

## **PROJETO DE GRADUAÇÃO**

# **DESENVOLVIMENTO DE MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA POR MEIO DE CARROS-PIPA COM A CONSTRUÇÃO DE NOVAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA.**

Por,  
**Igor Alexander Galvão Quaresma**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia de Produção

Brasília  
2021

IGOR ALEXANDER GALVÃO QUARESMA

DESENVOLVIMENTO DE MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA  
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA POR MEIO DE CARROS-PIPA COM A  
CONSTRUÇÃO DE NOVAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA.

Trabalho submetido como requisito parcial para  
obtenção do grau de bacharel em Engenharia de  
Produção.

Brasília

2021

PROJETO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**DESENVOLVIMENTO DE MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA  
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA POR MEIO DE CARROS-PIPA COM A  
CONSTRUÇÃO DE NOVAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

Igor Alexander Galvão Quaresma

Banca examinadora

---

Prof. Ph.D Reinaldo Crispiniano Garcia  
UnB/EPR (Orientador)

---

Prof. Dr. Clóvis Neumann  
UnB/EPR

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por ter me ajudado durante toda a minha jornada pessoal e profissional. A minha mãe maravilhosa que sempre me apoiou em todas as minhas decisões e sempre esteve comigo nos momentos mais difíceis e de maior alegria. Agradeço por todo esforço e dedicação que ela fez para me dar as melhores oportunidades possíveis e por todo ensinamento ao longo dos meus 24 anos de vida. A meu pai que está olhando por mim em algum lugar do céu nesse momento, posso lhe garantir que você está e sempre esteve dentro do meu coração guiando todas as decisões mais importantes da minha vida. A toda minha família sou grato por todo suporte, amo vocês!

Agradeço a todo o corpo docente da Universidade de Brasília que tornou meu sonho de formar em uma universidade federal em realidade, em especial ao meu orientador prof. Reinaldo Garcia que desde o primeiro dia que o conheci, na primeira aula de pesquisa operacional, despertou meu interesse ainda maior pela engenharia de produção e principalmente pela pesquisa operacional. Professor Reinaldo, na primeira aula que eu tive com o senhor eu sabia que você seria meu orientador, agradeço por ter acreditado em mim e ter fornecido todo o apoio necessário.

Agradeço a todos os meus colegas de UnB que com certeza foram fundamentais na minha graduação. Agradeço especialmente ao Alexandre, Camila, Davi, Isabella e Jordana pela amizade, trabalhos em grupo e todos os momentos vividos. Vocês são fundamentais, ganhei amigos para a vida!

## RESUMO

A região Nordeste do Brasil sempre apresentou períodos de seca em sua história. Com o objetivo de mitigar os efeitos da seca na região o governo federal criou o programa Operação Carro-Pipa (OCP) para fornecer água a famílias em situação de elevada vulnerabilidade hídrica. Implementou-se nesse trabalho um modelo de otimização de rotas para os veículos utilizados na OCP considerando a inclusão de estações de tratamento de água ao modelo que anteriormente contava apenas com mananciais e prefeituras administrativas. Visando com isso uma redução dos investimentos consumidos e uma melhora da qualidade da água disponibilizada as famílias beneficiadas pelo programa. O modelo desenvolvido considera diferentes localizações para instalação das estações de tratamento de água e diferentes capacidades de oferta para essas estações. Desenvolveu-se o modelo de programação linear inteira na linguagem Python utilizando como base matrizes de distâncias e melhores localizações obtidas por meio da ferramenta *weighted overlay* e do módulo *network analyst* do sistema de informação geográfica ArcGIS. Obteve-se uma economia dos custos gerados pelo programa e a instalação das estações de tratamento de água se mostrou favorável após utilização de métodos de viabilidade financeira como o *payback* e o valor presente líquido.

**Palavras-chave:** Operação Carro-Pipa; Pesquisa Operacional; Problema de transportes; Sistema de informação geográfica.

## ABSTRACT

The Brazilian Northeast has always experienced periods of drought in its history. To mitigate the effects of drought in the region, the federal government has created the Water Truck Operation to supply water to families in a vulnerable hydric situation. This work aims at implementing an optimization model to the state of Ceará, decreasing the costs of the routing of vehicles used in the water truck operation while considering the construction of new Water Treatment Stations (WTS) to a previous model that considered only non-treated water supply points. The mathematical model is formulated with integer programming and it contemplates WTS in different locations with distinct supply capacities. The model was developed using Python programming language while its inputs were major done by the geographic information system ArcGIS, specifically the network analyst module and the weighted overlay tool. An economy of resources was obtained, and water treatment stations construction showed to be economic viable after using the payback and net present value methods.

**Keywords:** Operations Research; Transportation Problem; Brazilian Northeast Drought; GIS; Water Treatment Station.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Categorização dos níveis de seca ao longo dos anos .....	18
Figura 2 - Estado do Ceará e seus respectivos municípios .....	20
Figura 3 - Interface sistema GPIPABRASIL .....	23
Figura 4 - Etapas do tratamento convencional de água .....	25
Figura 5 - Camadas com os critérios definidos para análise de localização das ETAs..	40
Figura 6 - Mapa com resultado das melhores localidades para instalação das ETAs....	42
Figura 7 - Instalação da ETA 11111 .....	45
Figura 8 - Instalação da ETA 22222 .....	46
Figura 9 - Instalação das ETAs 11111 e 22222 .....	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Investimentos da OCP ao longo dos anos .....	22
Tabela 2 - Economias obtidas com os mananciais originais .....	39
Tabela 3 - Representatividade de cada estado perante distância total percorrida .....	48
Tabela 4 - Cenário 1 (Inclusão ETA 11111) .....	49
Tabela 5 - Cenário 2 (Inclusão ETA 22222) .....	49
Tabela 6 - Cenário 3 (Inclusão ETA 11111 e ETA 22222) .....	49
Tabela 7 - Comparativo entre economia gerada e custo de implementação para cada ETA .....	51
Tabela 8 - <i>Payback</i> para os modelos de cada cenário.....	51
Tabela 9 - VPL para os diferentes modelos .....	53

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Categorização dos níveis de seca do Monitor das Secas .....	17
Quadro 2 - Variáveis referentes à forma de abastecimento de água .....	41

## LISTA DE SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
CENAD	Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres
CMNE	Comando Militar do Nordeste
ECP	Estado de Calamidade Pública
ETA	Estação de Tratamento de Água
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MDR	Ministério do Desenvolvimento Regional
OCP	Operação Carro-Pipa
PA	Prefeitura Administrativa
PIB	Programação inteira binária
PL	Programação linear
PLI	Programação linear inteira
PO	Pesquisa Operacional
PRV	Problema de Roteamento de Veículos
SE	Situação de Emergência
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SOBRAPO	Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional
UMT	Unidade de Medida de Transporte

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	12
1.1 Contextualização.....	12
1.2 Objetivos.....	13
1.2.1 Objetivo Geral .....	13
1.2.2 Objetivos Específicos .....	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO .....	15
2.1 Região Nordeste do Brasil.....	15
2.2 O Estado do Ceará .....	19
2.3 Operação Carro-Pipa (OCP).....	21
2.4 Estação de Tratamento de Água (ETA).....	24
2.5 Pesquisa Operacional.....	26
2.5.1 Programação Linear (PL).....	27
2.5.2 Problemas de Transporte.....	28
2.5.3 Programação Inteira.....	29
2.5.4 Problema de Roteamento de Veículos (PRV).....	30
2.6 Sistema de Informação Geográfica (SIG).....	32
2.7 Análise de Viabilidade Econômica .....	33
2.7.1 Payback .....	33
2.7.2 Valor Presente Líquido.....	34
3 METODOLOGIA.....	36
4 DESENVOLVIMENTO DO MODELO.....	39
4.1 Delimitação do tema .....	39
4.2 Dados para implementação do modelo .....	39
4.3 Definição das localidades para instalação das ETAs - ArcGIS.....	40

4.4 Cenários .....	44
4.4.1 Cenário 1 – Implementação da ETA 11111.....	45
4.4.2 Cenário 2 – Implementação da ETA 22222 .....	46
4.4.2 Cenário 3 – Implementação das ETAs 11111 e ETA 22222 simultaneamente .....	46
5 RESULTADOS .....	48
5.1 Resultados obtidos para os cenários.....	48
5.2 Análise de Viabilidade Econômica .....	50
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	57
APÊNDICE A – Código para Resolução do Modelo de PL .....	61
APÊNDICE B – Código para Exportar Matrizes de Distâncias a Partir do ArcGIS.....	63

## **1 INTRODUÇÃO**

Nessa introdução, será apresentado o problema de estudo, utilizando uma contextualização sobre a seca na região Nordeste do Brasil e as possíveis medidas para mitigar os efeitos da mesma. Além disso, serão apresentados os objetivos gerais e específicos do projeto, assim como a estruturação que o trabalho seguirá.

### **1.1 Contextualização**

A região Nordeste demanda uma maior atenção perante o tema de oferta de água, haja vista as suas características naturais. Por se tratar de uma região em que a disponibilidade de água é mais baixa em relação a outras localidades do Brasil, devido principalmente aos baixos índices de precipitação e elevadas temperaturas, garantir que a população da região Nordeste tenha acesso a água é fundamental para a sobrevivência dessa.

De acordo com o diagnóstico dos serviços de água e esgotos do ano de 2018 disponível no Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), a região Nordeste possui cerca de 25,8% da população sem acesso a rede de água, ou seja, mais de um quarto da população dessa região demanda uma outra forma de acesso a água potável.

Nesse contexto, visando reduzir impactos da seca na região, a cooperação técnica do Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR) com o Ministério da Defesa, conjuntamente com a execução do Exército Brasileiro, desenvolveu o programa Operação Carro-Pipa (OCP). Esse programa, o qual foi criado no ano de 1998, tem como objetivo distribuir água potável para o consumo humano em regiões com maior déficit hídrico por meio da utilização de carros-pipa.

Por se tratar de um programa de extrema importância para a população e demandar valores muito altos para a sua manutenção, o Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres (CENAD), verificou a oportunidade de melhoria nas rotas de distribuição realizadas pelos veículos pertencentes ao programa. Isto ocorreu devida a observação de que muitas PAs (Prefeituras Administrativas) recebiam

água de um lugar mais distante do que o necessário, e que, no geral, a roteirização poderia ser melhorada. A Universidade de Brasília foi então contactada a fim de encontrar soluções ótimas para o abastecimento de todas as famílias contempladas na OCP. Nesse contexto, dentro da Pesquisa Operacional, adotou-se o método da Programação Linear (PL) para solucionar o problema, mais especificamente a Programação Inteira.

O Laboratório de Pesquisa Operacional – *Operations Research Laboratory* (ORLab) aplicou o modelo de otimização para todos os estados da região Nordeste contemplados no programa encontrando soluções ótimas de melhores pontos de coleta para cada ponto de recebimento. Isto proporcionou uma economia de recursos financeiros e a necessidade de explorar outros cenários para a otimização se tornou latente.

Visando uma economia de recursos financeiros utilizados pelo programa, conjuntamente com uma possível melhora da qualidade da água distribuída, objetivou-se nesse trabalho desenvolver um novo modelo de otimização para abastecimento das famílias atendidas pela OCP no estado do CE. Considera-se agora uma abordagem com a instalação de novas estações de tratamento de água (ETA), as quais servirão como novos pontos de captação de água.

## **1.2 Objetivos**

Essa seção apresentará os objetivos contemplados no trabalho, primeiramente o objetivo geral e depois todos os objetivos específicos.

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Desenvolver um modelo de otimização para reduzir custos de distribuição de água por carros-pipa no estado do Ceará, com a inclusão de novas estações de tratamento de água (ETAs).

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Verificar as principais características causadoras das secas na região Nordeste, e mais especificamente no estado do Ceará.
- Analisar a situação atual da distribuição de água por carros-pipa na região Nordeste, e mais especificamente no estado do Ceará.
- Definir localidades para construção de novas estações de tratamento de água no estado do Ceará.
- Analisar o impacto do modelo otimizado perante os custos do programa OCP.
- Fazer uma análise de viabilidade econômica dos custos de implementação das ETAs.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

Nesse capítulo são expostos conceitos importantes que serão utilizados ao longo do desenvolvimento do trabalho, utilizando para isso uma revisão de literatura existente sobre os assuntos relacionados com o escopo deste trabalho.

### **2.1 Região Nordeste do Brasil**

A região Nordeste é caracterizada por ser uma região brasileira que, devido a fatores geográficos e climáticos, apresenta um histórico de ocorrência de secas, o que ocasiona diversos problemas relacionados a escassez de recursos hídricos.

Baixos índices pluviométricos, elevadas temperaturas, elevadas taxas de evapotranspiração, solos rasos com pouca capacidade de armazenagem de água em aquíferos e o caráter concentrado das precipitações anuais leva à condição de clima semiárido e bioma caatinga na região Nordeste do Brasil (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA, 2018).

O regime pluviométrico, o qual tem a característica de ser concentrado em quatro meses do ano, pode ser dividido em três tipos distintos, dependendo de que porção da região esse abrange. Os mecanismos atmosféricos causadores das chuvas variam em relação a cada porção da região Nordeste, podendo esses serem frentes frias, diferentes zonas de convergência (ZCAS, ZCIT), convergência de ventos alísios e vórtices ciclônicos de altos níveis (VCAN).

Além do baixo índice pluviométrico, outro fator que contribui de forma considerável para a seca da região Nordeste são as elevadas temperaturas que essa possui ao longo de todo ano. Por estar localizada próximo a linha do Equador, onde a incidência de raios solares é caracterizada por ser perpendicular, portanto, mais intensa, a região naturalmente apresenta temperaturas mais elevadas.

Quanto aos fatores geológicos, o Nordeste apresenta duas estruturas básicas: o embasamento cristalino, que representa 70% da região semiárida, e as bacias sedimentares.

No embasamento cristalino, os solos geralmente são rasos (cerca de 0,60 m), apresentando baixa capacidade de infiltração, alto escoamento superficial e reduzida drenagem natural. Nesse tipo de solo a água é armazenada em fendas ou fraturas nas rochas e em regiões de solos aluviais (aluvião). As águas exploradas nessas regiões costumam ser de qualidade inferior devido à sua alta salinização. Já as bacias sedimentares são caracterizadas por possuírem solos mais profundos (superiores a 2 metros), com alta capacidade de infiltração, baixo escoamento superficial e boa drenagem natural. Essas características possibilitam a existência de uma grande quantidade de água de boa qualidade no lençol freático que, devido a sua profundidade, encontra-se protegida de evaporação. Porém, apesar dessas boas características, as bacias sedimentares encontram-se de forma esparsa na região (SUASSUNA, 2012).

A seca não é uma exclusividade apenas da região Nordeste do Brasil. Porções de outros estados como Minas Gerais, Roraima e Espírito Santo também sofrem ou já sofreram com a seca, porém, por fatores climáticos e geográficos já citados acima, a região Nordeste apresenta mais estados com vulnerabilidade hídrica. De acordo com o relatório da Conjuntura dos Recursos Hídricos (ANA, 2018), cerca de 80% das pessoas afetadas por secas em 2017 vivem na Região Nordeste, com os estados da Bahia, do Ceará e de Pernambuco totalizando cerca de 55,5% dos registros de seca do país.

Uma importante fonte de dados que contribui para o acompanhamento da situação da seca no país é o Monitor de Secas. O Monitor de Secas é um processo de acompanhamento regular e periódico da situação da seca no Nordeste, cujos resultados consolidados são divulgados por meio do Mapa do Monitor de Secas. Mensalmente informações sobre a situação de secas são disponibilizadas, com indicadores que refletem o curto prazo (últimos 3, 4 e 6 meses) e o longo prazo (últimos 12, 18 e 24 meses), indicando a evolução da seca em cada região (ANA, 2018). O monitor tem como principal objetivo promover a integração da informação de nível federal, estadual e municipal nas áreas de meteorologia, recursos hídricos e agricultura, possibilitando assim que o processo de tomada de decisão dos gestores públicos seja mais assertivo perante temas que envolvem a escassez de recursos hídricos.

Dentro do monitor, os mapas, tabelas e demais série de dados são divididos em diferentes estágios de seca, ou seja, diferentes níveis de intensidade da seca. No quadro abaixo, tem-se a classificação utilizada.

Quadro 1 - Categorização dos níveis de seca do Monitor das Secas

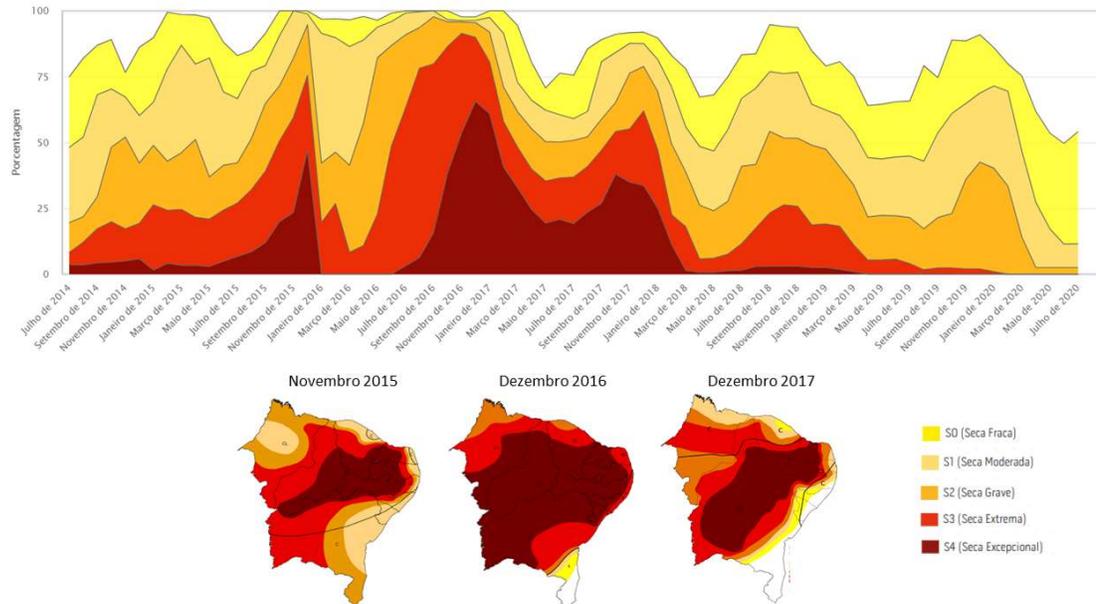
<b>Categoria</b>	<b>Descrição</b>	<b>Percentil</b>	<b>Possíveis Impactos</b>
S0	Seca Fraca	30 %til	Entrando em seca: veranico de curto prazo diminuindo plantio, crescimento de culturas ou pastagem. Saindo de seca: alguns déficits hídricos prolongados, pastagens ou culturas não completamente recuperadas.
S1	Seca Moderada	20 %til	Alguns danos às culturas, pastagens; córregos, reservatórios ou poços com níveis baixos, algumas faltas de água em desenvolvimento ou iminentes; restrições voluntárias de uso de água solicitadas.
S2	Seca Grave	10 %til	Perdas de cultura ou pastagens prováveis; escassez de água comuns; restrições de água impostas.
S3	Seca Extrema	5 %til	Grandes perdas de culturas / pastagem; escassez de água generalizada ou restrições
S4	Seca Excepcional	2 %til	Perdas de cultura / pastagem excepcionais e generalizadas; escassez de água nos reservatórios, córregos e poços de água, criando situações de emergência.

Fonte: ANA (2020)

Além das classificações acima, o monitor também classifica as secas em relação ao tempo, com “C” representando uma seca de curto prazo (normalmente atuando por 4 meses ou menos), e “L” representando uma seca de longo prazo (Seca de Longo Prazo, normalmente atuando por mais de 12 meses).

A região Nordeste historicamente sempre apresentou problemas com pelo menos algum grau de seca. Utilizando o gráfico do histórico da seca na região Nordeste, o qual apresenta dados a partir do mês de julho de 2014 até julho de 2020, é possível entender como a seca se manifestou nessa região durante os últimos anos. Percebe-se que principalmente no período de maio de 2015 até março de 2018 ocorreram alguns picos com situação mais crítica perante a intensidade da seca. Os principais picos, novembro de 2015, dezembro de 2016 e dezembro de 2017 estão detalhados na figura abaixo.

Figura 1 - Categorização dos níveis de seca ao longo dos anos



Fonte: ANA (2020)

Segundo Martins e Magalhães, ocorreram duas secas com duração de três anos (1930-32; 1941-43) desde 1911, duas com duração de quatro anos (1951-53 e 2012-2015) e uma com duração de cinco anos (1979-83). Arelado a isso, como é possível observar no gráfico do Monitor das Secas, o período entre julho de 2016 até março de 2018 também apresentou uma seca severa. Nesse sentido, o período entre 2012 e 2017 entrou para a história Brasileira como a pior seca da história da região Nordeste.

O primeiro registro de secas no Nordeste é atribuído a Fernão Cardim, que relatou a ausência de chuvas no ano de 1583 no estado de Pernambuco (CARDIM, 2004). Porém, com o passar dos anos novos registros ocorreram. Segundo estudos de diferentes autores, uma lista das secas, as quais têm sido relatadas desde o início do século 16, é: 1583, 1603, 1624, 1692, 1711, 1720, 1723-1724, 1744-1746, 1754, 1760, 1772, 1766-1767, 1777-1780, 1784, 1790-1794, 1804, 1809, 1810, 1816- 1817, 1824-1825, 1827, 1830-1833, 1845, 1877-1879, 1888-1889, 1891, 1898, 1900, 1902-1903, 1907, 1915, 1919, 1932-1933, 1936, 1941-1944, 1951- 53, 1958, 1966, 1970, 1976, 1979-1981, 1982-1983, 1992-1993, 1997-1998, 2001-2002, 2005, 2007, 2010 e 2012-2015 (ARAÚJO, 1982; GUTIERREZ *et al.*, 2014; MAGALHÃES *et al.*, 1988; , WHLHITE *et al.*,

2014). Nesse sentido, percebe-se que os períodos de seca podem variar em alguns anos, mas esses eventos são recorrentes na região.

O fato de a região Nordeste sofrer com secas, o que ocasiona em um déficit hídrico, é apontado como um fator determinante da pobreza, o que justifica o empreendimento de políticas para construção de grandes infraestruturas hídricas e de irrigação para enfrentar os riscos hídricos. Porém, como a sociedade não é submetida de forma homogênea ao risco da seca e aos seus impactos, maiores cidades são beneficiadas por essas obras, enquanto a população do meio rural geralmente não tem acesso a esta infraestrutura de grande porte que garante o seu abastecimento. Isto faz com que essa população rural se encontre em uma situação de maior vulnerabilidade (ANA, 2012).

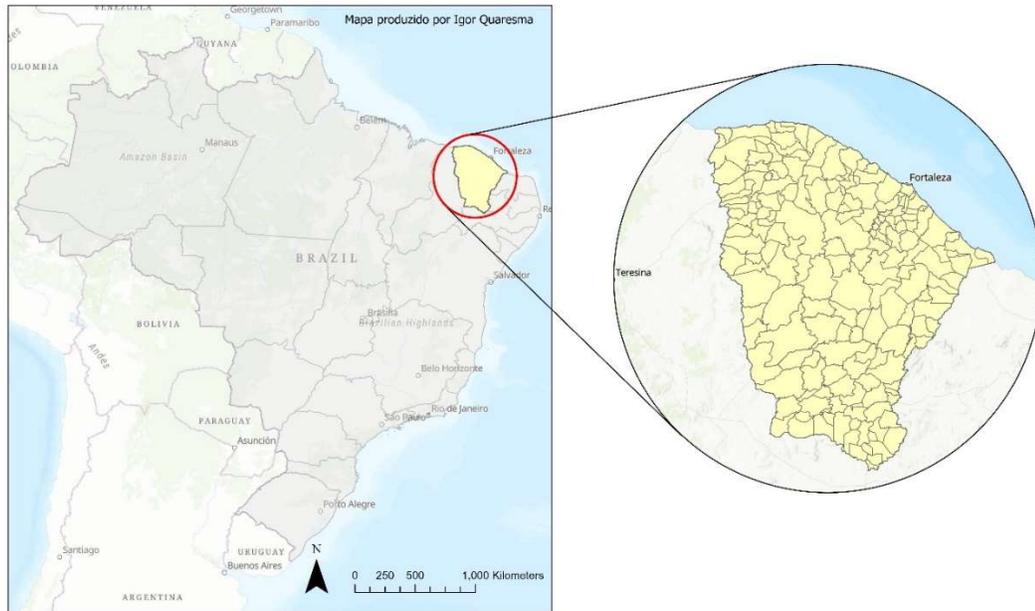
As estiagens e secas verificadas ao longo dos anos na região Nordeste, principalmente durante os últimos anos têm se apresentado de forma mais intensa, prejudicando de forma significativa a oferta de água para o abastecimento público e para demais setores dependentes, como os setores agrícola e de energia. Nessa região, 1.409 ou 78,5% dos 1.794 municípios decretaram situação de emergência (SE) ou estado de calamidade pública (ECP), devido à secas entre 2003 e 2016. Desses 1.409 municípios, cerca de 50% decretaram essa situação em pelo menos 7 anos no período (ANA, 2017)

Visando mitigar os efeitos das secas na região Nordeste, o Governo Federal criou o programa Operação Carro-Pipa, o qual será detalhado nas próximas seções.

## **2.2 O Estado do Ceará**

O estado do Ceará ocupa a posição de 17.º maior estado em área territorial no Brasil com uma área de 148.894,442 km<sup>2</sup> e uma população estimada de 9.187.103 pessoas. O estado possui 184 municípios e tem como capital a cidade de Fortaleza (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2020).

Figura 2 - Estado do Ceará e seus respectivos municípios



Fonte: autoria própria

O relevo é caracterizado pela existência da depressão sertaneja em seu centro, planícies ao norte e planaltos em partes do entorno do estado.

O clima predominante no território cearense é o Tropical Quente Semiárido, abrangendo 9 das 184 sedes municipais. Esse tipo climático apresenta características como escassez e irregularidade pluviométrica associado a altas taxas de evapotranspiração. Essas condições tornam o Estado mais suscetível aos fenômenos das secas (IPECE, 2013, p.3).

Os recursos hídricos superficiais são a principal fonte de suprimento de água na região. O armazenamento no cristalino, principal litologia da região, é limitado, em razão a sua alta resistência a infiltração. As áreas sedimentares se caracterizam como locais onde os recursos hídricos do substrato são notáveis (ARAÚJO; SILVA; SOUZA, 2007).

A região litorânea do estado conta com 573 km de extensão, o que atrelado ao clima quente e com pouca chuva garante uma intensa atividade de turismo. O turismo representa uma importante contribuição para a economia do estado, porém a economia do Ceará não fica limitada somente ao turismo, pois é composta também pela agropecuária, indústria e serviços (IPECE, 2014).

### **2.3 Operação Carro-Pipa (OCP)**

O Governo Brasileiro tem, desde o início do século XX, implementado políticas públicas com o propósito de minimizar os impactos provocados pela seca, principalmente, na região Nordeste do Brasil. Nesse contexto, em 1998 foi implementado pelo Governo Federal o Programa Emergencial de Distribuição de Água potável no semiárido Brasileiro. Ao longo dos anos, o objetivo principal do programa se manteve, porém no dia 25 de julho de 2012, por meio da Portaria Interministerial N° 1/MI/MD, o programa passou a ser denominado de Operação Carro-Pipa (MARDER, 2019)

A Operação Carro-Pipa tem o objetivo de complementar as ações estaduais e municipais de combate à seca, visando minimizar os danos causados pela seca, em especial no semiárido nordestino e no norte de Minas Gerais e do Espírito Santo. A Operação Carro-Pipa integra o Programa Emergencial de Distribuição de Água Potável no Semiárido Brasileiro, sendo o Exército Brasileiro, por meio do Comando Militar do Nordeste (CMNE), responsável pela execução, organização e fiscalização da ação (CMNE, 2020).

Por se tratar de uma operação complexa, diferentes instâncias estão envolvidas na OCP. A Operação foi inicialmente desenvolvida pela cooperação técnica do Ministério do Desenvolvimento Regional e o Ministério da Defesa conjuntamente com a execução do Exército Brasileiro. O Exército Brasileiro realiza a operação para planejar, coordenar e fiscalizar tanto a busca, quanto o transporte, desinfecção e distribuição da água potável (MDR, 2019). Além das instâncias já citadas, o Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres (CENAD) é responsável por apoiar toda a OCP.

O CENAD foi criado em fevereiro de 2005, por meio do Decreto nº 5.376, com o intuito de gerenciar, com agilidade, ações estratégicas de preparação e resposta a desastres em território nacional e, eventualmente, também no âmbito internacional (MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL, 2019).

Por meio do recebimento de informações de diversos órgãos do Governo Federal, cabe ao CENAD consolidar e avaliar informações sobre riscos no País. As informações responsáveis pela predição de tempo e temperatura; avaliação de condições geológicas de áreas de risco; monitoramento dos movimentos das placas tectônicas;

acompanhamento das bacias hidrográficas; controle de queimadas e incêndios florestais; e transporte e armazenamento de produtos perigosos são alguns dos exemplos de dados que o CENAD trabalha. Após avaliar os dados, o CENAD tem a responsabilidade de encaminhar essas informações aos órgãos de Proteção e Defesa Civil dos estados e municípios brasileiros, possibilitando assim a melhor tomada de decisão de gestores, visando uma prevenção ou redução de riscos relacionados a situações de ocorrência de desastres (MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL, 2019).

O processo para a operacionalização da OCP possui diferentes etapas e necessita da congruência dos distintos órgãos e departamentos envolvidos. Após toda parte documental estar finalizada, o serviço de entrega de água propriamente dito ocorre por meio da contratação de pipeiros, nome dado aos profissionais responsáveis por dirigir os carros-pipa, que realizam o frete dos respectivos pontos de coleta (mananciais ou ETAs) para as respectivas localidades a serem abastecidas (cisternas das comunidades).

O programa atende, em condições normais, aproximadamente 4 milhões de pessoas mensalmente, utilizando a contratação de cerca de 6.900 pipeiros para a execução da logística da operação, atendendo 79 mil pontos de abastecimento e cisternas coletivas, com 20 litros de água por pessoa ao dia (MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL, 2016).

Um programa da magnitude da OCP demanda uma grande quantidade de recursos financeiros. Os investimentos destinados para a operação cresceram ao longo dos últimos anos, passando do 1 bilhão de reais no ano de 2016 (ver Tabela 1).

Tabela 1 – Investimentos da OCP ao longo dos anos

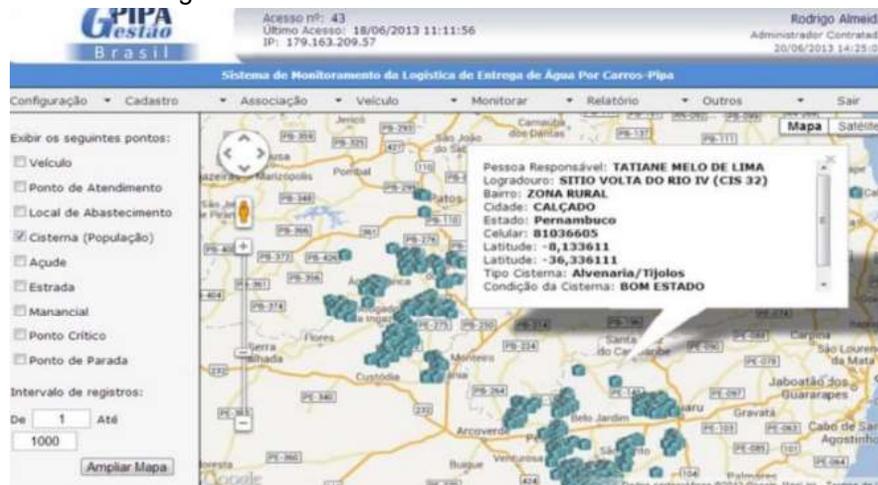
<b>Ano</b>	<b>População Atendida</b>	<b>Investimentos</b>
2010	2.389.522	R\$ 235.517.000
2011	2.563.916	R\$ 254.123.775
2012	3.148.237	R\$ 441.841.431
2013	3.705.895	R\$ 706.968.769
2014	3.773.426	R\$ 836.392.563
2015	3.878.212	R\$ 920.470.599
2016	3.598.991	R\$ 1.021.682.121
2017	3.229.232	R\$ 960.632.933

Fonte: Marder (2019)

Assim como recursos financeiros, o programa também conta com um expressivo número de recursos humanos para sua operacionalização. Além dos mais de 6000 pipeiros cadastrados para prestação de serviço no programa, este conta diariamente com o suporte de um quadro de cerca de 826 militares, os quais dividem-se entre atividades gerenciais e de fiscalização (BASSAN, 2018).

Além de todos os indivíduos envolvidos na operação, o desenvolvimento da OCP é facilitado pela utilização do sistema de informação “Sistema de Monitoramento da Logística de Entrega de Água por Carros-pipa” (GPIPABRASIL). O GPIPABRASIL é utilizado por todas as entidades envolvidas no programa que inclui os próprios pipeiros, representantes das Prefeituras Administrativas (PAs) e demais responsáveis por administrar e fiscalizar as operações que estão sendo realizadas. A inclusão do sistema trouxe uma grande inovação para toda a operação, tornando-a mais célere além de aprimorar a coleta e análise de dados sobre as entregas do programa. Informações como local onde está a cisterna (zona rural ou urbana), a cidade, o estado, o número do celular do responsável, as coordenadas (latitude - lat. e, longitude - long.), o tipo da cisterna (por exemplo, alvenaria) e a condição de conservação da mesma são alguns dos exemplos das informações presentes no sistema (ROCHA, 2017).

Figura 3 - Interface sistema GPIPABRASIL



Fonte: Rocha (2017, p. 29)

O programa desempenha uma função tão fundamental que no ano de 2020, no qual se iniciou a Pandemia de COVID-19, mesmo com todas as dificuldades trazidas pelo

novo coronavírus, as operações não foram interrompidas (MINISTÉRIO DA DEFESA, 2020).

Considerando a importância social do programa e que esse tem apresentado valores de investimentos cada vez maiores para sua operacionalização ao longo dos anos, o antigo Ministério da Integração, atual Ministério do Desenvolvimento Regional, encontrou uma oportunidade de otimização de roteiro de distribuição de água, visando promover uma maior economia à OCP (GOMES, 2019).

Assim, visando essa oportunidade de economia, um projeto realizado pelo grupo de pesquisa da UnB, representado pela ORLaB (Laboratório de Pesquisa Operacional – *Operations Research Laboratory*), desenvolveu um modelo para otimização das rotas utilizadas pelos veículos da OCP, promovendo uma economia de cerca de 20% dos custos da operação, equivalente a cerca de R\$ 240 milhões de reais.

Com o término do projeto de otimização dos carros-pipa, observou-se uma possível extensão do conhecimento desse projeto para trabalhos futuros. Nesse sentido, o trabalho em questão promove uma remodelagem do trabalho previamente desenvolvido pelo ORLaB, porém considerando agora a construção de ETAs que forneçam uma melhor qualidade de água para a população beneficiada pelo programa.

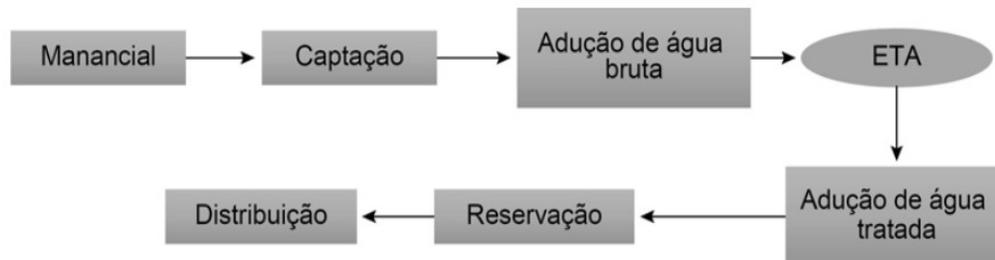
## **2.4 Estação de Tratamento de Água (ETA)**

As estações de tratamento de água consistem em uma estrutura física em que se realiza o processo de tratamento de água. Esse processo pode ser visto como um conjunto de manipulações da água em suas mais diferentes apresentações, de modo que esta possa ser considerada apta para o abastecimento público, ou seja, busca-se a elevação do padrão de qualidade da água bruta, de maneira que seja possível atender a um padrão de qualidade mínimo imposto pelos padrões de potabilidade vigentes (FILHO, 2007).

O desenvolvimento das técnicas para tratamento de água evoluiu consideravelmente nos últimos séculos, seja com o advento de técnicas de coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção. Com a evolução dessas técnicas, a partir de 1908, estruturou-se o que se conhece hoje por tratamento convencional de

águas de abastecimento, onde capta-se a água de uma determinada fonte, realiza-se o tratamento dessa água por meio de diferentes técnicas e, após isso, realiza-se a distribuição da água tratada (FILHO, 2017).

Figura 4 - Etapas do tratamento convencional de água



Fonte: Filho (2007, p. 4)

Nesse contexto, ao utilizar uma estação de tratamento de água, a qualidade da água distribuída é melhor, haja vista que essa passa por um processo intenso de tratamento. Evita-se assim que a população atendida pela água seja acometida com doenças transmitidas por água contaminada, tais como as transmitidas pelos patógenos *Giardia lamblia* e *Cryptosporidium parvum*, *Legionella pneumophila*, *Aeromonas hydrophilia* (HOWE, 2013).

Além das diversas doenças que podem ser causadas pela presença de patógenos na água, o tratamento também é eficaz para mitigar efeitos de diferentes constituintes naturais que acometem águas subterrâneas, tais como ferro, manganês, cloro, cálcio e magnésio (HOWE, 2013).

As ETAs desempenham um importante papel para que a população receba uma água de melhor qualidade. Como a região Nordeste, principalmente seu interior, carece de uma infraestrutura para a distribuição de água, mesmo a água tratada necessita muitas vezes ser distribuída por meio da utilização de carros-pipa. Nesse sentido, ainda há a chance de uma contaminação ocorrer durante o transporte da água, porém, conforme estabelecido pelo Artigo 15 da Portaria 2914/11, o fornecimento de água com utilização de carros-pipa deve seguir algumas diretrizes que visam melhorar a qualidade da água distribuída (BRASIL, 2011).

Além de todos os benefícios atrelados a saúde das pessoas, o tratamento da água gera posteriormente um retorno na forma de redução de custos em relação a serviços de saúde. Segundo a Organização Mundial da Saúde, cada dólar investido em saneamento básico, existe um retorno de 4,3 dólares de retorno na redução de custos com serviços de saúde e tratamento médico (OMS, 2014).

## **2.5 Pesquisa Operacional**

Segundo a Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional – SOBAPRO (2020), a Pesquisa Operacional consiste na área que aplica técnicas de modelagem matemática e algoritmos computacionais com o objetivo de auxiliar decisores na análise dos mais variados aspectos e situações de um problema complexo, permitindo a tomada de decisões efetivas e a construção de sistemas mais produtivos.

A Pesquisa Operacional teve seu início durante a Segunda Guerra Mundial, onde havia a necessidade premente de alocar de forma eficiente os escassos recursos para as diversas operações militares. Ao longo da Guerra, diversos cientistas foram convocados para lidarem com esses problemas de otimização. Com o fim da guerra, o sucesso obtido com as técnicas de pesquisa operacional despertou o interesse de empresas e indústrias, que viram na PO uma excelente forma de resolver problemas complexos dessas organizações (HILLIER, 2012).

O próprio termo “pesquisa” de pesquisa operacional relembra a maneira pelas quais são conduzidas as pesquisas em campos científicos usuais. O método científico desempenha um papel fundamental para investigação de problemas empresariais, portanto, a pesquisa operacional utiliza algumas fases usuais para realização da modelagem de um estudo na área. Segundo Hillier (2012), de forma geral, essas fases são:

1. Definir o problema de interesse e coletar dados;
2. Formular um modelo matemático que descreve o problema de interesse;
3. Desenvolver um procedimento computacional para derivar soluções para o problema desse modelo;

4. Testar os modelos desenvolvidos nas etapas anteriores e conforme os resultados obtidos, aprimorá-los e otimizá-los;
5. Preparar-se para a aplicação do modelo, certificando-se de instalar um sistema bem documentado para a aplicação do modelo, conforme prescrito pela gerência;
6. Implementação do modelo.

### 2.5.1 Programação Linear (PL)

A programação linear consiste em uma área da pesquisa operacional que utiliza um modelo matemático específico para descrever determinados tipos de problemas. O “linear” refere-se às funções matemáticas presentes no modelo, essas que são exclusivamente funções lineares. O problema de programação linear apresenta um formato genérico, assim, qualquer problema que possa ser modelado nesse formato, caracteriza-se como um modelo de programação linear (HILLIER, 2012).

Segundo Hillier and Lieberman (1995), o formato padrão do problema de PL pode ser descrito da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 &\text{Maximizar } Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \\
 &\text{Sujeito às restrições} \\
 &a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1 \\
 &a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2 \\
 &\vdots \\
 &a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m, \\
 &\quad e \\
 &x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0
 \end{aligned}$$

Nesse modelo, objetiva-se alocar os níveis de atividades que alcançam o melhor valor possível de performance do sistema, onde:

$Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$  é a função que mede a performance do sistema e, portanto, deve ser otimizada;

$x_j =$  nível de atividade  $j$  (para  $j = 1, 2, \dots, n$ )

$c_j =$  incremento em  $Z$  que resultaria de cada incremento unitário no nível de atividade  $j$ ;

$b_i =$  quantidade de recurso  $i$  que encontra-se disponível

para alocação em atividades (para  $i = 1, 2, \dots, m$ )

$a_{ij} =$  quantidade de recurso  $i$  consumido por unidade de atividade  $j$

A função  $Z$ , a qual mede a performance do sistema e está sendo maximizada, recebe o nome de função objetivo. O modelo é construído com o objetivo de tomar decisões em relação aos níveis de atividade. Os valores  $x_j$  consistem então nos valores que devem ser determinados para solução do problema em questão, sendo estes  $x_j$ 's chamados de variáveis de decisão. Os valores de  $c_j$ ,  $b_i$  e  $a_{ij}$  consistem nos parâmetros do modelo, os quais são valores constantes de entrada do mesmo.

O modelo padrão também pode ser utilizado para solucionar problemas de minimização da função objetivo, e restrições funcionais maiores ou iguais a disponibilidade de recursos, utilizando para isso as devidas adaptações.

## 2.5.2 Problemas de Transporte

Os problemas de transporte consistem em um caso particular dos problemas de programação linear. O principal objetivo desse tipo de problema é determinar a programação de envios que minimiza o custo total de frete enquanto as restrições de oferta e demanda são satisfeitas.

Considerando as características do modelo de transportes, esse pode ser reescrito no seguinte formato:

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij},$$

Sujeito às restrições

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq S_i \text{ para } i = 1, 2, \dots, m \text{ (oferta)}$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \geq D_j \text{ para } j = 1, 2, \dots, n \text{ (demanda)}$$

$$x_{ij} \geq 0 \text{ para todos } i \text{ e todos } j$$

### 2.5.3 Programação Inteira

A programação linear apresenta diferentes aplicações, porém alguns problemas práticos exigem que os valores das variáveis de decisão sejam inteiros, ou seja, problemas de programação linear inteira consistem em problemas de programação linear onde algumas ou todas as variáveis de decisão são restritas a valores inteiros (TAHA, 2007).

Os algoritmos de programação inteira utilizam um maior poder computacional para explorar novas soluções de um problema que era originalmente classificado como PL, porém considerando para isso a restrição dos valores inteiros. Segundo Taha (2007), a estratégia desses algoritmos de programação linear inteira (PLI) envolve os três passos seguintes:

1. Relaxamento do espaço de solução do PLI por meio da eliminação das restrições de valores inteiros nas variáveis de decisão inteiras e por meio da substituição das variáveis de decisão binárias com um intervalo de valores contínuos;
2. Solução do problema de PL e a respectiva identificação de sua solução ótima;
3. A partir da solução ótima contínua, adicionar restrições especiais que modifiquem o espaço de solução de uma forma que uma nova solução, a qual satisfaça os requisitos inteiros, seja obtida.

Caso a modelagem do problema envolva variáveis com valores inteiros e não inteiros, esse modelo recebe o nome de programação inteira mista. Entretanto, caso a modelagem seja realizada apenas com valores inteiros, o modelo recebe o nome de programação inteira pura.

Caso o modelo de programação linear inteira apresente variáveis de decisão restritas apenas a dois valores, esse caso específico recebe o nome de programação

inteira binária (PIB), o qual normalmente é utilizado para representar situações em que a tomada de decisão ocorre perante dois diferentes estados, ou seja, fazer ou não determinada situação, ligar ou desligar algo, verdadeiro ou falso e etc.

Assim, segundo Wagner (1969), o problema de programação inteira é baseado no seguinte modelo:

$$\begin{aligned} &\text{Otimizar} \quad \sum_{j=1}^n c_j x_j, \\ &\text{Sujeito às restrições} \\ &\quad \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \text{ para } i = 1, 2, \dots, m \\ &\quad x_j \geq 0 \text{ para } j = 1, 2, \dots, n \\ &\quad x_j \text{ valor inteiro para } j = 1, 2, \dots, p (\leq n) \end{aligned}$$

Um problema de programação inteira pura ocorre quando  $p = n$ , caso contrário, o problema se enquadra na categoria de programação inteira mista. Assim como no modelo padrão de programação linear, o modelo acima pode ser adaptado para solucionar problemas de maximização ou minimização, e problemas com restrições de igualdade ou desigualdade, dadas as devidas adaptações.

#### 2.5.4 Problema de Roteamento de Veículos (PRV)

O problema de roteamento de veículos, ou “*Vehicle Routing Problem (VRP)*” como é conhecido em inglês, consiste em um problema de otimização combinatória. Primeiramente definido como “*Truck Dispatching Problem*” por Dantzig e Ramser (1959), depois solucionado por uma nova abordagem heurística de Clarke e Wright (1964), o PRV recebeu ao longo dos anos diferentes abordagens de resolução para aproximação das soluções ótimas (TOTH et al., 2002).

Nas últimas décadas, com a evolução dos sistemas de computação e de diferentes tecnologias do ramo de tecnologia da informação, conjuntamente com o aumento do interesse de empresas estatais e privadas na aplicação prática do modelo e seus

respectivos benefícios, a quantidade de publicações e estudos realizados acerca do PRV cresceram consideravelmente (TOTH et al., 2002).

Por se tratar de um problema complexo de otimização combinatória, um importante fator para sua resolução é o poder computacional das máquinas. Com o objetivo de gerar soluções cada vez mais assertivas respeitando um determinado limite computacional, diferentes abordagens heurísticas são aplicadas ao problema.

O problema consiste de forma geral na distribuição de algum bem por uma determinada frota de veículos para um determinado local considerando um intervalo de tempo específico. Os veículos se locomovem por uma rede de estradas, as quais ligam o ponto de partida (normalmente um depósito) até outros pontos que devem ser atendidos. Os veículos saem do ponto de origem, realizam todas as entregas e, após isso, retornam novamente ao ponto de origem. Nesse contexto, fazer o roteamento dos veículos consiste em definir quais rotas devem ser realizadas por cada veículo de uma determinada frota para que os desejos do cliente e demais restrições sejam satisfeitas (TOTH et al., 2002).

O modelo mais estudado e normalmente aplicado academicamente é o de Roteamento de Veículos Capacitados (PRVC), o qual consiste na distribuição de bens de uma única origem para  $n$  outros pontos de destino com veículos com a mesma capacidade. A movimentação do veículo de um ponto  $i$  para um ponto  $j$  ocasiona em um custo de transporte de  $c_{ij}$ , onde o custo pode ser o preço do combustível necessário para ir do ponto  $i$  ao  $j$  ou simplesmente a distância entre os dois pontos (TOTH et al., 2002).

A determinação dos custos de transporte constituía-se em uma das etapas que exigia o maior esforço na elaboração do modelo de PRV, haja vista que determinar as distâncias entre todos os pontos era custoso e demorado. Os sistemas de informação geográfica mudaram essa realidade, tornando possível obter essas informações de forma remota e rápida. Esse é apenas um dos exemplos de como os sistemas de informação geográfica se interligam com outras áreas do conhecimento e facilitam o dia a dia das pessoas.

## 2.6 Sistema de Informação Geográfica (SIG)

As tecnologias envolvidas com o estudo do espaço evoluíram consideravelmente nos últimos séculos. Os primeiros estudos considerando informações espaciais estão relacionados com o advento da cartografia, essa que tem seus primeiros registros de utilização no período da Antiguidade. Com o século XVIII, iniciou-se a ciência cartográfica moderna e, a partir do final do século XX, com o advento da área da informática, os conceitos e técnicas que antes eram desenvolvidos de formas mais artesanais no papel, passaram a ser desenvolvidos em um meio digital por meio de softwares. Esses *softwares* relacionados à ciência cartográfica ficaram conhecidos como Sistemas de Informação Geográfica (MARTINELLI, 2003).

O Sistema de Informação Geográfica (SIG), ou *Geographic Information System* do inglês (GIS), é definido de diferentes formas. Para Aronoff, o SIG consiste em qualquer conjunto de procedimentos manuais ou computacionais utilizados para armazenar e manipular dados georreferenciados (1989); Parker define o SIG como uma tecnologia que armazena, analisa e mostra resultados tanto de dados espaciais e não espaciais (1988). Burrough (1986) define como um conjunto de ferramentas para coletar, armazenar, recuperar, transformar e exibir dados espaciais do mundo real. Apesar das diferentes definições, percebe-se que todas englobam uma ideia principal, em que o SIG é um sistema de informação utilizado para desenvolver análises com dados espaciais.

Os dados espaciais são essenciais para o desenvolvimento de análises espaciais. O principal objetivo dessas análises é mensurar propriedades e relacionamentos entre diferentes variáveis, considerando para isso a localização espacial do fenômeno em estudo, ou seja, incorporando o espaço na análise que se deseja realizar (DRUCK et al., 2004).

Com a utilização dos SIGs, é possível realizar análises por meio do sensoriamento remoto de diferentes regiões. Na prática, o sensoriamento remoto consiste na área das ciências aplicadas que se refere à obtenção de imagens a distância, por meio de sensores, sobre a superfície terrestre (RUDORFF, c2017). No projeto em questão, a partir de imagens de satélite da região de estudo, estado do CE, desenvolveu-se análises com a utilização do ArcGIS, um dos softwares de SIG mais utilizados no mundo.

A fim de realizar as análises do trabalho, utilizou-se diversas funcionalidades do ARCGIS como a manipulação de “*shapefiles*”, de imagens de satélite com suas diferentes bandas do espectro eletromagnético, de modelos digitais de elevação, além da utilização de módulos específicos do software como, por exemplo, o módulo referente à otimização de redes de transportes (*Network Analyst*).

## 2.7 Análise de Viabilidade Econômica

A análise de viabilidade econômica e financeira de um projeto tem o objetivo de avaliar se um investimento em uma determinada atividade é viável ou não (REIS, 2018). Essa atividade pode ser desde o desenvolvimento ou não de um projeto, por exemplo, a construção de uma instalação, ou, então, a aplicação do dinheiro em outras formas de investimento.

Ao realizar essas análises, deve-se considerar o valor do dinheiro no tempo, haja vista que geralmente as análises financeiras efetuadas para verificar se um investimento é viável ou não são realizadas com base na projeção de valores (SOUZA, 2014).

Existem diferentes métodos financeiros para realizar a análise de investimentos. Os mais utilizados para auxiliar os tomadores de decisão são o *Payback*, o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR).

### 2.7.1 Payback

“O período de payback representa o prazo de retorno dos recursos investidos no empreendimento. É um indicador de risco: quanto maior o payback, maior é o risco, e quanto menor o payback, menor é o risco do investimento” (SOUZA, 2014, p.150).

A regra utilizada para a tomada de decisão é simples. Define-se um prazo específico de corte, caso o período de payback apresente um valor superior ao prazo pré-determinado, recusa-se o projeto, caso o período seja inferior ao estabelecido, aceita-se o projeto (ROSS, 2015).

Esse método pode ser calculado mediante a divisão do investimento inicial pelo fluxo de caixa que representa o retorno periódico do investimento (SOUZA, 2014).

$$\textit{Payback} = \frac{\textit{Investimento}}{\textit{Fluxo de Caixa}}$$

Apesar de algumas simplificações realizadas pelo método, o que pode gerar decisões incoerentes se utilizado muito literalmente, o fato da sua simples aplicabilidade, bem como outras vantagens, faz com que as empresas utilizem esse método como filtro para tomar decisões mais assertivas (ROSS, 2015). Entretanto, faz-se necessário que as decisões não sejam baseadas apenas nesse método, mas considerem também outros métodos em conjunto, por exemplo, o Valor Presente Líquido.

### 2.7.2 Valor Presente Líquido

O Valor Presente Líquido (VPL) consiste em um dos principais métodos financeiros para realizar a análise de investimentos. O VPL consiste em trazer os fluxos de caixa (FC) futuros gerados por um determinado investimento para o valor presente, descontado por uma determinada taxa de desconto ( $r$ ), e o investimento inicial para desenvolvimento do projeto (ROSS, 2015).

$$VPL = -\textit{investimento inicial} + \frac{FC1}{(1+r)^1} + \frac{FC2}{(1+r)^2} \dots \frac{FCn}{(1+r)^n}$$

Como regra geral, o método do VPL recomenda aceitar projetos que apresentem VPL positivo ( $VPL > 0$ ) e, recusar projetos que apresentem VPL negativo ( $VPL < 0$ ).

O VPL possui algumas características que faz esse método ter a preferência de grande parte dos gestores no momento de tomada de decisão. Segundo Ross (2015), a chave para o sucesso do VPL são seus três atributos: o VPL utiliza fluxos de caixa, o VPL utiliza todos os fluxos de caixa do projeto e o VPL desconta os fluxos de caixa adequadamente.

Portanto, diferentemente de outras abordagens para a análises de investimentos, o VPL não considera apenas os lucros, mas sim os fluxos de caixas. O VPL não ignora fluxos de caixa além de uma data específica, mas considera todos os fluxos de caixa do

período analisado. Por fim, todos esses fluxos de caixa consideram o valor do dinheiro no tempo, utilizando para isso uma taxa de desconto apropriada.

### 3 METODOLOGIA

Segundo Almeida (2011, p. 30), toda pesquisa para que seja classificada como científica, precisa adotar métodos durante a sua elaboração, sendo necessário utilizar procedimentos padronizados e detalhados, de forma que, seguindo os mesmos passos, outras pessoas consigam replicar e aperfeiçoar a pesquisa.

O estudo em questão é classificado como uma pesquisa quantitativa descritiva que visa conhecer a realidade do programa OCP e aplicar um modelo de programação linear, que foca em uma abordagem numérica, para otimização de rotas dos carros-pipa participantes desse programa.

Retomando as fases usuais para a realização da modelagem em um estudo na área de pesquisa operacional, e mais especificamente a abordagem proposta por Hillier e Liebermann (2006), tem-se as seguintes etapas para o estudo em questão:

#### 1. Definição do problema e coleta de dados

O problema foi definido a partir de resultados obtidos em um projeto anterior do CENAD em parceria com o Laboratório de Pesquisa Operacional do departamento de Engenharia de Produção da UnB, a fim de se ampliar a análise já realizada, com a inserção de novas variáveis no problema, neste caso, novas ETAs. Ademais, considerou-se também outras fontes de dados como por exemplo IBGE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e ANA, além de demais “*datasets*” públicos de colaboração para obtenção de diversos dados, principalmente os relacionados a dados de estradas e rodovias. Ao aplicar a abordagem de novas ETAs ao modelo previamente desenvolvido, fez-se necessário realizar algumas adaptações e, portanto, desenvolver uma nova modelagem.

Objetivou-se com o novo modelo, abranger não somente uma economia financeira perante os recursos pagos na OCP, mas também o benefício social e de saúde para a população das regiões atendidas pelo programa, haja vista a melhora considerável da qualidade da água disponibilizada, uma vez que essa passe por um processo de tratamento mais refinado nas ETAs.

## 2. Formulação de um modelo matemático que descreve o problema de interesse

Desenvolveu-se a modelagem do problema considerando a abordagem de um problema de transportes, onde objetiva-se minimizar o custo de distribuição considerando, para isso, uma determinada capacidade de oferta da origem e uma determinada capacidade de demanda de cada destino.

No problema em questão o custo de distribuição está diretamente ligado ao consumo de combustível dos veículos utilizados na operação (carros-pipa). Além disso, existe representatividade da distância no cálculo da unidade de medida de transporte - UMT (valor utilizado para calcular remuneração desembolsada para os pipeiros). Assumiu-se assim a utilização da distância entre os pontos de oferta e demanda de água como sendo o “custo associado a cada unidade de xij”. Levando isso em consideração, tem-se a seguinte modelagem:

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n E_j * D_{i,j} * X_{i,j}$$

Sujeito às restrições

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} * E_j \leq \text{Capacidade do manancial}_i \text{ para } i = 1, 2, \dots, m \text{ (oferta)}$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1 \text{ para } j = 1, 2, \dots, n \text{ (demanda)}$$

$$x_{ij} \leq 1 \text{ e } x_{ij} \geq 0 \text{ para todos } i \text{ e todos } j$$

No modelo tem-se que  $E_j$  representa a quantidade de entregas requeridas pelas Prefeituras Administrativas (PAs)  $j$ ;  $D_{i,j}$  representa a distância entre o manancial (MAN)  $i$  para a PA  $j$ ;  $X_{i,j}$  representa uma variável de decisão binária, a qual assume valor 1 quando o MAN  $i$  atende a PA  $j$  e, 0, caso contrário. Ressalta-se que devido à restrição do modelo de cada PA ser atendida exclusivamente por um único manancial, há a restrição  $\sum_{i=1}^m X_{ij} = 1$ , onde o somatório de  $x_{1j}, x_{2j} \dots x_{mj}$  sempre terá valor de 1, o que necessariamente garante que apenas um dos termos do somatório tenha valor 1. Como a variável de decisão é binária, ou seja, assume apenas valores de 1 ou 0, um somatório com valor igual a 1 representa que apenas um dos termos possui valor 1, enquanto os

demais possuem valor 0. Essa propriedade é implantada na modelagem adicionando como limite superior (inferior) o valor 1 (0) para todo  $x_{ij}$ , além da propriedade dos  $x_{ij}$ 's serem inteiros.

3. Desenvolver um procedimento computacional para derivar soluções para o modelo desenvolvido

Utilizou-se o ArcGIS desktop (Arcmap) conjuntamente com o Python para desenvolver o procedimento computacional de resolução. Primeiramente, o ArcGIS para gerar matrizes de distâncias entre os pontos de oferta e demanda e, posteriormente, o Python para modelar e solucionar o problema de PL. No caso do Python, empregou-se a biblioteca Pulp para modelagem e resolução do problema de PL.

4. Teste e Implementação do modelo

Ao longo do desenvolvimento do procedimento computacional utilizado para resolver o modelo, realizou-se diferentes testes para verificar a validade do modelo e seus respectivos dados de entrada. Todos os procedimentos realizados no Python foram desenvolvidos na plataforma do Jupyter Notebook, a qual permitia o teste de cada linha de código à medida que esse era criado.

Com os procedimentos para gerar os arquivos de entrada definidos, assim como a modelagem propriamente dita, aplicou-se o modelo no cenário definido como escopo deste trabalho.

## 4 DESENVOLVIMENTO DO MODELO

Este capítulo irá apresentar o passo a passo do desenvolvimento deste trabalho. Apresentar-se-á como as ferramentas utilizadas foram adaptadas para resolução do problema proposto. Após a descrição dos passos utilizados para desenvolver a análise espacial com a utilização do ArcGIS e da modelagem e resolução do problema de PL com o Python, será apresentada a análise de viabilidade econômica dos diferentes cenários propostos.

### 4.1 Delimitação do tema

O presente trabalho teve como referência um modelo previamente desenvolvido e testado para todos os estados nordestinos da Operação Carro-Pipa. O modelo inicialmente desenvolvido por Garcia *et al.* (2019) apresentou o seguinte resultado para o estado do Ceará (conforme a Tabela 2).

Tabela 2 - Economias obtidas com os mananciais originais

Estado	Economia (%)	Custo Atual (distância em Km)	Custo Otimizado (distância em Km)
Ceará	6,20%	1.085.601,59	1.018.318,00

Fonte: Garcia *et al.* (2019)

A fim de realizar uma extensão do trabalho desenvolvido, realizou-se uma nova modelagem considerando a adição de novas estações de tratamento de água ao modelo que anteriormente contava com mananciais (MAN) e prefeituras administrativas (PA).

### 4.2 Dados para implementação do modelo

O trabalho utilizou dados de três fontes principais, dados referentes a nome (código) e localização (coordenadas geográficas) dos MANs e das PAs, assim como

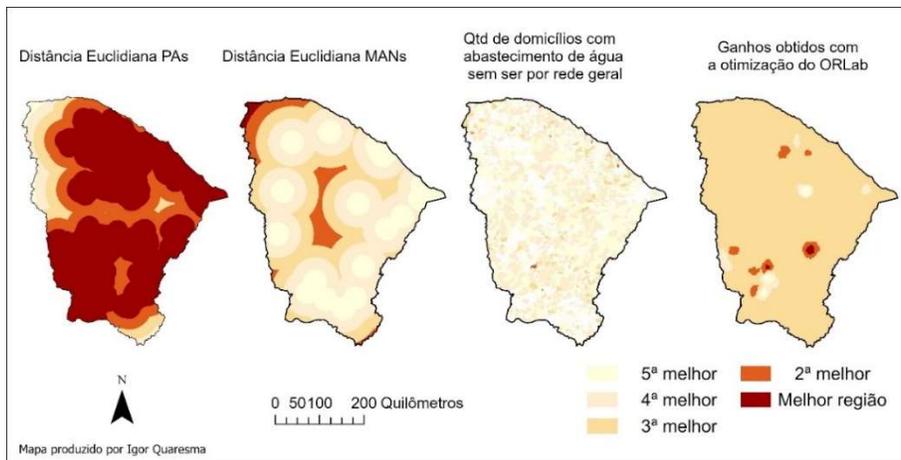
capacidade de oferta de cada MAN e demanda de cada PA, os quais foram cedidos pelo CENAD e correspondem ao mês de outubro de 2017. Dados referentes a malhas territoriais, setores censitários e estatísticas populacionais foram coletados do IBGE e da ANA. Por fim, utilizou-se dados de ruas e rodovias do projeto *OpenStreetMap* na elaboração das redes utilizadas para as análises de distâncias. Ressalta-se a utilização da rede de rodovias, estradas e ruas do *OpenStreetMap* devido à sua característica “Open-Source”.

### 4.3 Definição das localidades para instalação das ETAs - ArcGIS

Como primeira etapa após a obtenção dos dados, desenvolveu-se um mapa para definição preliminar de candidatas a melhores localidades para instalação das ETAs. A fim de identificar essas localidades, performou-se a análise de peneiramento (“*sieving analysis*”) utilizando múltiplas camadas (NOBLE, 1992; KUTA et al., 2016).

As melhores localidades foram definidas a partir do desenvolvimento de uma análise considerando os quatro critérios seguintes: menores distâncias euclidianas em relação a outras PAs; regiões com maior ganho de economia após primeira otimização realizada por Garcia et al (2019); maiores distâncias euclidianas em relação aos demais pontos de oferta de água e a quantidade de domicílios sem abastecimento de água por rede geral. Para cada um desses critérios desenvolveu-se uma diferente camada no ArcGIS, conforme apresentado na figura 5.

Figura 5 - Camadas com os critérios definidos para análise de localização das ETAs



Fonte: autoria própria

Para a camada referente a quantidade de domicílios sem abastecimento de água por rede geral foi considerado as informações dos setores censitários com suas respectivas variáveis referentes a forma de abastecimento de água da população. Utilizou-se as seguintes variáveis dos Resultados do Universo por setores censitários:

Quadro 2 - Variáveis referentes à forma de abastecimento de água

<b>Código da Variável</b>	<b>Descrição da Variável</b>
V013	Domicílios particulares permanentes com abastecimento de água de poço ou nascente na propriedade
V014	Domicílios particulares permanentes com abastecimento de água da chuva armazenada em cisterna
V015	Domicílios particulares permanentes com outra forma de abastecimento de água
V107	Domicílios particulares permanentes do tipo casa com abastecimento de água de poço ou nascente na propriedade
V108	Domicílios particulares permanentes do tipo casa com abastecimento de água da chuva armazenada em cisterna
V109	Domicílios particulares permanentes do tipo casa com outra forma de abastecimento de água
V146	Domicílios particulares permanentes do tipo casa de vila ou em condomínio com abastecimento de água de poço ou nascente na propriedade
V147	Domicílios particulares permanentes do tipo casa de vila ou em condomínio com abastecimento de água da chuva armazenada em cisterna
V148	Domicílios particulares permanentes do tipo casa de vila ou em condomínio com outra forma de abastecimento de água
V185	Domicílios particulares permanentes do tipo apartamento com abastecimento de água de poço ou nascente na propriedade
V186	Domicílios particulares permanentes do tipo apartamento com abastecimento de água de chuva armazenada em cisterna
V187	Domicílios particulares permanentes do tipo apartamento com outra forma de abastecimento de água

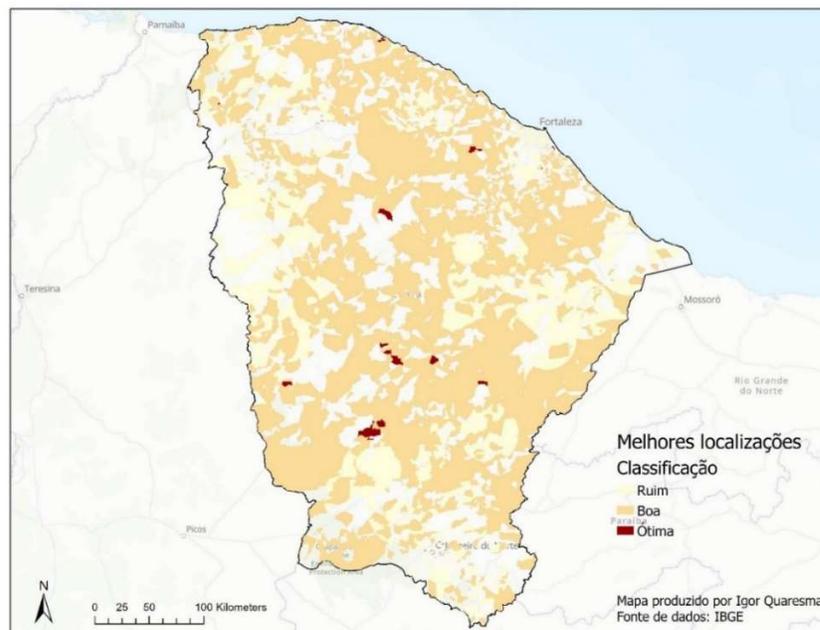
Fonte: IBGE (2010)

Ressalta-se que a análise referente as formas de acesso a água foi desenvolvida com o somatório das variáveis do Quadro 2, ou seja, realizou-se a soma de todos os domicílios do estado do Ceará que são abastecidos por água de outras formas que não seja pelo abastecimento de água de rede geral. Apesar do abastecimento por carros-pipa estar incluído diretamente nas variáveis V015, V109, V148 e V187, considerou-se também as demais variáveis presentes na tabela, pois entende-se que essas outras duas categorias, abastecimento de água por poço ou nascente e por água da chuva armazenada em cisterna, representam situações de famílias que podem demandar água

tratada por uma ETA, haja vista que essas outras formas da água não passam por um tratamento específico.

Com todas as camadas necessárias finalizadas, desenvolveu-se o mapa final com as localidades recomendadas para instalação das ETAs. Ao longo dessa análise, cada camada demandou a utilização de ferramentas específicas para ser desenvolvida, a localização final foi determinada com a sobreposição de todas as camadas consideradas, portanto, levando em conta os requisitos de todas as camadas. A ferramenta do ArcGIS utilizada para desenvolver essa sobreposição foi a “weighted overlay”, com os seguintes critérios de pesos de priorização: 30% para os resultados de ganho com a otimização do ORLab, 30% para a análise de formas de abastecimento dos domicílios, 20% para a distância euclidiana das PAs e 20% para as distâncias euclidianas dos mananciais. Com a sobreposição de todas as camadas da figura 5, obtém-se o seguinte mapa resultante.

Figura 6 - Mapa com resultado das melhores localidades para instalação das ETAs



Fonte: autoria própria

Após a obtenção dos pontos candidatos a instalação das ETAs, desenvolveu-se as matrizes de distâncias que foram utilizadas na etapa de derivação de soluções do modelo. Apesar do trabalho de Garcia *et al.* (2019) já possuir o resultado obtido com uma otimização para o estado do Ceará, observa-se que a comparação entre o cenário sem

a ETA e com a ETA é parte fundamental do escopo deste trabalho. Portanto, a simulação para a situação anterior antes da inclusão da ETA foi mais uma vez realizada considerando-se um total de 4444 PAs e 35 MANs para o cenário inicial do modelo, cenário esse que será chamado de cenário base a partir de agora.

Com todos os dados necessários para a implementação do modelo de PL coletados, desenvolveu-se o procedimento computacional para resolução do modelo em Python. O modelo foi construído recebendo os seguintes dados de entrada, todos em formato “.csv”:

- “df\_oferta\_final” – composto por duas colunas de dados, onde a primeira contém os códigos identificadores de cada manancial (MAN) ou ETA, e a segunda possui a quantidade de fretes que aquele manancial / ETA tem capacidade de ofertar.
- “df\_demanda\_final” – composto por duas colunas de dados, onde a primeira coluna contém os códigos identificadores de cada PA, e a segunda possui a quantidade de fretes demandada por cada uma das PAs.
- “df\_distancias\_wo” – composto por uma matriz, onde as linhas e colunas referem-se respectivamente aos códigos identificadores das PAs e dos MANs. Os demais campos da matriz representam as distâncias entre uma determinada PA perante um determinado MAN. Exemplificando, no trecho da matriz abaixo, tem-se que a distância entre a PA 1 e o manancial 148 é 368.608,00 metros. Todas as distâncias obtidas a partir da matriz de distâncias estão em metros, a transformação para a unidade de quilômetros foi realizada apenas no momento da identificação dos custos do programa OCP.

Quadro 3 - Matriz de distância entre PAs e MANs

<b>PA / MAN</b>	<b>33</b>	<b>148</b>	<b>601</b>	<b>646</b>
<b>1</b>	397052	368608	314590	182778
<b>2</b>	223911	194841	131500	348750
<b>3</b>	449932	421488	373224	174122

Fonte: autoria própria

Com os dados de entrada desenvolvidos, implementou-se o modelo, o qual ao final do processamento gera o resultado com quais rotas devem ou não ser realizadas. O arquivo de resultado é gerado com o nome de “df\_resultado” em formato “.csv” e esse é composto por duas colunas, uma com o nome de “variable” a qual indica a rota em análise e a outra com o nome de “value” a qual mostra valor 1 para as rotas que devem ser realizadas e 0 para as que não devem ser realizadas.

O modelo aplicado ao cenário base resultou o valor de 981.444,71 km, considerando o número de PAs (4444) e mananciais (35) usados para este estudo. Com o cenário base para comparação definido, aplicou-se o modelo de otimização elaborado a 3 cenários novos, os quais serão detalhados a seguir.

#### 4.4 Cenários

Esta seção mostrará os três cenários distintos que o modelo foi aplicado. Nos cenários 1 e 2, utilizou-se a inclusão de apenas uma ETA. Deste modo, o cenário 1 consiste na implantação de uma ETA (móvel, fixa pequena ou média) em um lugar específico e, o cenário 2 dessas mesmas três possíveis ETAs em um outro lugar, diferente do primeiro.

No cenário 3, duas ETAs com a mesma capacidade foram incluídas simultaneamente ao modelo. Considerou-se, para os três cenários, as capacidades de entrega apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4 - Capacidade de entrega das ETAs instaladas

<b>Tipo de ETA</b>	<b>Capacidade de entrega (carros-pipa de 20.000 litros)</b>
ETA Móvel	113 entregas
ETA Fixa Pequena	300 entregas
ETA Fixa Média	1000 entregas

Fonte: autoria própria

Para o cenário 3, pela complexidade de contar com a inclusão de duas ETAs simultaneamente, considerou-se a capacidade de entrega das duas ETAs como sendo iguais, portanto, duas ETAs com capacidade de 113 entregas, duas ETAs com

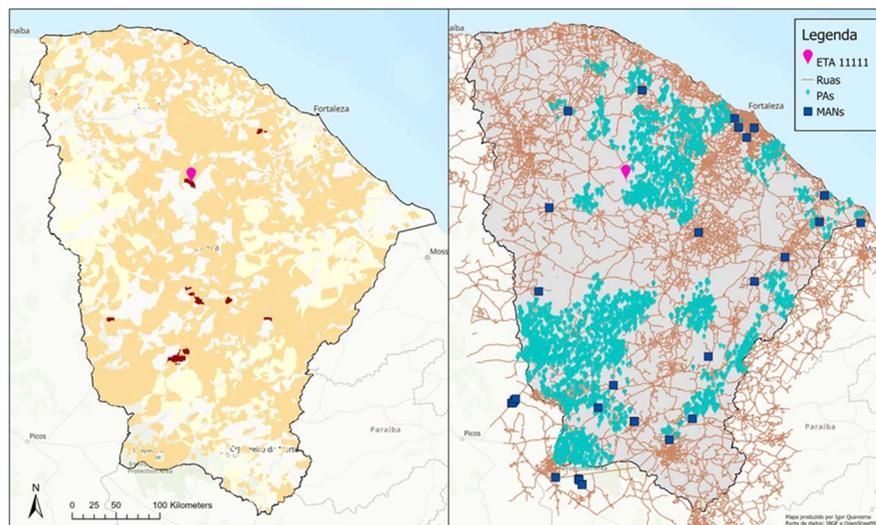
capacidade de 300 entregas e duas ETAs com capacidade de 1000 entregas. Esses valores foram utilizados levando em consideração a ETA móvel com capacidade de produção de 75.000 litros de água tratada por dia (FILGUEIRA, 2017) e estações fixas pequena e média com capacidades respectivamente de 200.000 e 670.000 litros diários. Os valores foram calculados considerando carros-pipa com capacidade de 20.000 litros cada.

Para os três diferentes cenários, a partir da definição do ponto de instalação da ETA, incluiu-se as informações referentes as localizações dos MAN e das PAs, além das informações referentes as ruas presentes no estado. Dessa forma, utilizou-se a função “network analyst” para gerar as distâncias entre todos os pontos de oferta e demanda. Implementou-se essas distâncias ao modelo de otimização conjuntamente com os outros “inputs” do modelo. Os resultados da otimização com as respectivas distâncias finais totais percorridas pelos veículos estão apresentados na seção resultados.

#### 4.4.1 Cenário 1 – Implementação da ETA 11111

Nesse cenário, considerou-se a implementação de uma ETA, a qual recebeu o código de ETA 11111, na localidade de coordenadas  $39.7741587^\circ$  W e  $4.4148720^\circ$  S. Essa localidade foi escolhida utilizando a região ótima definida pela sobreposição das camadas do mapa de escolha de melhor localização (a esquerda).

Figura 7 - Instalação da ETA 11111

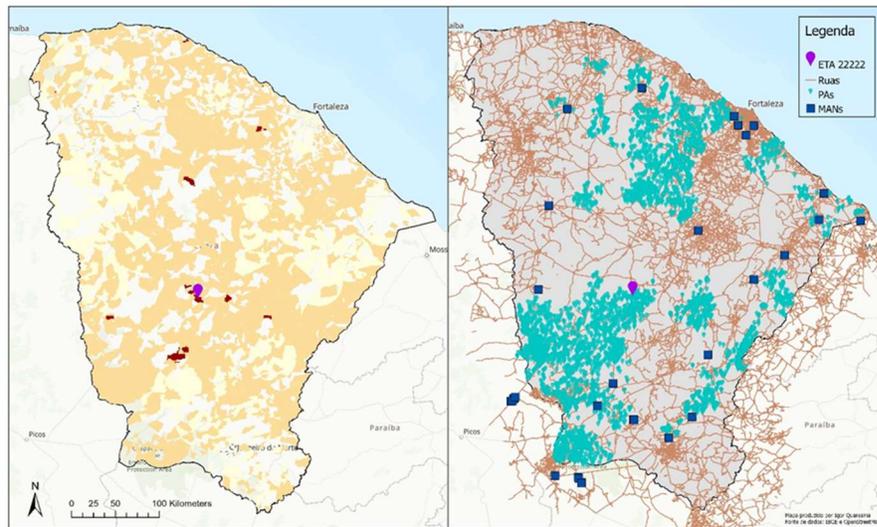


Fonte: autoria própria

#### 4.4.2 Cenário 2 – Implementação da ETA 22222

Nesse cenário, considerou-se a implementação de uma ETA, a qual recebeu o código de ETA 22222, na localidade de coordenadas  $39.7009923^\circ$  W e  $5.6401221^\circ$  S. Assim como no cenário 1, a localidade foi escolhida utilizando a região ótima definida pela sobreposição das camadas do mapa de escolha de melhor localização, porém, nesse caso considerou-se uma região mais ao sul do estado.

Figura 8 - Instalação da ETA 22222

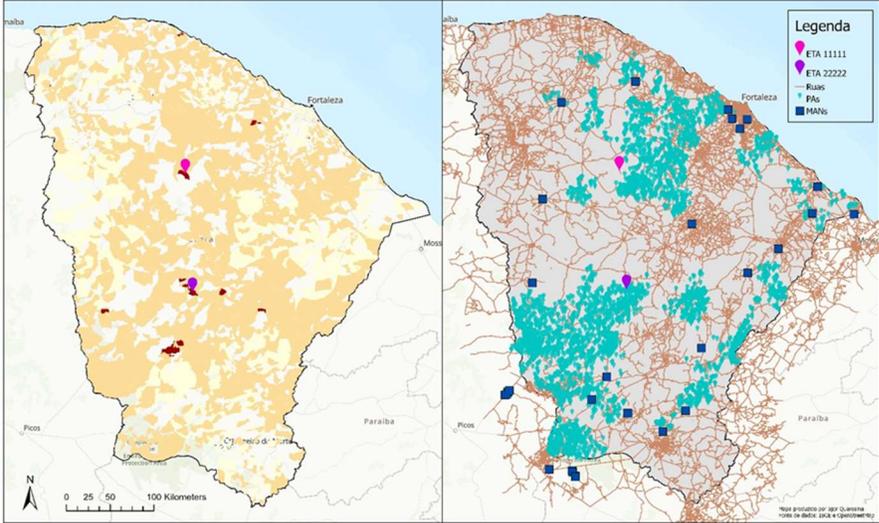


Fonte: autoria própria

#### 4.4.2 Cenário 3 – Implementação das ETAs 11111 e ETA 22222 simultaneamente

Nesse cenário, ocorreu a implementação de duas ETAs móveis ou, duas ETAs pequenas fixas, ou duas ETAs médias fixas simultaneamente, as quais receberam os códigos de ETA 11111 e ETA 22222, respectivamente, nas localidades de coordenadas  $(39.7741587^\circ$  W,  $4.4148720^\circ$  S) e  $(39.7009923^\circ$  W e  $5.6401221^\circ$  S). Estas são as mesmas localizações das ETAs dos cenários 1 e 2.

Figura 9 - Instalação das ETAs 11111 e 22222



Fonte: autoria própria

## 5 RESULTADOS

Apresentar-se-á neste capítulo os resultados obtidos para cada um dos três cenários previamente definidos. A análise de otimização de cada um dos cenários incorporará também uma análise de viabilidade econômica para a construção das ETAs.

### 5.1 Resultados obtidos para os cenários

Após aplicação do modelo para os diferentes cenários com suas respectivas alternativas, os resultados foram compilados nas tabelas abaixo.

Baseando-se no ano de 2016 o qual apresentou o maior orçamento destinado a OCP com o valor de R\$ 1.021.682.120,57 (MARDER, 2019) e considerando a distância obtida no cenário base deste trabalho (981.444,7 Km) conjuntamente com os valores obtidos pela otimização realizada por Garcia *et al*, tem-se que o estado do Ceará refere-se a cerca de 8,37% dos custos totais da OCP. Nesse contexto, obtém-se um custo total de operação para o estado do CE de R\$ 85.514.793,49. Assumindo que a distância percorrida é a única responsável pelos investimentos destinados ao programa, obteve-se com a multiplicação do valor de economia determinado para cada cenário com o orçamento total destinado para a OCP no Ceará, o valor em reais da economia gerada pelo modelo.

Tabela 3 - Representatividade de cada estado perante distância total percorrida

<b>Estados</b>	<b>Custo Cenário Base (km)</b>	<b>Percentual em relação ao total (%)</b>
Alagoas	288.999,00	2,46
Bahia	3.888.017,00	33,15
Ceará	981.444,70	8,37
Paraíba	1.969.359,00	16,79
Pernambuco	2.279.456,00	19,44
Piauí	1.185.485,00	10,11
Rio Grande do Norte	1.038.331,00	8,85
Sergipe	96.647,00	0,82

Fonte: adaptado de Garcia et al. (2019)

Para o primeiro cenário, tem-se que a economia apresenta o valor mínimo de R\$ 1.171.552,67 para a alternativa de ETA Móvel e valor máximo de R\$ 5.626.873,41 para a alternativa de ETA Média Fixa ao ano.

Tabela 4 - Cenário 1 (Inclusão ETA 11111)

<b>Alternativas</b>	<b>Distância total (km)</b>	<b>Economia em relação ao cenário base (%)</b>
ETA Móvel	967.996,9	1,37
ETA Pequena Fixa	947.476,7	3,46
ETA Média Fixa	916.848,6	6,58

Fonte: autoria própria

No segundo cenário, tem-se que a economia apresenta o valor mínimo de R\$ 1.453.751,49 para a alternativa de ETA Móvel e valor máximo de R\$ 8.175.214,26 para a alternativa de ETA Média Fixa ao ano.

Tabela 5 - Cenário 2 (Inclusão ETA 22222)

<b>Alternativas</b>	<b>Distância total (km)</b>	<b>Economia em relação ao cenário base (%)</b>
ETA Móvel	964.712,9	1,70
ETA Pequena Fixa	945.585,7	3,65
ETA Média Fixa	887.623,3	9,56

Fonte: autoria própria

Por fim, tem-se uma economia mínima de R\$ 2.633.855,64 para o terceiro cenário, para a alternativa de ETA Móvel, e valor máximo de R\$ 13.716.572,88 para a alternativa de ETA Média Fixa ao ano.

Tabela 6 - Cenário 3 (Inclusão ETA 11111 e ETA 22222)

<b>Alternativas</b>	<b>Distância total (km)</b>	<b>Economia em relação ao cenário base (%)</b>
2 ETAs Móveis	951.265,1	3,08
2 ETA Pequenas Fixas	911.617,7	7,11
2 ETA Médias Fixas	824.020,1	16,04

Fonte: autoria própria

Observa-se que em todos os cenários, com o aumento da capacidade da ETA instalada, há conseqüentemente um aumento de economia em relação a distância final total percorrida. Na próxima seção do trabalho será analisado se essa economia gerada justifica o investimento necessário para instalação da ETA, haja vista que o valor dispendido para uma construção de ETA de maior porte também é mais significativo.

Devido à sua menor capacidade, a utilização de ETA móvel representa a menor economia entre as alternativas analisadas. Entretanto, essa alternativa possui o diferencial em relação à sua mobilidade. Por se tratar de um conjunto compacto, esse pode ser alocado em diferentes regiões do estado caso necessário, favorecendo inclusive diferentes municípios em um mesmo período de secas.

## 5.2 Análise de Viabilidade Econômica

Para construção de uma estação de tratamento de água com capacidade de 53 milhões de litros por dia é necessário o investimento de 75,4 milhões de dólares (PORTAL TRATAMENTO DE ÁGUA, 2017). Considerando a cotação do câmbio de 1 dólar igual 5,16 reais (dia 4 de janeiro de 2021) e a regra dos seis décimos, a qual consiste em uma relação empírica para estimação de custo considerando que o aumento de tamanho de uma determinada instalação gera um aumento do custo elevado a 0,6 (CILENSEK, 2009), tem-se:

$$\frac{\text{custo 1}}{\text{custo 2}} = \left( \frac{\text{tamanho 1}}{\text{tamanho 2}} \right)^{0.6}$$

Considerando o custo 1 como custo a ser identificado, custo 2 como sendo o investimento de 75,4 milhões de dólares, o tamanho 1 a capacidade em litros por mês da ETA que se deseja instalar e tamanho 2 como a capacidade de 1,59 bilhões de litros por mês, tem-se os valores de implementação das ETAs apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Comparativo entre economia gerada e custo de implementação para cada ETA

	<b>Alternativa</b>	<b>Economia da otimização por ano (R\$)</b>	<b>Custo de implementação ETA (R\$)</b>
<b>Cenário 1</b>	ETA Móvel	R\$ 1,171,552.67	R\$ 7,614,613.01
	ETA Pequena Fixa	R\$ 2,958,811.85	R\$ 13,679,603.92
	ETA Média Fixa	R\$ 5,626,873.41	R\$ 28,170,903.13
<b>Cenário 2</b>	ETA Móvel	R\$1,453,751.49	R\$7,614,613.01
	ETA Pequena Fixa	R\$3,121,289.96	R\$13,679,603.92
	ETA Média Fixa	R\$8,175,214.26	R\$28,170,903.13
<b>Cenário 3</b>	2 ETAs Móveis	R\$2,633,855.64	R\$15,229,226.02
	2 ETAs Pequenas Fixas	R\$6,080,101.82	R\$27,359,207.85
	2 ETAs Médias Fixas	R\$13,716,572.88	R\$56,341,806.27

Fonte: autoria própria

Com os valores referentes a economia gerada pelo modelo de otimização e os custos necessários para construção das ETAs pode-se utilizar alguns métodos para análise da viabilidade econômica da construção ou não dessas ETAs.

Primeiramente, pode-se implementar o método do *payback*, o qual consiste na determinação do prazo em que um investimento original é pago pelos seus fluxos de caixa futuros, ou seja, o período que levará para um determinado investimento se pagar.

Realizando essa análise para os cenários deste trabalho, obtém-se os resultados apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - *Payback* para os modelos de cada cenário

	<b>Alternativa</b>	<b>Payback (meses)</b>
<b>Cenário 1</b>	ETA Móvel	78
	ETA Pequena Fixa	56
	ETA Média Fixa	61
<b>Cenário 2</b>	ETA Móvel	63
	ETA Pequena Fixa	53
	ETA Média Fixa	42
<b>Cenário 3</b>	2 ETAs Móveis	70
	2 ETAs Pequenas Fixas	54
	2 ETAs Médias Fixas	50

Fonte: autoria própria

Conclui-se a partir da tabela que o cenário 2, com a inclusão do modelo de ETA Média Fixa, tem o menor período de retorno do investimento, um período de 42 meses ou 3,5 anos. Portanto, sendo a melhor alternativa de escolha considerando o método do *payback*.

Deve-se considerar também que as opções de ETAs Pequenas Fixas e ETAs Médias Fixas do cenário 3 apresentaram um resultado muito próximo de retorno determinado na opção de melhor retorno conforme explicitado no parágrafo anterior. Considerando que nessa opção um maior público será beneficiado, haja vista que ao invés de construir apenas uma instalação construir-se-á duas instalações e que essas estarão dispostas em localidades diferentes do estado do CE, a escolha dessas opções também deve ser considerada pelos gestores públicos.

Ressalta-se que para os três cenários analisados, todas as alternativas de modelo de ETAs apresentaram um retorno em menos de 7 anos, o que pode ser considerado um período curto de retorno para o desenvolvimento de uma obra que beneficiará diversas pessoas e que possui vida útil de vários anos. Segundo Fulton (2009), estruturas como as estações de tratamento de água têm uma longa expectativa de vida, normalmente sendo projetadas com período de vida entre 30 e 50 anos.

A análise realizada não considera benefícios indiretos obtidos com a construção das ETAs como, por exemplo, a redução de custo dos serviços de saúde dos municípios. Da mesma forma, custos referentes a manutenção e operação das ETAs não estão incluídos nessa análise do *payback*, portanto, ao incluir esses valores, a quantidade de meses para que o investimento de implementação se pague tende a aumentar.

Assim como o *payback*, o Valor Presente Líquido (VPL) consiste em um outro método utilizado para verificar a viabilidade de um determinado projeto, no caso deste trabalho, a construção ou não da ETA.

O método do VPL consiste em trazer todos os fluxos de caixa futuros de um projeto para a data presente e, após isso, somá-los com o investimento inicial desse projeto (ROSS, 2015). Caso o VPL seja positivo, deve-se aceitar o projeto e, caso o VPL seja negativo, recusa-se o projeto em questão.

Para o método do VPL, a fim de deixar o resultado do indicador mais condizente com a realidade, considerou-se duas possibilidades, uma sem incluir os custos de

operação e manutenção (O&M) e outra incluindo esses custos ao longo dos anos de operação da ETA. Conforme o trabalho de Atta-Asiamah (2010), o custo anual de operação de uma ETA, com capacidade de 9,8 milhões de litros por mês, é de R\$208.381,44 (cotação de 1 dólar americano igual a 5,16 reais). Aplicando mais uma vez a regra dos seis décimos para os diferentes tamanhos de ETAs, determina-se o valor de manutenção anual para cada um dos modelos de ETA.

Além disso, considerando o Custo Médio Ponderado de Capital (WACC) como taxa de desconto e considerando o valor de WACC utilizado pela Agência Reguladora de Saneamento e Energia do Estado de São Paulo (ARSESP) no valor de 8,10% a.a. para o ano de 2020 (ARSESP, 2020), pode-se calcular o VPL de todas as alternativas dos três cenários deste trabalho com a seguinte equação.

$$VPL = -investimento\ inicial + \frac{FC1}{(1+r)^1} + \frac{FC2}{(1+r)^2} \dots \frac{FCn}{(1+r)^n}$$

onde “FC” representa o fluxo de caixa obtido com a construção daquele modelo específico de ETA em uma determinada localidade. Portanto, “FC” inclui a soma entre todos os recursos que foram pagos e todos os recursos que foram ganhos com a implementação do projeto em um determinado ano. Por sua vez, o “investimento inicial” consiste no valor utilizado para financiar a construção daquele modelo específico de ETA e, “r” consiste na taxa de desconto do projeto que será de 8,10% ao ano. Por último, “n” representa a quantidade de períodos totais que assumirá o valor de 30 anos. Calculando o VPL para cada uma das alternativas dos diferentes cenários, obtém-se os resultados discutidos na Tabela 9.

Tabela 9 - VPL para os diferentes modelos (continua)

	<b>Alternativa</b>	<b>VPL sem custos de O&amp;M</b>	<b>VPL com custos de O&amp;M</b>
<b>Cenário 1</b>	ETA Móvel	R\$ 5,451,004.04	R\$ 4,488,665.94
	ETA Pequena Fixa	R\$ 19,318,231.84	R\$ 17,589,397.55
	ETA Média Fixa	R\$ 34,582,206.50	R\$ 31,021,955.52
<b>Cenário 2</b>	ETA Móvel	R\$ 8,598,196.47	R\$ 7,635,858.37
	ETA Pequena Fixa	R\$ 21,130,251.73	R\$ 19,401,417.44
	ETA Média Fixa	R\$ 63,002,307.83	R\$ 59,442,056.85

Tabela 9 - VPL para os diferentes modelos (conclusão)

	<b>Alternativa</b>	<b>VPL sem custos de O&amp;M</b>	<b>VPL com custos de O&amp;M</b>
<b>Cenário 3</b>	2 ETAs Móveis	R\$ 14,144,569.98	R\$ 12,219,893.78
	2 ETAs Pequenas Fixas	R\$ 40,448,483.57	R\$ 36,990,814.99
	2 ETAs Médias Fixas	R\$ 96,630,819.66	R\$ 89,510,317.70

Fonte: autoria própria

Ao analisar a tabela com os resultados de VPL, percebe-se que a inclusão dos custos de O&M retornam um valor menor para o VPL, como esperado. Isto ocorre porque o fluxo de caixa de cada período sofrerá uma redução com a subtração do valor de O&M em relação ao ganho da otimização.

Conclui-se que assim como a análise do *payback*, o método do VPL todas as alternativas são consideradas viáveis, haja vista que todas apresentam um valor de VPL maior que 0 ( $VPL > 0$ ). Percebe-se que com o aumento da capacidade da ETA, o valor de VPL se torna mais positivo, o que ocorre devido ao aumento dos ganhos que o aumento da capacidade da ETA proporciona.

Os métodos financeiros utilizados nessa análise são algumas outras formas de embasar as decisões dos gestores, seja no setor privado ou público. Como regra geral, empreendimentos privados visam obter lucro. Por outro lado, obras públicas não necessariamente visam obter lucro, mas sim uma aplicação eficiente de recursos públicos para melhora da qualidade de vida dos habitantes da região beneficiada.

Ao analisar os três cenários propostos pelo presente trabalho, percebe-se que a construção das ETAs é viável tanto pelo lado econômico, haja vista que para ambos os métodos financeiros a construção se mostrou viável, como na questão social e de saúde, o qual mostra que a possibilidade de ter água tratada aprimora a vida dos habitantes do estado do Ceará.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho visou a implantação de um modelo para otimizar a distribuição de água por carros-pipa no estado do Ceará, considerando a construção de novas estações de tratamento de água (ETAs). Estas ETAs objetivam melhorar a qualidade da água distribuída para a população atendida pelo programa Operação Carro Pipa (OCP) do Governo Federal.

A primeira etapa do estudo compreendeu a identificação das principais características causadoras das secas no Nordeste, e mais especificamente no estado do Ceará. Após isso, realizou-se um estudo sobre programa OCP do Governo Federal e a sua fundamental importância para as famílias que vivem em regiões com elevada vulnerabilidade hídrica.

A partir de um modelo de otimização previamente desenvolvido e aplicado a mananciais e prefeituras administrativas da região Nordeste, o qual apresentou expressivos resultados de economia, identificou-se o potencial de uma economia ainda maior de recursos financeiros destinados ao programa OCP com a inclusão de ETAs ao modelo.

Além da economia de recursos financeiros utilizados para manutenção do programa, observou-se o impacto sobre o aspecto social e de saúde que a construção de ETAs poderia gerar para todas as famílias beneficiadas pelo OCP, haja vista a melhora considerável da qualidade da água ao utilizar tais estruturas de tratamento.

Diferentes técnicas para identificar os melhores pontos para instalação das ETAs foram aplicadas. Com a utilização do software ArcGIS, a partir da análise de peneiramento (“sieving analysis”) com a utilização de diferentes critérios, tais como quantidade de domicílios não atendidos com água por distribuição de rede geral e regiões com resultados de economia mais expressivos com o modelo previamente desenvolvido, as regiões que podem ser ditas como as melhores candidatas para a instalação das ETAs foram assim identificadas.

Determinou-se então três diferentes cenários para implementação do modelo de otimização, cada um considerando também três modelos de ETAs com capacidades distintas.

Ao implementar o procedimento computacional de otimização, obteve-se os valores de economia de 1,37%, 3,46% e 6,58% para os três modelos do cenário 1; 1,7%, 3,65% e 9,56% para os três modelos do cenário 2, e 3,08%, 7,11% e 16,04% para os três modelos de cenário 3.

A partir das economias obtidas, e dos custos de construção das ETAs de cada um dos três modelos, ETAs móvel, pequena fixa ou média fixa, realizou-se a análise de viabilidade econômica da construção das ETAs.

Com a utilização do método do payback, a ETA Média Fixa na localização 39.7009923° W e 5.6401221° S (ETA 22222) apresentou o menor período de retorno do investimento, com um total de 42 meses ou 3,5 anos. Todos os demais modelos, nos três cenários, apresentaram um período de menos de 7 anos para retorno do investimento. Este tempo de 7 anos pode ser considerado curto, principalmente para obras de infraestrutura de saneamento básico.

Além da análise do payback, utilizou-se o método do Valor Presente Líquido (VPL). Os resultados obtidos com o VPL foram positivos ( $VPL > 0$ ) para todos os três cenários e os respectivos modelos de ETAs, o que pela metodologia do método mostra que todas as alternativas desses três cenários são viáveis.

O modelo com a inclusão das novas ETAs foi aplicado apenas para o estado do Ceará, o que já demonstrou possíveis benefícios que podem ocorrer para a população beneficiada pelo programa e para o próprio Governo Federal com a melhoria da qualidade de vida da população e, economia de recursos financeiros. Sugere-se como extensão deste trabalho a aplicação do modelo considerando inclusão de novas ETAs para outros estados beneficiados pela OCP. Recomenda-se ainda o estudo de cenários com a adição de duas ou mais ETAs simultâneas em diferentes localidades, porém com capacidades distintas de fornecimento. Por fim, pode-se analisar outros critérios de decisão durante a etapa de identificação das melhores localidades para instalação das ETAs. Critérios como elevação do terreno para regiões com maior variabilidade do relevo e diferentes combinações na escala de priorização dos critérios podem ser analisados no futuro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, M. S. **Elaboração de projeto, TCC, dissertação e tese: uma abordagem simples, prática e objetiva.** 2ª Edição. São Paulo: Atlas, 2014.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2018.** Brasília, 2018. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/portal/publicacao/Conjuntura2018.pdf>>. Acesso em 07 set. 2020.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **A questão da água na região Nordeste.** Brasília, 2012. Disponível em: <<https://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2012/aQuestaoDaAguaNoNordeste.pdf>>. Acesso em 18 set. 2020.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2019.** Brasília, 2019. Disponível em: <<http://conjuntura.ana.gov.br/static/media/conjuntura-completo.bb39ac07.pdf>>. Acesso em 07 set. 2020.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2019.** Brasília, 2019. Disponível em: <<http://conjuntura.ana.gov.br/static/media/conjuntura-completo.bb39ac07.pdf>>. Acesso em 07 set. 2020.

ARAÚJO, A. L.; SILVA, F. J. A.; SOUZA, R. O. Águas subterrâneas no Ceará – poços instalados e salinidade. In: **Revista tecnologia Fortaleza.** V. 28, n. 2, p, 136-159. Fortaleza, 2007.

ARONOFF, S. **Geographic information systems: A management perspective.** Ottawa: WDL Publications, c1993.

ARSESP - AGÊNCIA REGULADORA DE SANEAMENTO E ENERGIA DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Determinação do custo médio ponderado de capital (wacc) para o processo da 3ª revisão tarifária ordinária da companhia de saneamento básico do estado de São Paulo – SABESP.** RC.F N °4, Julho-2020. Disponível em: <[http://www.arsesp.sp.gov.br/ConsultasPublicasBiblioteca/RC\\_WACC\\_SABESP\\_cp06.pdf](http://www.arsesp.sp.gov.br/ConsultasPublicasBiblioteca/RC_WACC_SABESP_cp06.pdf)> Acesso em: 18 abr. 2021.

BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. **Portaria nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011.** Brasília, 2011.

CARDIM, F. **A terra é chã e sua gente honrada.** V.1, n.4. Fortaleza: Revista Conviver Nordeste Semi-árido, 2004.

CILENSEK, R. F. Water Treatment Plant Construction Cost Estimating. *In*: AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. **Water Treatment Plant Design**. United States: McGRAW-HILL, 2005.

CLARKE, G; WRIGHT, J. W. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. **Operations research**, v. 12, n. 4, p. 568-581, 1964.

COMANDO MILITAR DO NORDESTE. **Comando Militar do Nordeste mantém programa emergencial de distribuição de água potável no semiárido**. Exército Brasileiro, Braço forte – mão amiga. Disponível em: < [http://www.eb.mil.br/web/noticias/noticiariodoexercito//asset\\_publisher/MjaG93KcunQI/content/id/11290847](http://www.eb.mil.br/web/noticias/noticiariodoexercito//asset_publisher/MjaG93KcunQI/content/id/11290847) >. Acesso em 23/09/2020

DANTZIG, G. B.; RAMSER, J. H. The truck dispatching problem. **Management science**, v. 6, n. 1, p. 80-91, 1959.

Druck, S.; Carvalho, M.S.; Câmara, G.; Monteiro, A.V.M. (eds) “**Análise Espacial de Dados Geográficos**”. Brasília, EMBRAPA, 2004.

FILGUEIRAS, M. **Todos Pela Água, Estações Móveis de Tratamento Levam Água Potável Para Comunidades Rurais**. Sala de Imprensa, 2017. Disponível em: < <http://saladeimprensa.ceara.gov.br/todospelaagua/?p=27227#:~:text=Com%20opera%C3%A7%C3%A3o%20de%2015%20horas,quest%C3%A3o%20da%20quadra%20chuvosa%20cearense> >. Acesso em: 03 jan. 2020

FILHO, S. S. F. **Tratamento de Água** - Concepção, projeto e operação de estações de tratamento. 3ª Edição. Rio de Janeiro: GEN | Grupo Editorial Nacional Participações S/A, 2017.

GARCIA, R.C., COSTA, M., GONÇALVES, R., COSTA, A.L.O., SAMY, D., NEUMANN, C, e FERREIRA, A.C. **A Cost Reduction Model for the Management of Pipe Cars in the Brazilian Northeast**, *Inform's Annual Meeting*, 2019, Seattle, WA, USA, 2019.

GOMES, G.L.O. **Aplicação de modelo de otimização para distribuição de água por meio de carros-pipa com a construção de novas estações de tratamento de água**. Brasília: Operational Research Laboratory, Universidade de Brasília, 2019.

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

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. 9ª Edição. São Paulo: McGRAW-HILL, 2013.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. 8ª Edição. São Paulo: McGRAW-HILL, 2006.

HOWE, K. J.; HAND, D. W.; CRITTENDEN, J. C.; TRUSSELL, R. R.; TCHOBANOGLIOUS, G. **Princípios de tratamento de água**. 1. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2016.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades e Estados**, c2020. Página inicial. Disponível em: < <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ce.html>>. Acesso em: 18 fev. 2021.

IPECE - Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Caracterização Territorial**. Fortaleza, 2013. Disponível em: < [http://www2.ipece.ce.gov.br/publicacoes/ceara\\_em\\_numeros/2013/territorial/01\\_001\\_caracteristicas\\_geograficas.pdf](http://www2.ipece.ce.gov.br/publicacoes/ceara_em_numeros/2013/territorial/01_001_caracteristicas_geograficas.pdf)>. Acesso em: 22 mar. 2021.

IPECE - Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Desenvolvimento Econômico do Ceará: Evidências Recentes e Reflexões**. Fortaleza, 2014. Disponível em: <[https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2015/02/Desenvolvimento\\_Economico\\_do\\_Ceara\\_Evidencias\\_Recentes\\_e\\_Reflexoes.pdf](https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2015/02/Desenvolvimento_Economico_do_Ceara_Evidencias_Recentes_e_Reflexoes.pdf)>. Acesso em: 14 mar. 2021.

KUTA, A. A.; OPALUWA, Y. D.; ZITTA, N.; OJATAH, E.; UGOLO, E. M. Application of GIS Sieve Mapping and Overlay Techniques for Building Site Suitability Analysis in Part of FUT, Gidan Kwano, Minna, Nigeria. **Indian Journal of Science and Technology**, v. 9, p. 1-6, 2016.

LIMA, B. A. *et al.* **O exército brasileiro na operação carro-pipa: uma análise dos impactos trazidos para a instituição, como ator principal, na execução do programa emergencial de distribuição de água potável em cisternas coletivas**. Salvador, 2018. Disponível em: < [https://bdex.eb.mil.br/jspui/bitstream/123456789/2702/1/PI2018\\_Grupo3.pdf](https://bdex.eb.mil.br/jspui/bitstream/123456789/2702/1/PI2018_Grupo3.pdf)> Acessado em: 9 out. 2021.

MANSO, C.; SANTOS, A.; MARINO, C.E.; FRANÇA, J.M. de. **A quem se destina o plano Brasil sem Miséria?: perfil dos extremamente pobres no país**. Fortaleza, CE: Laboratório de Estudos da Pobreza, Universidade Federal do Ceará, 2011.

MARDER, L. **Melhoria da gestão e controle da distribuição de Água pelo Exército Brasileiro**: Estudo de caso da operação Carro-Pipa. Salvador, 2019. Disponível em: <<http://bdex.eb.mil.br/jspui/handle/123456789/4059>>. Acesso em 10 set. 2020.

MARENGO, J.A.; CUNHA, A.P; ALVES, L.M. **A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico**. São Paulo, SP: Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), Centro de Ciências do Sistema Terrestre – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CCST/INPE), Nov. 2016.

MARTINELLI, M. **Mapas da geografia e cartografia temática**. São Paulo: Contexto, 2003.

MARTINS, E. S. P. R.; MAGALHÃES, A. R. “**A seca de 2012-2015 no Nordeste e seus impactos**”. Brasília, p. 107-128, 2015.

MINISTÉRIO DA DEFESA. **Durante a pandemia, Forças Armadas ampliam distribuição de água à população**. Portal do Governo Brasileiro, 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/defesa/pt-br/assuntos/noticias/ultimas-noticias/durante-pandemia-forcas-armadas-ampliam-distribuicao-de-agua-a-populacao>>. Acesso em 06 out. 2020.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. **Centro Nacional de Gerenciamento de riscos e desastres**. Portal do Governo Brasileiro, 2019. Disponível em: <https://antigo.mdr.gov.br/protecao-e-defesa-civil/centro-nacional-de-gerenciamento-de-riscos-e-desastres-cenad>>. Acesso em 25 set. 2020

PARKER H.D. **The unique qualities of geographic information system: a commentary**. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1988.

PORTAL TRATAMENTO DE ÁGUA. **Como construir uma ETA versátil**, 2017. Disponível em <<https://www.tratamentodeagua.com.br/como-construir-uma-eta-versatil/>>. Acesso em 30 nov. 2019.

REIS, T. Por que fazer a análise de viabilidade de um negócio é tão importante?. **Suno Artigos**, 2018. Disponível em: <<https://www.suno.com.br/artigos/analise-de-viabilidade/>>. Acesso em: 20 de mar. de 2021.

ROCHA, Paula Lúcia Ferruccio da. **O programa “Operação Carro-Pipa (OCP): inovações e desafios de implementação**. 2017. xi, 52 f., il. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Gestão de Políticas Públicas)—Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

ROSS, S. A.; WESTERFIELD, R. W.; JAFFE, J.; LAMB, R. **Administração Financeira**, 10. ed. São Paulo: McGrawHill, 2015.

RUDORFF, Bernardo. F. T. **PRODUTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO**. INPE, c2017. Disponível em: <<http://www3.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/educasere/apostila.htm>>. Acesso em: 16 dez. 2020.

SOUZA, A. B.; **Curso de administração financeira e orçamento: princípios e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Atlas, 2014.

TAHA, H.A. Pesquisa Operacional, 8ª ed., São Paulo: Pearson, 2007

WILHITE D. A.; SIVAKUMAR M. V. K.; PULWARTY R. Managing drought risk in a changing climate: The role of national drought policy. **Weather and Climate Extremes**, P. 4–13, 2014.

YIN, R. **Estudo de caso** : planejamento e métodos. 5.ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

## APÊNDICE A – Código para Resolução do Modelo de PL

```

#Importar bibliotecas
from pulp import *
import pandas as pd
import numpy as np
import re

#Abrir arquivos

#Identificador oferta e oferta
with open('df_oferta_final.csv','r') as df_oferta:
    id_oferta = list(map(str,pd.read_csv(df_oferta).iloc[:,0]))

#oferta
with open('df_oferta_final.csv','r') as df_oferta:
    oferta = list(map(int,pd.read_csv(df_oferta).iloc[:,1]))

#Identificador demanda
with open('df_demanda_final.csv','r') as df_demanda:
    id_demanda = list(map(str,pd.read_csv(df_demanda).iloc[:,0]))

#demanda
with open('df_demanda_final.csv','r') as df_demanda:
    demanda = list(map(int,pd.read_csv(df_demanda).iloc[:,1]))

#distancias
with open('df_distancias_wo.csv') as df_distancias:
    distancias = pd.read_csv(df_distancias)

distancias = distancias.T
distancias = distancias.round(0).astype('int')

#Definir o problema de PL
prob = LpProblem('Otimizacao_CE_atual', LpMinimize)

#Criar variáveis de decisão
Varx = LpVariable.dicts('Varx', [(MAN,PA) for MAN in range(len(id_oferta)) for PA in range(len(id_demanda))], 0, None, LpInteger)

#Definir função objetivo
prob += lpSum([demanda[PA] * distancias.iloc[MAN, PA] * Varx[MAN, PA] for PA in range(len(demanda)) for MAN in range(len(oferta))])

#Definir restrições
for MAN in range(len(oferta)):
    prob += lpSum([Varx[MAN,PA] * demanda[PA] for PA in range(len(demanda))]) <= oferta[MAN]

for PA in range(len(demanda)):
    prob += lpSum([Varx[MAN,PA] for MAN in range(len(oferta))]) == 1

#Escrever arquivo com modelagem
prob.writeLP("Visao_Modelagem_ETA11111.lp")

#Solucionar o modelo
prob.solve()

#Preparar formato dos dados de saída
lista_codigos = []
lista_len = []
for i in id_oferta:
    lista_codigos.append(i)
for i in range(len(oferta)):
    lista_len.append(i)

transform_o = list(zip(lista_len,lista_codigos))

lista_codigos = []
lista_len = []
for i in id_demanda:
    lista_codigos.append(i)
for i in range(len(demanda)):
    lista_len.append(i)

transform_d = list(zip(lista_len,lista_codigos))

```

```
variable_name = []
variable_value = []

for v in prob.variables():
    variable_name.append(v.name)
    variable_value.append(v.varValue)

df = pd.DataFrame({'variable': variable_name, 'value': variable_value})
transform_o = dict(transform_o)
transform_d = dict(transform_d)

def replace(value):
    o, d = re.findall(r'\((\d+),_(\d+)\)', value)[0]
    o_ = transform_o[int(o)]
    d_ = transform_d[int(d)]
    result = re.sub(r"\((\d+),_(\d+)\)", f"({o_},{d_})", value)
    return result

df['variable'] = df['variable'].apply(replace)

#Gerar arquivo com resultado da otimização
df.to_csv("df_resultado.csv")
```

## APÊNDICE B – Código para Exportar Matrizes de Distâncias a Partir do ArcGIS

```

#Importar biblioteca arcpy
from arcpy import *

#Explicitar quais campos (fields) da tabela deverão ser coletados
colunas = ["OBJECTID","Shape","Name","OriginID","DestinationID","DestinationRank","Total_Length"]

#Criar estrutura para receber os dados que serão gerados. No caso criaremos uma lista vazia
dados = []

#Gerar o cursor que irá selecionar cada linha da tabela do ARCGIS
with da.SearchCursor(r"OD Cost Matrix\Lines", colunas) as cur:
    for row in cur:
        dados.append(row)

#Transformar dados para estrutura de dataframe do pandas para facilitar manipulação dos dados
df = pd.DataFrame(dados, columns = colunas)

#Exportar o dataframe em formato csv para próximos passos
df.to_csv("D:\Users\Igor Quaresma D\Documents\ARCGIS\PG\Network_analyst\Matriz_distancias_CE\distancias_CE11111.csv)

def gerar_matriz_distancias(nome_arquivo_entrada,nome_arquivo_saida):
    """Essa função deve ser utilizada com a tabela gerada pelo ARCGIS. Essa tabela deve estar na forma:
    OBJECTID  Name  OriginID  DestinationID  DestinationRank  Total_Length  Shape_Length
    """
    #Argumentos
    #nome_arquivo_entrada - refere-se ao nome do arquivo gerado pelo arcgis, esse nome não deve incluir a extensão do arquivo
    #nome_arquivo_saida - refere-se ao nome do arquivo que será gerado com as distâncias entre os man e pas

    import pandas as pd
    import numpy as np

    #Ler arquivo
    df = pd.read_csv(nome_arquivo_entrada+'.csv')

    #Deletar colunas que não serão utilizadas para gerar a matriz
    df.drop(['OBJECTID', 'OriginID', 'DestinationID', 'DestinationRank', 'Shape'], axis =1, inplace = True)

    #Limpar o sinal de - na coluna nome e gerar colunas MAN e PA
    df['MAN'] = df['Name'].apply(lambda x: x.split()[0])
    df['PA'] = df['Name'].apply(lambda x: x.split()[2])

    #Renomear coluna Total_Length (m) para Distancia_m
    df.rename({'Total_Length': 'Distancia_m' }, axis = 1, inplace = True)

    #reordenar ordem colunas
    df = df[['Name', 'MAN', 'PA', 'Distancia_m']]

    #Definir campos dos MAN e PAs como numéricos
    df['MAN'] = df['MAN'].astype('int')
    df['PA'] = df['PA'].astype('int')
    df['Distancia_m'] = df['Distancia_m'].astype('float')

    #Gerar arquivo com a matriz
    matriz_distancias = df.pivot(index = 'PA', columns = 'MAN', values = 'Distancia_m')

    #Salvar matriz gerada em arquivo excel
    matriz_distancias_excel = matriz_distancias.to_excel(nome_arquivo_saida+'.xls')

    #imprimir matriz na tela
    return matriz_distancias

#Gerar arquivo de entrada para o modelo de otimização
gerar_matriz_distancias(distancias_CE11111,df_distancias_wo)

```