

Nome da instituição: **INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

Nome do trabalho: **“PLANEJAMENTO DE OBRAS DE PERFURAÇÃO DE POÇOS:
PROCEDIMENTO INTEGRADO À DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA EM
REGIÕES AFETADAS PELA SECA”**

Curso: **ENGENHARIA DE TRANSPORTES**

Nível: **MESTRADO**

Nome dos autores: **YESUS EMMANUEL MEDEIROS VIEIRA
RENATA ALBERGARIA DE MELLO BANDEIRA D.Sc – IME
ORIVALDE SOARES DA SILVA JÚNIOR, D.Sc – IME**

Orientadores: **RENATA ALBERGARIA DE MELLO BANDEIRA D.Sc – IME
ORIVALDE SOARES DA SILVA JÚNIOR, D.Sc - IME**

Avaliadores: **ADRIANA LEIRAS, D. Sc. – PUC-Rio
LUIZ ANTÔNIO SILVEIRA LOPES, D. Sc. – IME/ EB
ORIVALDE SOARES DA SILVA JÚNIOR, D. Sc. – IME/ EB**

RESUMO

Mitigar as consequências negativas de desastres relacionados ao clima como as secas tem sido um grande desafio, especialmente em áreas altamente vulneráveis e que geralmente não estão bem estruturadas para tratar a escassez de água. Quando a seca se agrava nestas áreas, ocorre um colapso na disponibilidade hídrica, o qual pode ser tratado com medidas reativas, tais como a perfuração de poços artesianos e o transporte de água emergencial por caminhões-pipa. Estas atividades costumam ser conduzidas de forma dissociada e empírica, além de carecerem de técnicas de logística humanitária relativas à otimização e auxílio à tomada de decisões. A presente dissertação tem por objetivo propor um procedimento que integre a logística do processo de distribuição de água na região do semiárido brasileiro ao planejamento de obras de perfuração de poços, visando o aumento da eficiência do processo de atendimento às comunidades atingidas pela seca. A metodologia está dividida em duas etapas principais. Na primeira etapa, foram investigadas potenciais zonas de ocorrência de poços produtivos em aquíferos fissurais livres, desenvolvendo-se um modelo prospectivo de regressão cujos parâmetros foram calibrados em função de análises fotogeológicas, cartográficas e geofísicas. Na segunda etapa, foram aplicadas heurísticas e metaheurísticas para resolver o problema de distribuição de água pelos carros pipa, o qual é classificado como o Problema de Roteirização de Veículos com Múltiplos Depósitos (PRVMD). Os resultados obtidos da análise das perfurações realizadas, bem como os obtidos na etapa de roteirização aplicada em um cenário real contendo 1.070 pontos de demanda e 16 mananciais, indicam que o procedimento proposto é eficaz de subsidiar melhores decisões em resposta à mitigação dos efeitos da seca, promovendo uma distribuição de água mais eficiente, econômica e equitativa para a população.

Palavras-chave: Aquífero fraturado; SIG; Seca; PRVMD.

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

The United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR, 2009) considera desastre como uma grave perturbação do funcionamento de uma comunidade ou de uma sociedade, envolvendo perdas humanas, materiais, econômicas ou ambientais de grande extensão, cujos impactos excedem a capacidade da comunidade ou da população afetada de arcar com seus próprios recursos. O acontecimento e o prevalecimento de um determinado desastre natural são provenientes de três variáveis, as quais apresentam características básicas: risco (fenômeno natural, tais como terremoto, tufão ou erupção vulcânica, secas); exposição (infraestrutura, edifícios, seres humanos e outras entidades expostas aos riscos) e vulnerabilidade (propensão a sofrer perdas) (UITTO, 1998).

Segundo MARCELINO (2006), os desastres naturais estão associados aos termos perigo, vulnerabilidade e risco. O perigo seria o processo ou evento que ocorre naturalmente ou induzido pelo homem com potencial de gerar danos e prejuízos. A vulnerabilidade é a extensão dos danos e prejuízos potenciais de dados de um ou vários elementos em uma área afetada por um perigo, dependendo das condições sociais e econômicas. O risco está relacionado com a probabilidade das consequências danosas ou perda esperada de vidas, feridos, propriedades e atividades econômicas e/ou ambientais afetadas, resultantes da interação entre perigo e vulnerabilidade. Sendo assim, pode-se dizer que o risco está diretamente relacionado com o perigo e a vulnerabilidade.

Segundo VAN WASSEHOVE (2006), os desastres podem ser classificados de acordo com sua origem (natural ou antropogênica) ou com sua evolução (início lento ou repentino).

A seca, identificada como um desastre natural do tipo lento, corresponde a um dos desastres naturais mais onerosos, com impactos desastrosos na sociedade e ecossistemas, a exemplo da ocorrida nos EUA em 2012 e a na África Oriental 2010/2011, levando a perdas econômicas substanciais e fome em todo o mundo (HAO et al. 2017). O evento pode ser definido como um fenômeno climático recorrente, que resulta da redução das chuvas, tornando

Comentado [ye1]: UNISDR (2009), *Terminology on Disaster Risk Reduction*, United Nations, Geneva.

Comentado [ye2]: UITTO, J.I. The geography of disaster vulnerability in megacities: a theoretical framework. *Applied Geography*, v. 18, n° 1, p: 7-16, 1988

Comentado [ye3]: MARCELINO, E. V; NUNES, L. H; KOBAYAMA, M. (2006). "Mapeamento de Risco de desastres naturais do estado de Santa Catarina". *Caminhos da Geografia (UFU)*, Uberlândia, v.7, n.17, p. 72-84.

Comentado [ye4]: Van Wassenhove, L.N., 2006. Blackett memorial lecture: Humanitarian aid logistics: Supply chain management in highgear. *Journal of the Operational Research Society* 57, 475–489.

Comentado [ye5]: HAO, Z.; HAO, F.; SINGH, V. P.; OUYANG, W.; CHENG, H. An integrated package for drought monitoring, prediction and analysis to aid drought modeling and assessment. *Environmental Modelling and Software*, v. 91, p. 199-209, 2017.

a água disponível insuficiente para atender às necessidades de seres humanos e ecossistemas (ORTEGA-GAUCIN; LÓPEZ PÉREZ; ARREGUÍN, 2016).

Apesar da crescente natureza severa da seca em muitas regiões do mundo, a abordagem de gerenciamento deste tipo de desastre ainda carece de medidas que mitiguem ou impeçam que as mesmas ocorram (JACOBS et al., 2016; WILHITE et al., 2014, FINNESSEY et al., 2016). As operações de resposta a desastres lentos, tais como a seca, não recebiam tanta cobertura da mídia e, portanto, não provocavam níveis mais altos de solidariedade. Esses tipos de desastres também não costumavam atrair tanta atenção do meio acadêmico, faltando assim pesquisas sobre o assunto (LONG e WOOD, 1995). No entanto, com o crescente aumento da gravidade dos desastres lentos, as pesquisas relacionadas à mitigação de seus impactos vêm se desenvolvendo, sendo que as principais abordagens de solução estão ligadas ao gerenciamento de desastres por meio do emprego de técnicas de otimização e de tomada de decisão (BOONMEE et al., 2017).

Nesse sentido, as estratégias de gerenciamento da seca que vem sendo desenvolvidas visam desenvolver métodos, técnicas e meios práticos para alcançar a sustentabilidade do ecossistema no período de deficiência hídrica. O objetivo destas estratégias é o de amortecer os efeitos perigosos da seca em seres humanos, meios de subsistência e outros componentes ambientais, e abrangem três componentes vitais: avaliação e monitoramento da intensidade da seca; declaração de seca e priorização de áreas para gerenciamento de seca; e desenvolvimento e implementação de estratégias de mitigação da seca (NDMA, 2010).

Na seara da estratégias de gerenciamento da seca, a perfuração de poço artesanais em áreas afetadas pela seca se constitui em uma das práticas estruturais de redução de risco mais comumente adotadas pelos gestores de terras áridas. Conforme as características de localização, quantidade e qualidade da água obtida em um determinado poço perfurado, esta estrutura poderá ser empregada como um manancial para a distribuição de água à população, seja localmente, seja até distâncias maiores, por meio do transporte emergencial de água por caminhões-pipa. Assim, de acordo com fatores como a localização de um determinado manancial, a proximidade destes aos pontos de demanda e a maneira como a água será distribuída, os custos logísticos e nível de serviço de atendimento à população sofrerão alterações.

Quanto ao processo localização de possíveis mananciais, em regiões de seca as águas subterrâneas das quais se obtém os poços artesanais ocorrem predominantemente em bacias hidrográficas inseridas em terreno de rocha cristalina (NAG, 2016; SINGH et al., 2019).

Comentado [ye6]: ORTEGA-GAUCIN, D.; LÓPEZ PÉREZ M.; ARREGUÍN, C. F. I. Drought Risk Management in Mexico: Progress and Challenges. *International Journal of Safety and Security Engineering*, v. 6, n. 2, p. 161-170, 2016.

Comentado [ye7]: B. Jacobs, L. Boronyak-Vasco, K. Moyle, P. Leith, Ensuring resilience of natural resources under exposure to extreme climate events, *Resour. Basel* 5 (2) (2016), D.A. Wilhite, M.V.K. Sivakumar, R. Pulwarty, Managing drought risk in a changing climate: the role of national drought policy, *Weather Clim. Extremes* 3 (2014) 4–13, T. Finnessey, M. Hayes, J. Lukas, M. Svoboda, Using climate information for drought planning, *Clim. Res.* 70 (2–3) (2016) 251–263

Comentado [ye8]: Long, D.C. and Wood., D.F., 1995, "The logistics of famine relief", *Journal of Business Logistics*, Vol. 16 No. 1, pp. 213-230.

Comentado [ye9]: Chawis Boonmee, Mikiharu Arimura, Takumi Asada, Facility location optimization model for emergency humanitarian logistics, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Volume 24, 2017, Pages 485-498

Nestes tipos de rochas, a água subterrânea ocorre em sistemas de fendas e fraturas interconectadas, descontínuas e com extensão limitada. As abordagens usualmente utilizadas para prospecção de água subterrânea nesses locais ainda carecem de fundamentação técnico-científica, refletindo-se na grande quantidade de poços improdutivos ou salinizados, não sendo conhecidos modelos totalmente eficientes para subsidiar a locação e a exploração de poços (CPRM, 2001). Dessa maneira, surge a necessidade do desenvolvimento de novas abordagens que possam contribuir efetivamente para aumentar o índice de sucesso na obtenção de poços produtivos, ampliando a oferta de água existente e, conseqüentemente contribuindo para a otimização na aplicação dos recursos financeiros destinados ao combate à seca em regiões semiáridas.

Além disto, um problema recorrente no processo de combate a seca está relacionado à distribuição de água potável, uma vez que os programas de abastecimento de água para populações difusas ainda carecem de capacidade para atender às demandas atualmente observadas (GUTIÉRREZ et. al, 2014).

Nesse contexto, a presente dissertação possui como tema a proposta de novas abordagens de solução para os processos de distribuição de água e atividade de locação de poços artesianos em regiões afetadas pela seca. O problema a ser resolvido é o aumento da eficiência do processo de atendimento às comunidades atingidas pela seca no semiárido nordestino, e como hipótese de solução pretende-se verificar se a integração do planejamento logístico ao planejamento e controle de obras de perfuração de poços artesianos levará a um maior nível de serviço no atendimento à população, com a redução de custos da operação.

1.2 OBJETIVO

Esta dissertação tem como objetivo geral desenvolver um procedimento para o planejamento e controle de obras de perfuração de poços artesianos e a distribuição da água obtida a vítimas de seca, visando aumentar o sucesso na locação dos poços artesianos e a eficiência logística do processo de atendimento às comunidades atingidas pela seca.

Objetivos secundários:

a) definir um método para planejamento da locação de poços artesianos, considerando a análise de parâmetros de eletroresistividade que, associados aos geológicos, estejam relacionados à

ocorrência de água, de modo a aumentar o sucesso deste processo e aumentar a eficiência o controle deste tipo de obra;

b) avaliar métodos de roteirização de carros pipa para realizar o transporte de água potável entre mananciais e pontos de abastecimento e comparar seus resultados através de experimentos computacionais;

c) propor um procedimento para planejamento de obras de perfuração de poços artesianos e distribuição da água coletada às vítimas da seca, validando-o por meio de aplicação em um caso real do semiárido do Nordeste brasileiro.

1.3 JUSTIFICATIVA

A intensificação das mudanças climáticas em muitas regiões do planeta, tem aumentado a importância de medidas por maior resiliência aos impactos esperados pela estiagem, tais como a construção de cisternas para coleta de água das chuvas, construção de barragens e estações de bombeamento, além dos mecanismos de redes de segurança social, como a distribuição de água motorizada, perfuração e recuperação de poços (GUTIÉRREZ et al., 2014). Mitigar as consequências negativas de crises como as secas, portanto, tem sido um desafio em muitas regiões do mundo, especialmente em áreas altamente vulneráveis, insuficientemente estruturadas para lidar com crises hídricas.

Sob o foco da logística humanitária em cenários de seca, WILDMAN (2012) aponta o transporte de água por caminhões-pipa como uma das estratégias de mitigação possíveis. Tal intervenção, destaca o autor, deveria ser tipicamente de curto prazo, empregada para salvar vidas, cobrir interrupções no serviço de água ou de acesso a quantidades suficientes de água para atender aos requisitos de sobrevivência. Assim, quando usado apropriadamente, desempenha um papel legítimo de resposta, a exemplo do que ocorre nas Terras Áridas e Semi-Áridas da África Oriental e no Brasil.

No entanto, nestes mesmos locais, o transporte de água por caminhões pipa pode frequentemente desempenhar um papel muito diferente, agindo como um mecanismo estabelecido na vida cotidiana de uma grande porcentagem da população. Nestes casos, a medida torna-se uma intervenção humanitária quase que anual entre organizações humanitárias

e governos, favorecendo a existência de um mercado comercial robusto de caminhões de água em muitas áreas para atender populações que não dispõem de fonte de água permanente.

Dessa forma, além da escassez de água induzida pelo clima, vários outros fatores impulsionam o transporte de água por caminhões-pipa (WILDMAN, 2012):

- a) padrões de assentamento deficientes, impulsionados por interesses políticos de políticos;
- b) criação de muitos novos Distritos, necessitando do estabelecimento de novos centros administrativos mesmo em locais sem fontes confiáveis de água;
- c) interesses comerciais de empresários;
- d) falta de estratégias de longo prazo para investir em fontes de água confiáveis / adequadas nas Terras Áridas e Semi-Áridas;
- e) síndrome de dependência por parte das comunidades.

Assim, o transporte de água emergencial para populações afetadas pela seca pode se tornar uma intervenção cíclica, à medida que os padrões de chuva nessas áreas se tornaram cada vez mais imprevisíveis. Além de caro e insustentável, o transporte cíclico de água está sob crescente escrutínio, pois cada vez mais parece ter impactos negativos nos meios de subsistência pastorais, mecanismos de enfrentamento existentes em tempos de escassez de água e inflação no preço da água (WILDMAN, 2012).

Nesse contexto, dois campos da Ciência deverão ser levados em conta na busca por soluções ao problema proposto:

- a) métodos geofísicos e de geoprocessamento aplicáveis à prospecção de água em aquíferos subterrânea, fonte de obtenção dos poços artesianos aplicáveis como mananciais,
- b) problemas de otimização combinatória relacionados à roteirização de veículos, aplicáveis no contexto de distribuição de água em cenário de seca.

Em auxílio à correta escolha de pontos candidatos a perfuração, o método da eletroresistividade, por meio de suas duas principais técnicas de investigação em superfície – sondagem elétrica vertical e caminhamento elétrico – é seguramente aquele que encontra maior abrangência nas aplicações voltadas à geologia (hidrogeologia, mapeamento, mineração), engenharia civil e estudos ambientais em geral, oferecendo vantagens quanto à rapidez, custo e resultados satisfatórios, **comprovados em inúmeros estudos em todo o mundo** (GANDOLFO, 2007). Assim, o uso da geofísica para mapeamento de aquíferos e avaliação de qualidade da

Comentado [O10]: Esta afirmação é um pouco forte, foi feita por GANDOLFO (2007)? Se positivo, alteramos a posição da citação. Caso contrário, adicionar mais referências, pelo menos 3.

água tem crescido devido a grande parte aos resultados positivos alcançados, associado ao avanço nas soluções de modelamento numérico (SOARES de SÁ, 2017).

Além disto, busca-se aplicar conceitos logísticos ao planejamento de obras através da aplicação ferramentas de otimização, como métodos exatos, heurísticas e metaheurísticas para a alocação dos pontos de demanda aos mananciais e para roteirização da frota adotada para a distribuição da água às comunidades assistidas. Nos últimos anos, métodos matemáticos exatos, heurísticos e mais recentemente metaheurísticos foram propostos para resolução do PRV, bem como das variantes deste problema (LAPORTE, 2009). Embora técnicas exatas resolvam o PRV de maneira satisfatória, uma vez que este é classificado como NP-difícil, não se conhece algoritmo computacionalmente eficiente para sua resolução, e sua solução de forma manual ou sem utilização de métodos e ferramentas adequadas apresenta uma baixa eficiência, especialmente quando avaliados problemas de dimensão real (large-size), como é o caso deste trabalho. Neste caso, recomenda-se o uso de técnicas heurísticas e metaheurísticas (BRÄYSY e GENDREAU, 2005; LAPORTE, 2009), por conta do alto tempo computacional despendido pelas técnicas exatas para resolução do problema.

Assim, é essencial analisar o emprego de métodos geofísicos para a locação de poços, não sendo repetitivos os estudos de casos, uma vez que a geologia em geral contém situações bastante particulares e muitas vezes complexas. Portanto, quanto mais situações forem estudadas, maior será o nível de conhecimento proporcionado ao meio acadêmico e técnico, o que pode aumentar a probabilidade de acertos ao se utilizar tecnologias de prospecção mais adequadas ao estudo de aquíferos fraturados.

Atualmente, a distribuição de água potável é responsabilidade do Governo Federal e se dá através da Operação Carro-Pipa (OCP), programa que atende os estados brasileiros afetados pela seca. Porém, o uso dos carros-pipa, transporte comumente empregado na mitigação dos efeitos da seca brasileira, tem-se mostrado insuficiente para sanar a demanda de água da população em situação de emergência (CGEE, 2016). Embora esta operação disponha de sistema informatizado que cadastra e monitora a entrega de água, este se limita a verificar a confirmação da entrega da água ao destinatário no ponto final, inexistindo uma metodologia que oriente os gestores na escolha de mananciais e definição de rotas que conciliem as prioridades operacionais da ajuda humanitária à necessidade de eficiente aplicação dos limitados recursos disponíveis. Ainda, as distâncias de transporte de água cada vez maiores, aliadas às peculiaridades da metodologia empregada na sua distribuição, constituem óbices ao

enfrentamento da seca no país, cujo contexto específico carece de abordagem sob o foco da logística humanitária.

Por tal caracterização e importância, é necessário desenvolver um procedimento para estruturação do processo de distribuição de água, em atendimento às comunidades do semiárido brasileiro. Portanto, esta dissertação propõe um procedimento que segue uma nova abordagem de solução à logística da operação em cenários de seca, permitindo quantificar os benefícios da diminuição das distâncias de deslocamento praticadas entre mananciais e pontos de abastecimento, redimensionando o quantitativo de frota empregada e abrindo a possibilidade de ampliação da rede de atendimento, em face da maior efetividade dos recursos aplicados. Espera-se que os estudos relacionados ênfase sobre como os investimentos podem ser mais bem aplicados para alcançar comunidades rurais dispersas afetadas pelas secas pode melhorar as políticas sociais e os mecanismos de alívio que fornecem assistência equitativa a essas populações vulneráveis.

2 PROCEDIMENTOS PROPOSTOS PARA AS ATIVIDADES DE LOCAÇÃO DE POÇOS E DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Os procedimentos propostos na presente dissertação buscam, em uma primeira etapa, definir áreas-alvo nas quais se realizarão os ensaios de prospecção de água subterrânea, empregando, para isso, produtos de sensoriamento remoto e métodos de investigações geofísicas para identificação dos pontos candidatos para perfuração de poços.

Em uma segunda etapa, utilizando os mananciais existentes e novos mananciais definidos na primeira etapa e os pontos de demanda de água às comunidades atendidas pela OCP, resolve-se um Problema de Roteirização de Veículos com Múltiplos Depósitos (MDVRP), por meio do qual são definidas as correspondências de abastecimento entre mananciais e pontos de demanda, bem como as rotas de entrega de água a serem percorridas pelos veículos.

O fluxograma da Figura 4.1 tem por objetivo ilustrar a sequência destes procedimentos, uma vez diagnosticado o cenário de seca. Assim, a cronologia dos eventos pode ser resumida como se segue: com o “início ou agravamento da seca”, realiza-se a atividade de “cadastro dos Pontos de Abastecimento (PA)” que estão dispersos ao longo das zonas rurais afetadas, identificando assim a demanda a ser atendida. Tal atividade é sucedida pelo

“inventário dos mananciais existentes”, compostos em geral por açudes ou fontes subterrâneas de água que possuam oferta hídrica adequada durante todo o ano.

Se existe a “necessidade de inclusão de novos mananciais”, então investiga-se prováveis pontos de perfuração de novos poços artesianos pela atividade de “determinação matemática de pontos candidatos à perfuração de poços”, fazendo-os corresponder o mais próximo possível das concentrações de demanda cadastradas. Esta etapa visa a calibração de um modelo matemático em auxílio à locação de poços, considerando o processo iterativo entre levantamento cartográficos, sensoriamento remoto, geofísica terrestre e perfuração de poços teste.

Uma vez calibrado o modelo matemático, realiza-se a seleção de uma área-alvo, a qual deverá ser submetida a ensaios geofísicos adicionais para confirmação de chances de ocorrência de água subterrânea. Se a “perfuração é recomendada”, então se executa a atividade de “realizar perfurações” nos locais indicados. Os valores de vazão obtidos nessa fase indicarão se nos pontos perfurados ocorrerá ou não a instalação dos poços. Em caso positivo, o poço é instalado e é realizada a atividade de “atualização do inventário de mananciais”. Em caso negativo, a água obtida nesses poços artesianos poderá ser empregada localmente pela população para destinos complementares que não sejam o consumo humano e preparo de alimentos.

Para realizar a distribuição de água, executa-se a atividade de “aplicar algoritmo de roteirização”, que é resolvido como um Problema de Roteirização de Veículos com Múltiplos Depósitos em duas etapas. Na primeira etapa, é modelado como um Problema de Transportes, utilizando Programação Linear (Seção 4.6). O resultado indica as quantidades de água a serem transportadas entre mananciais e centros de demanda dos municípios a serem abastecidos. Na segunda etapa, são resolvidos os Problemas de Roteirização de Veículos para cada manancial, utilizando um método heurístico e duas meta-heurísticas, a ALNS (PISINGER e ROPKE, 2007) e MACS-RVND (SILVA JUNIOR e LEAL, 2020). Estes algoritmos buscam por rotas que reduzam o custo de transporte e que os veículos atendam, preferencialmente, mais de um ponto de demanda, respeitando as necessidades de consumo per capita, regime de funcionamento dos mananciais e segurança na jornada de trabalho dos motoristas. Finalmente, o procedimento termina.

Os procedimentos propostos, aqui descritos resumidamente, serão mais bem detalhados nas seções a seguir. As numerações destas seções encontram-se inseridas também no fluxograma, permitindo assim o acompanhamento de ocorrência de cada etapa a ser descrita.

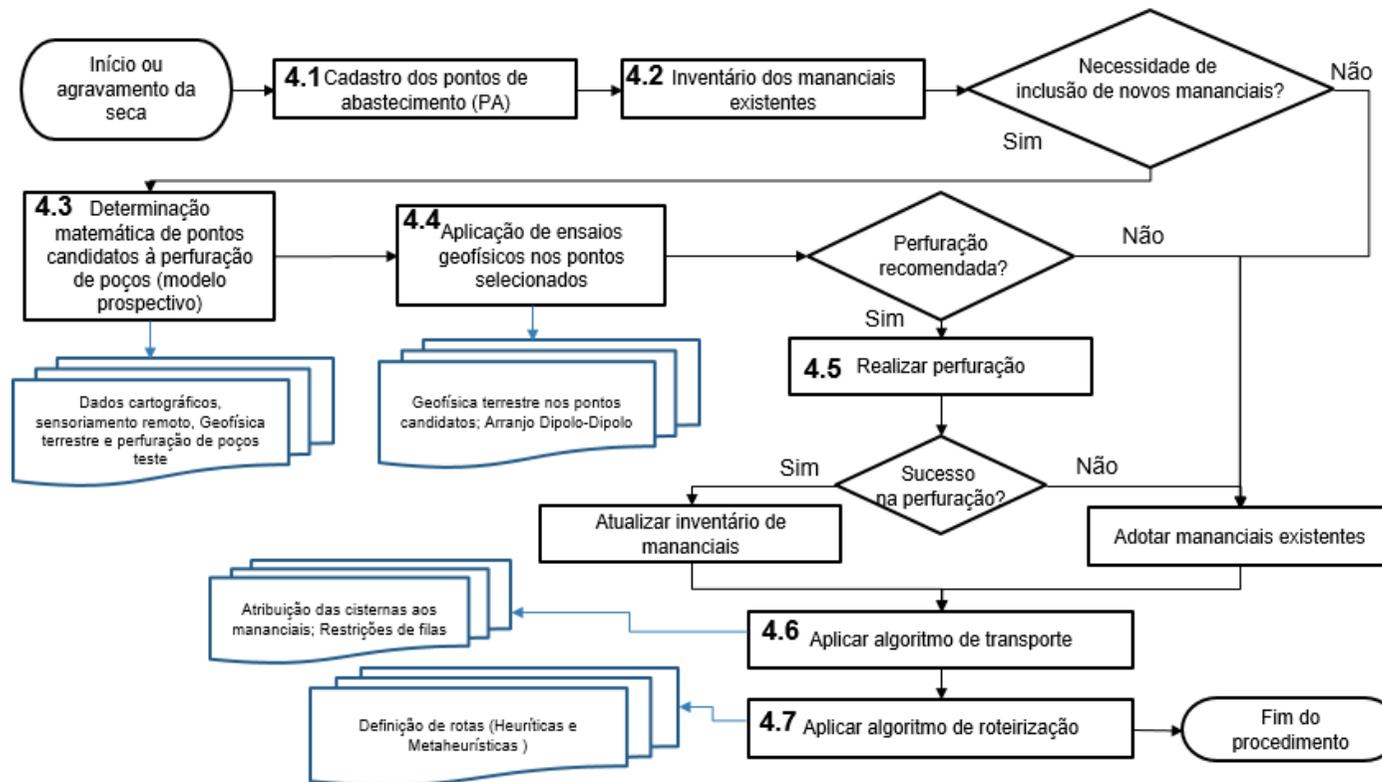


Figura 2.1 Fluxograma dos procedimentos propostos

3 APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE PERFURAÇÃO DE POÇOS E DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA: O CASO DA OPERAÇÃO CARRO PIPA

Este capítulo destina-se à aplicação do procedimento de perfuração de poços e distribuição de água às vítimas da seca, seguindo os passos previamente descritos na seção de metodologia. Inicialmente, será apresentada a área geral de estudo e as medidas adotadas pelas autoridades visando mitigar o efeito da seca na região, com especial foco na distribuição de água emergencial. Em seguida, será feita a delimitação de uma região específica, a partir da qual os experimentos foram conduzidos. Os resultados destes experimentos são apresentados neste capítulo conforme a sequência em que se desenvolve o modelo proposto (Fluxograma da Figura 4.1).

3.1 ÁREA DE ESTUDO E APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

A região de estudo está inserida na região nordeste do Brasil, situada entre 1° e 18°30' de latitude Sul e 34°30' e 40°20' de longitude Oeste de Greenwich. Sua área, que é de 1.219.000 km², representa aproximadamente um quinto de todo o território nacional, incluindo nove estados (Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia). Habitam a região 18,5 milhões de pessoas, das quais 8,6 milhões estão na zona rural. A Figura 3.1 apresenta os limites dos municípios inseridos no delineamento do nordeste semiárido.



Figura 3. 1 Região semiárida brasileira (LIMA et al, 2019)

Grandes áreas da região semiárida do Brasil sofreram uma seca severa e prolongada entre 2010 e 2017. Essa seca, bem como as que atingiram o sul do país nos últimos anos, provocou novas discussões em busca de melhorias nas políticas de gestão de secas nos níveis federal e estadual.

3.2 APLICAÇÃO “DETERMINAÇÃO MATEMÁTICA DE PONTOS CANDIDATOS À PERFURAÇÃO DE POÇOS”

Para a criação do modelo matemático, foram inicialmente elencadas as variáveis explicativas que teoricamente podem influenciar no processo de circulação e armazenamento de água em meios fissurais, extraídos de literatura sobre o tema (ABUZIED e ALREFAEE 2017; FEITOSA, 2008; MADRUCCI et al., 2008; BRANDÃO e GOMES, 2003; GUPTA; 2003), tendo sido considerados neste trabalho, em um primeiro momento, os aspectos de litologia em subsuperfície, declividade do terreno, densidades de drenagem superficial e de lineamentos estruturais locais e regionais, bem como distância dos pontos de perfuração ao elementos estruturais

Comentado [O11]: Organizar as referências. Por exemplo: Qual é o ano de publicação de ABUZIED? Se for 2017, coloca do lado o ano. Agora se são 2 autores, ABUZIED; ALREFAEE, então separa ambos por "e" e não por ";".

3.2.1 APLICAÇÃO “LEVANTAMENTOS CARTOGRÁFICOS E APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO”

A etapa de levantamentos cartográficos e aplicação de técnicas de sensoriamento remoto se deu no contexto de resultados de vazão obtidas em 113 perfurações executadas pelo Exército Brasileiro em região de clima semiárido (Figura 5.9). Naquela ocasião, O Exército Brasileiro, em parceria com o Ministério da Integração Nacional, executou a perfuração de poços artesianos com objetivo de aumentar a disponibilidade de água e prover segurança hídrica à população do semiárido brasileiro (EXÉRCITO BRASILEIRO, 2018)

Na Figura 3.2., verifica-se a distribuição geográfica dos 113 poços artesianos analisados (pontos em azul), os quais se inserem no contexto geológico da província da Borborema, abrangendo o Domínio Ceará Central (DCC), Domínio Jaguaribeano (DJ) e Domínio Rio Piranhas-Seridó (DPS), ocupando uma extensa área na porção central-sul do Estado do Rio Grande do Norte, Ceará e Paraíba, e contendo diversas litologias.

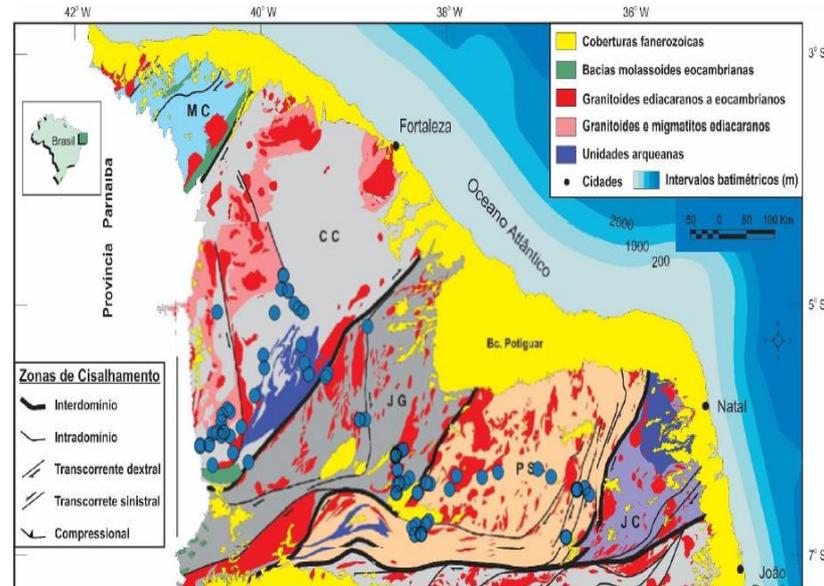


Figura 3. 2 Domínio Piranhas-Seridó (DPS) no contexto da Província Borborema (Adaptado de MEDEIROS et al., 2005)

3.2.1.1 SUBETAPA “ESTUDOS REGIONAIS”

Após determinados os domínios geológicos em que estão inseridos os 113 poços em análise, em seguida foram gerados os levantamentos em escala 1:100.000, buscando a avaliar distribuição espacial dos parâmetros preditores de ocorrência de água subterrânea que foram selecionados. Com esta finalidade, foram utilizadas, como bases cartográficas, as cartas de integração geológica geofísica do banco de dados corporativo (Geobank) da CPRM (Serviço Geológico do Brasil) e os dados hipsométricos constantes do banco de dados do INPE (2019). Dentre os produtos de sensoriamento remoto empregados no estudo, empregaram-se as informações obtidas da *Shuttle Radar Topography Mission – SRTM* (Missão Topográfica de Radar Transportado), disponíveis no site da *National Aeronautics and Space Administration – NASA*, com resolução espacial de 30 metros (NASA, 2019). A Figura 3.3 ilustra os resultados de seleção de uma das áreas de pesquisa avaliadas no estudo.

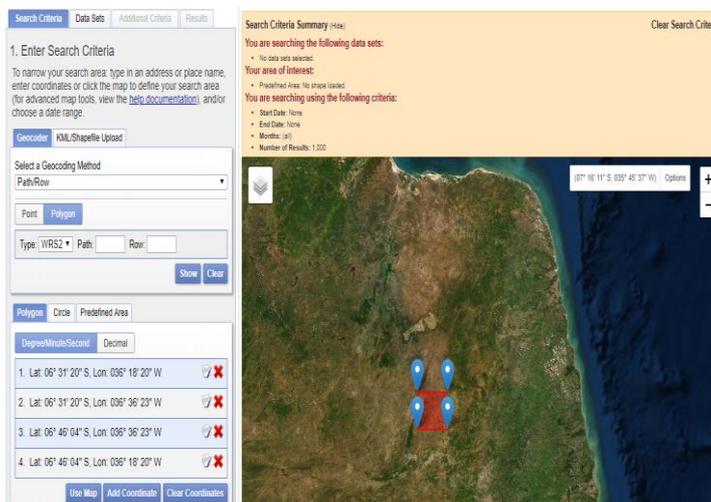


Figura 3. 3 eleição da área de uma das áreas de pesquisa no site Earth Explorer – USGS

Assim, de posse das representações cartográficas e dos produtos do sensoriamento remoto, foram elaborados, com o auxílio do software de geoprocessamento QGIS (Versão 2.8.9), mapas temáticos e modelos sombreados que auxiliaram na extração e vetorização das feições geomorfológicas presentes na área de estudo.

Os processos acima descritos foram executados em escala 1:100.000 em todas as zonas alvo onde os 113 poços se localizam, compreendendo os estados do Ceará, Paraíba e Rio Grande do Norte. O produto final em cada um destes setores é o exemplificado na Figura 3.4, correspondente à Folha CAICÓ (SB.24-Z-B-I).

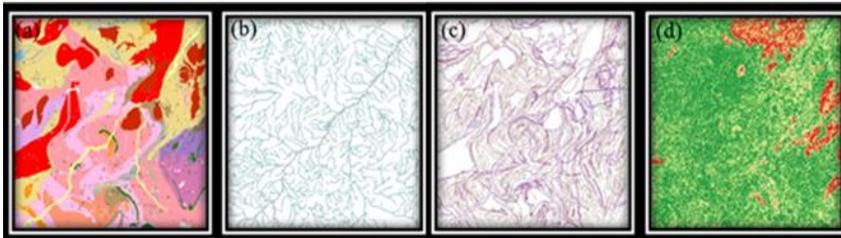


Figura 3.4 Resultados em escala 1:100.000 das variáveis independentes avaliadas (a):Litotipos predominantes; (b): Drenagem superficial; (c): Lineamentos estruturais; (d): Declividade

3.2.1.2 SUBETAPA ESTUDOS LOCAIS

O próximo passo executado foi o de estudos regionais, utilizando-se das ferramentas de estatística espacial do SIG para a obtenção dos valores de densidade de drenagem (km/km^2) e de lineamentos estruturais (km/km^2). Estes procedimentos foram realizados por meio da ferramenta *LineDensity* do software *ArcMap*. Esta permitiu calcular a densidade das formas lineares nas redondezas de cada célula (pixel) do raster de saída. A densidade é calculada em unidades de comprimento por unidade de área (km/km^2).

Dessa maneira, as variáveis explicativas citadas no subitem anterior foram subdivididas em classes, de acordo com os seus aspectos de favorabilidade de ocorrência de água subterrânea, e os resultados estão apresentados na Tabela 3.1. Os litotipos predominantes foram agrupados e classificados em sua ocorrência de acordo com a escala apresentada em FEITOSA

(2008), ao passo que as densidades de lineamentos estruturais e de drenagem superficial foram divididas em cinco classes ordinais, com pesos variando de um a nove, seguindo o proposto por ABUZIED e ALREFAEE (2017), e adaptando-se os intervalos numéricos de classe de acordo com os valores médios de densidades de lineamentos e de drenagem superficial identificados nas áreas de perfuração dos 113 poços. As categorias de declividade do terreno, por sua vez, correspondem à classificação estabelecida pela EMBRAPA (1979).

Adicionalmente, optou-se por verificar a influência que a proximidade do ponto de perfuração em relação aos contatos geológicos e lineamentos estruturais possui sobre produtividade dos poços. Estabeleceu-se para este fim, com auxílio do QGIS, um *buffer* circular de 100 metros de raio, reduzindo-se a distância analisada em MADRUCCI et al. (2008) para os aquíferos cristalinos no estado de São Paulo, que foi de 250 metros. Esta modificação foi adotada em consideração aos menores índices pluviométricos constatados na região nordeste e suas implicações no acúmulo de águas subterrâneas em aquíferos fissurais, bem como para garantir que a área-alvo de locação do poço esteja contida no raio de ação do equipamento de prospecção geofísica, o qual buscará confirmar a existência de fraturas na rocha.

Tabela 3. 1 Resultado da divisão das variáveis independentes em classes, conforme potencial teórico de acumulação de água subterrânea

Variável	Classes	Descrição/intervalos	Potencial teórico de acumulação de água subterrânea	Peso atribuído
Litotipo predominante	1	Granitoides não deformados / quartzodioritos/granodioritos/corpos tabulares de granito	Muito ruim	3
	2	Paragneisse/granodioritos e granitos porfiríticos gnaissificados	ruim	4
	3	Ortogneisses fortemente bandados/migmatitos paraderivados/calçissilicáticas	Moderado	5
	4	Xistos/quartzitos/biotite-gnaisses/metacalcários	Bom	6
	5	Aluviões	Muito bom	9
Densidade lineamentos (Km/Km ²)	1	0-0,490	Muito ruim	1
	2	0,490-0,980	ruim	3
	3	0,980-1,470	Moderado	5
	4	1,470-1,960	Bom	7
	5	>1,960	Muito bom	9
	1	0-0,452	Muito ruim	1
	2	0,452-0,904	ruim	3

Densidade drenagem superficial (Km/Km ²)	3	0,904-1,356	Moderado	5
	4	1,356-1,808	Bom	7
	5	>1,808	Muito bom	9
Declividade	1	0-2% Plano	Muito bom	1
	2	2%-5% Suave ondulado	Bom	3
	3	5%-10% Ondulado	Moderado	5
	4	10%,-15% Moderadamente ondulado	Ruim	7
	5	15%-45% Forte ondulado	Muito ruim	9
Distância do ponto de perfuração ao lineamento mais próximo	1	<100m	Favorável	1
	2	>100m	Desfavorável	0

Após identificados, para cada um dos 113 poços em estudo, os valores de classes correspondentes às quatro variáveis explicativas elencadas, estes foram submetidos aos testes estatísticos qui-quadrado e de correlação, com o intuito de confirmar quais variáveis de fato exerceram influência sobre a produtividade dos poços analisados. Concluída esta etapa, desenvolveu-se o modelo prospectivo sob a forma de regressão logística, seguindo a expressão matemática apresentada na equação (3.1).

As vazões de produção dos poços estudados foram categorizadas em seis classes de produtividade, de acordo com divisão estabelecida em FEITOSA (2008). Com o objetivo de confirmar se há relação entre as classes de produtividade dos 113 poços perfurados e as variáveis de decisão descritas na Tabela 3.1, foram realizados os testes qui-quadrado e o de correlação de *Spearman*.

A identificação das variáveis explicativas relevantes, apontadas na Tabela 3.1, permitiu estabelecer um modelo preditor preliminar de ocorrência de água subterrânea, por meio da regressão logística binomial. Dessa maneira, atribuindo-se o valor 0 (zero) aos poços com vazões inferiores a 1m³/h e o valor 1 (um) aos poços com vazões superiores a 1 m³/h, obteve-se a equação (3.1).

$$\hat{p} = \left(\frac{e^{-5,943+0,853*\text{lit}+0,537*\text{lin}+0,101*\text{dren}+2,739*\text{dist}}}{1 + e^{-5,943+0,853*\text{lit}+0,537*\text{lin}+0,101*\text{dren}+2,739*\text{dist}}} \right) \quad (3.1)$$

Onde, classe de vazão = $\begin{cases} 1, \text{ se } \hat{p} \geq 50\% \\ 0, \text{ se } \hat{p} < 50\% \end{cases}$

A equação (3.1) possui como variáveis independentes o litotipo predominante (*lit*), drenagem superficial (*dren*) e densidade de lineamentos (*lin*) e distância do ponto candidato à perfuração ao lineamento estrutural identificado como mais próximo (*dist*). O valor de R^2 de *Nagelkerke* obtido foi de 0,49, de modo que o modelo é capaz de explicar cerca de 50% das variações registradas na variável dependente, ou seja, produção dos poços.

Após obtido o modelo matemático preliminar, é necessário que este seja calibrado, verificando assim a sua aplicabilidade ou necessidade de ajustes. Com esta finalidade, procedeu-se à fase de perfuração de poços testes, auxiliada pelo método geofísico do caminhamento elétrico, cujos resultados são descritos na seção a seguir.

3.3 ETAPA “ENSAIOS GEOFÍSICOS E PERFURAÇÃO DE POÇOS TESTE”

3.3.1 MÉTODO GEOFÍSICO EMPREGADO

As investigações geofísicas de campo ocorreram por meio do método do caminhamento elétrico, usualmente adotado na prospecção de águas subterrâneas por satisfazer a condição básica para identificação de um aquífero, que é a presença de contraste entre as grandezas, delimitando, por exemplo, as zonas de fraturas saturadas em água, vertical e horizontalmente (GIAMPÁ e GONÇALES, 2009).

O arranjo de eletrodos utilizado nesta fase do procedimento foi o Dipolo-Dipolo (D-D), que apresenta resolução aceitável e ao mesmo tempo uma alta velocidade de aquisição de dados (MARTORANA et al., 2017), conforme ilustrado na Figura 3.5.

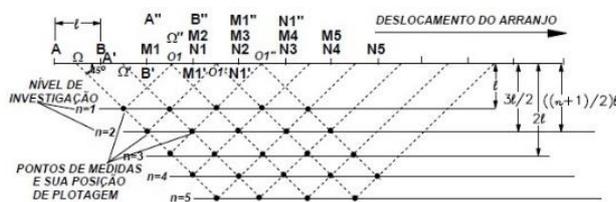


Figura 3.5 Caminhamento Resistividade/Disposição do arranjo dipolo-dipolo

(Gallas, 2000, adaptado de Hallof, 1957)

Para os experimentos realizados com D-D, utilizou-se o equipamento *Supersting R8* (Figura 3.6), com 8 canais, 84 eletrodos e potência de 200W. Cada levantamento apresentou conFigurações específicas de espaçamento de eletrodos e comprimento de linha, o que se deu em virtude das limitações de espaço físico encontradas nos locais, fornecendo profundidades teóricas de investigação de até 70 metros de profundidade.

Os dados de resistividade aparente foram medidos e processados através do software *RES2DINV*, o qual realiza a inversão para dados de eletroresistividade e que possui suporte a dois algoritmos de inversão (robusto e suavidade), permite trabalhar com dados de topografia do terreno e possui interface gráfica amigável. O método adotado na inversão dos dados foi o método de inversão robusta (OLDENBURG e LI, 1999). Tratando-se de uma morfologia irregular, foi aplicada a correção topográfica com base nos dados topográficos levantados sucessivamente à campanha geofísica.



Figura 3. 6 Exemplo de configuração de aparelho resistímetro

3.3.2 PERFURAÇÃO DE POÇOS TESTE

O cálculo do tamanho da amostra de poços a serem perfurados seguiu a Equação (3.1), adotando-se neste trabalho o índice PA de 41% relativo ao sucesso na perfuração com técnicas de locação em campo, conforme resultados obtidos em últimas 113 perfurações realizadas pelo Exército Brasileiro, e o índice PB de 75% de sucesso por meio de método

convencional aliado ao geofísico, valor médio observado dos estudos recentes divulgados em aquíferos fissurais no Brasil (GALLAS e GIARDIN, 2016; SILVA, RODRIGUES e LISBOA, 2018; SA e ELIS, 2016). Dessa maneira, foi obtido um tamanho amostral de 43 poços teste.

As perfurações dos poços foram realizadas utilizando uma broca Prominas modelo R-1S, com capacidade para perfurar poços até 250 metros de profundidade. Na perfuração, 10,1/2'' ou 9,7/8'' bits de diâmetro foram utilizados na fase inicial do poço. Na fase intermediária, foi utilizada broca de 8'' e, na etapa final, 6'' de diâmetro.

Na Figura 3.7 estão apresentadas as seções modeladas, resultantes das pseudo-seções de eletroresistividade, obtidas do software RES2DINV. As interpretações das imagens consideraram o litotipos predominantes da região de estudo, destacados em MEDEIROS et al. (2012) como possuindo a presença de ortognaisses dioríticos a graníticos no Complexo Caicó, e de micaxistos e granada micaxistos na Formação Seridó. De acordo com o formato assumido pelas seções modeladas, alguns pontos específicos da linha de caminhamento foram associados a prováveis fraturamentos e/ou regiões onde há um aprofundamento do topo da rocha sã, e estão representados nas quatro primeiras imagens pelas cores azuis e verdes, possuindo menores valores de resistividade, variando de $6 \Omega.m$ a $300 \Omega.m$. Áreas com elevados valores de resistividade (cores amarelo- avermelhadas nas Figuras) foram associadas a possíveis ocorrências de rochas graníticas/ gnássicas e locais pouco ou nada alteradas (baixo grau de faturamento), variando de $325 \Omega.m$ a *mais de* $5000 \Omega.m$.

Na quinta imagem, referente à comunidade Badarucu, são percebidas menores amplitudes e valores absolutos de resistividade, o que se associou à presença de rochas xistosas alteradas, litotipo bem avaliado quanto ao favorecimento de ocorrência de águas subterrâneas, segundo BRANDÃO e GOMES (2003), e que pode justificar a ótima vazão obtida nesta perfuração. Baixas resistividades ocorrem em camadas superficiais de cerca de 8 m de espessura em todos os perfis estudados, e foram associadas à ocorrência de camadas de solo ou rocha alterada. Em todos os casos, a presença de variações laterais entre zonas fortemente condutivas e zonas resistivas pode ser interpretada como fraturas abertas, com potencial de ocorrência de água subterrânea, ou mesmo como a presença de terrenos soltos argilosos ocupando o espaço gerado pelos falhamentos.

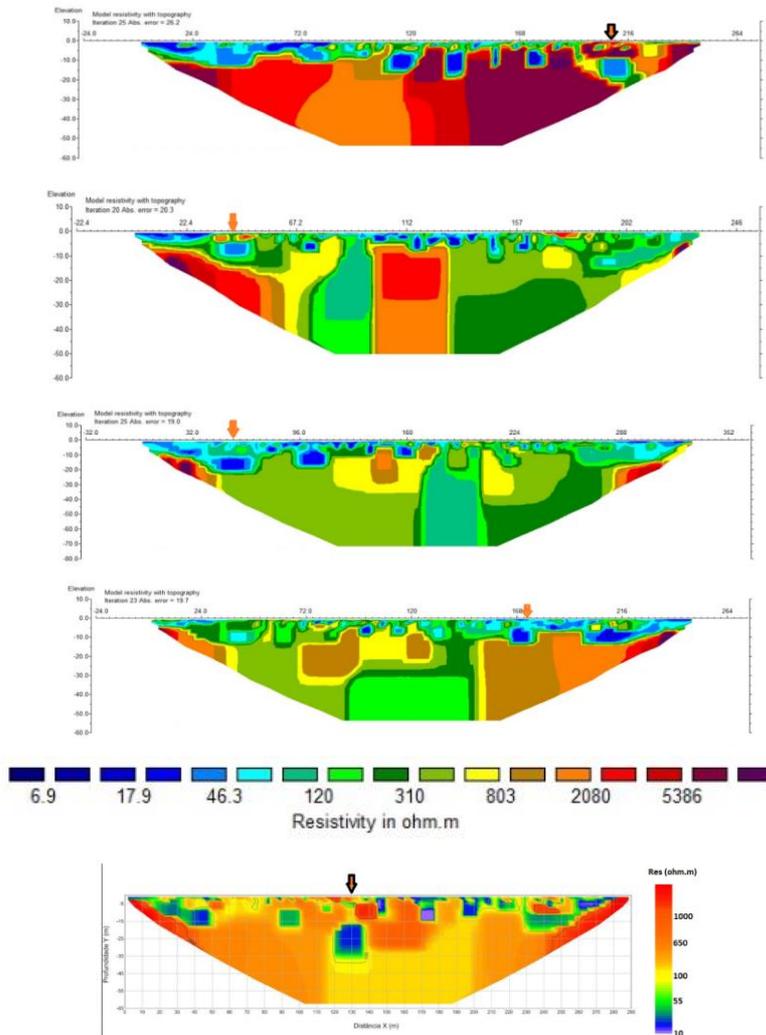


Figura 3. 7 Seções modeladas de resistividade das cinco localidades estudadas, em sequência: 1° BEC;Logradouro;Palma;Cachos e Badarucu.

Considerando a presença de fortes lineamentos estruturais na região, e que houve o cruzamento com os perfis geolétricos executados, decidiu-se pela interpretação da ocorrência de falhamentos nos cinco perfis. Assim, foram escolhidos cinco pontos para perfuração de poços artesianos, representados na Figura 3.7 pelas setas na cor vermelha, e delimitadas da

seguinte maneira: Linha A (1° BEC): ponto 210m. Linha B (Logradouro): ponto 42m. Linha C (Palma): ponto 56m. Linha D (Cachos): ponto 174m. Linha E (Badaruco): ponto 128m.

Após executados os ensaios de eletrorresistividade, foi possível estimar a ocorrência de água subterrânea nas cinco localidades estudadas, confirmadas em quatro das cinco perfurações posteriores, conforme resultados descritos na Tabela 3.2.

Tabela 3. 2 Resultado do método do caminhamento elétrico

Caso	Local	Indicação de Água	Vazão instantânea obtida
1	Quartel do 1° BEC	Sim	3m³/h
2	Logradouro	Sim	4m³/h
3	Palma	Sim	Seco
4	Cachos	Sim	2,5m³/h
5	Badaruco	Sim	10m³/h

Dessa maneira, apenas o localizado na comunidade Palma se revelou improdutivo, pois embora tenham sido identificadas fraturas durante a perfuração, a presença de terrenos soltos argilosos preenchendo os seus espaços inviabilizou a ocorrência de água. Conforme destaca NEVES (2005), as fraturas preenchidas com água ou argila possuem respostas geoeletricas semelhantes, sendo então um risco associado à perfuração, caso os ensaios de eletrorresistividade não sejam acompanhados de investigações adicionais. A obtenção, no entanto, de 4 poços produtivos nas 5 perfurações realizadas, correspondendo ao índice de sucesso de 80%, destaca a eficácia do método geofísico na prospecção de águas subterrâneas em aquíferos fraturados na região em análise.

Para o conjunto dos 43 poços teste, os resultados obtidos pela aplicação da equação (6.1), estão apresentados na Tabela 3.3, e indicam que o modelo de predição estabelecido foi capaz de identificar corretamente 25 dos 31 poços classe 0, correspondendo a um percentual de 76% de acurácia na predição, assim como identificou corretamente a ocorrência de 9 dos 12 poços com vazões superiores a 1m³/s (75% de acurácia), alcançando-se o desempenho global de 79,07%.

Tabela 3. 3 Resumo do modelo obtido

Previstos	Observados	Porcentagem correta
-----------	------------	---------------------

< 1m ³ /h	> 1m ³ /h	< 1m ³ /h	> 1m ³ /h	
25	6	31	12	76,0%
3	9			75,0%
Porcentagem Global				79,07%

Após calibrado o modelo matemático, a próxima etapa consistiu na aplicação deste em uma determinada área-alvo, verificando se o mesmo irá prever a ocorrência de um poço produtivo. Em caso positivo, a depender da vazão obtida, adotar-se-á o mesmo como um dos mananciais da OCP para a região em estudo. Em caso negativo, seja pela obtenção de poço seco, seja pelo baixo valor de vazão, a etapa de roteirização é aplicada com os mananciais inicialmente previstos na primeira etapa do procedimento.

3.4 ENSAIOS GEOFÍSICOS E PERFURAÇÃO DE POÇOS

Nesta etapa do procedimento, a área-alvo selecionada encontra-se no município de Bernardino Batista-PB, tendo sido a escolha realizada em função da elevada taxa de insucessos das perfurações conduzidas naquela localidade, ao se aplicar métodos convencionais de locação. A Figura 3.8 apresenta o resultado das linhas de caminhamento elétrico executadas em campo, para o município de Bernardino Batista-PB. Nesta localidade, as interpretações das imagens consideraram o litotipos predominantes da região de estudo, destacados em MEDEIROS et al. (2005) pela presença de duas áreas bem caracterizadas: a primeira descrita como Suíte intrusiva Itaporanga, com presença de granitos, granodioritos e quartzo monzogranitos porfiríticos (NP3_gamma_2it), e a segunda pertencente ao complexo Jaguaretama, com a predominância local de Ortognaisses graníticos a granodioríticos cinza, migmatizados (PP2j).

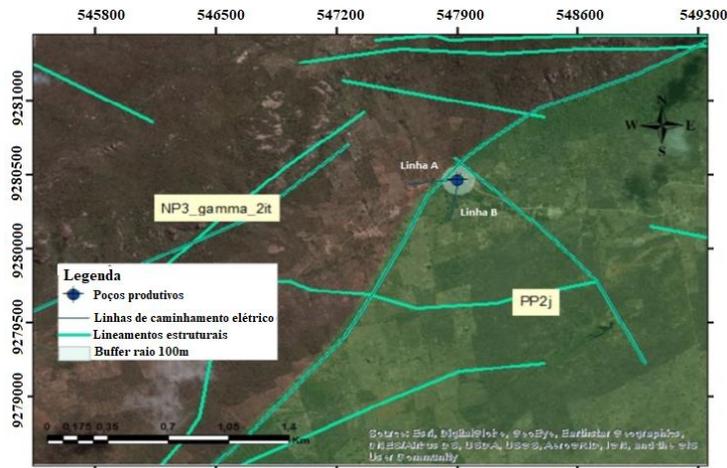


Figura 3. 8 Contexto geológico e disposição das linhas de caminhamento elétrico no município de Bernardino Batista.

Após concluídas as etapas de perfurações de poços, é necessário verificar se as vazões obtidas compensam a utilização destes como fontes mananciais para distribuição de água motorizada. Para o poço perfurado em Bernardino Batista, a vazão obtida foi de 1,4 m³/h, optando-se então pelo seu emprego apenas como fonte de abastecimento local.

No entanto, o levantamento de mananciais da primeira etapa do procedimento permitiu identificar a possibilidade de utilização do manancial *Kero Água*, o qual também se constitui em poço artesiano perfurado por terceiros no Município de Apodi-RN, e que não atende os 1.070 pontos de demanda do estudo de caso. Neste caso, atualizou-se o inventário inicial dos mananciais, incluindo esta nova fonte de água, permitindo assim adotar os procedimentos de roteirização, conforme descrito na seção a seguir.

3.5 RESULTADOS DOS PROCEDIMENTOS DE ROTEIRIZAÇÃO

Os algoritmos foram executados em um computador com um processador Intel Core i3 de 2,00 GHz e 4 GB de RAM rodando no Windows 10. O algoritmo MACS-RVND foi codificado em linguagem Java, enquanto os algoritmos ALNS e Clarke e Wright foram codificados em VBA para Excel. Para o ALNS foi definido o limite de tempo de CPU

recomendado para as soluções do algoritmo ALNS no VRP *Spreadsheet Solver* (ERDOĞAN, 2017), que aumenta de acordo com o número de clientes. Respectivamente, cada instância deste procedimento foi testada cinco vezes, a fim de obter as médias das soluções, e as melhores para análise de GAP. O mesmo número de testes de instância foi realizado para o MACS-RVND, que foi definido para limitar o tempo da CPU de forma similar ao ALNS, aumentando de acordo com o número de clientes.

Os problemas utilizados na comparação entre os algoritmos foram o conjunto dos 1.070 pontos de demanda espalhados pelo interior de 16 municípios do Nordeste do Brasil, atendidos pela operação do OCP. Nesta região, existem três fontes de água em potencial, e uma nova fonte de água (Kero Água) deve ser implementada de acordo com o procedimento de perfuração do poço.

3.5.1 RESULTADOS DA FASE DE ATRIBUIÇÃO

Na primeira etapa do procedimento, calculou-se quais as cisternas que devem ser atendidas por cada uma das cinco fontes de água localizadas na região semiárida. A Figura 3.9 ilustra o esquema obtido na fase de atribuição. Os resultados indicaram que o uso da fonte de água *Neto Galvão*, atualmente funcionando na operação OCP, acrescenta custos desnecessários à operação, além de implicar em tempos de viagem mais longos para atender às demandas dos beneficiários. Portanto, esse manancial deve ser desativado e substituída pela fonte de água de *Kero Agua*.

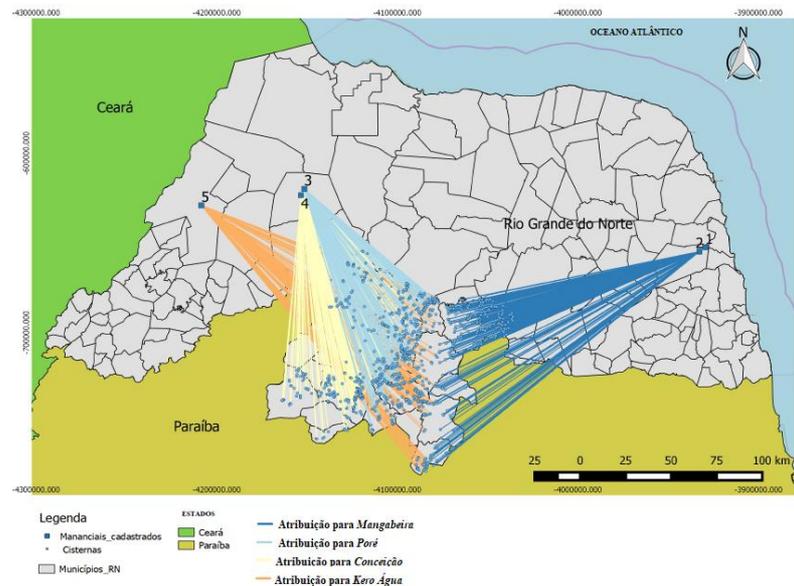


Figura 3.9 Resultado da fase de atribuição

Os resultados também mostram que o manancial *Poré* está atualmente subutilizado. Conforme a Tabela 3.4, este manancial pode atender até 13 municípios, sendo capaz de abastecer diariamente 63 caminhões-pipa, quando antes estava atendendo apenas 9 municípios e 32 veículos diários. Por outro lado, o manancial *Mangabeira* pode ser menos solicitado, de acordo com os resultados obtidos pelo procedimento proposto. Atualmente, essa fonte de água atende 6 municípios, abastecendo 79 caminhões-pipa. Os resultados indicam que ele deveria abastecer apenas um município, e carregando diariamente 23 veículos.

Essas mudanças na alocação atual de fontes de água geraram uma redução de 34,05% nas distâncias anuais totais percorridas pelos caminhões-tanque, desde as fontes de água até os pontos de demanda, o que trará reflexos positivos nos custos de roteirização aplicados na próxima etapa.

Tabela 3. 4 Redistribuição de municípios a serem atendidos por cada fonte de água

Manancial	Municípios alocados por manancial	Distâncias anuais percorridas manancial-município (Km)	
-----------	-----------------------------------	--	--

	Atual cenário	Novo cenário (Algoritmo de transportes)	Atual cenário	Novo cenário (Algoritmo de transportes)	Diferença estimada	Tamanho médio de fila no manancial	
						Atual cenário	Novo cenário
Kero água	0	2	0	487.571	+100%	0	24
Neto Galvão	01	0	218.260	0	-100%	5	0
Mangabeira	06	1	2.414.630	459.651	-99,97%	79	23
Poré	09	13	946.354	1.413.359	+49,35%	32	63
Total	16	16	3.579.244	2.360.581	-34,05%	110	110

3.5.2 RESULTADOS NA FASE DE ROTEIRIZAÇÃO

Definidas as atribuições entre mananciais e ponto de demanda, realizou-se a etapa de construção de rotas. Os resultados computacionais desta etapa são fornecidos na Tabela 3.5. A primeira coluna é o nome da instância, ou município. As próximas duas colunas contêm o número de clientes em cada instância e o número de veículos empregados para as rotas calculadas. As demais colunas apresentam os resultados em termos de distância total percorrida para as rotas calculadas pelos três algoritmos. Para as meta-heurísticas ALNS e MACS-RVND são apresentados os valores médios e o melhor valor obtidos em cada instância, permitindo assim analisar os GAPs (diferença entre os resultados dos algoritmos) das soluções obtidas pelos métodos CW-2opt, ALNS e MACS-RVND, respectivamente). A última linha contém a soma de todas as distâncias a serem praticadas pelos veículos da OCP, considerando a heurística e meta-heurísticas analisadas.

A Tabela 3.5 mostra que os procedimentos meta-heurísticos apresentaram os melhores resultados para os problemas de CVRP listados. Em 14 das 16 instâncias, que contêm até 107 clientes, a heurística CW-2opt retornou soluções 1,02%, em média, piores em comparação às soluções ALNS e 2,15 % pior quando comparadas às soluções MACS-RVND. Além disso, o desempenho do CW-2opt foi significativamente reduzido nas outras duas instâncias, com o maior número de clientes (143 e 200 clientes).

Ao comparar o desempenho entre o MACS-RVND e o ALNS, em termos de qualidade da solução encontrada, constatou-se que em 14 instâncias o MACS-RVND retornou as melhores soluções, com uma distância total menor que as soluções ALNS. Para as outras duas instâncias, o LNS e o MACS-RVND obtiveram os mesmos valores de solução.

Adicionalmente, o MACS-RVND obteve a maior redução pontual (3,25% para a instância de Jardim do Seridó), resultando em uma redução média de 0,37% nas distâncias totais, considerando o conjunto dos 16 casos.

Tabela 3. 5 Resultados da implementação da heurística e meta-heurísticas em 16 instâncias da OCP

Município	NC	V	Clark and Wright + 2-opt (1)	Resultados						
				LNS		MACS-RVND		GAP		
				Média	Melhor (2)	Média	Melhor (3)	(2)/(1)	(3)/(1)	(3)/(2)
Acari	60	9	3175.97	3103.68	3,081.95	3075.88	3072.88	-2.96%	-3.25%	-0.29%
Caicó	143	24	6800.13	6398.22	6398.09	6,417.85	6396.96	-5.91%	-5.93%	-0.02%
Currais Novos	200	45	16875.21	14812.66	14,863.67	14867.21	14,860.21	-11.92%	-11.90%	-0.02%
Carnaúba	14	3	810.88	810.01	810.01	810.01	810.01	-0.11%	-0.11%	0.00%
Cruzeta	82	13	2769.22	2749.63	2744.35	2749.77	2742.9	-0.90%	-0.95%	-0.05%
Equador	44	11	3655.42	3635	3634.95	3635.05	3634.2	-0.56%	-0.58%	-0.02%
Florânia	98	18	3236.96	3188.25	3183.14	3192.91	3182.66	-1.66%	-1.68%	-0.02%
Ipueira	9	1	419	418	418	418	418	-0.24%	0.00%	0.00%
Jardim do seridó	107	20	5202.55	5152.37	5116.08	4949.57	4,949.57	-1.66%	-4.86%	-3.25%
Jucurutu	52	8	1654.74	1623.92	1610.84	1596.14	1,596.14	-2.65%	-3.54%	-0.91%
Ouro Branco	26	3	1201.26	1212.75	1182.45	1180.51	1,180.51	-1.57%	-1.73%	-0.16%
São vicente	56	12	3331.92	3283.87	3276.08	3281.51	3,276.07	-1.68%	-1.68%	0.00%
São José	79	17	3,812.23	3,791.13	3,771.50	3770.47	3,770.47	-1.07%	-1.10%	-0.03%
Serra negra	37	4	968.95	950.94	949.76	950.88	949.68	-1.98%	-1.99%	-0.01%
Parelhas	37	9	3792.42	3757.77	3753.87	3281.513	3751.37	-1.02%	-1.08%	-0.07%
Ten.Laurentino	26	8	2,148.73	2,118.44	2,096.85	2,083.75	2,083.75	-2.41%	-3.02%	-0.62%
Total	1070	205	59,855.59	57,006.64	56,891.59	56,736.05	56,676.38			-0.37%

NC: Número de cisternas; V: Tamanho da frota (número de rotas)

3.5.3 CONTRIBUIÇÃO À PRÁTICA DA OCP

A aplicação do procedimento de roteirização no contexto da OCP indicou que as entregas de água poderiam ser realizadas por um número menor de veículos por município, como mostra a Tabela 3.6. Para um conjunto de 16 municípios, a redução no número total de veículos empregados em a operação caiu de 110 caminhões para 69, como resultado do procedimento proposto. Respectivamente, essas modificações geraram uma redução de 26,87% nos custos de transporte pagos durante a operação de um ano pelo governo, passando de R\$ 10.536.021,30 para R\$ 7.704.736,70, como resultado da adoção dos procedimentos de atribuição e roteirização no cenário atual do OCP.

Tabela 3. 6 Resultados práticos para os 16 municípios investigados

Município	NC	P	V	Distância anual (Km)	Custo (R\$)	Consumo per capita (litro x pessoa/dia)		
						Mín	Médio	Máx
Acari	60	Atual	03	81.590	479.749,20	20,01	23,29	32,87
		Proposto	01	74.994,12	440.965,43	-	20	-
Caicó	143	Atual	12	185.400	1.090.152,00	20,02	22,63	32,87
		Proposto	09	155.373	913.593,24	-	20	-
Carnaúba dos Dantas	14	Atual	1	29.920	175.929,60	20,01	22,3	26,3
		Proposto	1	19.710,24	115.896,21	-	20	-
Cruzeta	82	Atual	5	130.540	767.575,20	20,06	22,85	32,87
		Proposto	3	66.779,18	392.661,58	-	20	-
Currais Novos	240	Atual	23	360.646	2.120.598,48	20,02	22,63	32,87
		Proposto	14	359.817,50	2.115.726,90	-	20	-
Equador	44	Atual	3	130.974	770.127,12	20,01	21,88	26,30
		Proposto	2	88.450,45	520.088,65	-	20	-
Florânia	98	Atual	8	101.748	598.278,24	20,09	22,22	32,87
		Proposto	5	77.456,41	455.443,69	-	20	-
Ipeuira	9	Atual	1	11.160	65.620,80	20,54	21,48	23,48
		Proposto	1	10.171,33	59.807,42	-	20	-
Jardim do Seridó	107	Atual	7	230.920	1.357.809,60	20,31	22,49	32,87
		Proposto	4	120.439,50	708.184,26	-	20	-
Jucurutu	52	Atual	3	45.876,69	269.754,93	20,01	22,58	26,30
		Proposto	2	38.884,46	228.640,62	-	20	-
Ouro Branco	26	Atual	1	38.091,67	223.979,01	20,09	23,01	26,30
		Proposto	1	28.725,74	168.907,35	-	20	-
Parelhas	37	Atual	7	93.150	547.722,00	20,01	21,46	26,30
		Proposto	3	91.773,17	539.626,24	-	20	-
São José do Seridó	79	Atual	10	182.816	1.074.958,08	20,05	23,21	32,87
		Proposto	8	91.344,17	537.103,72	-	20	-
São Vicente	56	Atual	5	73.392	431.544,96	20,01	22,17	32,87
		Proposto	2	51.023,35	300.017,30	-	20	-
Serra Negra do Norte	37	Atual	3	55.680	327.398,40	20,23	21,77	26,30
		Proposto	2	50.373,16	296.194,18	-	20	-
Laurentino Cruz	26	Atual	4	50.344,88	234.823,68	20,05	22,36	32,87
		Proposto	2	50.010,00	468.741,55	-	-	-
TOTAL	1.070	Atual	110	1.802.249,24	10.536.021,30			
		Proposto	69	1.336.441,32	7.704.736,70			

NC: Número de cisternas; V: Tamanho da frota; P: procedimento adotado

O governo brasileiro alocou R\$ 1.021.682.120,57 em 2017 para a distribuição de água emergencial considerando toda a região nordeste do Brasil. A expansão do modelo proposto poderia, portanto, levar a melhorias na gestão financeira e operacional da OCP. Os procedimentos de agrupamento e roteirização permitiram que a água fosse distribuída uniformemente à população durante o período de seca. Além disso, o procedimento proposto possibilita uma diminuição no tempo de resposta às comunidades e, conseqüentemente, leva a

um aumento no número de beneficiários atendidos em um horizonte de tempo estabilizado, com uso de uma menor frota. O orçamento economizado também poderia ser destinado a pagar pelos reajustes solicitados pelos motoristas de caminhões-pipa, como discutido anteriormente, o que poderia evitar possíveis greves e o serviço de interrupção.

4 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS

Esta dissertação propôs um procedimento para auxiliar no processo de tomada de decisões relativas ao fornecimento de água em cenários de seca, integrando as atividades de planejamento de obras de perfuração de poços e a logística de distribuição emergencial de água às comunidades afetadas por esse tipo de desastre. Dessa maneira, em uma primeira etapa foram investigadas potenciais zonas de ocorrência de poços produtivos em aquíferos fissurais livres, cuja perfuração visa produzir mananciais candidatos ao fornecimento de água para os diversos pontos de demanda cadastrados na OCP. Esse conjunto de ofertas e demandas foi tratado como *Multiple Depot Vehicle Routing Problem* (MDVRP), para o qual foi proposta uma abordagem de solução em dois estágios na busca por soluções satisfatórias em termos de nível de serviço e que atendam aos requisitos da operação.

No que diz respeito à etapa de prospecção de águas subterrâneas, as técnicas de SIG empregadas nesta pesquisa permitiram a análise de diferentes variáveis preditoras de ocorrência de água subterrânea (lineamentos, litologia, drenagem e declividade), correlacionando-as com os dados de produtividade dos poços perfurados pelo Exército Brasileiro no semiárido nordestino. Concluiu-se que a variação na classe de produção dos poços perfurados é influenciada pelas variáveis de decisão litotipo predominante, densidade de drenagem e densidade de lineamentos estruturais e distância do poço ao contato geológico.

Ainda, foi desenvolvido neste estudo um modelo prospectivo hidrogeológico, que incorporou variáveis independentes que apresentaram correlações estatísticas condizentes com estudos predecessores conduzidos em outras regiões de aquíferos cristalinos no Brasil. Este modelo, que tem como base a regressão logística, se mostrou eficaz na definição de áreas-alvo para perfurações de poços no contexto das comunidades atendidas pela Operação Carro Pipa, reduzindo o risco de locações malsucedidas. Isso se reflete diretamente nos custos governamentais envolvidos nas atividades de prospecção, bem como nos ganhos sociais advindos da construção de poços produtivos próximos às comunidades que necessitam da água.

No entanto, durante a validação do modelo, também foram verificados poços produtivos em áreas que o modelo mostrou ser desfavorável, bem como poços improdutivos em locais avaliados como promissores, ajudando a revelar a complexidade do tema. É comum no domínio fraturado do semiárido brasileiro a ocorrência de poços produtivos localizados próximos a poços completamente secos, o que pode ser atenuado, como evidenciado neste artigo, através de investigações geofísicas realizadas. Assim, recomenda-se o desenvolvimento de pesquisas futuras na busca de modelagem que nos permita avaliar as taxas de sucesso em locais de poços tubulares, levando em conta ainda que cada modelo de regressão deva ter os seus parâmetros calibrados e particularizados para uma determinada área de estudo, não podendo ser consideradas como constantes aplicáveis a qualquer cenário hidrogeológico.

No que diz respeito ao objetivo de otimizar a distribuição emergencial de água, o estudo revelou o grande potencial da aplicação de abordagens heurísticas e meta-heurísticas na construção de soluções comparativamente melhores que as praticadas no atual cenário da Operação Carro Pipa. Ao se explorar a nova meta-heurística MACS-RVND em cenários reais de problemas de roteirização de larga escala, este algoritmo se mostrou eficiente e competitivo em relação ao ALNS, resultando em uma diminuição na distância total percorrida, número de veículos utilizados e no custo anual da distribuição de água. Não menos importante, a etapa de atribuição de mananciais aos pontos de demanda permitiu reduzir o tempo médio de fila de espera dos caminhões nos locais de abastecimento, e foi capaz de indicar, para o estudo de caso realizado, a ocorrência de manancial ineficiente em termos de custo operacional e tempo de resposta às comunidades.

O procedimento exposto nesta dissertação preenche a lacuna de pesquisa que envolve a logística de distribuição de água no cenário de seca no Brasil, estruturando a sequência de decisões que abrangem perfuração de poços, escolha de mananciais e técnicas de roteirização aplicadas ao contexto da Operação Carro Pipa. Os resultados finais obtidos, expressos em termos de distâncias totais percorridas, número de veículos empregados e custos anuais de distribuição de água possuem o objetivo de auxiliar os gestores no processo decisório envolvendo a mitigação de custos e a manutenção da qualidade de reposta de atendimento à população. Os ganhos nesses aspectos abrem portas à possibilidade de que, mantido um determinado orçamento, amplie-se a rede de logística humanitária aplicada ao enfrentamento da seca, beneficiando em tempo hábil um maior número de pessoas em hipóteses de aumento de escala da crise.

Tal ampliação da rede de beneficiários, no entanto, deve ser analisada de forma criteriosa. Como já abordado nesta dissertação, a promoção indiscriminada do acesso à água potável pode favorecer a ocorrência de padrões de assentamento deficientes, estabelecendo e incentivando a formação de novos centros administrativos em locais sem fontes sustentáveis de água, criando uma síndrome de assistencialismo e dependência em algumas comunidades. Tais aspectos são catalisados em parte pela distorção no consumo de água per capita entregue às comunidades, o qual tende a ser maior em áreas mais isoladas e de menor densidade populacional, o que favorece a dispersão populacional e aumenta a complexidade do processo de distribuição de água.

Em virtude dos efeitos crescentes das mudanças climáticas, um número cada vez maior de pessoas poderá estar submetido aos efeitos do fenômeno da estiagem, em especial nos países em desenvolvimento, carentes de infraestrutura e investimentos governamentais adequados. Assim, o desenvolvimento de modelos e técnicas de solução semelhantes às discutidas neste artigo são altamente recomendadas.

Dessa maneira, a fim de aprimorar os estudos do processo de integração entre as atividades de perfuração de poços e a distribuição de água emergencial, os seguintes trabalhos futuros são sugeridos:

Tratar a escolha de áreas-alvo como um problema de localização de facilidades, considerando não somente os aspectos físicos para a ocorrência de água subterrânea, mas também os aspectos sociais (risco e vulnerabilidade) da população que necessita da água.

Estudar o problema de distribuição emergencial de água como um *Inventory Routing Problem* (IRP), ou seja, um problema de roteirização com estoques, verificando a influência desse tipo de tratamento nos custos e nível de serviço da OCP.

Empregar os conceitos de *system dynamics* para modelar e quantificar os padrões de reforço na dependência da água emergencial que são gerados pela distribuição desigual da água nas cisternas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABUZIED, S. M., ALREFAEE, H. A. **Mapping of groundwater prospective zones integrating remote sensing, geographic information systems and geophysical techniques in El-Qaà Plain area, Egypt.** Hydrogeology Journal, vol. 25, p. 2067-2088, 2017.

ABUZIED, S. M.; IBRAHIM, S. K.; KAISER, M. F.; SELEEM, T. A. **Application of remote sensing and spatial data integrations for mapping porphyry copper zones in**

Nuweiba area, Egypt. International Journal of Signal Processing Systems, v.4, n.2, p. 102–108, 2016.

ANGELIM, L.A.A.; MEDEIROS, V.C.; NESI, J.R. 2006. Programa Geologia do Brasil – PGB. Projeto Geologia e Recursos Minerais do Estado do Rio Grande do Norte. Mapa geológico do Estado do Rio Grande do Norte. Escala: 1:500.000. Recife: CPRM/FAPERN.

BANCO MUNDIAL, 2012. **The Sendai Report: Managing Disaster Risks for a Resilient Future.** Washington DC, 68 pp.

BERTAZZO, T. R.; LEIRAS, A.; YOSHIKAZI, H. T. Y. e SAUAIA, A. C. A. **Mecanismos de coordenação em gestão de operações humanitárias: modelo conceitual de simulador e proposta de jogo de logística humanitária.** *Gestão e Produção*, v. 25, n. 2, p. 219-232, 2018.

BOONMEE, C.; ARIMURA, M.; ASADA, T. **Facility location optimization model for emergency humanitarian logistics,** International Journal of Disaster Risk Reduction, v. 24, p. 485-498, 2017.

BRANDÃO, R. L.; GOMES, F. E. M. **Técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto aplicadas na avaliação de potencial hidrogeológico da Folha Irauçuba.** Revista de Geologia, v. 16, n. 1, 2003.

CGEE. **Desertification, land degradation and drought in Brazil** - Brasília - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2016. Brasília, DF, 252 p. <https://www.cgee.org.br/documents/10195/7340/DesertificacaoWeb.pdf>. Accessed Mar. 10, 2019.

CLARKE, G., and J. W. WRIGHT. **Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points.** Operations Research, 12 (4): 568–581, 1964.

COMANDO MILITAR DO NORDESTE. **Ordem de Serviço Nr 008 de 17 de agosto de 2015. Regula a participação do Comando Militar do Nordeste (CMNE) no Programa Emergencial de Distribuição de Água Potável no semiárido brasileiro – Operação Carro-pipa.**

CONCEIÇÃO, R. A. C.; SILVA, A. Q. **Extração automática de lineamentos utilizando imagens SRTM, Landsat ETM+ e ALOS PALSAR na região de Nobres, MT.** In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO– SBSR, Foz do Iguaçu, PR, 2013.

CEPED Drought and Drought in Brazil - Know the Data, References and Other Information. UFSC. <http://www.ceped.ufsc.br/seca-e-estiagem-no-brasil-conheca-os-dados-ate-2012>. Accessed Feb. 18, 2019.

CPRM. **Programa de água subterrânea para a região nordeste.** Ministério de Minas e Energia. Disponível em: https://www.cprm.gov.br/publique/media/hidrologia/mapas_publicacoes/programa_agua_subterranea_nordeste.pdf. 2001.

CUNHA, A. P.; MARCHEZINI, V.; LINDOSO, D.; SAITO, S.; ALVARÁ, R. C. **The challenges of Consolidation of a Drought-Related Disaster Risk Warning System to Brazil.** *Sustentabilidade em Debate*, v. 10, p. 43-76, 2019.

CROES, G. A. **A method for solving traveling salesman problems** *Operations Research*, v. 6:791-812, 1958.

DAS, S. **Delineation of groundwater potential zone in hard rock terrain in Gangajalghati block, Bankura district, India using remote sensing and GIS techniques.** *Modeling Earth Systems and Environment*, v. 3, n. 4, p. 1589–1599, 2017.

EIRÓ, F., AND D. P. LINDOSO. **Reinvenção de práticas clientelistas no Programa Um Milhão de Cisternas? PIMC.** *Ciência & Sustentabilidade*, 1: 62-76., 2015

ELIS, V. R.; BARROSO, C. M. R.; KIANG, C. H. **Aplicação de ensaios de resistividade na caracterização do sistema aquífero Barreiras / Marituba em Maceió – AL.** *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 22, n.2, p. 101-113, 2004.

ELIS, V. R.; BONDIOLI, A.; USTRA, A. T.; CARLOS, I. M.; POZZO, H. Â. P. D. **Resistivity imaging for identification of fracture zones in crystalline bedrock in Brazil.** *Sustainable Water Resources Management*, v. 5, n.3, p. 1089–1101, 2019.

EMBRAPA (Brasil). Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. In: **REUNIÃO TÉCNICA DE LEVANTAMENTO DE SOLOS, 10., 1979, Rio de Janeiro.** Súmula. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1979.

EMBRAPA (Brasil). **Atualização do Relatório de Avaliação de Programa – Ação Construção de Cisternas para Armazenamento de Água.** Brasil, 2009.

ESRI **GIS and Mapping Software.** Disponível em: <http://www.esri.com/>. Acesso em: 12 abr 2019.

EXÉRCITO BRASILEIRO. Disponível em: https://www.eb.mil.br/web/noticias/noticiario-do-exercito/-/asset_publisher/MjaG93KcunQI/contente/operacao-semiarido-exercito-perfura-pocos-no-nordeste. Acesso em: 20 dez 2018.

ERDOĞAN, G. **An open source Spreadsheet Solver for Vehicle Routing Problems**. Computers & Operations Research, v. 84: 62–72, 2017.

EXÉRCITO BRASILEIRO. **Relatório Informativo ao CMNE da Operação Carro-pipa a cargo do 1º BEC**. Caicó, RN. 2016.

FEITOSA, FERNANDO A. C. 2008. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações/organização e coordenação científica**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID,2008. 812 p.

FETTER, A. H. (1999) **U/Pb and Sm/Nd geochronological constraints on the crustal framework and geological history of Ceará state, NW Borborema Province, NE Brazil: implications for the assembly of Gondwana**. Kansas, 164 p. PhD. Thesis – University of Kansas.

FINNESSEY, T.; HAYES, M.; LUKAS, J.; SVOBODA M. **Using climate information for drought planning**. Clim. Res. v.70 (2–3), p. 251–263, 2016.

GALLAS, J. D. F. **Prospecção de água subterrânea em aquíferos cristalinos com o emprego de métodos indiretos**. Revista do Instituto Geológico, 24(1/2), p.43-51, São Paulo. 2003.

GALLAS, J. D. F.; GIARDIN, A. **Eletrorresistividade na prospecção de aquíferos fraturados**. Águas subterrâneas, v. 30, n. 1, p. 119-138, 2016.

GAMBARDELLA, L. M., TAILLARD, É. AND AGAZZI, G. (1999) **‘MACS-VRPTW: A Multiple Ant Colony System for vehicle routing problems with time windows’**. In: New Ideas in Optimization. Londres: McGraw-Hill, pp. 63-76.

GANDOLFO, O.C.B. 2007. **Um estudo do imageamento geoeletrico na investigação rasa**. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 215 f.

GENDREAU, M., HERTZ, A.; LAPORTE, G. **A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem**. Management Science, Vol. 40, No. 10, 1276 – 1290, 1994.

GUPTA, R. P. **Remote Sensing Geology**, 2ªed., Springer, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, Germany, 665 p, 2003.

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

HAO, Z.; HAO, F.; SINGH, V. P.; OUYANG, W.; CHENG, H. **An integrated package for drought monitoring, prediction and analysis to aid drought modeling and assessment**. *Environmental Modelling and Software*, v. 91, p. 199-209, 2017.

INPE. Disponível em: www.webmapit.com.br/inpe/topo data /. Acesso em: 17 mar 2019.

JACOBS, B.; BORONYAK-VASCO, L.; MOYLE, K., LEITH, P. **Ensuring resilience of natural resources under exposure to extreme climate events**, *Resour. Basel*, v. 5 (2), 2016.

JARDIM DE SÁ, E.F. **A Faixa Seridó (Província Borborema, NE do Brasil) e o seu significado geodinâmico na cadeia Brasileira/Pan-Africana**. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Tese de Doutorado, 1994. 803p..

KELLER, G. V. & FRISCHKNECHT, F. C. **Electrical methods in geophysical prospecting**. Oxford: Pergamon Press. 1966, 517p

LIMA, A.A.M.; OLIVEIRA, D.B.; QUETZ, J. S.; HAVT, A.; PRATA, M. M. G.; LIMA, I. F. N. (2019) **Etiology and severity of diarrheal diseases in infants at the semiarid region of Brazil: A case-control study**. *PLoS Negl Trop Dis* 13(2): e0007154

LONG, D.C., and D.F. WOOD. **The logistics of famine relief**. *Journal of Business Logistics*, 16(1): 213-230, 1995.

MADRUCCI, V.; TAIOLI, F., DE ARAÚJO, C.C. **Groundwater favorability map using GIS multicriteria data analysis on crystalline terrain, Sao Paulo state, Brazil**. *Journal of Hydrology*, v. 357, n. 3, p. 153–173, 2008.

MARANHÃO, C. M. L. **Alguns Aspectos da Interpretação Fotogeológica Aplicados à Prospecção de Aquíferos em Meio Cristalino**. *Revista de Geologia da UFC*, V. 7, p17 – 25. 1994.

MARCELINO, E. V.; NUNES, L. H.; KOBAYAMA, M. **“Mapeamento de Risco de desastres naturais do estado de Santa Catarina”**. Caminhos da Geografia (UFU), Uberlândia, v.7, n.17, p. 72-84, 2006.

MARTINS, E. S. P. R.; MAGALHÃES, A. R.; FONTENELE, D. A seca plurianual de 2010-2017 no Nordeste e seus impactos. Disponível em: http://seer.cgee.org.br/index.php/parcerias_estrategicas/article/viewFile/844/772. 2017. Acesso em 15 fev 2019.

MARTORANA, R.; CAPIZZI, P.; D’ALESSANDRO, A.; LUZIO, D. **Comparison of different sets of arrays 245 configurations for multichannel 2D ERT acquisition**. Journal of Applied Geophysics, v. 137, p. 34 – 48, 2017.

MEDEIROS, V. C.; AMARAL, C. A.; ROCHA, D. E. G. A.; SANTOS, R. B. PROGRAMA GEOLOGIA DO BRASIL - PGB. SOUSA. **FOLHA SB.24-Z-A. ESTADOS DA PARAÍBA, RIO GRANDE DO NORTE E CEARÁ**. Mapa Geológico. Recife: CPRM, 2005, 1 mapa, color., 66cm x 108cm. Escala 1:250.000.

NAG, S. **Delineation of Groundwater Potential Zones in Hard Rock Terrain in Kashipur Block, Purulia District, West Bengal, using Geospatial Techniques**. International Journal of Waste Resources, v. 6, 2016.

NASA. Disponível em: www2.jpl.nasa.gov/srtm/. Acesso em: 12 mar 2019.

NEVES, M. A. 2005. **Análise integrada aplicada à exploração de água subterrânea na Bacia do Rio Jundiá (SP)**. Tese de doutoramento, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 200 p.

OLDENBURG, D.W.; LI, Y. **Estimating depth of investigation in DC resistivity and IP surveys**. Geophysics, v. 64, n. 2, p. 403-416, 1999.

ORTEGA-GAUCIN, D.; LÓPEZ PÉREZ M.; ARREGUÍN, C. F. I. **Drought Risk Management in Mexico: Progress and Challenges**. International Journal of Safety and Security Engineering, v. 6, n. 2, p. 161-170, 2016.

PISINGER, D., and S. ROPKE. **A general heuristic for vehicle routing problems**. Computers & Operations Research, v. 34(8): 2403–2435, 2007.

SILVA, M. A.; MOREIRA, C. A.; BORSSATTO, K., ILHA, L. M.; SANTOS, S. F. **Geophysical prospection in tin mineral occurrence associated to greisen in granite São Sepé (RS)**. REM - International Engineering Journal, v. 71, n. 2, p. 183-189, 2018.

SA, H. S.; ELIS, V. R. **Aplicação de imageamento elétrico multi-eletrodos para auxílio na locação de perfuração de poços tubulares: estudo de casos em aquíferos fraturados**. In: XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, Campinas, 2016. p. 2-11.

SISTEMA INTEGRADO DE ADMINISTRAÇÃO FINANCEIRA DO GOVERNO FEDERAL(SIAFI). Disponível em: <<https://acesso.serpro.gov.br/HOD10/jsp/logonID.jsp>>. Acesso em: 18 ago. 2016.

SILVA, C. D. A.; RODRIGUES, R.S.; LISBOA, L.H.D. **Locações de poços em ambiente cristalino: da análise estrutural aos dados de eletroresistividade. estudo de caso nos municípios de São Gonçalo do Amarante e Aratuba, Ceará**. Anais do xx congresso brasileiro de águas subterrâneas, Campinas, 2018.

SILVA, M. B.; MAIA, R. B. **Caracterização Morfoestrutural do Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Jaguaribe, Ceará-Brasil**. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 18, n. 3, 2017.

SILVA JÚNIOR, O.S. 2009. **Roteirização de veículos de carga com múltiplos depósitos em sistema de informação geográfica livre**. Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro. 134 f.

SILVA JÚNIOR, O.S.; LEAL, J. E. **A Multiple Ant Colony System with Random Variable Neighborhood Descent for the Vehicle Routing Problem with Time Windows**. Int. J. Logistics Systems and Management, (*In press*), 2020.

SINGH, K. K. K., BHARTI, A. K.; PAL, S. K.; PRAKASH, A.; SAURABH, K. R.; SINGH, P. K. **Delineation of fracture zone for groundwater using combined inversion technique**. Environmental Earth Sciences, v. 78, n. 4, p. 110, 2019.

SINGHAL, B. & GUPTA, R. (1999). Introduction and Basic Concepts.

SPHERE PROJECT | **Humanitarian Charter and Minimum Standards in Humanitarian Responses**. Manual/Guideline. 2011

Comentado [O12]: Inserir referência.

SUBRAMANIAN A. (2012) '**Heuristic, Exact and Hybrid Approaches for Vehicle Routing Problem**', Niterói. Computer Science Thesis (Doctorate). Universidade Federal Fluminense.

THOMAS, A., & MIZUSJIMA, M. **Logistics training: necessity or luxury?** Forced Migration Review, 60-61, 2005.

UITTO, J.I. **The geography of disaster vulnerability in megacities: a theoretical framework.** Applied Geography, v. 18, nº 1, p; 7-16, 1988

UNISDR. Terminology on Disaster Risk Reduction, United Nations, Geneva, 2009.

WILHITE, D.A; SIVAKUMAR, M.V.K.; PULWARTY, R. **Managing drought risk in a changing climate: the role of national drought policy,** Weather Clim. Extremes 3,2014.

VAN WASSENHOVE, L.N. **Blackett memorial lecture: Humanitarian aid logistics: Supply chain management in highgear.** Journal of the Operational Research Society, 57: 475-489, 2006.

SUBRAMANIAN, A., L. M. A. DRUMMOND, C. BENTES, L. S. OCHI, and R. FARIAS. **A parallel heuristic for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery.** Computers & Operations Research, v.37 (11): 1899-1911, , 2010..

VIEIRA Y.E.M., DE MELLO BANDEIRA R.A., LOPES L.A.S., DE OLIVEIRA SILVA L. (2020) **Water Distribution for Victims of Drought: The Case of the Brazilian Semi-arid Region.** In: Leiras A., González-Calderón C., de Brito Junior I., Villa S., Yoshizaki H. (eds) Operations Management for Social Good. POMS 2018. Springer Proceedings in Business and Economics. Springer, Cham

WILDMAN, T. (2012) *Technical Guidelines On Water Trucking in Drought Emergencies (Horn and East Africa Region).* Oxfam GB. Available at: <http://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/Technical%2BGuidelines%2Bon%2BWater%2BTrucking%2Bin%2BDrought%2BEmergencies.pdf>

ZAR, J. **Biostatistical analysis.** 4. Ed. Upper Saddle River – New Jersey: Prentice Hall, 663 p., 1999.