



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA
DOUTORADO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA

CIBELE GOUVEIA COSTA CHIANCA

QUALIDADE DA ÁGUA DE BARRAGENS SUBTERRÂNEAS DO SEMIÁRIDO
POTIGUAR PARA FINS DE IRRIGAÇÃO

MOSSORÓ

2020

CIBELE GOUVEIA COSTA CHIANCA

QUALIDADE DA ÁGUA DE BARRAGENS SUBTERRÂNEAS DO SEMIÁRIDO
POTIGUAR PARA FINS DE IRRIGAÇÃO

Tese apresentada ao Doutorado em Manejo de Solo e Água do Programa de Pós- Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Doutora em Manejo de Solo e Água.

Linha de Pesquisa: Modelagem Ambiental e Manejo do Solo e Água

Orientador: Prof. Dr. Rafael Oliveira Batista

Coorientador: Prof. Dr. Stefeson Bezerra de Melo

MOSSORÓ

2020

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

C532q Chianca, Cibele Gouveia Costa.
Qualidade da água de barragens subterrâneas do
semiárido potiguar para fins de irrigação / Cibele
Gouveia Costa Chianca. - 2020.
87 f. : il.

Orientador: Rafael Oliveira Batista.
Coorientador: Stefeson Bezerra de Melo.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural
do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Manejo de Solo e Água, 2020.

1. aquífero aluvial. 2. salinidade. 3. análise
multivariada. 4. variabilidade espacial. I.
Batista, Rafael Oliveira, orient. II. Melo,
Stefeson Bezerra de, co-orient. III. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

CIBELE GOUVEIA COSTA CHIANCA

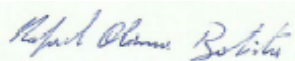
QUALIDADE DA ÁGUA DE BARRAGENS SUBTERRÂNEAS DO SEMIÁRIDO
POTIGUAR PARA FINS DE IRRIGAÇÃO

Tese apresentada ao Doutorado em Manejo de Solo e Águas do Programa de Pós- Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Doutora em Manejo de Solo e Água.

Linha de Pesquisa: Modelagem Ambiental e Manejo do Solo e Água

Defendida em: 31/08/2020

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Rafael Oliveira Batista – Presidente



Prof. Dr. Stefeson Bezerra de Melo - Membro



Profa. Dra. Daniela da Costa Leite Coelho - Membro



Profa. Dra. Silvanete Severino da Silva - Membro



Prof. Dr. Ketson Bruno da Silva - Membro

AGRADECIMENTOS

À Deus, por sempre está presente, me fortalecendo e mostrando o caminho a seguir.

À minha família, pela paciência, dedicação e incentivo. Em especial ao meu esposo, Max Chianca Pimentel Filho, pelo companheirismo durante a minha jornada, e a minha mãe, Maria Claudia de Gouveia, pelo amor incondicional, por sempre me encorajar e mostrar que sou capaz.

Aos meus orientadores, Rafael Oliveira Batista e Stefeson Bezerra de Melo, por terem acreditado em mim e possibilitado a continuidade do meu doutorado, aceitando a orientação depois do trabalho já iniciado. Obrigada por todo apoio, atenção e compreensão.

À professora Solange Aparecida Goularte Dombroski pelo apoio e ajuda durante o período das análises.

Aos meus amigos pelo incentivo, cumplicidade e por proporcionarem momentos de descontração. Em especial, a Ana Beatriz Alves de Araújo, por dar-me apoio no início da pesquisa, a Maria Elidayane da Cunha e Rutilene Rodrigues da Cunha, pelo enorme apoio e parceria durante a segunda fase da pesquisa, a Cássio Kaique da Silva, por acompanhar-me nas coletas e ajudar na realização dos ensaios e a Maria de Fátima Alves de Matos pela ajuda com os mapas apresentados na pesquisa. Sem vocês, talvez não tivesse conseguido.

Aos técnicos e bolsistas dos Laboratórios de Análise de Solo, Água e Planta (LASAP) e do Laboratório de Saneamento (LASAN) da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) e do Laboratório de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (LARHISA) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), pelo apoio na realização dos ensaios. Aos técnicos do Instituto de Assistência Técnica e Extensão Rural do Rio Grande do Norte, por todo o apoio e tempo dispensado para me acompanhar até as barragens subterrâneas.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água (PPGMSA), pelo conhecimento e apoio transmitido.

A UFRN e UFERSA por me darem condição de realizar o doutorado sem afastamento. Enfim, a todos que de forma direta ou indireta tornaram possível o cumprimento de um sonho.

RESUMO

As barragens subterrâneas vêm sendo largamente implantadas no semiárido potiguar brasileiro, com o objetivo de atenuar os efeitos provocados pela escassez hídrica. Com base nessa realidade, o objetivo desse estudo foi avaliar a qualidade da água proveniente dessas barragens, para fins de irrigação, bem como analisar a variabilidade espacial e temporal da condutividade elétrica desse recurso hídrico, através do interpolador de ponderação do inverso da distância. As amostras foram coletadas em 45 barragens implantadas e finalizadas pelo Instituto de Assistência Técnica e Extensão Rural do Rio Grande do Norte, no final do período seco do ano de 2018 e comparadas com as amostras obtidas no final do período chuvoso, no ano de 2019. Determinou-se a qualidade da água através da classificação do risco de salinização e sodificação do solo definidos pelo United State Salinity Laboratory e dos padrões de toxicidade de íons específicos e risco de obstrução de sistemas de irrigação localizada definidos pela Food and Agriculture Organization of United Nation. Para isso, foram analisadas as variáveis: condutividade elétrica, potencial hidrogeniônico, sólidos em suspensão totais, sólidos dissolvidos totais, sódio, potássio, cálcio, magnésio, cloreto, carbonato, bicarbonato, boro, cobre, enxofre, ferro, manganês, zinco, cromo, níquel, cádmio e chumbo. As técnicas de análise multivariada permitiram identificar as variáveis que exercem maior influência na variação hidroquímica da água dessas barragens. Os resultados mostraram que as variáveis relacionadas a salinidade e a toxicidade de íons reduzem sua concentração após o período chuvoso, enquanto que as variáveis relacionadas aos problemas de obstrução dos sistemas de irrigação localizada aumentavam. Com relação ao risco de salinidade e sodicidade do solo, a maioria das barragens foram classificadas como C2-S1. A presença de aglomerados rurais sem esgotamento sanitário, a utilização de dejetos de animais com fertilizantes e a decomposição de matéria orgânica, devido ao cultivo de capim na área da barragem, podem elevar os teores de salinidade das águas aluviais. A alcalinidade, a presença de algas e a concentração de íons ferro são as variáveis responsáveis pelos problemas de obstrução dos sistemas de irrigação localizada. As variáveis relacionadas a salinidade apresentam maior influência na variação hidroquímica da água das barragens, nos dois períodos estudados. A condutividade elétrica e os íons de cloreto apresentam a maior carga fatorial dessa salinidade. E por fim, as áreas que apresentavam maior condutividade elétrica no final do período seco, são similares às áreas de maior condutividade elétrica obtidas no final do período chuvoso.

Palavras-chave: aquífero aluvial, salinidade, análise multivariada, variabilidade espacial

ABSTRACT

Underground dams have been widely deployed in the semiarid region of Rio Grande do Norte, a state in Brazilian Northeast, aiming to mitigate the effects caused by water scarcity. Based on this, the goal of this research was to evaluate the water quality from these dams, for irrigation purposes, as well as to analyze the spatial and temporal variability of the electrical conductivity of this resource, through the inverse distance weighting interpolation. The samples were collected in 45 dams, all of them implemented and finalized by the Technical Assistance and Rural Extension Institute from Rio Grande do Norte, at the end of the dry season of 2018 and compared with the samples obtained at the end of the rainy season of 2019. The water quality was determined by the risk assessment of soil salinization and sodification from the United States Salinity Laboratory and by the standards of specific ions toxicity, as the obstruction risk in localized irrigation systems defined by Food and Agriculture Organization of the United Nations. For this purpose, some variables were analyzed: electrical conductivity, hydrogen potential, total suspended solids, total dissolved solids, sodium, potassium, calcium, magnesium, chloride, carbonate, bicarbonate, boron, copper, sulfur, iron, manganese, zinc, chrome, nickel, cadmium and lead. The multivariate techniques of analysis allowed to identify variables that caused higher influence on hydrochemical variation of the water from the dams. The results show that variables related to salinity and to toxicity of ions decreased their rates after the rainy season, while the rates of variables related to obstruction problems at localized irrigation systems increased. Regarding the risk of salinity and soil sodicity, most of the dams were classified as C2-S1. The presence of rural communities without sanitary sewer system, the use of animal waste as fertilizer and the decomposition of organic matter, due to cultivation of grasses around the dams could increase the salinity rates of the water from alluvial aquifers. The alkalinity, the algae presence and the concentration of iron ions are the variables responsible for the obstruction problems at localized irrigation systems. The variables related to salinity present higher influence over the hydrochemical variation of the water from the dams in both studied seasons. The electrical conductivity and chloride ions present the highest load factor of the salinity. Finally, the areas with the highest electrical conductivity at the end of the dry season are similar to the areas obtained at the end of the rainy season.

Keywords: alluvial aquifer, salinity, multivariate analysis, spatial variability

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de delimitação do semiárido brasileiro.	4
Figura 2. Cisternas de placa de 16 m ³ com captação nos telhados das residências.....	8
Figura 3. Desenho ilustrativo de uma barragem subterrânea.	9
Figura 4. Construção de barragem subterrânea na comunidade Olho D'água do Milho no município de Caraúbas: Escavação da trincheira (A), Acomodação da lona de polietileno (B), Proteção do barramento com pedra e solo (C) e Instalação do poço amazonas (D).	11
Figura 5. Diagrama do United States Salinity Laboratory – USSSL.	16
Figura 6. Mapa de solos do estado do Rio Grande do Norte.....	22
Figura 7. Bacias hidrográficas do estado do Rio Grande do Norte.	23
Figura 8. Localização das barragens subterrâneas avaliadas nesse estudo.	25
Figura 9. Bacia do riacho Melancias, no estado do Rio Grande do Norte.	26
Figura 10. Poços rasos das barragens subterrâneas: SM-IP (A), J-SC2 (B), C-T1 (C), CE-RF1 (D).....	27
Figura 11. Instrumentos utilizados na coleta da água nos poços das barragens subterrâneas: Balde e corda (A), Frasco de polipropileno de um litro (B).....	28
Figura 12. Histogramas da condutividade elétrica da água dos poços das barragens subterrâneas, no final do período seco 2018 (A) e final do período chuvoso 2019 (B).	36
Figura 13. Boxplot das diferenças significativas entre a condutividade elétrica do fim do período seco (2018) e do fim do período chuvoso (2019).	37
Figura 14. Classificação da água das barragens subterrâneas quanto ao risco de salinização e sodificação do solo, de acordo com a USSSL.	40
Figura 15. Grau de restrição ao uso da água das barragens subterrâneas analisadas para irrigação por aspersão, considerando a toxicidade do íon sódio (Na ⁺).....	45
Figura 16. Grau de restrição ao uso da água das barragens subterrâneas analisadas para irrigação por aspersão, considerando a toxicidade do íon cloreto (Cl ⁻).....	45
Figura 17. Grau de restrição ao uso da água das barragens subterrâneas analisadas para de irrigação por superfície, considerando a toxicidade do íon sódio (Na ⁺) e cloreto (Cl ⁻).	46
Figura 18. Grau de restrição ao uso da água das barragens subterrâneas analisadas para irrigação por aspersão convencional, considerando a toxicidade do íon bicarbonato (HCO ₃ ⁻).	47
Figura 19. Concentrações de sódio (Na ⁺), cálcio (Ca ²⁺), cloreto (Cl ⁻) e bicarbonato (HCO ₃ ⁻) em função da condutividade elétrica.	48

Figura 20. Grau de restrição ao uso da água das barragens subterrâneas analisadas para irrigação, considerando a faixa de normalidade do potencial hidrogeniônico (pH).....	49
Figura 21. Grau de restrição ao uso da água das barragens subterrâneas analisadas em sistemas de irrigação localizada, considerando concentração de sólidos suspenso totais (SST).....	50
Figura 22. Grau de restrição ao uso da água das barragens subterrâneas analisadas em sistemas de irrigação localizada, considerando concentração de sólidos dissolvidos totais (SDT).....	51
Figura 23. Problemas de sólidos suspensos em poços rasos das barragens subterrâneas analisadas: CE-RF3 (A), CD (B), U (C), TP (D).	52
Figura 24. Grau de restrição ao uso da água das barragens subterrâneas em sistemas de irrigação localizada considerando a concentração de ferro (Fe).	53
Figura 25. Grau de restrição ao uso da água de barragens subterrâneas em sistemas de irrigação localizados considerando a concentração de manganês (Mn).	53
Figura 26. Análise de agrupamento das barragens subterrâneas analisadas no estado do Rio Grande do Norte, em função de suas características hidroquímicas no período seco, do ano 2018.	60
Figura 27. Análise de agrupamento das barragens subterrâneas analisadas no estado do Rio Grande do Norte, em função de suas características hidroquímicas no período chuvoso do ano de 2019.	61
Figura 28. Variação espacial da condutividade elétrica da água das barragens subterrâneas, no fim do período seco do ano de 2018.....	62
Figura 29. Variação espacial da condutividade elétrica da água das barragens subterrâneas, no fim do período chuvoso do ano de 2019.....	63
Figura 30. Barramentos subterrâneos estudados no município de Campo Redondo, comunidade Timbaúba.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Diretrizes para se interpretar a qualidade da água de irrigação	18
Tabela 2. Concentrações máximas de oligoelementos recomendáveis para a irrigação	19
Tabela 3. Quantitativo de barragens subterrâneas do estado do Rio Grande do Norte analisadas no presente estudo	24
Tabela 4. Variáveis físico-químicas analisadas e metodologias de ensaio utilizadas	28
Tabela 5. Valores mínimo, médio e máximo das variáveis analisadas na água das barragens subterrâneas do estado do Rio Grande do Norte, no fim do período seco e fim do período chuvoso	33
Tabela 6. Estatística descritiva da condutividade elétrica da água	35
Tabela 7. Variação da condutividade elétrica entre o final do período seco e o final do período chuvoso em função da salinidade da água da barragem no final do período seco	38
Tabela 8. Porcentagem de barragens por restrição ao uso da água de irrigação em sistemas de irrigação localizada.....	54
Tabela 9. Matriz de Correlação das variáveis analisadas nas barragens subterrâneas do estado do Rio Grande do Norte no final do período seco do ano de 2018	54
Tabela 10. Matriz de Correlação das variáveis analisadas nas barragens subterrâneas do Rio Grande do Norte no final do período chuvoso de 2019.....	55
Tabela 11. Matriz de cargas fatoriais rotacionadas pelo método Varimax Normalizado para as variáveis físico-químicas da água das barragens subterrâneas analisadas no estado do Rio Grande do Norte, no final do período seco do ano 2018.....	56
Tabela 12. Matriz de cargas fatoriais rotacionadas pelo método Varimax Normalizado para as variáveis físico-químicas da água das barragens subterrâneas analisadas no estado do Rio Grande do Norte, no final do período chuvoso do ano 2019.....	58
Tabela 13. Avaliação da eficiência do interpolador IDW para condutividade elétrica da água das barragens subterrâneas analisadas	63
Tabela 14. Apresentação do erro apresentado pelo interpolador IDW para condutividade elétrica por tipo de erro e barragem subterrânea	64

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	24
Equação 2.....	29
Equação 3.....	29
Equação 4.....	31
Equação 5.....	32
Equação 6.....	32
Equação 7.....	32

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AA - Análise de Agrupamento

AB - Afonso Bezerra

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACP - Análise de Componentes Principais

AF - Análise Fatorial

AG - Angicos

A-M1 - Apodi, Comunidade Melancias, Barragem 1

A-M2 - Apodi, Comunidade Melancias, Barragem 2

A-M3 - Apodi, Comunidade Melancias, Barragem 3

A-M4 - Apodi, Comunidade Melancias, Barragem 4

AN - Água Nova

ANA - Agência Nacional de Águas

AS - Açu

ASA - Articulação no Semiárido Brasileiro

B - Boro

β - Expoente da ponderação

BSh - Clima semiárido quente

C1 - Salinidade baixa

C2 - Salinidade média

C3 - Salinidade alta

C4 - Salinidade muito alta

C5 - Salinidade excepcionalmente alta

Ca²⁺ - Cálcio

CA - Caicó

Cd - Cádmio

CD - Carnaúba dos Dantas

CE - Condutividade Elétrica

CE-A1 - Coronel Ezequiel, Comunidade Antas, Barragem 1

CE-A2 - Coronel Ezequiel, Comunidade Antas, Barragem 2

CE-RF1 - Coronel Ezequiel, Comunidade Riacho Fechado, Barragem 1

CE-RF2 - Coronel Ezequiel, Comunidade Riacho Fechado, Barragem 2

CE-RF3 - Coronel Ezequiel, Comunidade Riacho Fechado, Barragem 3

CG - Campo Grande

Cl⁻ - Cloreto

CN - Currais Novos

CO₃²⁻ - Carbonato

C-OD - Caraúbas, Comunidade Olho D'água do Milho

CP - Componente Principal

CPRM - Serviço Geológico do Brasil

Cr - Cromo

CR-LM - Campo Redondo, Comunidade Lagoa do Meio

CR-TI1 - Campo Redondo, Comunidade Timbaúba dos Inocêncios, Barragem 1

CR-TI2 - Campo Redondo, Comunidade Timbaúba dos Inocêncios, Barragem 2

C-T1 - Caraúbas, Comunidade Timbaúba, Barragem 1

C-T2 - Caraúbas, Comunidade Timbaúba, Barragem 2

Cu - Cobre

d - Erro amostral

D - Dureza

DECAM - Departamento de Engenharia e Ciências Ambientais

DEC - Departamentos de Engenharia Civil

d_i - Distância euclidiana entre o valor amostrado e o estimado

Dsv.Pad - Desvio Padrão

EMA - Erro Médio Absoluto

EMATER - Instituto de Assistência Técnica e Extensão Rural

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EMR - Erro Médio Relativo

EQM - Erro Quadrático Médio

Fe - Ferro

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations

FG - Frutuoso Gomes

FUNCEME - Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos

GNOMO - Laboratório de Geotecnologias Aplicadas, Modelagens Costeira e Oceânica

Marinha

GPR - Ground Penetrating Radar

HCO₃⁻ - Bicarbonato

i - Número de pontos amostrados utilizados para estimar o valor de um local não medido.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDW - Inverse Distance Weighted

IT - Itajá

J-SC1 - Jucurutu, Comunidade Saco dos Cavalos, Barragem 1

J-SC2 - Jucurutu, Comunidade Saco dos Cavalos, Barragem 2

K⁺ - Potássio

LA-C - Lajes, Comunidade Cabugi

LA - S - Lajes, Comunidade Solista

LASAP - Laboratório de Solo, Água e Planta

LC - Lucrecia

Ld - Limite de detecção

LG-B1 - Luis Gomes, Comunidade Boqueirão, Barragem 1

LG-B2 - Luis Gomes, Comunidade Boqueirão, Barragem 2

LP-BP - Lajes Pintadas, Comunidade Barros Preto

LP-TN - Lajes Pintadas, Comunidade Tanque Novo

Mg²⁺ - Magnésio

Mn - Manganês

MV - Marcelino Vieira

n - número de pontos amostrados

N - Tamanho da população

Na⁺ - Sódio

Nd - Não determinado

Ni - Níquel

ODB - Olho D'água dos Borges

P - Proporção da população

P1+2 - Programa 1 Terra e 2 Águas

P1MC - Programa 1 Milhão de Cisternas

Pb - Chumbo

pH - Potencial Hidrogeniônico

PL - Parelhas

PR - Paraú

RAS - Razão de Adsorção de Sódio

RN - Rio Grande do Norte

s - Tamanho da amostra necessária;

S - Enxofre

S1 - Baixo perigo de sódio

S2 - Médio perigo de sódio

S3 - alto perigo de sódio

S4 - Muito alto perigo de sódio

SDT - Sólidos dissolvidos totais

SM-BV - Severiano Melo, Comunidade Boa Vista

SM-IP - Severiano Melo, Comunidade Ipoeira

SP - Serrinha dos Pintos

SR - São Rafael

SST - Sólidos em suspensão totais

ST - Sólidos totais

ST - São Tomé

SUDENE - Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste

TP - Triunfo Potiguar

UFERSA - Universidade Federal Rural do Semi-Árido

UFRN - Universidade Federal do Rio Grande do Norte

UM - Umarizal

USSL - United States Salinity Laboratory

X - Variável normal padronizada associada ao nível de confiança

Z_{ai} - Valor amostrado

Z_c - Valor estimado

Zn - Zinco

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo geral	3
2.2 Objetivos específicos	3
3 REVISÃO DE LITERATURA	4
3.1 Semiárido brasileiro e escassez hídrica	4
3.2 Técnicas de combate à escassez hídrica na área rural	6
3.3 Barragens subterrâneas	9
3.3.1 Classificação das barragens subterrâneas	9
3.3.2 Recomendações para locação, construção e manejo das barragens subterrâneas	12
3.3.3 Classes de solo e seu uso em barragens subterrâneas.....	13
3.3.4 Estudos desenvolvidos no Rio Grande do Norte	14
3.4 Qualidade da água	14
3.4.1 Usos múltiplos das águas das barragens subterrâneas.....	15
3.4.2 Características necessárias à irrigação.....	15
3.5 Técnicas de análise de dados	19
3.5.1 Análise estatística multivariada	19
3.5.2 Espacialização de dados	20
4 MATERIAL E MÉTODOS	21
4.1 Caracterização da área de estudo	21
4.2 Seleção das barragens subterrâneas	23
4.3 Coleta das amostras	27
4.4 Variáveis analisadas	28
4.5 Critérios de avaliação	29
4.6 Análise estatística	30
4.6.1 Estatística descritiva	30
4.6.2 Estatística multivariada.....	30
4.6.3 Espacialização da condutividade elétrica	31
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
5.1 Estatística descritiva das variáveis analisadas	33
5.2 Classificação da qualidade da água dos poços das barragens subterrâneas de acordo com o risco de salinização e sodificação do solo	39

5.2.1 Bacia do riacho Melancias.....	42
5.3 Qualidade da água das barragens subterrâneas para uso na irrigação de acordo com a toxicidade de íons específicos e oligoelementos	44
5.4 Qualidade da água das barragens subterrâneas para uso em sistemas de irrigação localizada	48
5.5 Análise de correlação entre as variáveis analisadas	54
5.6 Análise fatorial das variáveis relacionadas a qualidade da água de irrigação	56
5.7 Análise de agrupamento das barragens que apresentam semelhantes características físico-químicas de suas águas	59
6 CONCLUSÕES.....	66
7 REFERÊNCIAS.....	67

1 INTRODUÇÃO

As regiões semiáridas do Brasil são caracterizadas por baixos índices pluviométricos, distribuição irregular das precipitações no decorrer do tempo e espaço, e elevada evapotranspiração, os quais proporcionam escassez de água na região. Aliado aos fatores climáticos, o uso irracional e o desperdício também tem contribuído para a falta de água. A crescente poluição dos corpos hídricos agrava o problema por tornar a pouca água disponível imprópria.

Diante desse cenário, várias medidas de enfrentamento foram adotadas, ao longo dos anos, pelos órgãos governamentais e algumas Organizações não Governamentais, com intuito de aumentar a disponibilidade de água nessa região. Dentre elas, pode-se destacar: a construção de cisternas, para armazenamento das águas pluviais captadas em telhados das edificações, pátios cimentados ou no escoamento superficial do solo; a construção de açudes e barreiros; a construção de adutoras; perfuração de poços rasos e profundos; instalação de dessalinizadores; a distribuição de água por meio de carros pipas; e, a implantação de barragens subterrâneas, objeto de estudo deste trabalho.

Os órgãos públicos federais têm priorizado o financiamento de barragens subterrâneas, por serem de construção simples, de baixo custo de implantação e manutenção, fácil operação, e se adaptarem a diversos ambientes. Essas barragens proporcionam ao agricultor uma maior exploração da sua propriedade, viabilizando a geração de renda através do cultivo agrícola na área do barramento e criação de animais. Também há uma melhora na qualidade de vida, ocasionada pelo aumento da disponibilidade de água para uso residencial.

A barragem subterrânea é uma tecnologia de captação de água de chuva, através da instalação de um septo impermeável, dentro do solo, nas linhas de drenagem do terreno. Esse tipo de barramento permite uma maior infiltração de água no solo, reduzindo, ao mesmo tempo, o escoamento superficial e a erosão. Esta ainda pode proporcionar a plantação em períodos de estiagem, a depender da quantidade de chuva (Santos et al., 2008; Silva et al., 2010).

O modelo mais utilizado no semiárido brasileiro é o Costa & Melo (Lima et al., 2013), o qual é dotado de um poço escavado permitindo a utilização da água para dessedentação de animais e consumo doméstico secundário (consumo humano para usos gerais), além da produção agrícola.

A instalação de barragens sem critérios de locação, negligenciando as técnicas construtivas, não envolvendo a comunidade com a obra, executando um manejo inadequado, além do acompanhamento e monitoramento inexistente podem implicar em sua inutilização e na contribuição da degradação dos recursos hídricos.

Apesar dos investimentos realizados e da existência de um número considerável de barragens no estado do Rio Grande do Norte (1591 barragens implantadas pelo Instituto de Assistência Técnica e Extensão Rural do estado até o ano de 2018), poucos são os estudos que as avaliam (Lima, 2013). O acompanhamento das condições das barragens existentes ao longo do tempo, o estudo da viabilidade econômica, a quantificação dos benefícios e a definição das limitações são necessários para auxiliar as políticas de convivência com o semiárido e aumentar o rendimento hídrico e financeiro das barragens. Auxiliado por esses estudos pode-se definir padrões de monitoramento e acompanhamento técnico, na tentativa de maximizar o retorno econômico e social proveniente da sua instalação.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a qualidade da água de barragens subterrâneas do semiárido potiguar, para fins de irrigação.

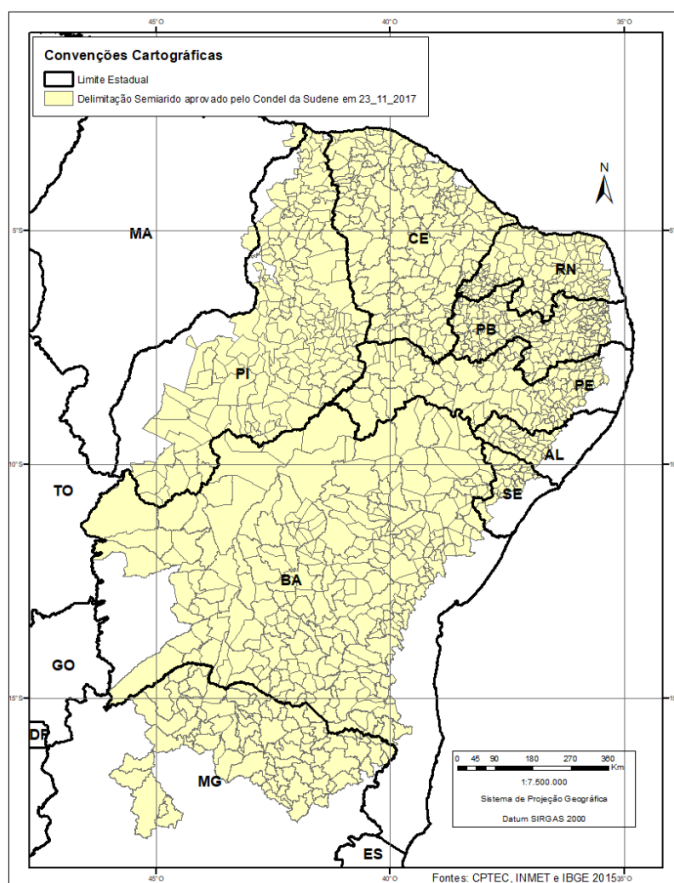
2.2 Objetivos específicos

- Avaliar o comportamento de variáveis físico-químicas da água de barragens subterrâneas do semiárido potiguar em duas estações climáticas distintas, seca e chuvosa;
- Avaliar a influência da salinidade e da presença barramento superficial a montante, na variação da condutividade elétrica das águas de barragens subterrâneas do semiárido potiguar entre as estações climáticas seca e chuvosa;
- Classificar a água das barragens subterrâneas do semiárido potiguar em relação ao risco de salinidade e sodicidade do solo, propostos pelo *United States Salinity Laboratory*;
- Identificar a influência do uso e ocupação do solo e do manejo da área na salinização da água de barragens subterrâneas do semiárido potiguar;
- Identificar as principais variáveis geradoras de problemas relacionados à obstrução do sistema de irrigação localizada, ao utilizar a água das barragens subterrâneas do semiárido potiguar;
- Identificar as variáveis que exercem maior influência na variação hidroquímica da água das barragens subterrâneas do semiárido potiguar;
- Avaliar o uso do interpolador de ponderação do inverso da distância na geração de mapas de variabilidade espacial da condutividade elétrica da água de barragens subterrâneas do semiárido potiguar; e
- Avaliar a variabilidade espacial e da condutividade elétrica da água de barragens subterrâneas em estações climáticas distintas, seca e chuvosa.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Semiárido brasileiro e escassez hídrica

O semiárido brasileiro ocupa uma área de 1.128.697 km² e abrange 1.262 municípios pertencentes aos estados do Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e Minas Gerais, conforme Figura 1. Essa região possui 27.870.241 habitantes, a qual representa aproximadamente 14% da população brasileira (SUDENE, 2017a,b).



Fonte: ANA (2017).

Figura 1. Mapa de delimitação do semiárido brasileiro.

De acordo com a SUDENE (2017a), o semiárido brasileiro se caracteriza por apresentar precipitações média anual igual ou inferior a 800 mm; ou índice de aridez de Thornthwaite igual ou inferior a 0,50; ou percentual diário de déficit hídrico igual ou superior a 60%, considerando todos os dias do ano. Nota-se também a distribuição irregular das chuvas, no tempo e espaço, e a existência de eventos de precipitação intensa (precipitações superiores a 50 mm em 24 horas), tornando o período chuvoso concentrado entre 3 e 5 meses do ano (Montenegro & Montenegro, 2012; Ramalho, 2013). Esses autores enfatizaram ainda que o semiárido apresenta temperaturas

elevadas, em média 28 °C; baixa amplitude térmica, inferior 5 °C; insolação média anual de 2.800 h e evapotranspiração potencial média de 2.500 mm no ano, ocasionando um elevado déficit hídrico e limitando a agricultura de sequeiro.

O semiárido brasileiro apresenta uma grande diversidade de solos, devido a sua formação geológica, embasamento cristalino (ocupando 70% dessa região) e bacias sedimentares. Os solos formados sobre o embasamento cristalino geralmente são rasos e eutróficos, com vegetação do tipo caatinga, composta por arbustos que perdem as folhas nos meses mais secos e águas subterrâneas com elevado teores de sais e baixa vazão (Cirilo, 2008; Gama & Jesus, 2020).

Os eventos de chuvas intensas somados a solos rasos e vegetação espaçada, com solo parcialmente descoberto, facilita o carreamento de sedimentos (partículas de solos e nutrientes) e pode ocasionar erosão, salinização e desertificação dessas áreas, como também um aumento do assoreamento e aporte de nutrientes nos açudes, o qual pode resultar em eutrofização do manancial (Ramalho, 2013; Oliveira, 2012).

Além da escassez hídrica oriunda das características climáticas e geológicas, a região nordeste apresenta, conforme Brasil (2019), elevado índice de perdas nos sistemas de distribuição de água (46%).

Mota (2002) afirma que o Brasil, antes da década de 90, as perdas e desperdícios com a irrigação chegavam a 80% e eram ocasionados principalmente pelo uso de técnicas inadequadas e equipamentos mal projetados e manejados (Rodrigues & Irias, 2004). Sendo assim, Araújo (2012) comenta que o uso de métodos mais eficientes de irrigação pode gerar economia de água em até um terço, considerando-se a eficiência do sistema como um todo.

Outro fator que reduz a disponibilidade hídrica do semiárido é a poluição da água oriunda principalmente de despejos de esgotos domésticos, despejos de resíduos animais *in natura*, efluentes industriais, lixões, o uso de fertilizantes em quantidades acima do necessário ao cultivo, o uso de agrotóxicos, presença contínua de animais próximos aos mananciais e o cultivo de peixes em tanques redes nos açudes, com o uso de ração (Araújo, 2012; Moreschi et al., 2015).

Por fim, Zanella (2014) e Ramalho (2013) elencam as perdas resultantes da redução da disponibilidade de água, oriunda das secas prolongadas, como: redução ou perda das culturas; morte dos animais; maior degradação da qualidade das águas ainda existentes, resultando em um maior número de morbidade por doenças infectocontagiosas e gastrointestinais; aumento do desemprego rural e da migração campo-cidade; e, sobrevivência com recursos públicos de caráter emergencial.

Portanto a gestão dos recursos hídricos, no que se refere ao gerenciamento de demandas e oferta e a proteção dos mananciais, aliada a redução de perdas nos sistemas de adução, melhorias no sistema de irrigação e a implementação do reúso de água são primordiais para uma melhor convivência com o semiárido.

3.2 Técnicas de combate à escassez hídrica na área rural

A primeira ação efetiva por partes dos governantes do Brasil no combate a escassez hídrica do Nordeste foi em 1877, com a criação de uma comissão imperial que tinha como objetivo estudar a província do Ceará e propor ações para garantir a sobrevivência da população e agropecuária no período de seca. Em 1909 foi criada a Inspetoria de Obras Contra as Secas e a primeira medida adotada foi a construção de açudes (Campos, 2014).

Cirilo (2008) afirma que os açudes podem-se enquadrar em duas categorias, de acordo com a sua capacidade de acumulação: açudes de médio e de grande porte, com capacidade de acumulação na ordem de bilhões de metros cúbicos, construídos em bacias hidrográficas de maior porte e com capacidade de regularização plurianual, os quais existem em menor quantidade; e, os açudes de pequeno porte, ou barreiros, com capacidade de acumulação na ordem de milhares de metros cúbicos. Os barreiros são construídos principalmente para o atendimento da população rural difusa e estão presentes em grandes quantidades em todos os estados do semiárido. Esses barreiros não resistem a secas prolongadas, devido aos altos índices de evaporação potencial da área.

Montenegro & Montenegro (2012) e Feitosa (2011) ressaltam que a qualidade de água dos açudes apresenta elevada sazonalidade, estratificação vertical e vem sofrendo acelerado processo de eutrofização; sendo assim, somente a política de implantação de açudes não é eficiente para combater a escassez hídrica.

Outra medida bastante difundida nas áreas urbanas e rurais dos municípios do semiárido é a implantação de poços tubulares profundos e poços escavados rasos. Conforme mencionado anteriormente, a maior parte do semiárido encontra-se sobre formação cristalina, a qual caracteriza-se por águas subterrâneas com elevado teores de sais e baixa vazão. Cirilo (2008) afirma que os poços tubulares são caracterizados por profundidades na ordem de 50 m e vazões médias de $2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, além do elevado índice de poços secos.

Os poços escavados rasos, também conhecidos por cacimbões ou poços amazonas, são instalados geralmente em vales aluviais dos rios e riachos intermitentes. Apesar desse aquífero apresentar muitas vezes salinidade elevada, possui a vantagem da renovação e diluição

relativamente rápida de suas águas, dependendo das precipitações pluviométricas, sendo largamente utilizado no semiárido (Montenegro & Montenegro, 2012).

O Serviço Geológico do Brasil - CPRM (2002) constatou que apenas 25% das amostras de água coletada nos poços do Nordeste eram consideradas doce, sendo 33% classificadas como salobra e 42% como salgadas.

Com o intuito de reduzir a salinidade das águas captadas no semiárido, de forma a torná-la própria para o consumo humano, o Governo Federal, através do programa Água Doce, tem investido na instalação de dessalinizadores com sistema de tratamento por osmose reversa. Souza et al. (2016) ressaltam que os principais desafios desse sistema são o elevado custo de manutenção, principalmente por causa das membranas, e a grande quantidade de rejeito produzido, composto por elevadas concentrações de sais. Algumas soluções podem ser adotadas para destinação dos rejeitos, como: uso de tanques com lâminas d'água delgadas para incremento da velocidade de evaporação e a consequente deposição de sais; acumulação em tanques para a criação de peixes, como tilápia rosa, e o camarão marinho; o cultivo de *Atriplex nummularia*, planta com grande capacidade de absorção de sais e que pode ser utilizada como forrageira.

Outra forma de disponibilizar água para consumo humano da população rural difusa é através da instalação de cisternas rurais (Figura 2), com captação de água de chuvas nos telhados das casas ou em lajes instaladas nos terrenos. No semiárido brasileiro, dois programas idealizados pela Articulação no Semiárido Brasileiro (ASA Brasil) foram primordiais na solidificação e disseminação dessa tecnologia: P1MC – Programa 1 Milhão de Cisternas, iniciado em 2001, com objetivo de instalar cisternas de 16 m³ para armazenar água de chuva captada nos telhados das residências, para consumo humano; e P1+2 – Programa 1 Terra e 2 Águas, iniciado em 2007, com objetivo de armazenar água de chuva captada em um calçadão de cimento construído sobre o solo, com pelo menos 200 m² em uma cisterna de 52 m³, para irrigação de quintais produtivos e dessedentação de animais.

Apesar da grande disseminação das cisternas, os programas ainda carecem de ações efetivas no tocante à qualidade da água armazenada. Andrade Neto (2013) relata que a segurança sanitária de sistemas de captação de água de chuva em cisternas depende da educação sanitária dos usuários e do manejo seguro, mas, também, de um projeto adequado, que incorpora barreiras físicas de proteção sanitária, inspeção regular e manutenção do sistema. O mesmo apresenta a importância de descartar o primeiro milímetro de cada chuva, o qual lava a atmosfera e a superfície de captação.



Fonte: Acervo pessoal (2010).

Figura 2. Cisternas de placa de 16 m³ com captação nos telhados das residências.

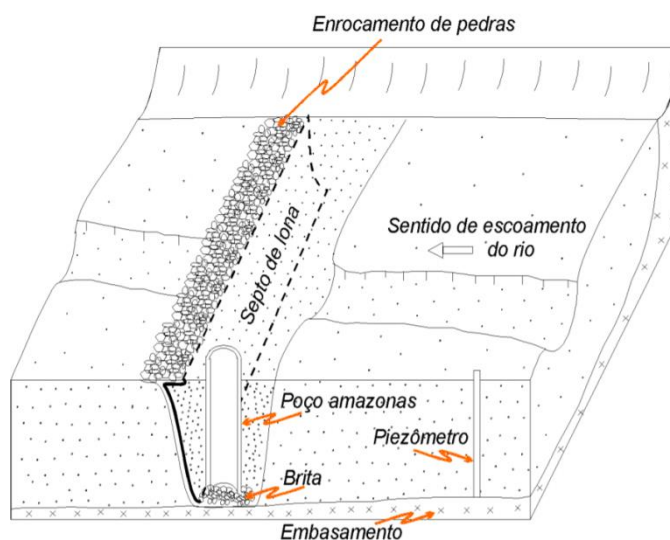
Os órgãos governamentais priorizaram também a construção de adutora e canais para viabilizar o abastecimento de água das cidades e dos perímetros irrigados. Cirilo (2008) relatam essas adutoras e canais captam água a partir de açudes de médio e grande porte ou em poços profundos, instalados em áreas sedimentares. Devido ao elevado custo dessa água, não é viável a utilização desse tipo de sistema para o abastecimento de populações rurais difusas, exceto aquelas que estejam próximas ao traçado das obras.

Diante da escassez hídrica e de inúmeros problemas com a qualidade da água, tem-se aumentado os estudos relacionado ao reúso de esgoto domésticos na irrigação. Ferreira et al. (2019) alertam que os esgotos são utilizados geralmente de forma informal, na região semiárida nordestina, sendo necessário o monitoramento e o controle da qualidade da água de reúso e a avaliação dos riscos para solo, culturas irrigadas e impactos à saúde humana. Além dessas avaliações, para prática efetiva do reúso é necessário haver a aceitação pública e a integração dos diversos setores envolvidos, de forma que essas práticas sejam incluídas em novos projetos de saneamento básico, principalmente os que envolve os pequenos aglomerados rurais.

Apesar de todas as medidas e infraestruturas implantadas para combate a escassez hídrica, entre os anos de 2003 a 2018, 51% (2.842) dos municípios brasileiros declararam estado de emergência ou calamidade devido à estiagem (ANA, 2019). Muitas cidades e comunidades rurais difusas tiveram que ser abastecidas através de carro pipa. Dessa forma, a ampliação e o fortalecimento da infraestrutura hídrica, com adequada gestão, constituem requisitos essenciais para a solução do problema.

3.3 Barragens subterrâneas

A barragem subterrânea também é uma tecnologia que vem sendo largamente empregada no semiárido brasileiro, como forma de combate a escassez hídrica. Ela consiste em uma obra hidroambiental, construída em depósitos aluvionais (rios e riachos intermitentes) e linhas de drenagem, que objetiva interceptar o fluxo de água subterrâneo ou subsuperficial, por meio de um septo impermeável, instalado transversalmente ao sentido do fluxo de água de forma a favorecer seu acúmulo dentro do solo (EMBRAPA, 2011; Lima, 2013), conforme Figura 3.



Fonte: Cirilo & Costa (1999).

Figura 3. Desenho ilustrativo de uma barragem subterrânea.

Essas estruturas são de construção simples, de baixo custo de implantação e manutenção, fácil operação, além de proporcionar a redução de perdas d'água por evaporação, possuir uma maior proteção da água contra poluição externa e não haver perdas de áreas superficiais por inundações, conforme apontado por Cirilo et al. (2003). Lima et al. (2013) ainda acrescentam que essa tecnologia é de fácil replicação e possui capacidade de adaptação a diversos ambientes e demanda dos usuários.

3.3.1 Classificação das barragens subterrâneas

As barragens subterrâneas são classificadas de acordo com a altura do septo impermeável, sendo assim, são chamadas de submersa quando o septo se encontra abaixo do nível do solo, e submersíveis quando está acima do nível do solo (Brito et al., 1999). As barragens submersíveis proporcionam um acúmulo gradativo de sedimentos com maior granulometria (fração areia) e podem acumular um maior volume de água, devido ao incremento do armazenamento

superficial, ficando, geralmente, alagadas de 2 a 3 meses após o período chuvoso. As águas dessas barragens vertem por sangradouros construídos em concreto.

a) Barragens submersíveis

Existem três modelos de barragens subterrâneas do tipo submersíveis implementados no Brasil: EMBRAPA; ASA Brasil ou Caatinga; e, Serra Negra do Norte. O modelo EMBRAPA possui como principal função a criação de uma área úmida para ser utilizada para o cultivo agrícola, portanto pode ser construída fora da área aluvional, em locais mais argilosos, não necessitando a instalação de poços amazonas ou cacimbão. Já o modelo Caatinga deve ser utilizado na área aluvional, com a instalação de poço amazonas com nível acima da cota de sangria, para retirada de água da barragem. Esse modelo de barragem proporciona um maior volume de água armazenado que o modelo EMBRAPA. Por fim, o modelo Serra Negra do Norte caracteriza-se por ser instaladas em rios de maior porte, possuindo grandes vertedouros de concreto e conseqüentemente maior acúmulo subterrâneo e superficial. Exige estudos topográficos e projeto estrutural, tornando a construção desse modelo de barragem mais oneroso. Se construída de forma sequenciada possibilita a perenização de trechos de rios intermitentes (Lima et al., 2013).

b) Barragens submersas

O modelo mais utilizado no semiárido brasileiro é o de barragem submersa, também conhecida por Costa & Melo (Lima et al., 2013; França et al., 2016). Esse tipo de barramento apresenta como características, a escavação de uma trincheira retilínea no leito de rio ou riacho, perpendicular à direção do escoamento (Figura 4A), na qual é inserida uma lona de polietileno de 200 micras (Figura 4B), para impermeabilizar o solo e impedir a passagem de água e sobre essa área impermeabilizada é realizado um enrocamento de pedras ou uma barreira de solo para proteção do barramento (Figura 4C).

Na área da barragem subterrânea são instalados um ou mais poços do tipo cacimbão ou amazonas (Figura 4D), de forma a permitir a utilização da água armazenada na zona saturada para dessedentação de animais, consumo doméstico e produção agrícola. Também devem ser inseridos piezômetros ao longo da bacia hidráulica da barragem que irão auxiliar na avaliação da qualidade e quantidade da água existente na mesma (Oliveira et al., 2010).

Deve-se fazer a proteção sanitária do poço raso, com a finalidade de evitar entrada de animais e de águas de enxurradas, além da proliferação de algas. Para isso, deve-se adaptar as proteções sanitárias sugeridas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT em sua NBR 12.244 – Construção de poço para captação de água subterrânea (ABNT, 2006). Sendo

assim a parede do poço deve estar acima do nível do solo, a uma altura mínima de 50 cm, e além disso sua parede deve ser impermeabilizada internamente e externamente em uma altura mínima de 1 m, a partir da boca do poço. Além disso, o poço deve ser possuir tampa de concreto, cimentada e com uma abertura com tampa móvel de forma a facilitar a captação de água.



Fonte: Saulo Samuel Carneiro Praxedes (2012).

Figura 4. Construção de barragem subterrânea na comunidade Olho D'água do Milho no município de Caraúbas: Escavação da trincheira (A), Acomodação da lona de polietileno (B), Proteção do barramento com pedra e solo (C) e Instalação do poço amazonas (D).

A limitação deste tipo de barramento subterrâneo é a necessidade da presença de pacotes sedimentares mais espessos, recargas subterrâneas suficientes para possibilitar o aproveitamento hídrico pleno e uma condutividade hidráulica adequada, que facilite a recarga de água dos poços amazonas durante o bombeamento da água (Lima et al., 2013).

3.3.2 Recomendações para locação, construção e manejo das barragens subterrâneas

A realização de um estudo prévio para definir o local mais adequado para implantação da barragem subterrânea no curso d'água é de extrema importância. Nele devem ser identificados os locais que: apresentam solos aluviais mais arenosos, sem características salinas e com depósitos aluviais mais espessos, com pelo menos 2 m de espessura; possuem maiores áreas de contribuição, ou seja, o local a ser barrado deve possuir pelo menos 1 km de extensão a montante; apresentam áreas de estrangulamento, de forma a reduzir os custos com escavação e lona, além de proporcionar uma maior área de contribuição; não possuem barramentos superficiais naturais (soleiras rochosas) ou artificiais (barreiros) próximos, uma vez que, os barramentos superficiais a montante reduzem a área de contribuição e os a jusante proporcionam uma elevação do lençol freático, sendo desnecessária a instalação da barragem subterrânea (Costa & Costa Filho, 2015).

Em relação ao processo construtivo, deve-se: realizar durante o período seco, de forma a ter uma pequena (inferior a 1 m) ou nenhuma espessura saturada do leito do riacho e seja viável o esgotamento da água durante a construção; verificar a correta instalação da lona plástica de forma que não ocorra perfuração da lona por pedras ou raízes e nem instalação acima do leito rochoso; verificar a permeabilidade das paredes do poço Amazonas ou cacimbão de forma a favorecer o bombeamento de um maior volume de água; assegurar proteção sanitária do poço; e, instalar enrocamento de pedra ou sacos de areia, no máximo 50 cm de altura e imediatamente a jusante do ponto de colocação da lona, de forma a proporcionar uma maior infiltração de água (Costa & Costa Filho, 2015).

Em relação ao manejo, Lima (2013), não recomenda a utilização de fertilizantes industrializados e nem a criação ou o trânsito de animais sobre a área da barragem. Os esgotos sanitários, também, devem ser mantidos distantes da área da barragem, evitando assim a contaminação dos mananciais hídricos. Ressalta-se que deve haver rotação de culturas, de forma a empregar cultivos tolerantes a salinidade. Silva et al. (2011) recomendam, ainda, que as barragens devem ser monitoradas a cada dois anos, de forma a prevenir possíveis problemas de salinização.

Nenhum dos fatores acima são suficientes para o êxito da implantação dessa tecnologia se os beneficiários não se envolverem ativamente em todas as etapas do processo e se conscientizarem da necessidade da instalação dessa obra hídrica em sua propriedade. Esse fato ocorre por muitas vezes o recurso para execução das barragens possuem um prazo curto para implantação, impossibilitando assim, a avaliação conjunta com os beneficiários da real necessidade de implantação da barragem.

3.3.3 Classes de solo e seu uso em barragens subterrâneas

O conhecimento do tipo de solo existente na área que se deseja implantar uma barragem subterrânea é de fundamental importância para definição do tipo de barragens e os cuidados construtivos que devem ser empregados, bem como nas escolhas dos cultivos e definição do manejo a ser adotado.

Silva et al. (2010) e Silva et al. (2019) abordaram em seus estudos os diferentes tipos de solo do semiárido e seus potenciais para locação de barragens subterrâneas, entre eles destaca-se:

- os argisolos por possuírem textura média/argilosa, média fertilidade e condições físicas favoráveis, mesmo quando apresentam camada de impedimento superior a 1,0 m de profundidade; e,

- os neossolos quartzarênicos latossólico, pois apesar da sua textura arenosa, eles apresentam uma camada impermeável a 3 m de profundidade o que viabiliza a utilização de barramentos subterrâneos.

Os mesmos autores alertam que alguns solos não são viáveis para implantação de barragens subterrâneas ou necessitam de adequações no manejo e cultivo, como:

- os planossolos por apresentarem maiores concentrações de sais, sendo recomendado somente para cultivos de espécies tolerantes;

- os neossolos quartzarênicos por apresentarem grandes profundidade, o que dificulta utilização da lona que possui altura limite de 6m, e baixa capacidade de retenção de água;

- os neossolos litólicos por serem rasos (< 1 m) não são recomendados para locação de barragens subterrâneas por proporcionarem pouca acumulação de água;

- os neossolos flúvicos (aluviões), por apresentarem grandes profundidades, as quais estão relacionadas diretamente com a vazão do rio/riacho, o que pode restringir a implantação de barragens submersíveis e o uso de lona na impermeabilização do barramento; e,

- os vertissolos e os luvisolos crômicos, os quais apresentam características de expansão e contração, que podem comprometer a estrutura da parede do barramento, bem como dificultar o manejo da área de plantio. Além dessas características, eles apresentam baixa permeabilidade, condutividade hidráulica e velocidade de infiltração e alta capacidade de retenção, condições essas que propiciam acúmulo de sais na superfície.

Cirilo et al. (2003) ao analisar a qualidade da água nas barragens de Mutuca, no estado de Pernambuco, perceberam que as barragens implantadas em Planossolos e solos Litólicos apresentavam maior salinidade que as implantadas em solos aluviais.

3.3.4 Estudos desenvolvidos no Rio Grande do Norte

Nos últimos anos, os órgãos públicos federais priorizaram o financiamento de barragens subterrâneas como tecnologia para atendimento às necessidades de água da população rural, aumentando assim o número de barragens construídas no Brasil (Lima et al., 2019b).

Dessa forma, mais de 75% das barragens subterrâneas implantadas no estado do Rio Grande do Norte foram instaladas pelo Instituto de Assistência Técnica e Extensão Rural (EMATER-RN). Apesar do grande número de barragens subterrâneas existentes no estado, poucos são os estudos locais que avaliam as condições das barragens existentes, a viabilidade econômica, os benefícios e as limitações; e, definem padrões de monitoramento e acompanhamento técnico das mesmas (Lima, 2013).

Os estudos realizados no estado do Rio Grande do Norte, são em bacias pontuais, como: a avaliação da viabilidade técnico-econômica de uma barragem subterrânea construída no município de Alexandria, RN (Brito et al., 1999); a inclusão de Groud Penetrating Radar (GPR) para estudos de alocação e monitoramento de barragens subterrâneas, o qual foi realizado no corpo aluvionar da sub-bacia do riacho Pau Lavrado, no município de Fernando Pedrosa (Lima et al., 2018); a avaliação do nível do lençol freático e da salinidade da água de barragens subterrâneas situadas na bacia do rio Cobra, a qual engloba os municípios Parelhas, Carnaúba dos Dantas e Jardim do Seridó (Lima et al., 2019b); e, análise de atributos físico-químicos e biológico da água de quatro barragens subterrâneas situada no rio Espinharas, no município de Serra Negra do Norte, visando o consumo humano e irrigação (Dantas, 2009) e em três barragens subterrâneas do município de Caraúbas (Chianca et al., 2020). Diante desse cenário, faz-se necessário um estudo mais amplo das barragens subterrâneas, de forma a abranger todo o estado.

3.4 Qualidade da água

A qualidade da água é resultante das condições naturais e do uso e ocupação do solo. Durante os processos de escoamento superficial e infiltração pode haver incorporação de sólidos em suspensão e íons dissolvidos, havendo assim grande influência da cobertura e composição do solo nesses processos. O uso e ocupação do solo contribuem para introdução de compostos na água de forma concentrada, como lançamento de esgoto; ou difusa, como aplicação de defensivos agrícolas no solo. Muitas vezes a introdução desses compostos são em concentrações acima da capacidade de regeneração da água, ocasionando uma deterioração da sua qualidade (Von Sperling, 2014).

Vários fatores influenciam na qualidade da água subterrânea, entre eles destaca-se: clima, composição da água de recarga, tempo de contato da água e o meio físico, litologias atravessadas, além da contaminação antrópica (Santos, 2008).

A qualidade desejável para uma determinada água está relacionada com o seu uso previsto. Sendo assim, para cada uso existe um padrão de qualidade definido em legislação ou norma, a qual impõe limites para as características físico-químicas, bacteriológicas e organolépticas da água a ser utilizada. Esses padrões poderão auxiliar na indicação da necessidade, tipo e viabilidade de um tratamento para adequação ao uso (Von Sperling, 2014; ABNT, 1993).

3.4.1 Usos múltiplos das águas das barragens subterrâneas

Cirilo et al. (2003) relataram que 62,3% das barragens subterrâneas avaliadas no estado de Pernambuco/Brasil eram utilizadas pela comunidade beneficiada. Os usos mais comuns identificados foram em ordem decrescente: uso doméstico (lavar roupa, limpeza, para cozinhar) – 63,8%; dessedentação de animais – 44,7%; irrigação manual de pequenos cultivos – 26,6%; consumo humano (beber) – 13,8%; irrigação com bomba e sistema de distribuição – 6,38%; e, manufatura de tijolos e construção. Dentre os cultivos realizados, a maioria está relacionado a produção de capim para o gado.

Já França (2016) ao avaliar o uso de 40 barragens subterrâneas implantadas no estado do Ceará/Brasil, registrou que apenas 27,5% da água dessas barragens era consumida pelas famílias beneficiadas. Ele elencou que os principais fatores para o não consumo de água das barragens estavam relacionados a existência de outras fontes de água e a distância da barragem para a residência do beneficiário.

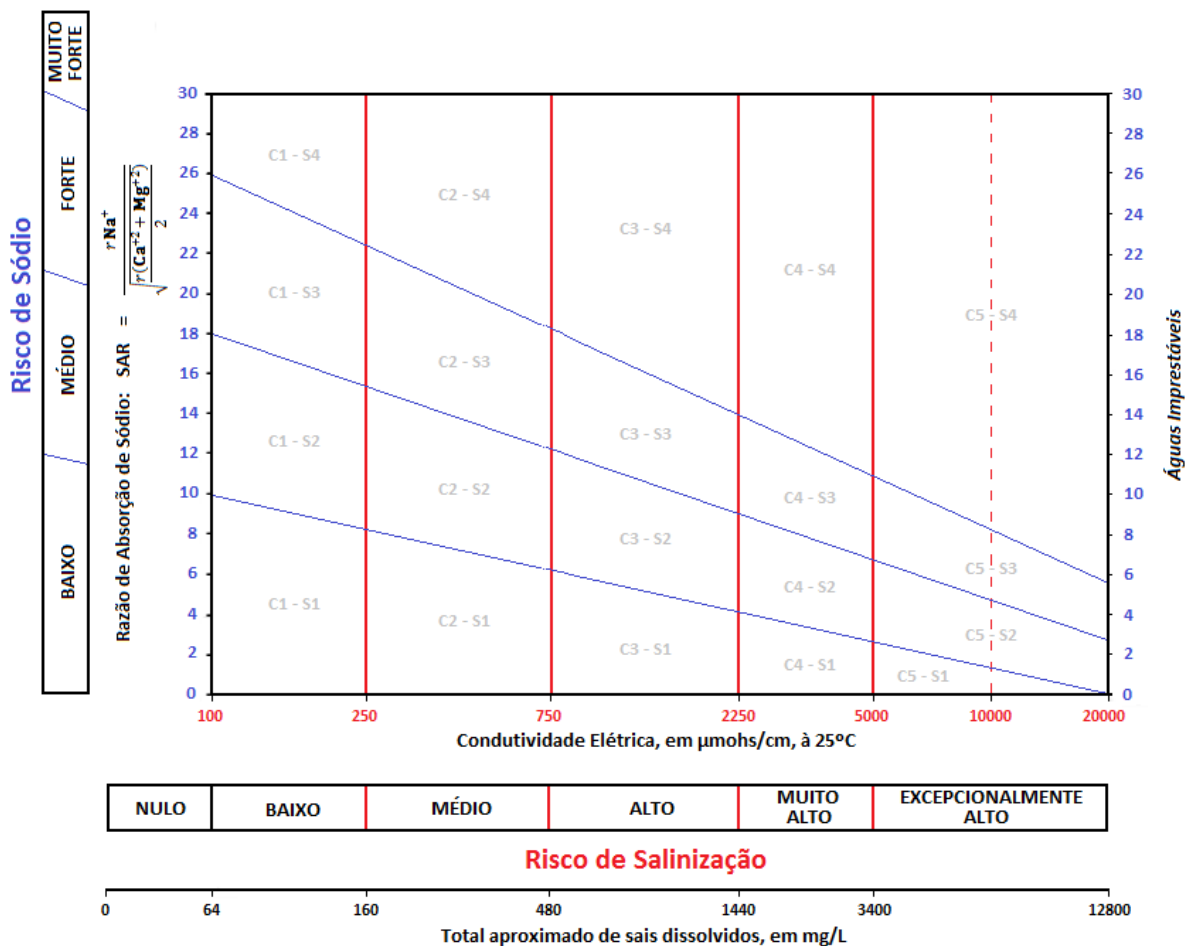
3.4.2 Características necessárias à irrigação

Ayers & Westcot (1999) afirmaram que os principais problemas da água utilizada na irrigação estão relacionados com o tipo e quantidade de sais dissolvidos e sedimentos em suspensão. Sendo assim, a água pode requerer técnicas especiais de manejo para controlar ou compensar eventuais problemas associados à sua utilização.

Os efeitos da água de irrigação sobre os vegetais levam em consideração, além de sua composição físico-química, as características da espécie vegetal, no tocante a tolerância à salinidade e o seu ciclo de vida; e as características físico-químicas do solo, através da permeabilidade, porosidade, textura e composição mineral (Santos, 2008). Na avaliação da

qualidade da água de irrigação também deve-se levar em consideração as características hidráulicas do emissor e do método de irrigação (Cordeiro, 2001).

Assim, o Laboratório de Salinidade dos Estados Unidos (*United States Salinity Laboratory* - USSSL) propôs, em 1954, uma classificação para água de irrigação em relação ao risco de salinização e sodificação do solo (Figura 5). Essa classificação é baseada na condutividade elétrica (CE), e na razão de adsorção de sódio (RAS). Ao classificar uma água para irrigação, supõe-se que ela será usada sob condições médias relacionadas à textura do solo, velocidade de infiltração, drenagem, quantidade de água usada, clima e tolerância dos cultivos aos sais. A inexistência de uma dessas condições pode tornar inseguro o uso da água, mesmo que sob condições médias, acima especificadas, ela encontre-se classificada como de boa qualidade.



Fonte: Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos - FUNCEME (2014).

Figura 5. Diagrama do United States Salinity Laboratory – USSSL.

A CE da água mede a sua capacidade de conduzir corrente elétrica, estando diretamente proporcional ao teor de sais dissolvidos sob a forma de íons, sendo, portanto, um indicador do perigo de salinização do solo. Santos (2008), com base na metodologia da USSSL dividiu esse

critério em cinco classes: salinidade baixa (C1), salinidade média (C2), salinidade alta (C3), salinidade muito alta (C4) e salinidade excepcionalmente alta (C5).

As águas abaixo de $100 \mu\text{mohs cm}^{-1}$ podem ser utilizadas na irrigação, sem restrição. As águas classificadas como C1 (CE entre 100 e $250 \mu\text{mohs cm}^{-1}$) podem ser usadas para irrigação da maioria dos cultivos em quase todos os tipos de solo, com pouca probabilidade de desenvolver problemas de salinidade. A classificação C2 indicam águas com CE entre 100 e $250 \mu\text{mohs cm}^{-1}$, as quais podem ser usadas no cultivo de plantas com fraca tolerância salina desde que estejam em solos silto-arenosos, siltosos ou areno argilosos, com um grau moderado de lixiviação. Águas classificadas como C3 apresentam conteúdos de sais entre 700 a $2.250 \mu\text{mohs cm}^{-1}$ e não pode ser usada em solos com drenagem deficiente e mesmo com drenagem adequada, podem ser necessárias práticas especiais para controle de salinidade. Só deve ser aplicada na irrigação de plantas de alta tolerância salina. A classificação C4, refere-se a águas com CE entre 2.250 a $5.000 \mu\text{mohs cm}^{-1}$, as quais não devem ser utilizadas para irrigação em condições normais, somente quando existir solos arenosos permeáveis, bem cuidados e abundantemente irrigados e plantas altamente tolerantes aos sais. Por fim, a classificação C5, refere-se a águas com CE superior a $5.000 \mu\text{mohs cm}^{-1}$, as quais devem seguir as mesmas instruções da classe anterior, no que se refere as condições de solo e irrigação, e ser utilizadas somente para irrigação de palmeiras, salvo exceções.

Por sua vez, a RAS indica a porcentagem de sódio contido em uma água que pode ser adsorvido pelo solo, sendo um indicador do perigo de alcalinização ou sodificação do solo (Almeida, 2010). Água com alta proporção de sódio em relação ao cálcio e magnésio pode ocasionar uma troca dos íons de cálcio e o magnésio adsorvidos por íons de sódio, resultando na dispersão dos colóides. Tomando-se como base este critério de perigo de sódio, as águas se classificam em quatro classes: baixo (S1), médio (S2), alto (S3) e muito alto (S4), a depender dos valores da RAS e da CE. Para valores maiores de salinidade, necessita-se menores valores de RAS para aumentar o perigo de sodificação (Cordeiro, 2001).

Richards (1954) informa que as águas com classificação S1 podem ser usadas para irrigação de todos os tipos de cultivos e em quase todos os solos, com pouco perigo de desenvolvimento de problemas de sodificação. As águas S2 só devem ser utilizadas em solos de textura arenosa ou ricos em matéria orgânica e com boa permeabilidade. As águas classificadas como S3 só devem ser utilizadas em plantas com alta tolerância ao sódio e exigem tratamento do solo com práticas de drenagem, lixiviação e aplicação de matéria orgânica. Por fim, águas classificadas como S4 são geralmente inadequadas para irrigação, exceto quando a salinidade for baixa ou média em solos bem drenados e com uso de gesso ou outro corretivo.

Ayers & Westcot (1999) propõe limites para alguns íons específicos e oligoelementos (Tabelas 1 e 2) que podem ocasionar problemas de toxicidade em plantas sensíveis devido a acumulação em seus tecidos, de forma a ocasionar danos e reduzir a produtividade das culturas. Na Tabela 1 também são apresentados os limites de algumas variáveis que pode ocasionar e obstrução do sistema de irrigação localizada, danos aos equipamentos de bombeamento e redução da infiltração do solo.

Tabela 1. Diretrizes para se interpretar a qualidade da água de irrigação

Problema Potencial	Unidade	Grau de restrição ao uso		
		Nenhum	Ligeiro a Moderado	Severo
Toxicidade de íons específicos (afetam culturas sensíveis)				
Sódio (Na⁺)				
Irrigação por superfície	RAS	< 3	3 – 9	> 9
Irrigação por aspersão	mmol _c L ⁻¹	< 3	> 3	
Cloreto (Cl⁻)				
Irrigação por superfície	RAS	< 4	4 – 10	> 10
Irrigação por aspersão	mmol _c L ⁻¹	< 3	> 3	
Bicarbonato (HCO₃⁻)				
Apenas aspersão convencional	mmol _c L ⁻¹	< 1,5	1,5 – 8,5	> 8,5
Boro (B)	mg L ⁻¹	< 0,7	0,7 - 3,0	> 3
pH		Faixa normal: 6,5 – 8,4		
Outros (problemas de entupimento no sistema de irrigação localizada)				
Sólidos em suspensão (SST)	mg L ⁻¹	< 50	50 – 100	> 100
Sólidos dissolvidos (SDT)	mg L ⁻¹	< 500	500 – 2000	> 2000
Manganês (Mn)	mg L ⁻¹	< 0,1	0,1 – 1,5	> 1,5
Ferro (Fe)	mg L ⁻¹	< 0,1	0,1 – 1,5	> 1,5
pH		< 7,0	7,0 – 8,0	> 8,0

Fonte: Ayers & Westcot (1999).

Tabela 2. Concentrações máximas de oligoelementos recomendáveis para a irrigação

Elemento	Concentração (mg L ⁻¹)	Observações
Cobre (Cu)	0,20	Entre 0,1 a 1,0 mg L ⁻¹ é tóxico para plantas em soluções nutritivas
Manganês (Mn)	0,20	No geral é tóxico só em solos ácidos desde alguns décimos até uns poucos mg L ⁻¹
Ferro (Fe)	5,0	Não é tóxico em solos com boa aeração, porém contribui para acidez e a indisponibilidade do fósforo e do molibdênio. A aspersão pode causar formação de depósitos em folhas
Zinco (Zn)	2,0	Tóxico para muitas plantas em concentrações bastante variadas. A toxicidade é reduzida em pH superior a seis e em solos de textura fina
Cromo (Cr)	0,10	Recomenda-se valores baixos devido à falta de conhecimento sobre sua toxicidade nas plantas
Níquel (Ni)	0,2	Entre 0,5 e 1,0 mg L ⁻¹ é tóxico para certas plantas, sua toxicidade é reduzida em pH neutro ou alcalino
Cádmio (Cd)	0,01	Tóxico para feijões, beterraba e nabo em concentrações abaixo de 0,1 mg L ⁻¹ em soluções nutritivas; recomenda-se limites baixos devido à sua acumulação potencial em solos e plantas; perigoso para seres humanos.
Chumbo (Pb)	5,0	Em altas concentrações pode inibir o crescimento celular

Fonte: Ayers & Westcot (1999).

3.5 Técnicas de análise de dados

3.5.1 Análise estatística multivariada

As técnicas de análise multivariada facilitam a interpretação de um número elevado de dados, uma vez que essa ferramenta permite agrupar variáveis e amostras similares, investigar a dependência entre as mesmas e construir testes de hipóteses a partir desses agrupamentos.

Por meio dos componentes principais e análise fatorial, é possível selecionar aquelas características de maior participação em cada componente e definir as características físico-químicas da água que deverão ser monitoradas reduzindo-se, assim, os custos com análises de características de menor importância na qualidade das águas (Gomes & Cavalcante, 2017).

Gomes & Franca (2019) obtiveram êxito ao avaliar uso de análise multivariada para subsidiar o monitoramento da qualidade da água subterrânea na bacia sedimentar do Araripe, sul do estado do Ceará, uma vez que essa técnica permitiu reduzir o número de variáveis à serem monitoradas. Os autores também observaram que não existiam variações significativas entre os períodos analisados (chuvoso e seco), reduzindo assim a necessidade de monitoramento em diferentes períodos climáticos.

Helena et al. (2000) afirma que essa ferramenta foi fundamental na confirmação e aprofundamento das conclusões hidroquímicas preliminares obtidas com a estatística univariada em relação a qualidade da água do lençol freático do rio Pisuerga na Espanha. Gomes & Cavalcante (2017) ao analisarem a qualidade da água subterrânea do município de Fortaleza/CE, também consideraram a análise multivariada uma ferramenta importante para o monitoramento e suporte a gestão da qualidade da água subterrânea em regiões semiárida de alta vulnerabilidade socioambiental.

3.5.2 Espacialização de dados

Jakob & Young (2006) alertam que a interpolação espacial é uma técnica utilizada para estimar valor de um atributo em um local não amostrado. Esta converte observações pontuais em campos contínuos produzindo padrões espaciais que são comparados entre si. Dessa forma, existem diversos interpoladores, porém os autores afirmam que a Krigagem apresenta melhores resultados, pois leva em consideração a correlação espacial da variável. Entretanto, para obtenção dessa correlação espacial e uma melhor estimativa de valor para os locais não amostrados é necessário que os dados possuam uma distribuição normal.

Souza et al. (2010) descrevem que o interpolador de ponderação do inverso da distância (IDW) é um interpolador determinístico univariado de médias ponderadas. Sendo assim, esse método não leva em consideração a correlação espacial dos dados e sim apenas relações baseadas na distância. Assim, o método de interpolação IDW prediz um valor para um local não medido utilizando-se de valores amostrados à sua volta, determinando um maior peso para os valores amostrados mais próximos. Segundo Jakob & Young (2006), este método pode ser adequado para uma visualização ou interpretação preliminar da interpolação de uma superfície, pois não é realizada uma avaliação da predição de erros, que pode produzir um efeito *bulls eyes* ao redor da localização do dado.

Andrade et al. (2012) relataram sobre a importância do conhecimento da qualidade da água subterrânea e sua distribuição espacial para o planejamento da exploração e do manejo do aquífero. Eles ainda observaram que a condutividade elétrica da água subterrânea, utilizada para irrigação em um assentamento rural no semiárido pernambucano, mantinha um padrão de distribuição espacial ao longo dos três anos de estudo. Nesse contexto, Costa et al. (2006) afirmaram que o uso da geoestatística confirmou a existência de setores no aquífero cristalino do Rio Grande do Norte com salinidades distintas.

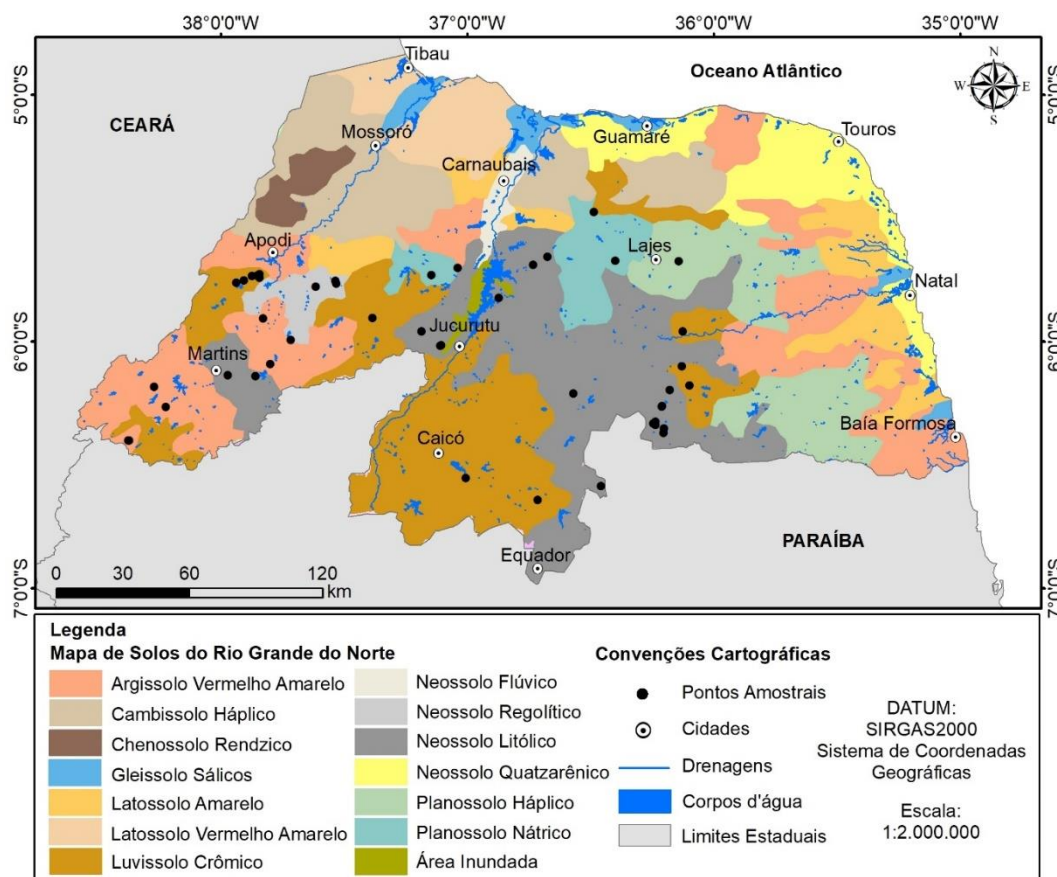
4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização da área de estudo

A presente pesquisa foi desenvolvida no interior do estado do Rio Grande do Norte (RN) – Brasil, nas áreas que possuíam uma maior concentração de barragens subterrâneas instaladas pelo Instituto de Assistência Técnica e Extensão Rural do Rio Grande do Norte – EMATER/RN.

As barragens subterrâneas, do estado, estão situadas em áreas que apresentam clima semiárido quente (BSh), conforme a classificação de Köppen, caracterizada por escassez de chuvas (250 – 750 mm), as quais ocorrem no verão e arrastam-se até o outono, grande irregularidade na sua distribuição e elevados índices de evaporação, apresentando uma evapotranspiração potencial mensal média de 125 mm (Diniz & Pereira, 2015; Dubreuil et al., 2018; Lima et al., 2019a).

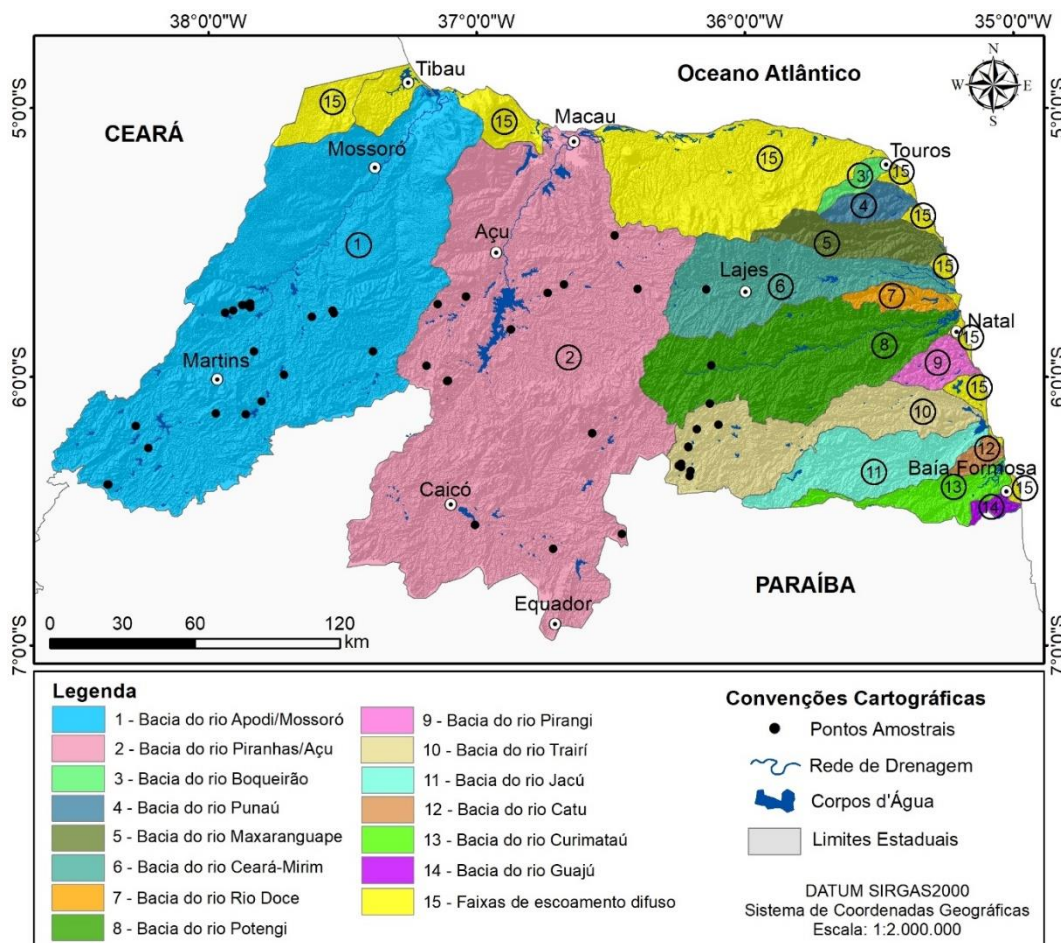
Conforme o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) (IBGE & EMBRAPA, 2001), as barragens subterrâneas estão localizadas sobre rochas do embasamento cristalino e em solos do tipo argissolo vermelho amarelo, luvisolo crômico, neossolo litólico, neossolo regolítico, planossolo háplico e planossolo nátrico, conforme observado na Figura 6. Com relação ao tipo de relevo, a maior parte das barragens estão situadas em relevo plano (53%), existindo ainda em relevo suave ondulado (29%) e ondulado (18%), conforme a classificação proposta por Santos et al. (2018).



Fonte: IBGE & EMBRAPA adaptada e atualizada (2001).

Figura 6. Mapa de solos do estado do Rio Grande do Norte.

O estado do RN é dividido em quatorze bacias hidrográficas mais as faixas de escoamento difuso. Na Figura 7 evidencia-se que as bacias do rio Piranhas-Açu e do rio Apodi-Mossoró ocupam a maior área drenada do estado, desaguam em seu litoral norte e possuem a maior concentração das barragens subterrâneas avaliadas (31 e 42%, respectivamente). As demais barragens estão localizadas na bacia do rio Trairí (20%), do rio Potengi (5%) e do rio Ceará-Mirim (2%), as quais desaguam no litoral leste do estado.



Fonte: ANA (2012).

Figura 7. Bacias hidrográficas do estado do Rio Grande do Norte.

4.2 Seleção das barragens subterrâneas

Com o intuito de abranger os municípios do RN, que possuíam barragens subterrâneas instaladas em sua área rural, a seleção das barragens a serem avaliadas foi executada em cinco etapas.

Na primeira etapa foi realizado um levantamento do número de barragens subterrâneas, construídas pela EMATER/RN, por regional e por município. A escolha dessa instituição, deve-se ao fato da mesma possuir o maior número de barragens instaladas no estado (LIMA, 2013).

Na segunda etapa foram consideradas somente as barragens consideradas finalizadas pela EMATER/RN, ou seja, deveriam possuir poços, renques e acabamento de pedra, sobre o septo impermeável, instalados. Em agosto de 2018, essa instituição possuía 1591 barragens instaladas no Rio Grande do Norte, sendo 1359 consideradas finalizadas.

Na terceira etapa foi quantificado o tamanho da amostra. Devido a inexistência de estudos anteriores sobre características físico-químicas da água da maior parte das barragens

subterrâneas do Rio Grande do Norte, decidiu-se utilizar a Equação 1, apresentada por Krejcie & Morgan (1970), para efetivação dessa etapa.

$$s = \frac{X^2 NP(1-P)}{d^2(N-1)+X^2 P(1-P)} \quad \text{Equação 1}$$

Em que:

- s – tamanho da amostra necessária;
- X – variável normal padronizada associada ao nível de confiança;
- N – tamanho da população;
- P – a proporção da população; e
- d – erro amostral.

Para uma estimativa inicial do tamanho da amostra, utilizou-se o valor de 1,96, referente à variável normal padronizada associada ao nível de confiança de 95% (X), um P de 0,5, a qual fornecerá o tamanho máximo da amostra, e o erro amostral (d) de 0,05, que são valores comumente utilizados na literatura, obteve-se um número de 300 barragens.

Na quarta etapa foi realizada uma distribuição proporcional do número de barragens a serem avaliadas em relação ao número de barragens existentes por regional da EMATER/RN, conforme exposto na Tabela 3. Para determinação da quantidade de barragens subterrâneas a serem avaliadas por município de cada regional, foi utilizada a mesma metodologia, partindo do número de barragens previstos para cada regional.

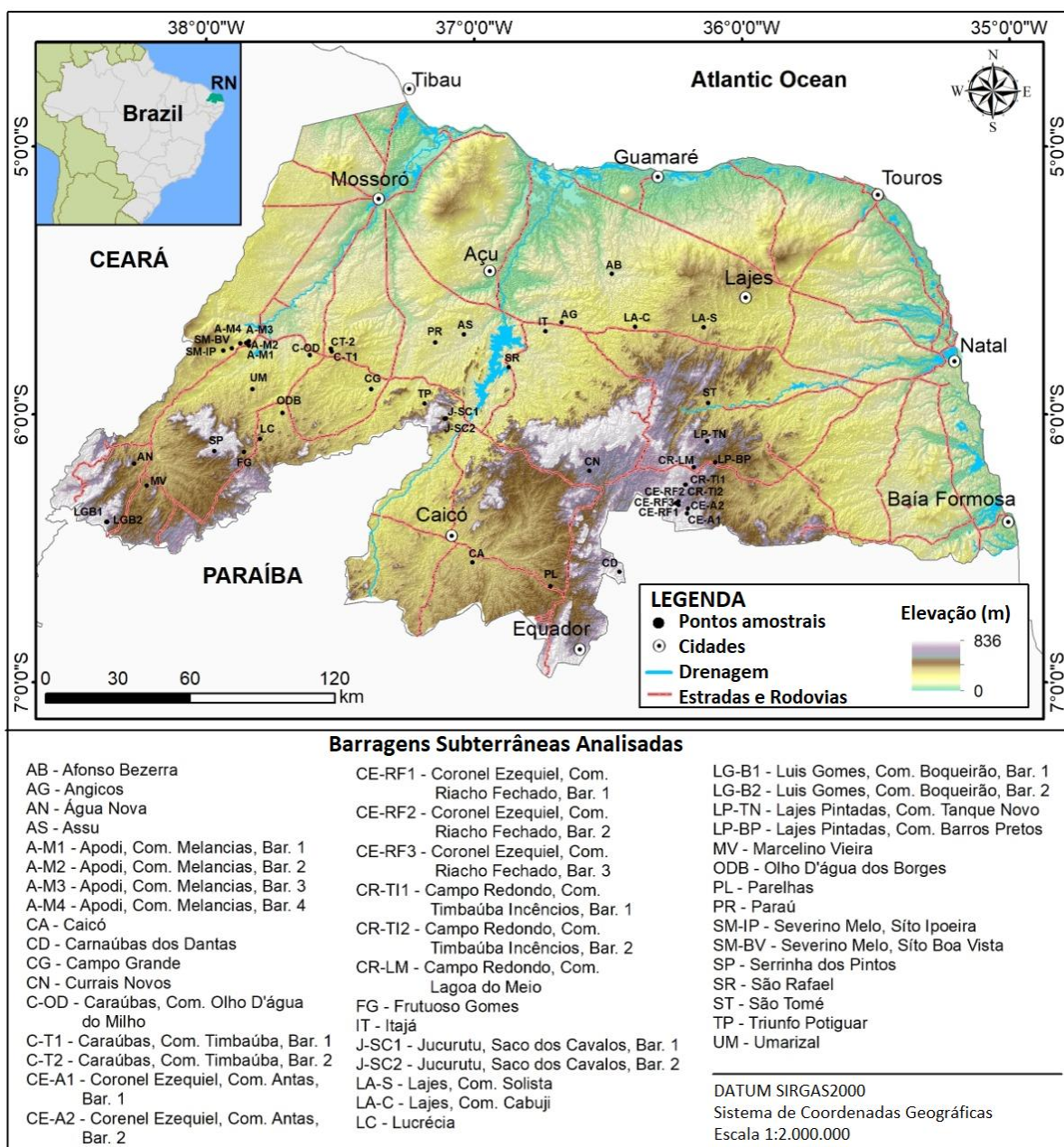
Tabela 3. Quantitativo de barragens subterrâneas do estado do Rio Grande do Norte analisadas no presente estudo

Regional EMATER/RN	Barragens consideradas finalizadas		Barragens previstas pela Equação 1		Barragens analisadas	
	Quantidade de barragens	% de barragens	Quantidade de barragens	% de barragens	Quantidade de barragens	% de barragens
Açu	179	13	39	13	10	22,2
Caicó	125	9	27	9	4	8,9
Currais Novos	74	6	18	6	2	4,5
João Câmara	31	2	6	2	0	0,0
Mossoró	152	11	33	11	9	20,0
Pau dos Ferros	110	8	24	8	4	8,9
Santa Cruz	395	29	87	29	10	22,2
São José do Mipibu	32	2	6	2	0	0,0
São Paulo do Potengi	172	13	39	13	1	2,2
Umarizal	89	7	21	7	5	11,1
TOTAL	1.359	100	300	100	45	100

Fonte: Autoria própria (2020).

Na quinta etapa, de posse do número de barragens a serem analisadas por município, foi realizada a seleção das barragens com o auxílio do técnico local da EMATER/RN e a existência de água no poço.

A primeira coleta foi realizada no final do período seco, entre outubro e dezembro do ano de 2018, no qual foram obtidas amostras de água de apenas 52 barragens, devido à grande quantidade de poços secos. Em julho do ano de 2019, final do período chuvoso, as barragens coletadas no primeiro período foram revisitadas, sendo possível obter amostras de água de apenas 45 barragens, apresentadas na Figura 8. Desta forma, neste estudo foram consideradas 45 barragens subterrâneas.

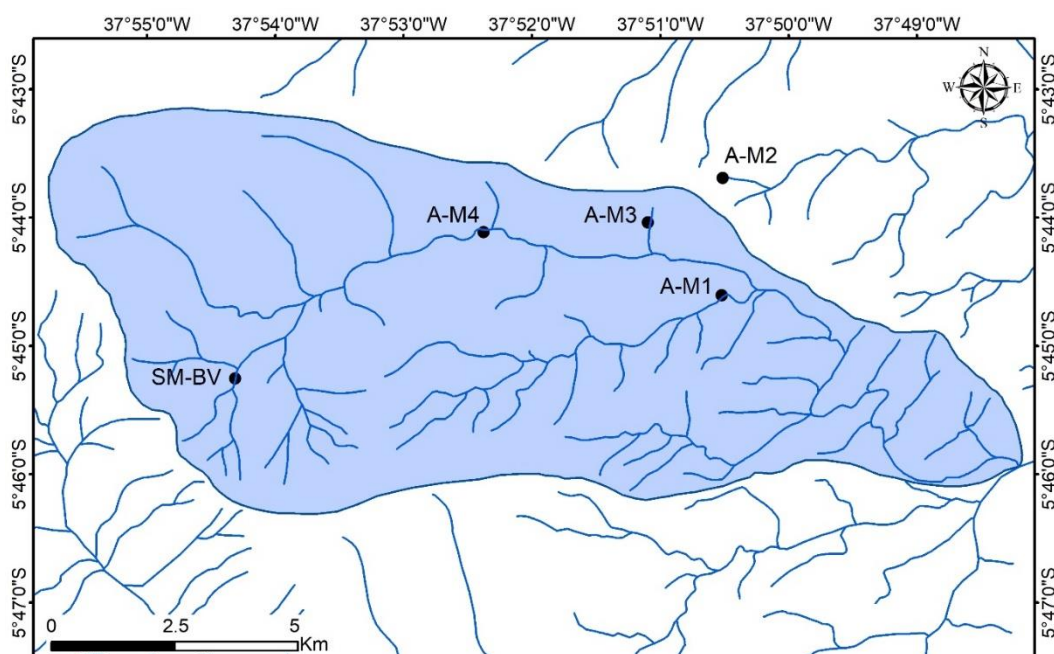


Fonte: Acervo pessoal (2020).

Figura 8. Localização das barragens subterrâneas avaliadas nesse estudo.

A maior parte das barragens subterrâneas avaliadas encontram-se em municípios da mesorregião do Oeste Potiguar, com respectivos códigos de identificação adotados: Açu (AS), Água Nova (AN), Apodi (A-M1, A-M2, A-M3 e A-M4), Campo Grande (CG), Caraúbas (C-OD, C-T1 e C-T2), Frutuoso Gomes (FG), Itajá (IT), Jucurutu (J-SC1 e J-SC2), Lucrecia (LC), Luís Gomes (LG-B1 e LG-B2), Marcelino Vieira (MV), Olho D'água dos Borges (ODB), Paraú (PR), São Rafael (SR), Serrinha dos Pintos (SP), Severiano Melo (SM-BV e SM-IP), Triunfo Potiguar (TP) e Umarizal (UM). Na mesorregião Central Potiguar foram avaliadas barragens nos municípios de Afonso Bezerra (AB), Angicos (AG), Caicó (CA), Carnaúba dos Dantas (CD), Currais Novos (CN), Lajes (LA-C e LA-S) e Parelhas (PL). Já na mesorregião Agreste Potiguar foram avaliadas barragens nos municípios de Campo Redondo (CR-LM, CR-TI1 e CR-TI2), Coronel Ezequiel (CE-A1, CE-A2, CE-RF1, CE-RF2 e CE-RF3), Lajes Pintadas (LP-BP e LP-TN) e São Tomé (ST).

Das barragens analisadas, a micro bacia que possuía o maior número de barramentos subterrâneos avaliados (4 barramentos) está localizado entre os municípios de Severiano Melo e Apodi, bacia do riacho Melancias. A localização dos barramentos está apresentada na Figura 9.



Fonte: Acervo pessoal (2020).

Figura 9. Bacia do riacho Melancias, no estado do Rio Grande do Norte.

4.3 Coleta das amostras

As amostras foram coletadas em dois períodos: final do período seco, entre outubro e dezembro do ano de 2018, e final do período chuvoso, em julho do ano de 2019.

As coletas foram realizadas nos poços rasos escavados (Figura 10), denominados cacimba ou amazonas, existentes nas barragens subterrâneas, com auxílio de um balde de alumínio e corda (Figura 11A). As amostras foram armazenadas em frascos de polipropileno de 1 litro (Figura 11B) e conservadas em recipientes térmicos com gelo e transportados para o Laboratório de Análise de Solo, Água e Planta (LASAP) do Departamento de Engenharia e Ciências Ambientais (DECAM) da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Campus Mossoró-RN. O balde de alumínio e os frascos utilizados no armazenamento da amostra foram previamente lavado com a água a ser amostrada, conforme recomendações de Almeida (2010).



Fonte: Acervo pessoal (2020).

Figura 10. Poços rasos das barragens subterrâneas: SM-IP (A), J-SC2 (B), C-T1 (C), CE-RF1 (D).



Fonte: Acervo pessoal (2020).

Figura 11. Instrumentos utilizados na coleta da água nos poços das barragens subterrâneas: Balde e corda (A), Frasco de polipropileno de um litro (B).

4.4 Variáveis analisadas

As análises físico-químicas foram realizadas no LASAP e seguiu os critérios estabelecidos por Almeida (2010). Foram realizadas triplicatas e obtidas a médias das repetições.

A Tabela 4 apresenta as variáveis físico-químicas analisadas, bem como a metodologia de ensaio utilizada para cada uma destas.

Tabela 4. Variáveis físico-químicas analisadas e metodologias de ensaio utilizadas

Variável	Metodologia
Condutividade Elétrica (CE)	Método Laboratorial: Condutivímetro (sonda HACH-CDC401)
Potencial Hidrogeniônico (pH)	Método Eletrométrico (pHmetro Teckna T-1000)
Sólidos Totais (ST)	Método Gravimétrico
Sólidos em Suspensão Totais (SST)	Método Gravimétrico, com papel fibra de vidro com abertura de 1µm.
Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)	Diferença entre ST e SST
Sódio (Na ⁺) e Potássio (K ⁺)	Fotômetro de Chama
Cálcio (Ca ²⁺) e Magnésio (Mg ²⁺)	Método complexométrico pelo EDTA
Cloreto (Cl ⁻)	Método de Mohr
Carbonato (CO ₃ ²⁻) e Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	Método Volumétrico
Nutrientes – Boro (B), Cobre (Cu), Enxofre (S), Ferro (Fe), Manganês (Mn) e Zinco (Zn)	Espectrofotometria de absorção atômica
Metais Pesados – Cromo (Cr), Níquel (Ni), Cadmio (Cd), Chumbo (Pb)	Espectrofotometria de absorção atômica

Fonte: Autoria própria (2020).

Com os resultados das variáveis foi possível obter a relação de adsorção de sódio (RAS), através da Equação 2; e a dureza da água, através da Equação 3.

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

RAS - relação de adsorção de sódio em $(\text{mmol}_c.L^{-1})^{1/2}$;

Na^+ - concentração de sódio em $\text{mmol}_c.L^{-1}$;

Ca^{2+} - concentração de cálcio em $\text{mmol}_c.L^{-1}$; e,

Mg^{2+} - concentração de magnésio em $\text{mmol}_c.L^{-1}$.

$$D = (Ca^{2+} + Mg^{2+}) \cdot 50 \quad \text{Equação 3}$$

Em que:

D - dureza em $\text{mg}.L^{-1}$;

Ca^{2+} - concentração de cálcio em $\text{mmol}_c.L^{-1}$; e,

Mg^{2+} - concentração de magnésio em $\text{mmol}_c.L^{-1}$.

Além das análises laboratoriais descritas, foram observadas algumas características das barragens subterrâneas, como: idade de implantação da barragem; existência de dispositivos de proteção no poço raso; alagamento da área da barragem após período chuvoso; presença de barramentos superficiais a montante da barragem, distantes no máximo 200 m; existência de aglomerado rural próximo à barragem; presença de curral, aprisco, pocilga ou galinheiro próximos à área da barragem; e, manejo da barragem, no que se refere à utilização de sua área e água, existente em seu poço.

4.5 Critérios de avaliação

A qualidade da água foi avaliada com base nos critérios estabelecidos pelo Estudo Irrigação e Drenagem, número 29, da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (*Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO*), no que se refere aos padrões de toxicidade de íons específicos e ao risco de obstrução de sistemas de irrigação localizada (Ayers & Westcot, 1999). Também foi realizada a classificação do risco de salinização e sodificação do solo, proposta por United State Salinity Laboratory – USSL (Richards, 1954) e adaptada por Santos (2008).

Utilizou-se a bacia do riacho Melancias (Figura 9), para avaliar a evolução da salinidade nos barramentos subterrâneos localizados ao longo do curso d'água.

4.6 Análise estatística

4.6.1 Estatística descritiva

As variáveis físico-químicas das amostras de água foram analisadas através da estatística descritiva, com auxílio do software Excel 2016, mediante: valores máximos e mínimos, média e desvio padrão, de forma a comparar a qualidade da água nos dois períodos avaliados.

A variável condutividade elétrica foi submetida ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk a 5% de significância e elaborado bloxplot da variação entre os dados obtidos nos períodos seco e chuvoso.

4.6.2 Estatística multivariada

Utilizou-se de técnicas de análise multivariada, com auxílio do software Statistica 7.0 versão demonstrativa (STATSOFT, 2004). Inicialmente foi realizada uma análise de correlação de Pearson ($p \leq 0,05$) entre as variáveis analisadas e a Análise de Componentes Principais (ACP), com o intuito de identificar o menor número de componentes, denominado fatores, que explicassem a variabilidade dos dados, para isso adotou-se os componentes principais cujos autovalores fossem superiores a 1 e que juntas apresentassem uma variância acumulada igual ou superior a 70%.

Na Análise Fatorial (AF), foram utilizados os fatores que apresentaram autovalores maiores que um (1), extraídos na ACP, e os eixos fatoriais foram rotacionados pelo método Varimax Normalizado. Considerou-se o valor de 0,7 para cargas fatoriais significativas.

Na Análise de Agrupamento (AA) foi utilizado um dendograma vertical da matriz e adotado o método Ward e a distância euclidiana como medidas de similaridade. Essa análise permitiu dividir as barragens subterrâneas em grupos com características de hidroquímicas similares.

Nessas análises foram descartadas as variáveis RAS, dureza e sólidos dissolvidos totais (SDT), por apresentarem multicolinearidade. No período chuvoso também foi descartado os dados de cádmio (Cd), por apresentarem concentrações abaixo do limite de detecção e adicionados enxofre (S) e boro (B).

4.6.3 Espacialização da condutividade elétrica

Os mapas apresentados neste trabalho foram desenvolvidos com auxílio do software ArcGIS 10.4.1, com licença adquirida pelo Laboratório de Geotecnologias Aplicadas, Modelagens Costeira e Oceânica Marinha (GNOMO), do Departamento de Engenharia Civil (DEC), da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Foram utilizados na confecção o DATUM SIRGAS2000 e o sistema de coordenadas geográficas.

Para estimar os valores de condutividade elétrica em locais não amostrados a partir de dados obtidos nos poços das barragens analisadas e confeccionar os mapas de sua distribuição geográfica adotou-se o interpolador Inverse Distance Weighted (IDW), com auxílio do software ArcGIS 10.4.1.

O IDW é um interpolador determinístico univariado de médias ponderadas. Sendo assim, esse método não leva em consideração a correlação espacial dos dados, e sim, apenas relações baseadas na distância (SOUZA et al., 2010).

O método de interpolação IDW prediz um valor para um local não medido utilizando-se de valores amostrados à sua volta, determinando um maior peso para os valores amostrados mais próximos, conforme Equação 4.

$$Z_e = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^\beta} \times Z_{ai} \right)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^\beta}} \quad \text{Equação 4}$$

Em que:

Z_e - valor estimado;

Z_{ai} - valor amostrado;

d_i - distância euclidiana entre o valor amostrado e o estimado;

β - expoente da ponderação; e

i - número de pontos amostrados utilizados para estimar o valor de um local não medido.

Pode-se atribuir diferentes valores ao expoente da ponderação, porém quanto maior for o valor dessa potência maior será a influência do vizinho mais próximo na estimativa dos valores. Neste trabalho foi adotado o expoente 2, que representa o inverso do quadrado da distância, e o uso de 7 pontos amostrados mais próximos da localidade a ser interpolada.

A avaliação da precisão do interpolador IDW foi realizada através da análise do erro médio absoluto (EMA), erro médio relativo (EMR) e erro quadrático médio (EQM), estimados através das Equações 5, 6 e 7, respectivamente.

$$EMA = \frac{1}{n} \sum_1^n |Z_{ai} - Z_{ei}| \quad \text{Equação 5}$$

$$EMR = \frac{1}{n} \sum_1^n \left(\frac{|Z_{ai} - Z_{ei}|}{Z_{ai}} \times 100 \right) \quad \text{Equação 6}$$

$$EQM = \frac{1}{n} \sum_1^n (Z_{ai} - Z_{ei})^2 \quad \text{Equação 7}$$

Em que:

n - número de pontos amostrados;

Z_{ai} - valor amostrado, ou seja, valor obtido na análise de condutividade elétrica da água de cada poço analisado; e,

Z_{ei} - valor estimado pelo interpolador IDW para condutividade elétrica da água de cada poço analisado.

O erro quadrático médio é mais sensível a grandes erros, por elevar as diferenças individuais ao quadrado, sendo sempre positivo e com valor igual a zero para uma simulação perfeita (HALLAK & PEREIRA FILHO, 2011).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Estatística descritiva das variáveis analisadas

Os valores mínimos, máximos e médios das variáveis físico-químicas das águas das barragens subterrâneas analisadas, nos dois períodos amostrados, e seus desvios-padrão estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Valores mínimo, médio e máximo das variáveis analisadas na água das barragens subterrâneas do estado do Rio Grande do Norte, no fim do período seco e fim do período chuvoso

Variáveis	Final do período seco, 2018				Final do período chuvoso, 2019			
	Mínimo	Máximo	Média	Dsv.Pad.	Mínimo	Máximo	Média	Dsv.Pad.
pH	7,06	9,87	8,08	0,53	6,67	8,59	7,87	0,44
CE ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	134	13010	1708	2643	92	12365	1141	2025
K ⁺ (mmolc.L ⁻¹)	0,02	1,08	0,24	0,23	0,01	0,81	0,19	0,17
Na ⁺ (mmolc.L ⁻¹)	0,38	102,18	9,64	18,66	0,31	94,41	7,22	15,73
Ca ²⁺ (mmolc.L ⁻¹)	0,41	32,95	4,07	5,39	0,29	16,02	2,48	2,45
Mg ²⁺ (mmolc.L ⁻¹)	0,15	23,93	3,39	5,45	0,13	28,06	2,17	4,36
Cl ⁻ (mmolc.L ⁻¹)	0,70	134,40	12,12	25,38	0,60	102,93	7,15	17,09
CO ₃ ²⁻ (mmolc.L ⁻¹)	< Ld	2,00	0,51	0,54	< Ld	1,80	0,34	0,48
HCO ₃ ⁻ (mmolc.L ⁻¹)	0,58	18,00	5,01	3,59	0,50	12,45	4,00	2,70
RAS(mmolc.L ⁻¹) ^{1/2}	0,39	19,97	3,69	4,63	0,38	20,11	3,66	4,80
D (mg.L ⁻¹)	40,5	2618,0	373,2	505,9	27,0	2203,8	232,8	332,3
SST (mg/L)	0,3	358,0	29,2	67,6	< Ld	487,0	37,6	81,4
SDT (mg/L)	155,5	10695,5	1254,8	2016,1	11,4	9237,5	722,6	1449,1
S (mg/L)	Nd	Nd	Nd	Nd	2,640	398,620	58,701	92,251
B (mg/L)	Nd	Nd	Nd	Nd	< Ld	0,300	0,048	0,074
Cu (mg.L ⁻¹)	< Ld	0,045	0,003	0,008	< Ld	0,070	0,010	0,017
Mn (mg.L ⁻¹)	< Ld	2,621	0,495	0,720	< Ld	4,190	0,752	0,954
Fe (mg.L ⁻¹)	< Ld	20,780	1,756	3,865	0,030	38,030	4,066	7,979
Zn (mg.L ⁻¹)	< Ld	0,137	0,017	0,028	< Ld	0,370	0,058	0,091
Cr (mg.L ⁻¹)	< Ld	0,022	0,002	0,004	< Ld	0,020	0,001	0,003
Ni (mg.L ⁻¹)	< Ld	0,029	0,003	0,007	< Ld	0,010	0,002	0,004
Cd (mg.L ⁻¹)	< Ld	0,040	0,004	0,009	< Ld	< Ld	0,000	0,000
Pb (mg.L ⁻¹)	< Ld	0,480	0,050	0,106	< Ld	0,010	0,002	0,004

Nota: Dsv.Pad – desvio padrão; Ld – limite de detecção; Nd – não determinado; Ph – potencial hidrogeniônico; CE – condutividade elétrica; K⁺ – potássio; Ca²⁺ – cálcio; Mg²⁺ – magnésio; Cl⁻ – cloretos; CO₃²⁻ – carbonato; HCO₃⁻ – bicarbonato; RAS – relação de adsorção de sódio; D – dureza; SST – sólidos suspenso totais; SDT – sólidos dissolvidos totais; S – enxofre; B – boro; Cu – cobre; Mn – manganês; Fe – ferro; Zn – zinco; Cr – cromo; Ni – níquel; Cd – cádmio; Pb - chumbo.

Nota-se uma alta dispersão das concentrações (alto desvio padrão) na maioria das variáveis o que indica uma grande variabilidade na composição química da água dessas barragens.

Observa-se, também, uma redução na concentração da maioria das variáveis analisadas entre o período seco e o chuvoso. Essa redução pode ter sido ocasionada pelo aumento do volume de água nas barragens.

Ao avaliar a água de barramentos superficiais na bacia do rio Cobra no Rio Grande do Norte, Brasil, Lima et al (2017b) notaram valores crescente de condutividade elétrica, dureza e sólidos dissolvidos totais entre o período chuvoso e o período seco, o qual atribuíram a redução das chuvas e alta evaporação do período, aumentando assim a concentração de sais na água.

Na avaliação da qualidade físico-química da água de barragens subterrâneas nas regiões de Ouricuri, São Caetano e Mutuca, no estado de Pernambuco, Cirilo et al. (2003), notaram uma redução das concentrações de sais ao compararem o período seco e chuvoso, a qual foi atribuída a recarga das áreas, devido as precipitações pluviométricas. Os autores ainda observaram níveis máximos de salinidade, nas águas das barragens, no fim do período de estiagem, devido a acentuada evaporação.

A mesma influência climatológica foi observada por Andrade et al. (2012), na água de vales aluviais da região semiárida de Pernambuco, e por Lima et al. (2019b), em barragens subterrâneas localizadas na bacia do rio Cobra, nos municípios de Parelhas, Carnaúba dos Dantas e Jardim do Seridó, no RN.

Houve um aumento na concentração de sólidos suspensos totais (SST), como um aumento na concentração de micronutriente avaliados (Cobre - Cu, Manganês - Mn, Ferro - Fe, Zinco - Zn), após o período chuvoso. Esse fato pode ter ocorrido devido a entrada de sedimentos, carregados pelas enxurradas, no poço, através de aberturas em suas paredes, ou por a sua parede está próxima ou no nível do solo, ou pela área alagar durante o período chuvoso e o poço não possuir dispositivos de proteção.

Lima et al. (2020) ao avaliar as concentrações de Cu, Mn, Fe e Zn em quatro barragens subterrâneas existentes na bacia do rio Cobra no Rio Grande do Norte, Brasil, constataram uma redução em suas concentrações no período chuvoso. Constataram também que, as maiores concentrações desses micronutrientes ocorriam nas barragens mais antigas.

Na Tabela 6 estão apresentados os resultados da estatística descritiva para a condutividade elétrica da água, no fim do período seco (ano de 2018) e do chuvoso (ano de 2019), de poços rasos instalados nas barragens subterrâneas analisadas.

Segundo classificação proposta por Warrick & Nielsen (1980), as águas dos poços das barragens subterrâneas analisadas apresentam uma alta variabilidade na condutividade elétrica, nos dois períodos (coeficiente de variação maior que 60%).

Ao avaliar o coeficiente de variação da condutividade elétrica da água subterrânea utilizada para irrigação em um assentamento rural no semiárido pernambucano, Andrade et al. (2012) obtiveram valores acima de 160% nos diversos períodos avaliados.

Tabela 6. Estatística descritiva da condutividade elétrica da água.

	CE – Fim do período seco (2018)	CE – Fim do período chuvoso (2019)
Mínimo (dS.m ⁻¹)	0,134	0,092
Máximo (dS.m ⁻¹)	13,010	12,365
Amplitude (dS.m ⁻¹)	12,876	12,273
Média (dS.m ⁻¹)	1,708	1,141
Mediana (dS.m ⁻¹)	0,621	0,512
Desvio Padrão (dS.m ⁻¹)	2,643	2,025
Coefficiente de Variação (%)	156,4	179,5
Coefficiente de Assimetria de Fisher	2,843	4,284
Curtose	8,265	21,176
p < 0,05	0,000*	0,000*

Nota: *não possui distribuição normal, pelo teste de Shapiro-Wilk, a 5% de significância;
CE – condutividade de elétrica.

Ressalta-se que Costa et al. (2006), também, encontraram coeficiente de variação da condutividade elétrica elevados, acima de 100%, ao analisar águas do aquífero cristalino do Rio Grande do Norte.

Observa-se, na Tabela 6, grande diferença entre o valor médio e o mediano, nos dois períodos estudados, o que indica que os valores não estão simetricamente distribuídos, o qual é confirmado pelo valor positivo e elevado do coeficiente de assimetria. Adicionando valores elevados de curtose, deduz-se que se trata de uma distribuição não normal, a qual é comprovada pelo teste de normalidade de Shapiro-Will a 5% de significância, e confirmado nos histogramas apresentados na Figura 12.

Observou-se que 22,3% dos proprietários das barragens avaliadas nunca utilizaram a água dos poços. Não foi possível observar correlação entre a não utilização da água da barragem e a existência de maiores condutividades elétricas, fato esse que sugere uma avaliação continuada dessas barragens para verificar o comportamento da salinidade.

Apenas 13% dos poços (CE-RF1, CE-RF2, LA-S, LG-B2, PR, ST) possuíam dispositivos de proteção. Não foi possível correlacionar a existência de dispositivos de proteção no poço com a ocorrência de menores condutividades elétricas e nem a idade das barragens com a salinidade.

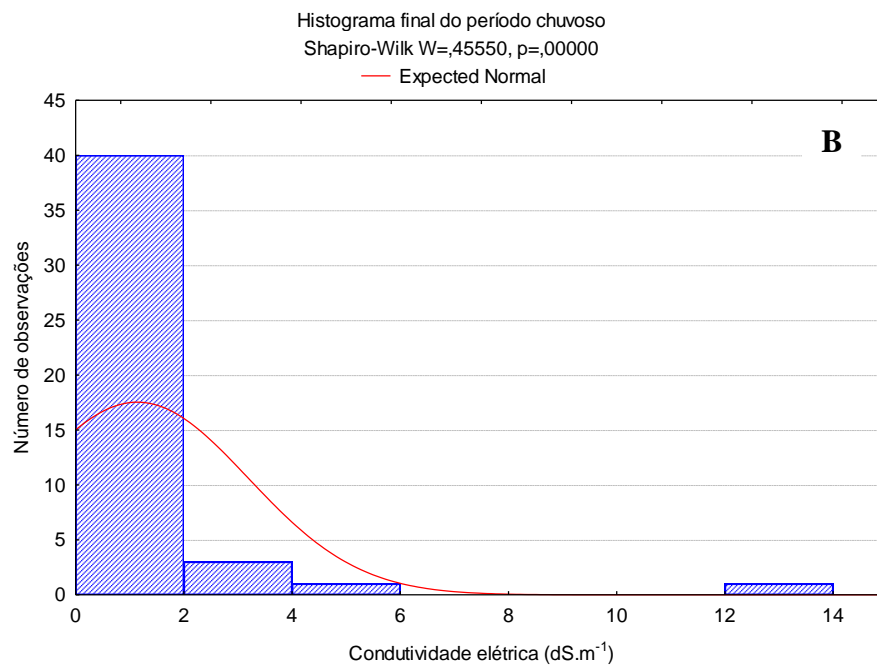
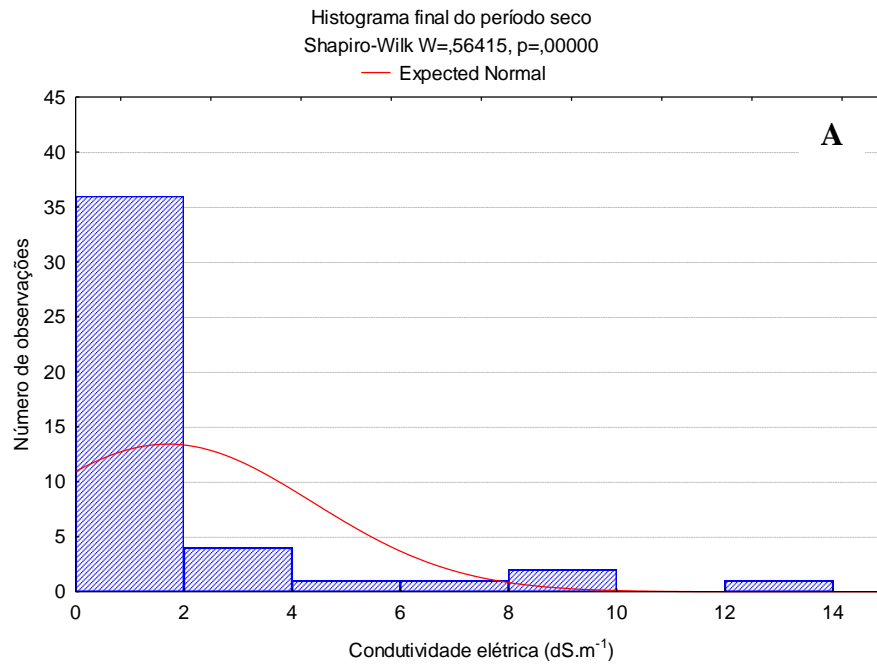


Figura 12. Histogramas da condutividade elétrica da água dos poços das barragens subterrâneas, no final do período seco 2018 (A) e final do período chuvoso 2019 (B).

A Figura 13 apresenta um gráfico, do tipo boxplot, da variação da condutividade elétrica entre o fim do período seco (2018) e o fim do período chuvoso (2019).

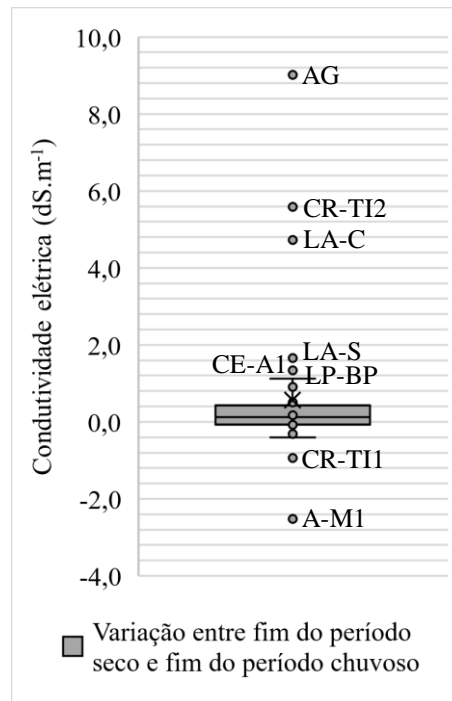


Figura 13. Boxplot das diferenças significativas entre a condutividade elétrica do fim do período seco (2018) e do fim do período chuvoso (2019).

Das barragens avaliadas, 71,2% (32 barragens) apresentaram redução na condutividade elétrica entre o fim do período seco e o fim do período chuvoso. Essa redução na concentração de sais provavelmente foi ocasionada pelas precipitações ocorridas no período chuvoso. Dessas barragens, seis apresentaram uma redução de condutividade elétrica muito superior ao conjunto de barragens avaliadas e estão destacadas na Figura 13.

As barragens avaliadas no município de Angicos (AG), em Campo Redondo, comunidade Timbaúba (CR-TI2) e em Lajes, comunidade Cabuji (LA-C) apresentaram grande redução da condutividade elétrica entre o fim do período seco e o fim do período chuvoso, entre 9,017 dS.m⁻¹ e 4,725 dS.m⁻¹. As duas primeiras barragens (AG e CR-TI2) possuem barramentos superficiais a montante, distantes no máximo 200 m, poços sem dispositivos de proteção e cultivo de capim na área da barragem, com a utilização de dejetos de animais como adubo.

A barragem que apresenta maior redução (AG) e a barragem LA-C, caracterizam-se por ter sua área alagada, com água corrente, até três meses após o fim do período chuvoso. No período chuvoso, devido ao alagamento, a coleta de água foi realizada o mais próximo possível do poço, na área alagada das duas barragens. Como o poço da barragem LA-C fica submerso no período chuvoso, notou-se na coleta do fim do período seco a presença de peixes em decomposição, o que remete a ausência de manutenção e inutilização do poço pelos proprietários.

Nas demais barragens, que apresentaram redução da condutividade elétrica, notou-se uma grande elevação do nível da água dos poços, a qual se encontrava bem próximo à superfície do solo durante a segunda coleta, fato esse que pode ter corroborado para essa redução.

Dentre as barragens que apresentaram comportamento contrário, ou seja, uma elevação da condutividade elétrica após o período chuvoso (13 barragens, 28,8%), destacam-se as barragens A-M1 e CR-TII, por apresentarem as maiores variações (Figura 13). Essas barragens são caracterizadas por utilizarem a sua área para implantação de culturas, incluindo o cultivo de maracujá para fins comerciais (CR-TII), e a utilização de dejetos bovino como adubo. A barragem A-M1 ainda está localizada a jusante de um aglomerado rural e o poço da barragem CR-TII encontra-se com as paredes no nível do solo, facilitando assim a entrada de sedimentos no período chuvoso.

Ao avaliarem os processos que governam a química das águas subterrâneas da Madagascar Sulista, Rabemanana et al. (2005) notaram que os processos de evaporação da água podem provocar uma cristalização e precipitação de sais na zona não saturada do solo. Esses sais podem ser redissolvidos, devido ao aumento do nível do lençol freático, ocasionado pelas precipitações pluviométricas, aumentando assim a salinidade da água subterrânea.

Ao agrupar as barragens conforme a classificação de salinidade proposta pelo United States Salinity Laboratory – USSS (Richards, 1954) adaptada por Santos (2008), e analisar a variação de condutividade elétrica, em módulo, entre o final do período seco e final do período chuvoso, nota-se que a variação da condutividade elétrica entre os dois períodos tende a aumentar com o aumento da salinidade da água no período seco, conforme Tabela 7.

Tabela 7. Variação da condutividade elétrica entre o final do período seco e o final do período chuvoso em função da salinidade da água da barragem no final do período seco

Classificação das barragens de acordo com a salinidade no fim período seco	Média da condutividade elétrica das barragens no fim período seco (dS.m ⁻¹)	Média das variações da condutividade elétrica, em módulo, entre o fim do período seco e o fim do período chuvoso (dS.m ⁻¹)	Média relativa das variações da condutividade elétrica, em módulo, entre o fim do período seco e o fim do período chuvoso (%)
C0	-	-	-
C1	0,191	0,035	18,4
C2	0,520	0,168	32,3
C3	1,041	0,465	44,6
C4	3,337	1,547	46,4
C5	9,311	4,994	53,6

No estudo realizado por Andrade et al. (2012) verifica-se que a água subterrânea no município de Pesqueiro, região semiárida do estado de Pernambuco, que as áreas com água tendo condutividade elétrica acima de 3,5 dS.m⁻¹ não sofriam muita variação desse parâmetro

entre o período seco e chuvoso. As maiores variações nesse parâmetro, relacionadas a precipitação, ocorriam em condutividade elétrica inferiores.

Ao analisar as barragens subterrâneas que possuíam barramentos superficiais a montante, distantes no máximo 200 m, nota-se que a maioria (10 barragens, 66,7%) obteve uma variação da condutividade elétrica entre os dois períodos avaliados inferior a $0,3 \text{ dS.m}^{-1}$. As demais barragens (5 barragens, 33,3%) apresentaram variações superiores a $0,6 \text{ dS.m}^{-1}$ podendo atingir variações de $9,017 \text{ dS.m}^{-1}$ (barragem AG). Diante desses dados não foi possível obter uma correlação entre a presença de barramentos superficiais a montante e variação da condutividade elétrica entre os dois períodos estudados, porém notou-se que as maiores variações eram em barragens localizadas na porção leste do estado do Rio Grande do Norte.

Lima et al. (2019b), ao estudarem a variação do nível freático e da salinidade do aquífero aluvial em barragens subterrâneas na bacia do rio Cobra, no semiárido potiguar, observaram que a presença de barramentos superficiais a montante de barramentos subterrâneos, pode promover uma recarga contínua do aquífero freático e, em consequência, obtém-se variações anuais menores e menos abruptas nos níveis de água e na salinidade desses barramentos subterrâneos. Diante disso, os autores sugerem a necessidade de um gerenciamento integrado das águas represadas nas estruturas superficiais e subterrâneas de uma mesma bacia.

5.2 Classificação da qualidade da água dos poços das barragens subterrâneas de acordo com o risco de salinização e sodificação do solo

A Figura 14 apresenta a adequabilidade da água para agricultura, em relação ao risco de salinização e sodificação do solo, proposta pelo USSL (Richards, 1954) adaptado por Santos (2008). Percebe-se que a maioria das águas contidas nas barragens subterrâneas (51% no final do período seco e 60% no final do período chuvoso) são classificadas como C2-S1, isto é, águas de salinidade média e fracamente sódicas. As águas dessas barragens pode ser utilizadas no cultivo de vegetais de fraca tolerância salina e de preferência em solos silte-arenosos, siltosos ou areno-argilosos.

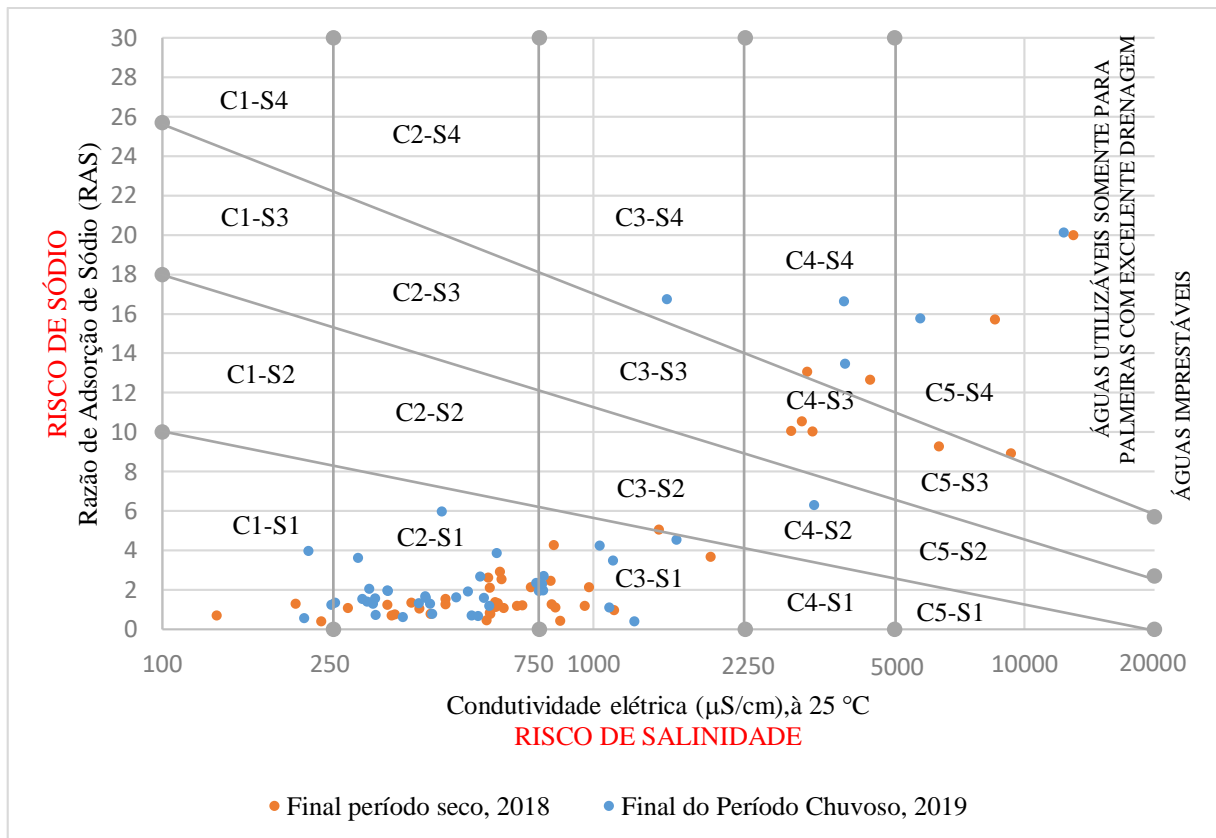


Figura 14. Classificação da água das barragens subterrâneas quanto ao risco de salinização e sodificação do solo, de acordo com a USSSL.

Silva et al. (2011) avaliaram a qualidade da água de duas barragens subterrâneas no estado da Paraíba (PB) e de seis barragens no estado da Bahia (BA), localizadas na região semiárida. As águas das barragens do estado da Paraíba foram classificadas como C2-S1, e a maioria das localizadas no estado da Bahia apresentaram classificação C1-S1, ou seja, baixa salinidade e fracamente sódica. Embora as águas dessas barragens não necessitem de práticas especiais de controle de salinidade, os autores recomendaram utilizar manejos que proporcionem a renovação das águas das barragens subterrâneas.

Observa-se na Figura 14 que a maior parte das amostras das águas das barragens subterrâneas apresenta salinidade variando entre as classes C2 (média salinidade) e C3 (alta salinidade), sendo 73% no fim do período seco e 80% no fim do período chuvoso. A mesma classificação de salinidade foi obtida por Cirilo et al. (2003) ao analisarem a águas do aquífero aluvial no estado de Pernambuco, em que 75% de suas amostras apresentaram classificação variando entre as classes C2 e C3.

Analisando a condutividade elétrica das águas obtidas nas barragens subterrâneas avaliadas no presente estudo, considerando o fim do período seco, observou-se que 56% das barragens apresentam valores inferiores a $0,7 \text{ dS m}^{-1}$.

Andrade et al. (2012) alertam que o uso contínuo de água com condutividade elétrica acima de $0,7 \text{ dS m}^{-1}$, sem o manejo adequado, pode contribuir para o aumento da concentração de sais no solo, os quais podem ser carregados para zona saturada do aquífero através das chuvas e/ou irrigação, ocasionando o aumento da salinidade das águas subterrâneas.

Cerca de 9% das amostras analisadas, foram classificadas como C5-S4 no final do período seco e/ou final do período chuvoso. A água da barragem localizada no município de Coronel Ezequiel, comunidade Antas (CE-A2) apresentou o pior risco de salinização e sodificação do solo, nos dois períodos, só podendo ser utilizada para irrigação de palmeiras em solos bem drenados. Apesar desse fato, a água é utilizada no cultivo de maracujá para fins comerciais, o qual está localizado na bacia de contribuição da barragem subterrânea. São utilizados dejetos bovinos, como fertilizante, e carrapaticida para as pragas das culturas. Essa barragem está situada sobre um terreno ondulado, conforme a classificação proposta por Santos et al. (2018), a uma altitude de aproximadamente 400 m e sem barramentos superficiais próximos.

Helena et al. (1999) observaram maior salinidade na margem esquerda do aquífero aluvial do rio Pisuerga, na Espanha, ocasionada possivelmente pela recirculação da água subterrânea. Essa água é utilizada na irrigação da área do aquífero e passa por processos de infiltração, deslocando parte dos íons presentes nos fertilizantes para o aquífero; evaporação, havendo uma concentração de íons; e, nova utilização na irrigação.

Costa et al. (2006) afirmam que a elevada salinização apresentadas no aquífero cristalino na região leste do estado Rio Grande do Norte está relacionada com as condições climáticas e relevo, uma vez que as precipitações pluviométricas que ocorrem nessa área são carregadas de núcleos higroscópicos marinhos, ricos em sódio e cloreto; e o relevo plano e pouco movimentado da Depressão Sertaneja propicia pouca mobilidade das águas, as quais são submetidas à evaporação, aumentando a salinidade.

As barragens localizadas no município de Angicos (AG) e Lajes, comunidade Cabugi (LA-C) também são classificadas como C5-S4 no final do período seco e sua água é considerada imprestável para irrigação da maioria das culturas e tipos de solos. No período chuvoso, a qualidade da água da barragem AG melhorou significativamente, sendo classificada como C2-S1, situação não observada na barragem LA-C, a qual passou a ser classificada como C4-S4, podendo nesse período ser utilizada somente na irrigação de vegetais com alta tolerância a salinidade e em solos arenosos permeáveis.

As barragens AG e LA-C estão situadas após barramento superficial, parte da área da barragem subterrânea fica alagada por aproximadamente três meses após o período chuvoso e sua área é utilizada para plantação de capim, sorgo e milho, com aplicação de dejetos de animais como fertilizante. A água da barragem AG é utilizada para dessedentação de animais e irrigação

da própria área com conjunto motobomba, já a água da barragem LA-C só é utilizada em épocas de seca prolongada. Ainda, próximo a barragem LA-C, menos de 150 m, existe uma criação de animais.

Cirilo et al. (2003) comentam que a não utilização da água da barragem subterrânea somada aos altos índices de evaporação podem aumentar o risco de salinização da área da barragem. Outro fator que pode aumentar o risco de salinização é conservar o nível da água acima ou no nível do solo.

Rabemanana et al. (2005) alertam que os resíduos de aglomerados rurais/urbanos, a existência de fossas sépticas, a presença de resíduos animais ou estrume/fertilizantes podem incrementar as concentrações de nitrato, cloretos e potássio na água subterrânea.

Em contrapartida, três barragens apresentaram classificação C1-S1, como as barragens localizadas nos municípios de Apodi, comunidade Melancias (A-M3); Jucurutu, comunidade Saco dos Cavalos (J-SC2); e, de Coronel Ezequiel, comunidade Riacho Fechado (CE-RF2), sendo a última classificada dessa forma apenas no período chuvoso.

A barragem J-SC2 apresenta a parede do poço no nível do solo e um curral ao lado do barramento. A área da barragem é utilizada para plantação de capim, feijão e jerimum, sem o uso de fertilizantes, e sua água é utilizada na dessedentação de animais e irrigação das culturas implantadas na área da barragem.

Na barragem subterrânea CE-RF2 foi construído um barramento superficial sobre sua parede, de forma que a área do barramento fica alagada por aproximadamente seis meses após as chuvas. Na área é cultivado capim, quando o barramento superficial seca, sem o uso de fertilizantes e a água é utilizada para consumo humano secundário e dessedentação de animais.

5.2.1 Bacia do riacho Melancias

Na bacia do riacho Melancias (Figura 9) foram avaliadas quatro barragens subterrâneas (SM-BV, A-M4, A-M3 e A-M1).

A barragem subterrânea localizada mais a montante desse riacho, situada no município de Severiano Melo, comunidade Boa Vista (SM-BV) foi classificada como C4-S4 no período seco e C4-S2 no período chuvoso. Essa barragem está situada a jusante de um aglomerado rural e de barramentos superficiais. A sua água é utilizada apenas para dessedentação de animais e a área da barragem é ocupada pelo cultivo de capim, sem o uso de fertilizante.

Classificação parecida (C4-S3 no final do período seco e C5-S4 no final do período chuvoso) foi apresentada pela barragem localizada mais a jusante do riacho, situada no município de Apodi, comunidade Melancias (A-M1). Essa barragem também se localiza a

jusante de um aglomerado rural e de um barramento superficial. A água do barramento é utilizada para dessedentação de animais e irrigação de capim, com auxílio de conjunto motobomba, cultivado na área da barragem. Ressalta-se que são utilizados dejetos bovinos como fertilizantes.

Helena et al. (2000) observaram a influência de vazamentos nos sistemas municipais de esgoto e/ou fossas sépticas nas elevadas concentrações de cloro e sódio presentes na água do aquífero freático na área da Vila de Santovenia de Pisuerga, uma vez que eles não possuíam origem geológica e as concentrações apresentaram pouca variação entre o período seco e chuvoso.

Entre as barragens SM-BV e A-M1, foram analisadas as barragens subterrâneas A-M4 e A-M3, as quais são classificadas, nos dois períodos, como C2-S1 e C1-S1 respectivamente. A barragem A-M3 e A-M4 não possui culturas implantadas em sua área, porém a água é utilizada na irrigação de outras áreas, com o auxílio de conjunto motobomba, e na dessedentação de animais.

Nota-se que apesar das barragens A-M3 e A-M4 estarem localizadas entre duas barragens que apresentam riscos de salinização e sodificação do solo (SM-BV e A-M1), suas águas podem ser utilizadas sem muita restrição. Deduz-se que fatores locais, como o tipo de solo, o manejo da barragem subterrânea e o uso e a ocupação do solo da bacia possuem grande influência na qualidade da água da barragem. Vale destacar que a qualidade da água de uma barragem subterrânea não sofre influência de uma barragem subterrânea a montante, localizada a mais de 4 km.

Lima et al. (2017a) ao avaliar a hidroquímica do aquífero aluvial da bacia do rio Cobra, localizado nos municípios de Parelhas, Carnaúba dos Dantas e Jardim do Seridó no estado do Rio Grande do Norte, Brasil, perceberam que a condutividade elétrica aumentava do curso superior ao curso inferior do rio. Eles atribuíram esse aumento ao transporte, deposição e acumulação de sais em áreas de várzea, ocasionados pelas chuvas.

5.3 Qualidade da água das barragens subterrâneas para uso na irrigação de acordo com a toxicidade de íons específicos e oligoelementos

Ao avaliar as concentrações dos metais pesados e micronutrientes, apresentados anteriormente na Tabela 5, com os valores máximos recomendados por Ayers & Westcot (1999), percebe-se que as águas avaliadas não apresentam problemas quanto aos teores de cobre ($< 0,1 \text{ mg L}^{-1}$), zinco ($< 2,0 \text{ mg L}^{-1}$), cromo ($< 0,1 \text{ mg L}^{-1}$), níquel ($< 0,2 \text{ mg L}^{-1}$) e chumbo ($< 5,0 \text{ mg L}^{-1}$).

O cádmio apresentou concentrações superiores ao limite recomendado ($0,01 \text{ mg L}^{-1}$) em sete barragens, localizadas nos municípios Triunfo Potiguar (TP), São Rafael (SR), Lajes (LA-C e LA-S), Campo Grande (CG), Angicos (AG) e Afonso Bezerra (AB). Este fato merece atenção, pois o cádmio tem elevado potencial de acumulação no solo e plantas, além de ser tóxico para plantas e seres humanos (Ayers & Westcot, 1999).

Ao analisar as amostras de água dos poços das barragens subterrâneas em relação aos íons que podem ocasionar maiores problemas de toxicidade, consultando as diretrizes de Ayers & Westcot (1999), nota-se que não existe restrição ao uso da água em relação ao íon boro, uma vez que a maior concentração obtida foi de $0,25 \text{ mg L}^{-1}$, nas barragens localizadas nos municípios de Lajes, comunidade Cabugi (LA-C) e Coronel Ezequiel, comunidade Antas (CE-A2). Almeida (2010) relata que esse elemento é mais abundante em águas salinas do que em águas de boa qualidade.

As Figuras 15, 16 e 17 apresentam o grau de restrição ao uso da água para irrigação, por aspersão e por superfície, considerando os íons de sódio e cloreto.

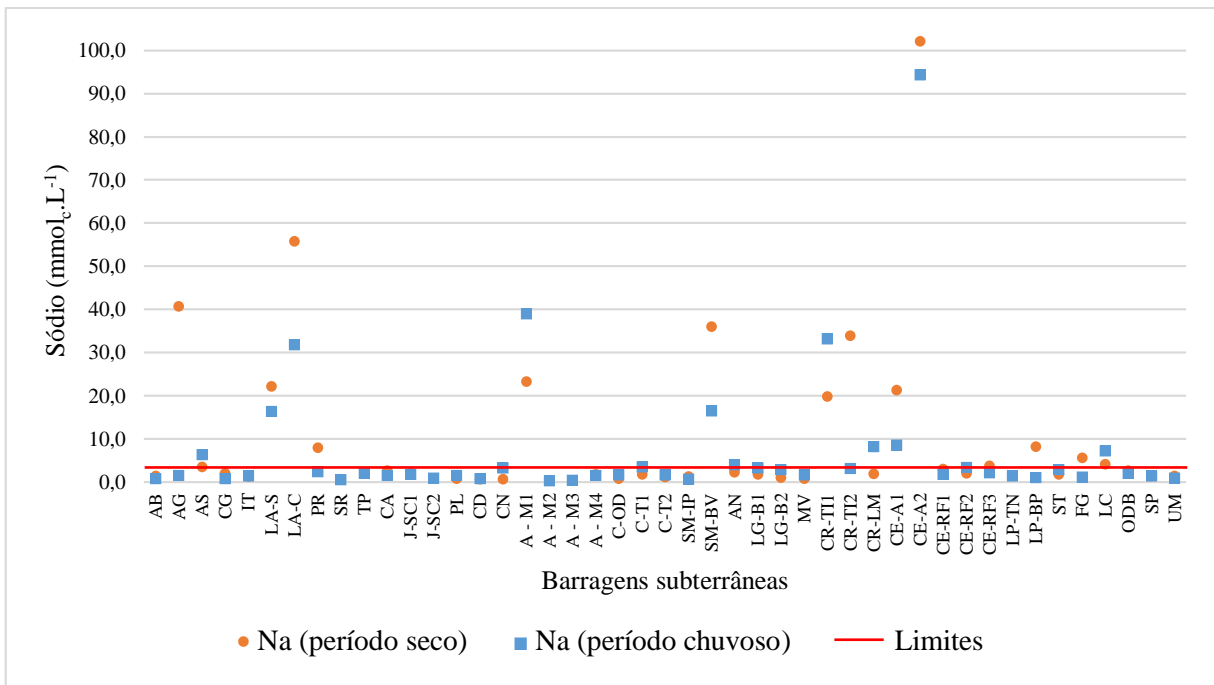


Figura 15. Grau de restrição ao uso da água das barragens subterrâneas analisadas para irrigação por aspersão, considerando a toxicidade do íon sódio (Na⁺).

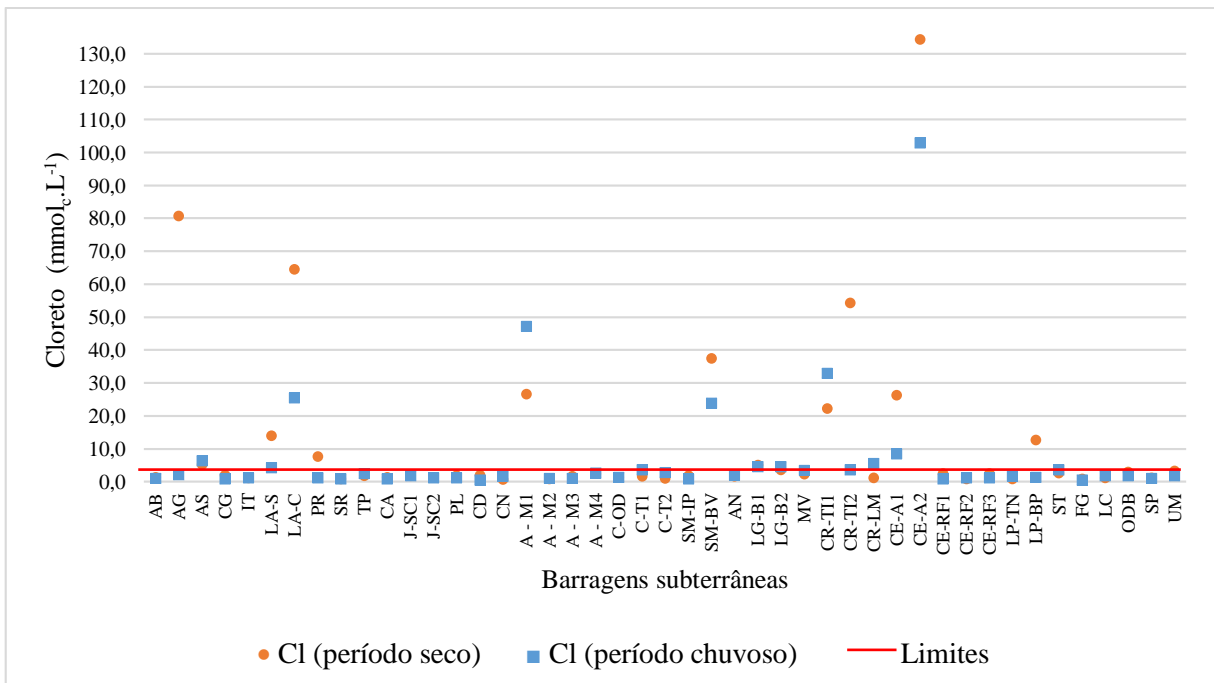


Figura 16. Grau de restrição ao uso da água das barragens subterrâneas analisadas para irrigação por aspersão, considerando a toxicidade do íon cloreto (Cl⁻).

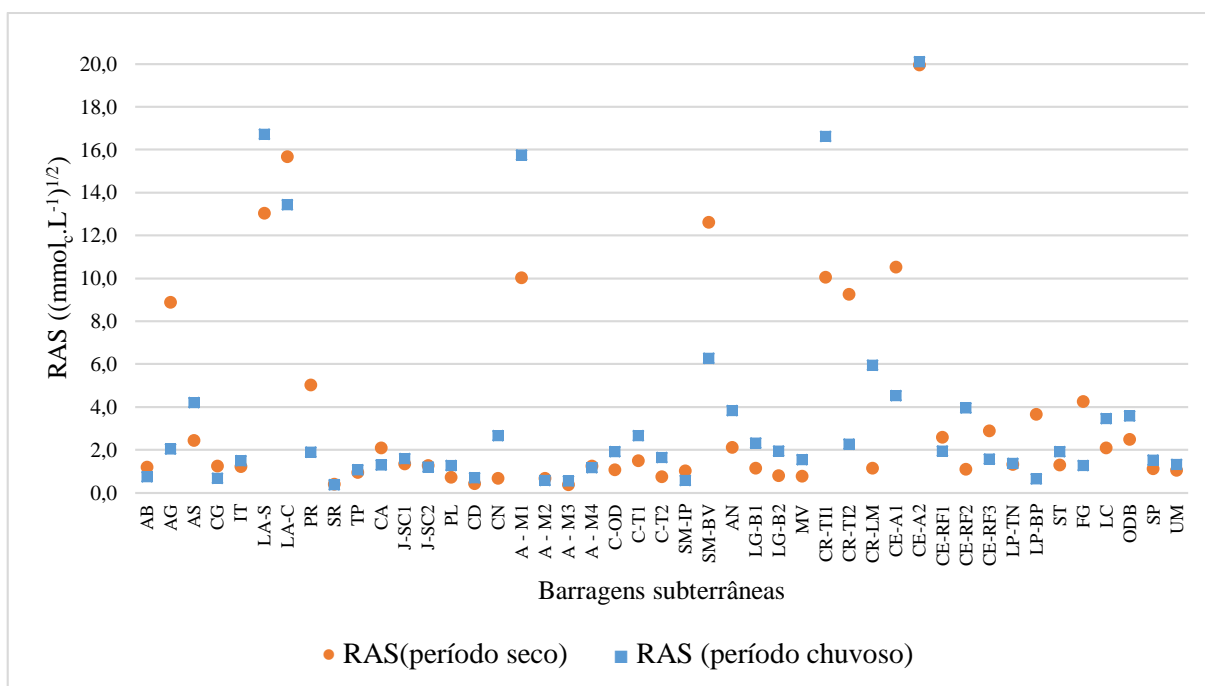


Figura 17. Grau de restrição ao uso da água das barragens subterrâneas analisadas para de irrigação por superfície, considerando a toxicidade do íon sódio (Na^+) e cloreto (Cl^-).

Ao analisar as Figuras 15 e 16, nota-se que um número considerável de barragens (15 barragens) apresentam restrições a utilização da sua água para irrigação por aspersão por possuírem concentrações de sódio e cloreto superiores a $3 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$, nos dois períodos avaliados. Parte dessas barragens ainda apresentam restrições severas ao uso na irrigação por superfície (8 barragens no final do período seco e 5 barragens no final do período chuvoso) por apresentarem RAS superior a $10 (\text{mmol}_c \text{ L}^{-1})^{1/2}$, conforme Figura 17.

As barragens que se destacam por apresentarem concentrações elevadas de sódio e cloreto, estão localizadas nos municípios de: Angicos (AG), Apodi (A-M1), Campo Redondo (CR-TI1 e CR-TI2), Coronel Ezequiel (CE-A1 e CE-A2), Lajes (LA-C e LA-S) e Severiano Melo (SM-BV). Nota-se que as barragens estão situadas na porção mais leste do aquífero cristalino ou possuem aglomerado rural e barramento a montante. A maioria das barragens possuem culturas instaladas na área ou na bacia da barragem e parte delas ficam alagadas após o período chuvoso (AG, CR-TI2, LA-C).

Lima et al. (2017b) atribuíram a inclusão de concentrações de cloreto nas águas superficiais da bacia do rio Cobra a dois mecanismos: intemperismo das rochas biotita e decomposição vegetal, devido ao grande acúmulo de matéria orgânica gerada pelas plantações de capim para o gado. Os autores concluíram ainda que a contribuição atmosférica era baixa devido à distância para a costa. Corroborando com essa informação, Costa et al. (2006) afirmaram que as precipitações da região do Seridó são oriundas da zona de convergência

intertropical e do vórtice ciclones da alta troposfera, os quais não estão necessariamente associados aos ventos marítimos.

Almeida (2010) destaca que o íon de cloro não é retido pelo complexo de troca do solo, desloca-se facilmente com a água do solo e é absorvido pelas raízes e pelas folhas, na irrigação por aspersão. Seu excesso pode provocar a clorose foliar e reduzir, em solos calcários, a absorção de fósforo e nitrogênio pelas plantas. Em relação ao íon de sódio, o referido autor afirma ainda que seu excesso pode ocasionar queimaduras nas folhas, e no solo pode deslocar o cálcio e o potássio dos coloides de argila, afetando sua estrutura, podendo resultar em desertificação da área.

A presença de bicarbonatos em excesso na água de irrigação por aspersão convencional pode provocar incrustações e depósitos brancos sobre as folhas e frutos. Nota-se, na Figura 18, que cerca de 89% da água das barragens subterrâneas possui algum tipo de restrição ao uso devido a elevada concentração de bicarbonatos. Dentre essas barragens, sete são classificadas de risco severo no fim período seco ou nos dois períodos de coleta: município de Angicos (AG), Lajes (LA-C e LA-S), São Rafael (SR), Triunfo Potiguar (TP), Coronel Ezequiel (CE-RF2) e Lucrécia (LC).

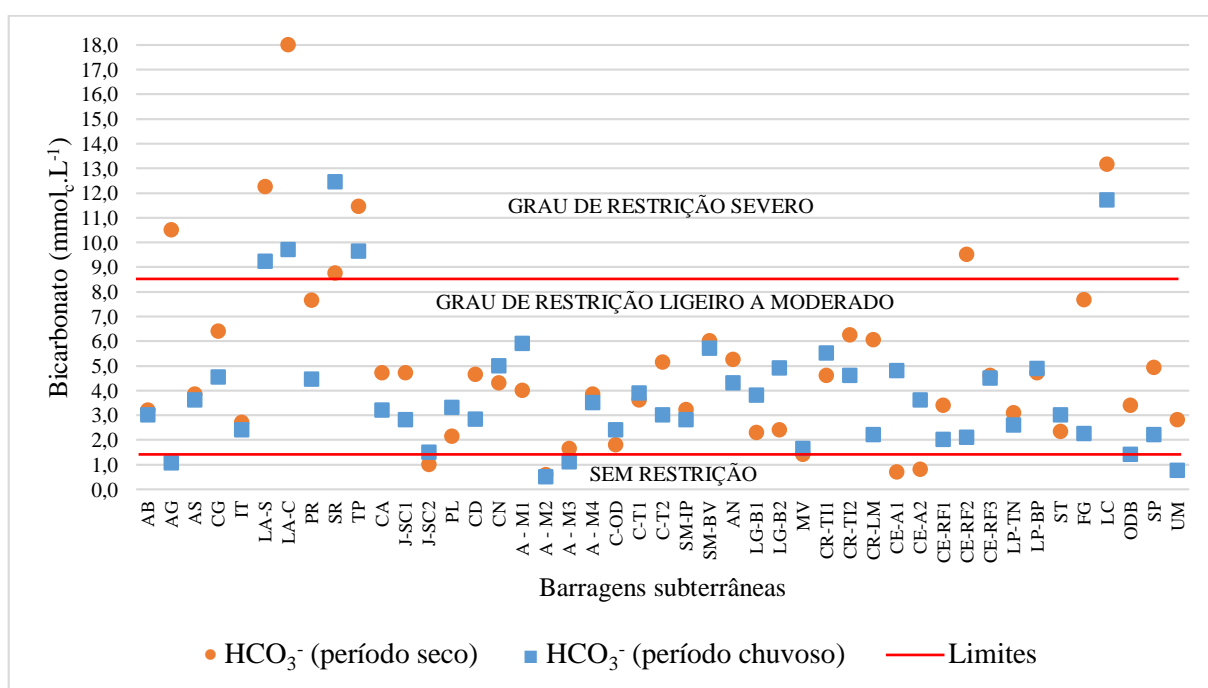


Figura 18. Grau de restrição ao uso da água das barragens subterrâneas analisadas para irrigação por aspersão convencional, considerando a toxicidade do íon bicarbonato (HCO₃⁻).

No trabalho realizado por Lima et al. (2017a) foi evidenciado que a presença de bicarbonato na água está relacionada com a dissolução de gás carbônico da atmosfera, a decomposição de matéria orgânica e intemperismo de rochas com silicatos. Concentrações

elevadas de bicarbonato podem provocar a formação de carbonato e bicarbonato sódico, podendo ocasionar problemas de sodificação do solo (Almeida et al., 2010; Maia et al., 2012).

Ao avaliar as concentrações de cloreto, sódio, cálcio e bicarbonato em relação a salinidade (Figura 19), nota-se que o aumento na condutividade elétrica proporciona um aumento nas concentrações de cloreto, sódio e cálcio e uma redução na concentração de bicarbonato. Esse comportamento também foi observado por Costa et al. (2006), nas águas subterrâneas do cristalino, e por Maia et al. (2012) em águas de diferentes origens dos estados do Ceará, Paraíba e Rio Grande do Norte.

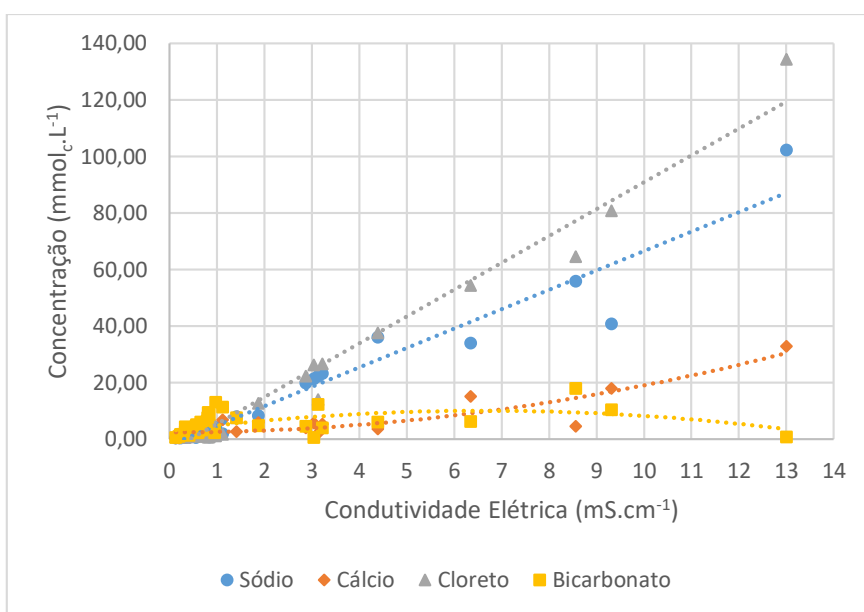


Figura 19. Concentrações de sódio (Na⁺), cálcio (Ca²⁺), cloreto (Cl⁻) e bicarbonato (HCO₃⁻) em função da condutividade elétrica.

5.4 Qualidade da água das barragens subterrâneas para uso em sistemas de irrigação localizada

Na Figura 20 são apresentados os valores de pH obtidos nos dois períodos analisados. Ayers & Westcot (1999) informam que a faixa de normalidade para o pH da água com fins de irrigação deve ser entre 6,5 e 8,4. Águas com pH anormais podem criar desequilíbrios de nutrição ou conter íons tóxicos. Observa-se que 8 barragens (18%) no final do período seco e somente uma (2%) no final do período chuvoso, apresentam um pH acima da faixa recomendada.

Os maiores problemas ocasionados por valores anormais de pH na água de irrigação estão relacionados com a deterioração dos equipamentos de irrigação. Ayers e Westcot (1999) afirmam que águas com pH acima de 7,0 já podem ocasionar algum grau de restrição ao uso

em sistemas de irrigação localizada, pois altas temperaturas aliadas a valores de pH elevados, podem favorecer a precipitação química pelo excesso de carbonatos ou sulfatos de cálcio e magnésio, ou pela oxidação do ferro. Todas as barragens avaliadas apresentaram algum risco de obstrução do sistema de irrigação localizada, por possuírem pH superior a 7,0 no final do período seco e/ou final do período chuvoso.

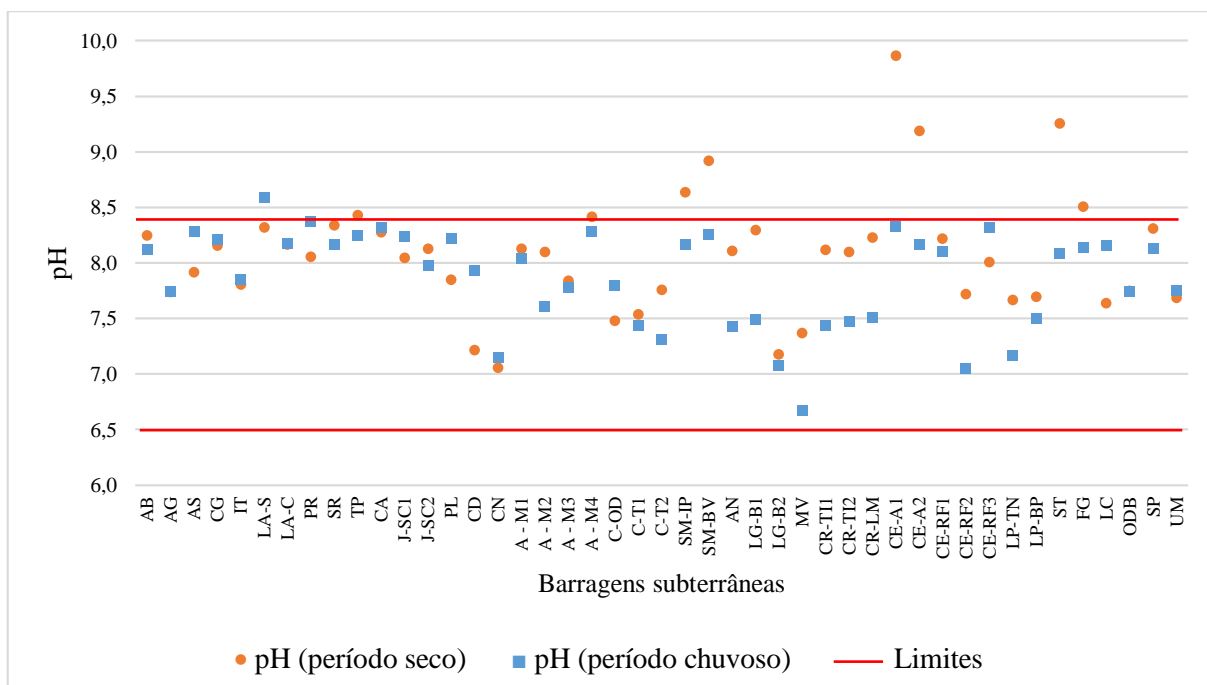


Figura 20. Grau de restrição ao uso da água das barragens subterrâneas analisadas para irrigação, considerando a faixa de normalidade do potencial hidrogeniônico (pH).

As Figuras 21 e 22 apresentam o potencial risco de obstrução dos sistemas de irrigação localizada em função da concentração de sólidos.

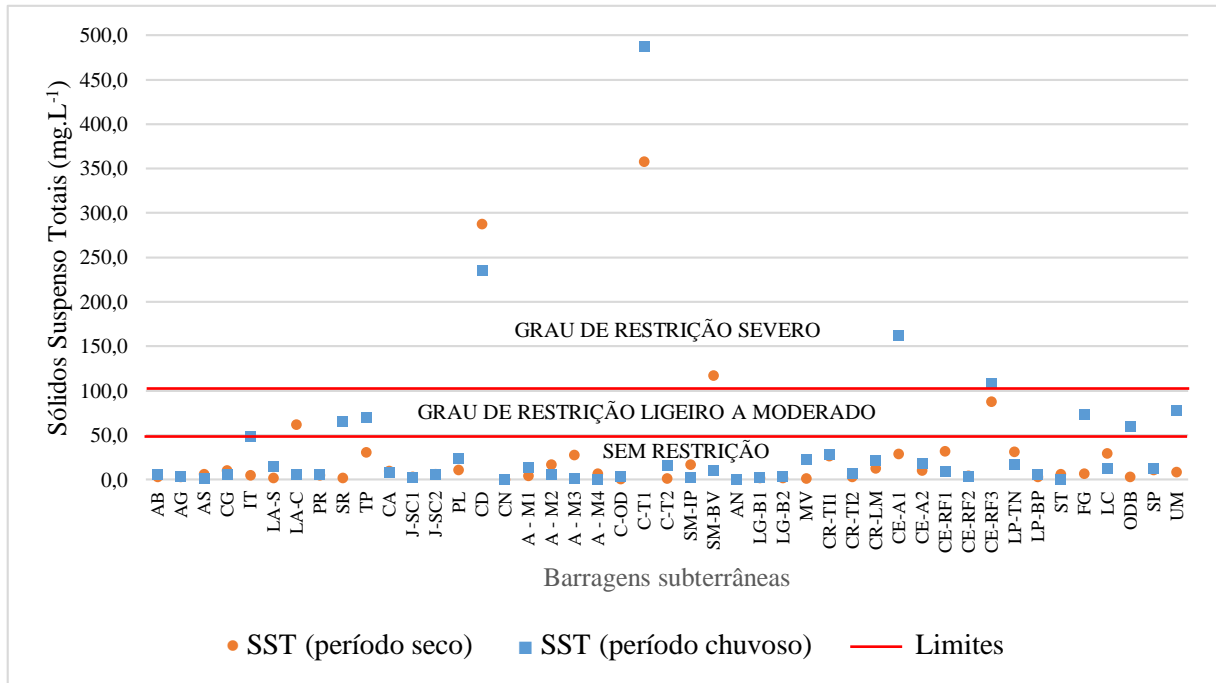


Figura 21. Grau de restrição ao uso da água das barragens subterrâneas analisadas em sistemas de irrigação localizada, considerando concentração de sólidos suspensão totais (SST).

Nota-se um aumento no risco de obstrução do sistema de irrigação localizada ao utilizar a água das barragens analisadas (de 11 para 20%), ocasionado pelo aumento na concentração de sólidos suspensos no final do período chuvoso. Esse fato pode ter ocorrido devido à entrada de sedimentos, carreado pelas enxurradas, no poço por cima de sua parede ou através de aberturas laterais.

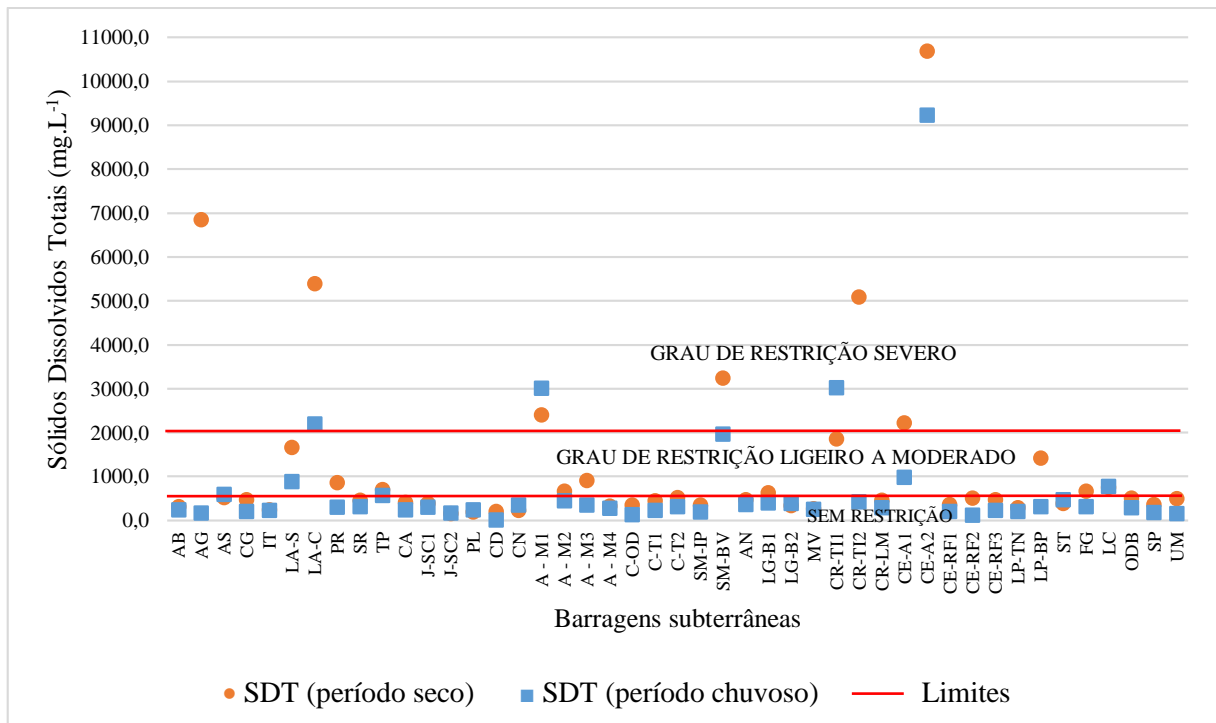


Figura 22. Grau de restrição ao uso da água das barragens subterrâneas analisadas em sistemas de irrigação localizada, considerando concentração de sólidos dissolvidos totais (SDT).

No final do período seco, os problemas com sólidos suspensos nas barragens foram ocasionados principalmente pela presença de algas, conforme Figuras 10C e 23A. Já no final do período chuvoso, além das algas, alguns poços apresentaram sedimentos e restos vegetais oriundos das águas de enxurradas que entram por cima da parede do poço, como pode-se observar nas Figuras 23B, 23C e 23D.





Figura 23. Problemas de sólidos suspensos em poços rasos das barragens subterrâneas analisadas: CE-RF3 (A), CD (B), U (C), TP (D).

Ao avaliar as águas das barragens subterrâneas que apresentam riscos severos de obstrução dos sistemas de irrigação localizadas, ocasionados pela concentração de sais dissolvidos, nota-se que são praticamente as mesmas que apresentam severos problemas de toxicidade com os íons de sódio e cloreto.

Percebe-se uma redução no número de barragens que apresentam alguma restrição quanto a concentração de sólidos dissolvidos entre o final do período seco (47% das barragens) e o final do período chuvoso (22% das barragens). Essa redução é esperada, uma vez que o aumento do volume de água armazenada na barragem subterrânea, oriundo das precipitações, proporciona uma redução na concentração de íons dissolvidos.

As Figuras 24 e 25 apresentam o potencial risco de obstrução dos sistemas de irrigação localizada em função das concentrações de ferro e manganês.

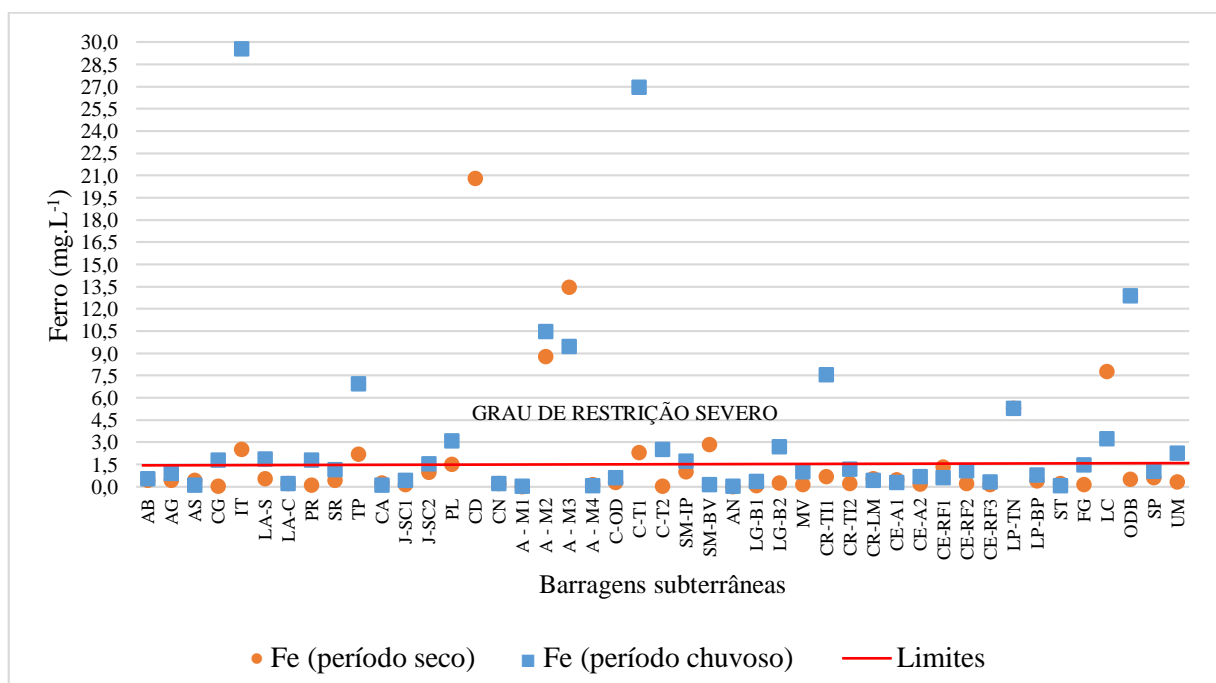


Figura 24. Grau de restrição ao uso da água das barragens subterrâneas em sistemas de irrigação localizada considerando a concentração de ferro (Fe).

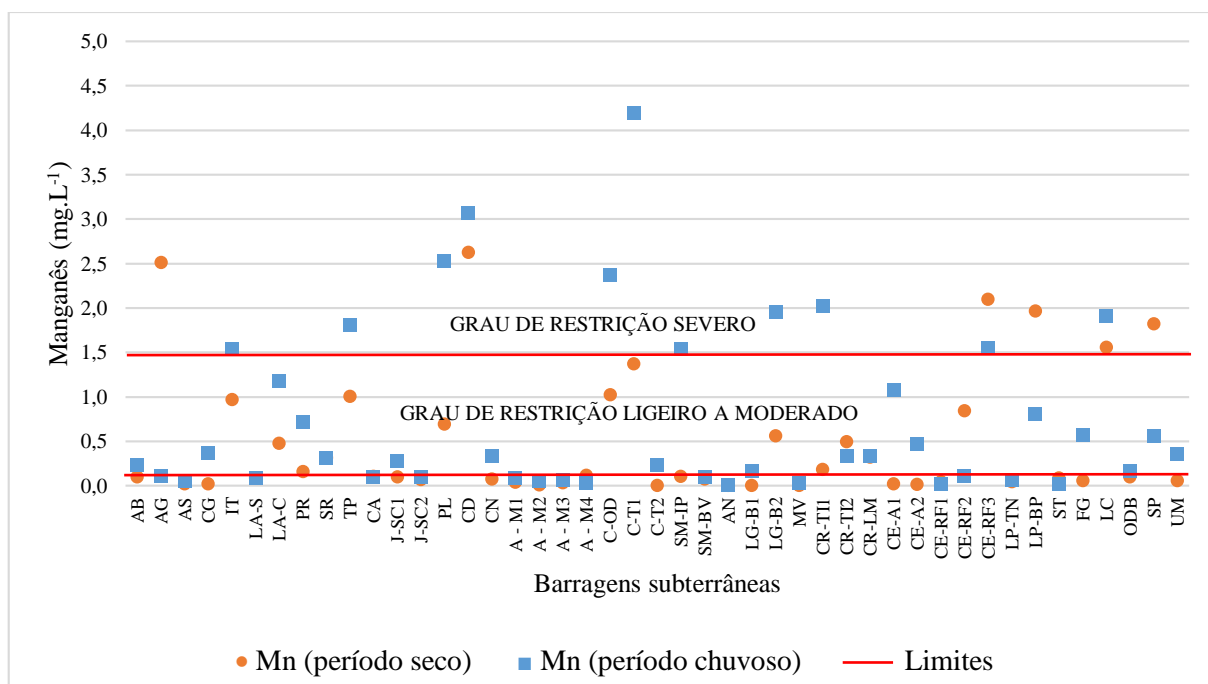


Figura 25. Grau de restrição ao uso da água de barragens subterrâneas em sistemas de irrigação localizados considerando a concentração de manganês (Mn).

Segundo Ayers & Westcot (1999) a presença de ferro e manganês na água de irrigação acima de 0,1 mmolc L⁻¹ pode obstruir fisicamente as tubulações e emissores dos sistemas de irrigação localizada. Ao depositar-se na parede dos tubos pode ocasionar um aumento na perda de carga e o comprometimento do sistema de irrigação.

Nota-se, nas Figuras 24 e 25, um aumento na restrição ao uso das águas das barragens subterrâneas em sistemas de irrigação localizada devido um aumento na concentração de ferro e manganês no final do período chuvoso. Esse fato provavelmente ocorre devido a lixiviação de óxidos de ferros e manganês existentes na bacia da barragem subterrânea, os quais são carregados pelas enxurradas e entram no poço por cima de sua parede ou se depositam na área da barragem.

As barragens subterrâneas que apresenta maior concentração de ferro, em ordem decrescente estão localizadas nos municípios de Carnaúba dos Dantas (CD), Itajá (IT), Caraúbas (C-T1), Apodi (A-M3) e Olho D'água dos Borges (ODB). E as que apresentam maiores concentrações de manganês, nos municípios: Caraúbas (C-T1 e C-OD), Carnaúba dos Dantas (CD), Angicos (AG), Parelhas (PL), Coronel Ezequiel (CE-RF3) e Campo Redondo (CR-TI1). Nota-se que a maioria dessas barragens ficam alagadas em média 4 meses após o período chuvoso.

Helena et al (2000) observaram um aumento na concentração de ferro, após o período chuvoso, nas amostras coletadas no aquífero aluvial do rio Pisuerga na Espanha. Porém Lima et al. (2020) relataram concentrações maiores de ferro e manganês, no fim do período seco, nas águas de barragens subterrâneas da bacia do rio Cobra, RN, Brasil. Os autores afirmaram que as concentrações de ferro e manganês estão relacionados a formação geológica da área.

A Tabela 8 resume a porcentagem de barragens que possuem restrição ao uso da água em sistemas de irrigação localizada, por parâmetro limitador. Percebe-se que os maiores problemas estão relacionados a alcalinidade da água (pH) seguido da concentração de ferro.

Tabela 8. Porcentagem de barragens por restrição ao uso da água de irrigação em sistemas de irrigação localizada

	Grau de restrição ao uso		Nenhum		Ligeiro a moderado		Severo	
	Período	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	
pH		0	2	40	47	60	51	
Sólidos Suspenso Totais		89	80	4	11	7	9	
Sólidos Dissolvidos Totais		53	78	31	13	16	9	
Ferro		13	11	65	47	22	42	
Manganês		51	31	36	45	13	24	

5.5 Análise de correlação entre as variáveis analisadas

A partir da matriz de correlação (Tabelas 9 e 10) é possível avaliar as associações entre as variáveis. Helena et al. (2000) afirma que somente correlações acima de 0,50 devem ser consideradas como relevantes.

Tabela 9. Matriz de Correlação das variáveis analisadas nas barragens subterrâneas do estado do Rio Grande do Norte no final do período seco do ano de 2018

	pH	CE	K ⁺	Na ⁺	Ca ⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SST	Cu	Mn	Fe	Zn	Cr	Ni	Cd	Pb
pH	1,00																	
CE	0,33	1,00																
K ⁺	0,61	0,61	1,00															
Na ⁺	0,40	0,97	0,64	1,00														
Ca ⁺	0,31	0,87	0,55	0,85	1,00													
Mg ²⁺	0,19	0,94	0,53	0,87	0,74	1,00												
Cl ⁻	0,33	0,99	0,62	0,98	0,91	0,90	1,00											
CO ₃ ²⁻	0,62	0,30	0,39	0,34	0,28	0,16	0,27	1,00										
HCO ₃ ⁻	-0,05	0,31	0,10	0,22	0,06	0,47	0,18	0,15	1,00									
SST	-0,17	-0,03	-0,02	-0,01	-0,06	0,00	-0,03	-0,11	0,02	1,00								
Cu	0,32	0,63	0,55	0,70	0,72	0,48	0,70	0,16	-0,16	0,01	1,00							
Mn	-0,35	0,09	-0,11	-0,02	0,14	0,20	0,07	-0,22	0,27	0,44	-0,08	1,00						
Fe	-0,26	-0,16	-0,01	-0,15	-0,11	-0,13	-0,14	-0,25	-0,06	0,51	0,06	0,33	1,00					
Zn	0,37	0,23	0,35	0,28	0,28	0,19	0,26	0,17	-0,08	-0,01	0,42	0,03	-0,07	1,00				
Cr	0,19	0,39	0,36	0,47	0,56	0,22	0,46	0,14	-0,23	0,21	0,76	0,06	0,26	0,24	1,00			

Ni	0,18	<u>0,86</u>	<u>0,51</u>	<u>0,81</u>	<u>0,81</u>	<u>0,85</u>	<u>0,87</u>	0,20	0,13	-0,02	<u>0,54</u>	0,12	0,01	0,17	0,27	1,00		
Cd	0,04	0,38	0,29	0,27	0,21	0,45	0,30	-0,05	0,49	-0,05	0,01	0,14	-0,14	-0,13	-0,13	0,23	1,00	
Pb	0,00	<u>0,72</u>	0,32	<u>0,59</u>	0,47	<u>0,79</u>	<u>0,66</u>	-0,02	0,47	-0,03	0,22	0,18	-0,15	-0,08	0,05	<u>0,57</u>	<u>0,60</u>	1,00

Nota: pH – potencial hidrogeniônico; CE – condutividade elétrica; K⁺ – potássio; Ca²⁺ – cálcio; Mg²⁺ – magnésio; Cl⁻ – cloretos; CO₃²⁻ – carbonato; HCO₃⁻ – bicarbonato; SST – sólidos suspenso totais; Cu – cobre; Mn – manganês; Fe – ferro; Zn – zinco; Cr – cromo; Ni – níquel; Cd – cádmio; Pb - chumbo.

Observa-se forte correlação nos dois períodos entre os íons de Cl⁻ e Na⁺ (r = 0,98 nos dois períodos). Como explicado anteriormente a presença desses íons estão associados a decomposição das rochas, porém em alguns locais existem outros fatores envolvidos, como precipitações com núcleos higroscópicos marinhos, presença de aglomerados rurais (vazamentos de fossas sépticas) e decomposição de matéria orgânica (cultivo de capim na área da barragem) (Helena et al., 2000; Rabemanana et al., 2005; Costa et al., 2006).

Resultados semelhantes foram apresentados por Lima et al. (2017a) ao avaliarem o aquífero aluvial do rio Cobra, RN, Brasil (correlação entre Cl⁻ e Na⁺ igual a 0,98). Os autores afirmaram que esses íons são abundantes na área de estudo e oriundo principalmente da decomposição das rochas.

Foram observadas altas correlações entre as variáveis Na⁺ e Cl⁻ com Ca²⁺ e Mg²⁺ nos dois períodos: Cl⁻ e Mg²⁺ (r = 0,90 e 0,94), Cl⁻ e Ca²⁺ (r = 0,91 e 0,89), Na⁺ e Mg²⁺ (r = 0,87 e 0,90), Na⁺ e Ca²⁺ (r = 0,87 e 0,85), entre Ca²⁺ e Mg²⁺ (0,74 e 0,90). Essas altas correlações sugerem a origem na mineralização natural dos componentes geológicos do solo.

Tabela 10. Matriz de Correlação das variáveis analisadas nas barragens subterrâneas do Rio Grande do Norte no final do período chuvoso de 2019

	pH	CE	K ⁺	Na ⁺	Ca ⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SST	Cu	Mn	Fe	Zn	S	B	Cr	Ni	Pb
pH	1,00																		
CE	0,18	1,00																	
K ⁺	0,27	0,22	1,00																
Na ⁺	0,15	<u>0,99</u>	0,14	1,00															
Ca ⁺	0,19	<u>0,91</u>	0,28	<u>0,87</u>	1,00														
Mg ²⁺	0,20	<u>0,95</u>	0,23	<u>0,93</u>	<u>0,90</u>	1,00													
Cl ⁻	0,11	<u>0,99</u>	0,18	<u>0,98</u>	<u>0,89</u>	<u>0,94</u>	1,00												
CO ₃ ²⁻	0,46	0,26	0,35	0,23	0,26	0,21	0,15	1,00											
HCO ₃ ⁻	0,31	0,25	0,29	0,21	0,31	0,23	0,14	<u>0,86</u>	1,00										
SST	-0,03	-0,05	-0,05	-0,06	-0,04	-0,02	-0,06	-0,10	0,02	1,00									
Cu	0,11	-0,11	0,12	-0,13	0,04	-0,08	-0,13	0,12	0,18	<u>0,51</u>	1,00								
Mn	0,01	-0,02	-0,18	-0,02	0,03	0,02	-0,04	-0,06	0,19	<u>0,67</u>	0,30	1,00							
Fe	-0,12	-0,13	-0,12	-0,12	-0,19	-0,10	-0,11	-0,21	-0,14	<u>0,65</u>	0,21	<u>0,58</u>	1,00						
Zn	0,26	-0,07	0,15	-0,10	0,10	-0,05	-0,10	0,16	0,16	0,31	<u>0,86</u>	0,25	0,07	1,00					
S	0,17	<u>0,65</u>	0,09	<u>0,67</u>	<u>0,53</u>	<u>0,63</u>	<u>0,62</u>	0,40	0,33	-0,09	-0,11	-0,03	-0,15	-0,08	1,00				
B	0,16	<u>0,55</u>	-0,07	<u>0,60</u>	0,44	0,47	<u>0,51</u>	0,32	0,30	0,31	0,07	0,18	0,13	-0,10	<u>0,61</u>	1,00			

Cr	-0,09	-0,10	0,10	-0,09	-0,17	-0,09	-0,07	-0,09	-0,25	-0,08	-0,04	-0,15	0,15	-0,01	-0,10	-0,13	1,00		
Ni	0,08	0,00	0,27	-0,02	-0,03	-0,01	-0,03	0,30	0,17	0,35	0,31	0,12	0,16	0,14	0,14	0,21	0,48	1,00	
Pb	0,10	0,17	0,10	0,16	0,16	0,21	0,18	-0,11	-0,17	0,23	-0,02	0,01	0,00	0,00	-0,05	0,01	-0,10	-0,06	1,00

Nota: pH – potencial hidrogeniônico; CE – condutividade elétrica; K⁺ – potássio; Ca²⁺ – cálcio; Mg²⁺ – magnésio; Cl⁻ – cloretos; CO₃²⁻ – carbonato; HCO₃⁻ – bicarbonato; SST – sólidos suspenso totais; S – enxofre; B – boro; Cu – cobre; Mn – manganês; Fe – ferro; Zn – zinco; Cr – cromo; Ni – níquel; Cd – cádmio; Pb - chumbo.

A condutividade elétrica é fortemente correlacionada com íons Cl⁻, Na⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺, nos dois períodos avaliados (r = 0,87 a 0,99), resultado esperado uma vez que essas variáveis estão diretamente relacionadas com a salinidade da água.

Helena et al. (1999) ao avaliarem o aquífero aluvial do rio Psuerga na Espanha, obtiveram uma forte correlação entre cloreto e sódio, a qual foi atribuída a uma origem antrópica, e entre condutividade elétrica e cálcio, magnésio, sulfato, cloreto, potássio, sódio e nitrato.

Ainda no período seco percebe-se uma correlação entre Ni e os íons que proporciona um aumento da condutividade elétrica: Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e Cl⁻ (r = 0,51 a 0,87). Já no período chuvoso observa-se uma maior correlação entre CO₃²⁻ e HCO₃⁻ (r = 0,86) e entre Zn e Cu (r = 0,86).

5.6 Análise fatorial das variáveis relacionadas a qualidade da água de irrigação

Da análise de componentes principais, obteve-se quatro fatores com os dados obtidos no período seco (Tabela 11) e seis fatores com os dados obtidos do período chuvoso (Tabela 12), os quais explicam 75,71 e 81,94%, respectivamente, da variação hidroquímica das barragens subterrâneas.

Tabela 11. Matriz de cargas fatoriais rotacionadas pelo método Varimax Normalizado para as variáveis físico-químicas da água das barragens subterrâneas analisadas no estado do Rio Grande do Norte, no final do período seco do ano 2018

Variáveis	Eixo Fatorial			
	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4
	cargas fatoriais			
pH	0,17	-0,04	-0,25	0,86
CE	0,93	0,26	-0,03	0,21
K ⁺	0,54	0,08	0,02	0,61
Na ⁺	0,91	0,12	-0,04	0,29
Ca ²⁺	0,91	-0,04	0,00	0,19
Mg ²⁺	0,86	0,44	0,02	0,09
Cl ⁻	0,96	0,12	-0,04	0,19
CO ₃ ²⁻	0,08	0,10	-0,16	0,79
HCO ₃ ⁻	0,09	0,83	0,13	0,09
SST	-0,04	0,01	0,84	0,03
Cu	0,77	-0,41	0,07	0,25
Mn	0,10	0,29	0,70	-0,23
Fe	-0,05	-0,20	0,78	-0,12
Zn	0,23	-0,25	0,10	0,49
Cr	0,55	-0,52	0,32	0,19

Ni	<u>0,87</u>	0,13	0,01	0,06
Cd	0,27	<u>0,70</u>	-0,04	-0,04
Pb	0,65	0,59	-0,05	-0,17
Autovalores	7,51	2,63	2,24	1,24
Variância Total (%)	41,72	14,63	12,47	6,89
Variância Acumulada (%)	41,72	56,35	68,82	75,71

Nota: pH – potencial hidrogeniônico; CE – condutividade elétrica; K⁺ – potássio; Ca²⁺ – cálcio; Mg²⁺ – magnésio; Cl⁻ – cloretos; CO₃²⁻ – carbonato; HCO₃⁻ – bicarbonato; SST – sólidos suspenso totais; Cu – cobre; Mn – manganês; Fe – ferro; Zn – zinco; Cr – cromo; Ni – níquel; Cd – cádmio; Pb - chumbo.

O primeiro fator uniu as variáveis CE, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, Cu e Ni, sendo responsável por 41,72% do total da variação hidroquímica do período seco. Esse componente principal está relacionado com a salinidade, sodicidade e toxicidade da água para fins de irrigação, sendo diretamente relacionado a mineralização natural dos componentes geológicos do solo, aliada a precipitações com núcleos higroscópicos marinhos, presença de aglomerados rurais (vazamentos de fossas sépticas) e decomposição de matéria orgânica (cultivo de capim na área da barragem). Essas mesmas características são apresentadas no primeiro fator da variação hidroquímica do período chuvoso (Tabela 12), o qual uniu as variáveis CE, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻ e S, e representam 31,50% do total da variação.

Lima et al. (2017a) ao analisarem as amostras de água do aquífero aluvial da bacia do rio Cobra no estado do Rio Grande do Norte, com auxílio da análise fatorial, obtiveram resultados semelhantes no primeiro fator, o qual era responsável por 39,30% da variação hidroquímica estudada. Esse fator também reuniu variáveis relacionadas a mineralização natural dos componentes geológicos do solo (CE, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e Cl⁻).

O segundo fator uniu as variáveis HCO₃⁻ e Cd e representam 14,63% do total da variação hidroquímica do período seco. As variáveis estão relacionadas a mineralização natural dos componentes geológicos do solo.

O terceiro fator uniu as variáveis SST, Mn e Fe, sendo responsável por 12,47% do total da variação hidroquímica do período seco. Esse fator está relacionado com os riscos de obstrução dos sistemas de irrigação localizada. Como visto anteriormente, os principais problemas de obstrução estão relacionados com a presença de algas e de ferro na água. Essas mesmas características e variáveis são apresentadas no segundo fator da variação hidroquímica do período chuvoso (Tabela 12), o qual representam 16,24% do total da variação.

O quarto fator formado no período seco uniu as variáveis pH e CO₃⁻ sendo responsável por 6,89% do total da variação hidroquímica do período seco. Este componente principal está relacionado com a alcalinidade da água, pois a medida que o pH aumenta a concentração de carbonatos também aumenta. Essas mesmas características e variáveis adicionadas de HCO₃⁻ são apresentadas no terceiro fator da variação hidroquímica do período chuvoso (Tabela 12), o qual representam 12,36% do total da variação.

Tabela 12. Matriz de cargas fatoriais rotacionadas pelo método Varimax Normalizado para as variáveis físico-químicas da água das barragens subterrâneas analisadas no estado do Rio Grande do Norte, no final do período chuvoso do ano 2019

Variáveis	Eixo fatorial					
	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4	Fator 5	Fator 6
	cargas fatoriais					
pH	0,09	0,07	0,59	0,03	0,14	0,34
CE	<u>0,98</u>	0,04	0,10	0,01	-0,03	0,09
K ⁺	0,13	0,25	0,39	-0,39	0,19	0,46
Na ⁺	<u>0,98</u>	0,02	0,06	0,02	-0,07	0,04
Ca ²⁺	<u>0,91</u>	0,09	0,13	0,08	0,17	0,13
Mg ²⁺	<u>0,95</u>	0,03	0,08	0,01	0,00	0,15
Cl ⁻	<u>0,98</u>	0,05	-0,02	0,01	-0,04	0,10
CO ₃ ²⁻	0,16	0,09	<u>0,92</u>	-0,11	0,04	-0,09
HCO ₃ ⁻	0,17	-0,06	<u>0,87</u>	0,09	0,09	-0,17
SST	-0,02	<u>-0,89</u>	-0,01	-0,08	0,26	0,17
Cu	-0,06	-0,30	0,11	-0,09	<u>0,89</u>	-0,04
Mn	0,00	<u>-0,82</u>	0,06	0,16	0,17	-0,05
Fe	-0,10	<u>-0,80</u>	-0,19	-0,17	0,00	0,01
Zn	-0,05	-0,09	0,12	-0,01	<u>0,95</u>	0,03
S	<u>0,70</u>	0,00	0,32	-0,05	-0,15	-0,26
B	0,60	-0,42	0,30	-0,03	-0,17	-0,21
Cr	-0,07	0,09	-0,24	<u>-0,85</u>	-0,03	-0,06
Ni	0,01	-0,27	0,27	<u>-0,80</u>	0,11	-0,04
Pb	0,13	-0,14	-0,10	0,11	-0,07	<u>0,84</u>
Autovalores	5,99	3,09	2,35	1,57	1,51	1,07
Variância Total (%)	31,50	16,24	12,36	8,26	7,93	5,64
Variância Acumulada (%)	31,50	47,75	60,11	68,37	76,30	81,94

Nota: pH – potencial hidrogeniônico; CE – condutividade elétrica; K⁺ – potássio; Ca²⁺ – cálcio; Mg²⁺ – magnésio; Cl⁻ – cloretos; CO₃²⁻ – carbonato; HCO₃⁻ – bicarbonato; SST – sólidos suspenso totais; S – enxofre; B – boro; Cu – cobre; Mn – manganês; Fe – ferro; Zn – zinco; Cr – cromo; Ni – níquel; Cd – cádmio; Pb - chumbo.

O quarto, quinto e sexto fatores apresentados na variação hidroquímica do período chuvoso são menos expressivos. O quarto fator uniu as variáveis Cr e Ni e o sexto fator é representado apenas pela variável Pb. Estes são responsáveis por 8,26 e 5,64%, respectivamente, do total da variação hidroquímica do período e estão relacionados a presença de metais pesados na água. Esses metais não oferecem risco às culturas por se apresentarem em pequenas concentrações.

O quinto fator é representado pelas variáveis Cu e o Zn e representam 7,93% da variação hidroquímica do período chuvoso. Estão relacionados com a presença de micronutrientes na água e não oferecem risco às culturas devido as pequenas concentrações.

5.7 Análise de agrupamento das barragens que apresentam semelhantes características físico-químicas de suas águas

As Figuras 26 e 27 apresentam a análise de agrupamento das barragens subterrâneas, com base em suas semelhanças hidroquímicas. Para a análise de agrupamentos foi utilizado o método Ward e distâncias euclidianas.

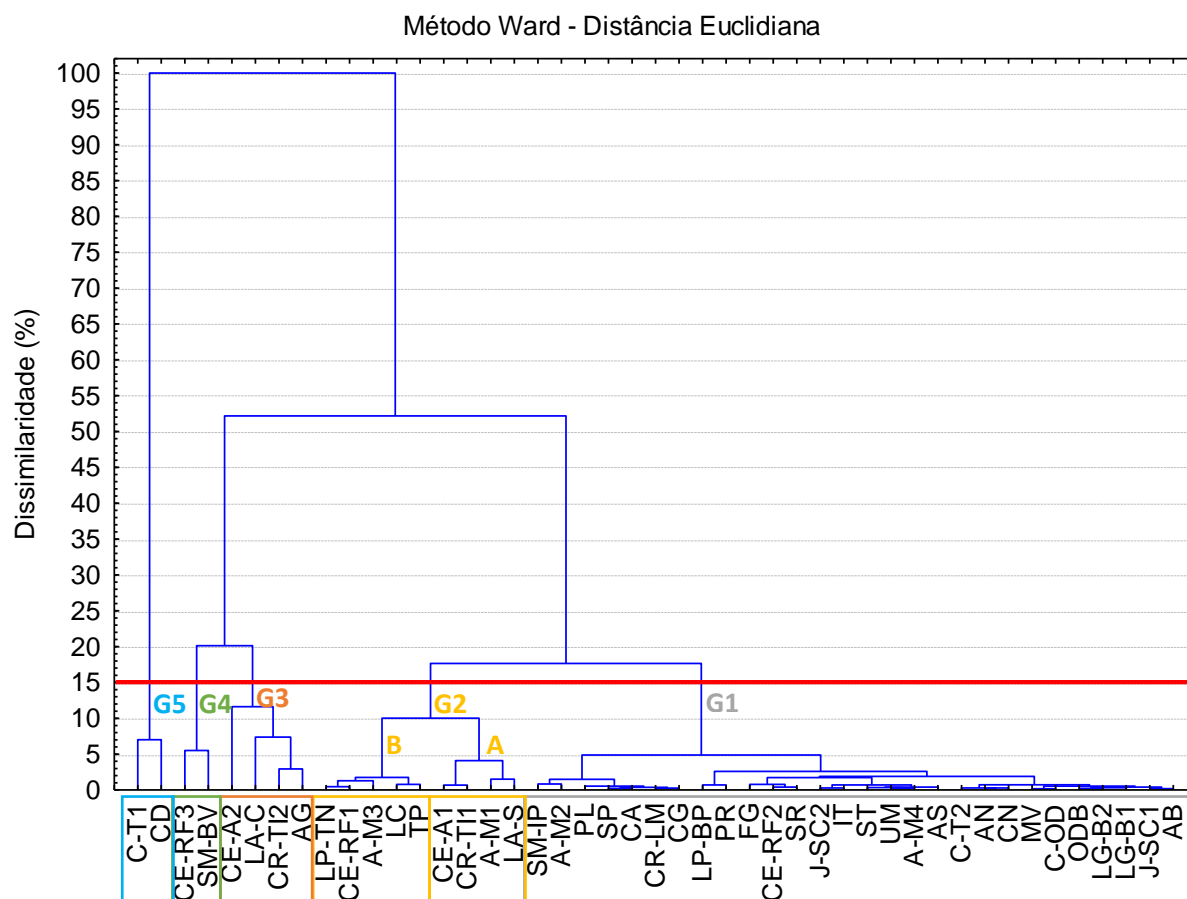
Apesar de nos dois períodos avaliados, a análise de agrupamento apresentar dois grupos principais, decidiu-se realizar um corte a 15% no período seco e 20% no período chuvoso, de forma a explicar melhor as divisões geradas. Esses cortes proporcionaram a subdivisão de 5 grupos nos dois períodos de estudo.

Analisando a Figura 26, nota-se que o grupo 1 é formado por barragens que não apresentam problemas para o uso de suas águas em irrigação.

O grupo 2 caracteriza-se por barragens que o uso de suas águas pode apresentar riscos de salinidade, sodicidade e/ou toxicidade. Esse grupo se subdivide em dois: o grupo A é caracterizado por apresentar maiores concentrações de sais e íons que geram toxicidade para as plantas, já o grupo B é caracterizado por apresentar concentrações intermediárias de sais.

O grupo 3 é caracterizado por apresentar barragens que o uso de suas águas pode apresentar elevado risco de salinidade, sodicidade e/ou toxicidade.

O grupo 4 é formado por barragens que o uso de sua água pode apresentar problemas de entupimento nos sistemas de irrigação localizada, ocasionados por sólidos em suspensão (presença de algas) e alcalinidade. E o grupo 5 é formado por barragens que suas águas apresentam baixa salinidade, porém podem gerar problemas graves de entupimento no sistema de irrigação, ocasionados pela presença de sólidos em suspensão (algas) e ferro.



Nota: G1 – grupo 1; G2 – grupo 2; G3 – grupo 3; G4 – grupo 4; G5 – grupo 5.

Figura 26. Análise de agrupamento das barragens subterrâneas analisadas no estado do Rio Grande do Norte, em função de suas características hidroquímicas no período seco, do ano 2018.

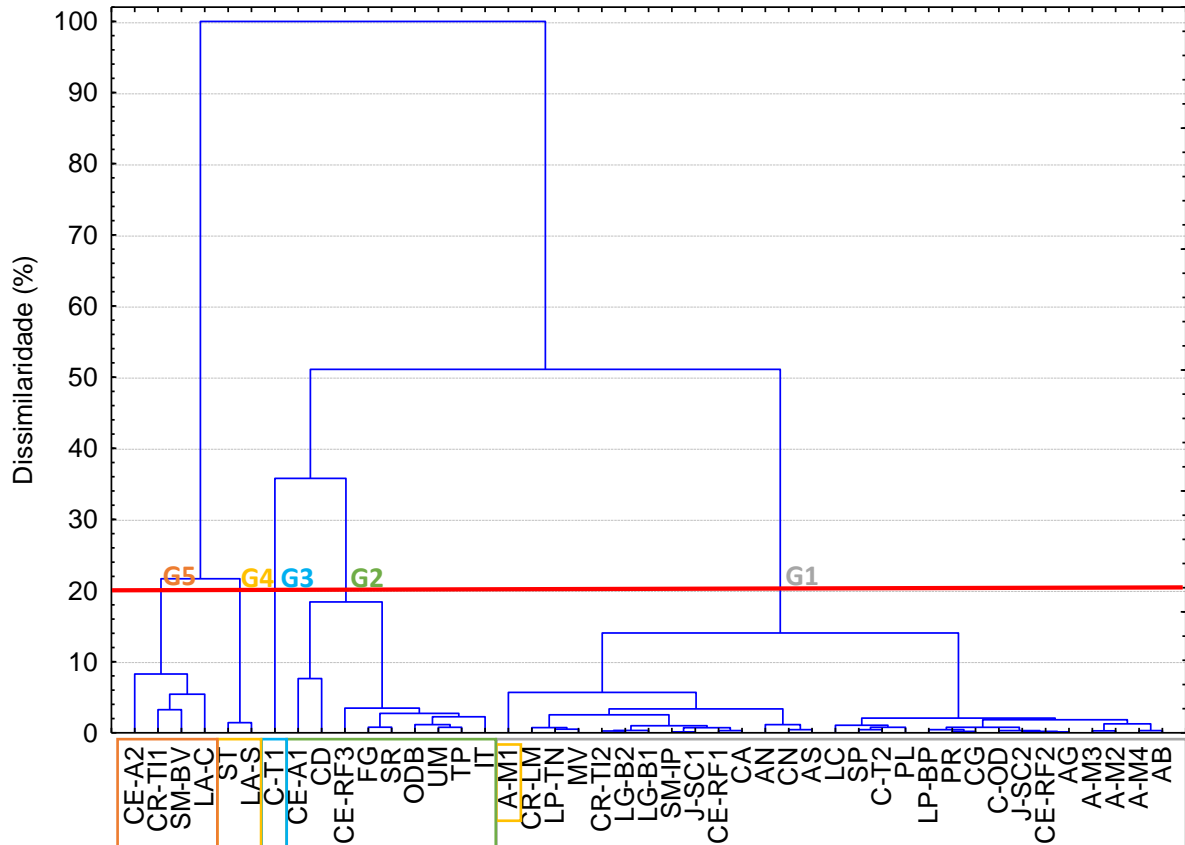
Analisando a Figura 27 nota-se que o grupo 1 é formado por barragens que o uso de suas águas não apresenta problemas de salinidade, sodicidade, toxicidade e obstrução do sistema de irrigação localizada, com exceção da barragem A-M1, que apresenta fraca ligação com o grupo por apresentar uma salinidade elevada e problemas de toxicidade.

O grupo 2 caracteriza-se por barragens que o uso de suas águas apresenta algum risco de obstrução do sistema de irrigação localizada, seja pela presença de algas, sedimentos oriundos de enxurradas ou presença de ferro e/ou manganês.

O grupo 3 está relacionado a apenas uma barragem (C-T1) a qual também o uso de sua água pode apresentar algum risco de obstrução do sistema de irrigação localizada, pela presença de algas, ferro e manganês.

O grupo 4 é formado por barragens que o uso de suas águas em irrigação pode apresentar problemas intermediários de salinidade, sodicidade e toxicidade. E o grupo 5 caracterizado por apresentar barragens que as suas águas apresentam elevado risco de salinidade, sodicidade e/ou toxicidade.

Método Ward - Distância Euclidiana



Nota: G1 – grupo 1; G2 – grupo 2; G3 – grupo 3; G4 – grupo 4; G5 – grupo 5.

Figura 27. Análise de agrupamento das barragens subterrâneas analisadas no estado do Rio Grande do Norte, em função de suas características hidroquímicas no período chuvoso do ano de 2019.

5.8 Espacialização da condutividade elétrica apresentada pelas águas dos barramentos subterrâneos

Diante da grande variabilidade e não normalidade dos dados de condutividade elétrica, nos dois períodos estudados, e dada a importância dos mesmos, optou-se por utilizar o interpolador IDW na confecção dos mapas de sua distribuição espacial, em paralelo com a análise temporal, os quais estão apresentados nas Figuras 28 e 29.

A maior parte dos locais de coleta está bem distribuída, com exceção dos municípios de Apodi e Coronel Ezequiel, os quais apresentam uma maior concentração. Conforme explicitado anteriormente, a escolha do local de coleta foi condicionada a existência de água no poço da barragem e indicação do técnico local da EMATER-RN.

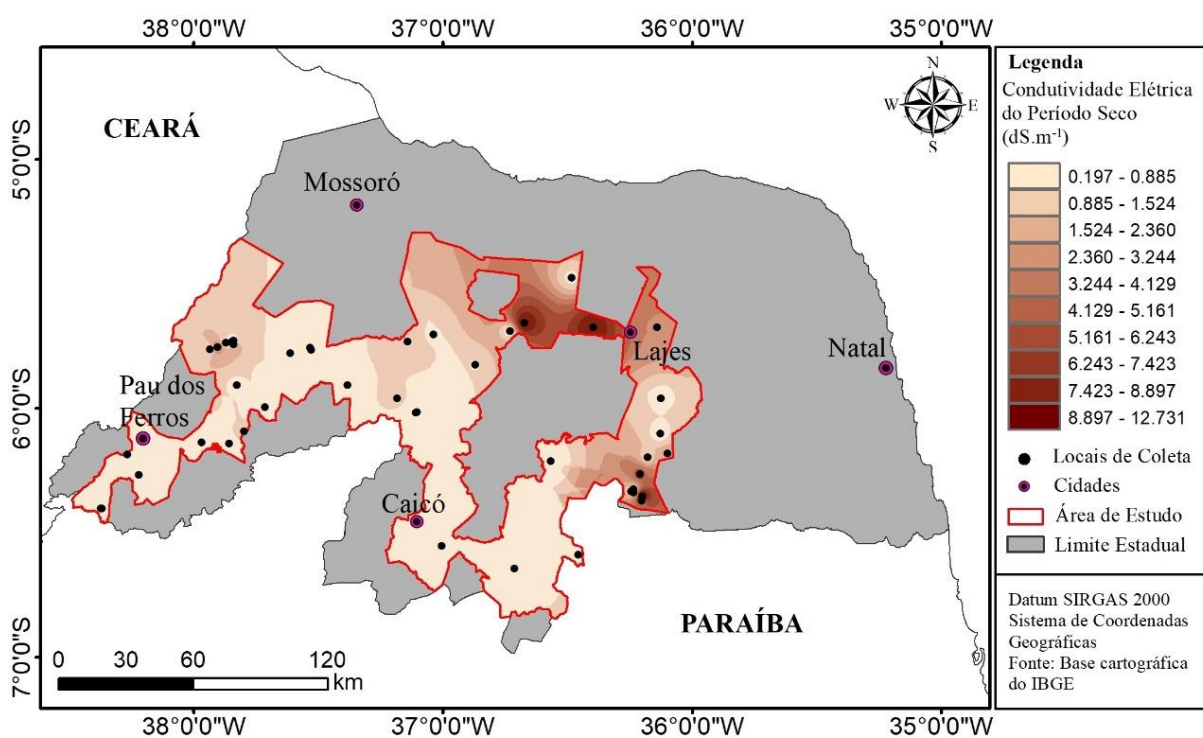


Figura 28. Variação espacial da condutividade elétrica da água das barragens subterrâneas, no fim do período seco do ano de 2018.

Observa-se, nas Figuras 28 e 29, que as maiores condutividades elétricas obtidas nas águas das barragens subterrâneas estão localizadas, em sua maioria, na porção leste do Rio Grande do Norte, mais especificamente próximo aos municípios de Lajes e Coronel Ezequiel. Os mapas ainda apresentam alguns pontos de salinidade elevada próximos ao município de Apodi. As demais barragens apresentam águas com condutividade elétricas com baixo potencial para salinização da água e do solo.

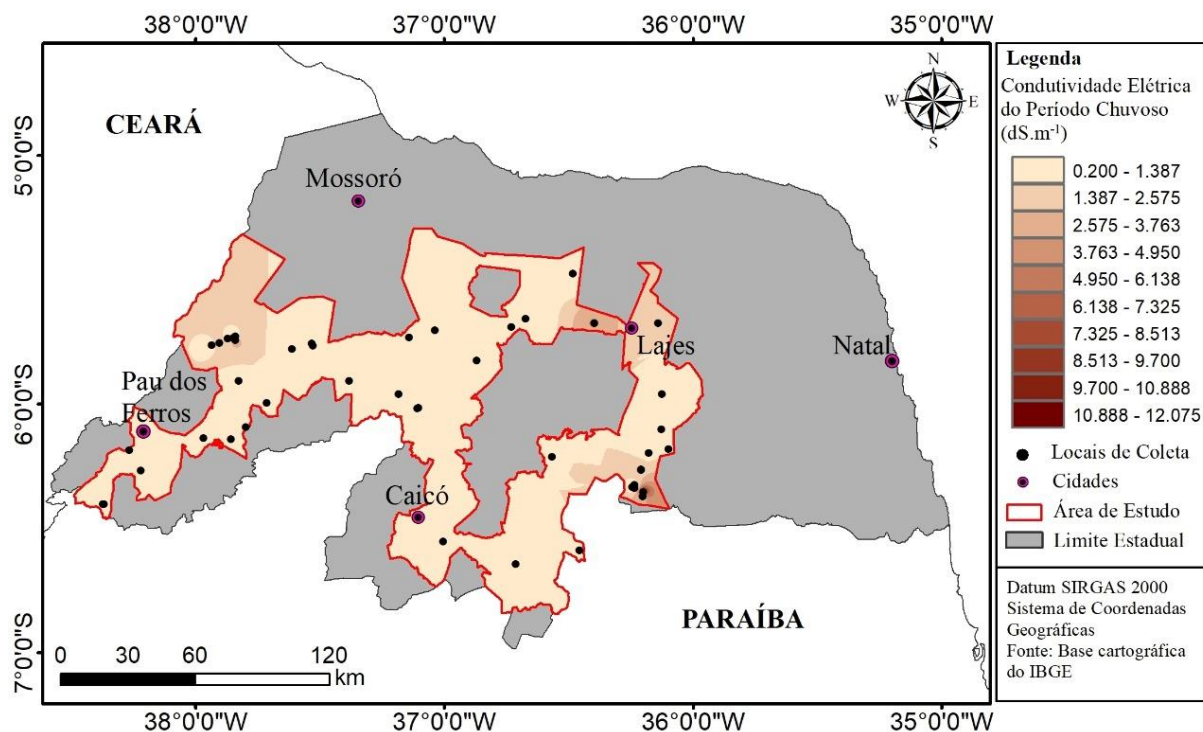


Figura 29. Variação espacial da condutividade elétrica da água das barragens subterrâneas, no fim do período chuvoso do ano de 2019.

Conforme mencionado anteriormente, um dos fatores que podem elevar a salinidade das águas situadas na porção leste do estado do Rio Grande do Norte são as baixas precipitações carregadas de núcleos higroscópicos marinhos, devido a atuação das Ondas de Leste (Costa et al., 2006). Já as altas salinidades encontradas na Região de Apodi podem estar relacionadas à presença de aglomerados rurais na área de contribuição da barragem subterrânea (Helena et al., 2000; Rabemanana et al., 2005).

Nota-se que as áreas que apresentavam maior condutividade elétrica no final do período seco (Figura 28), são similares às áreas de maior condutividade elétrica obtidas no final do período chuvoso (Figura 29).

Na Tabela 13 estão apresentadas a avaliação dos dados medidos e estimados pela geoestatística através do interpolador IDW.

Tabela 13. Avaliação da eficiência do interpolador IDW para condutividade elétrica da água das barragens subterrâneas analisadas

Descrição	EMA (dS.m ⁻¹)	EMR (%)	EQM
IDW fim do período seco	0,109	5,463	0,179
IDW fim do período chuvoso	0,100	13,420	0,142

Ao analisar os valores apresentados pelo erro médio absoluto (EMA) e erro quadrático médio (EQM), considera-se que o interpolador IDW apresentou uma boa eficiência na estimativa dos valores de condutividade elétrica.

Considerando os valores apresentados pelo erro médio relativo (EMR), considera-se que o interpolador apresentou uma boa eficiência no período seco (ano de 2018) e uma eficiência satisfatória no período chuvoso (ano de 2019).

Na Tabela 14 estão apresentadas barragens que proporcionaram uma maior contribuição para uma elevação dos erros apresentados.

Tabela 14. Apresentação do erro apresentado pelo interpolador IDW para condutividade elétrica por tipo de erro e barragem subterrânea

Pontos	Condutividade Elétrica (dS m ⁻¹)		Erro Médio Absoluto (dS m ⁻¹)		Erro Médio Relativo (%)		Erro Quadrático Médio	
	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso
	A-M1	3,225	5,745	0,081	0,153	2,5	2,7	0,01
A-M2	0,134	0,092	0,063	0,108	47,3	117,8	0,00	0,01
A-M3	0,234	0,214	0,070	0,123	29,9	57,5	0,01	0,02
CE-A1	3,050	1,562	0,368	0,419	12,1	26,8	0,14	0,18
CE-A2	13,010	12,365	0,278	0,289	2,13	2,33	0,08	0,08
CR-TI1	2,880	3,820	0,787	0,698	27,3	18,3	0,62	0,49
CR-TI2	6,350	0,761	2,683	2,361	42,2	310,2	7,20	5,57

As barragens subterrâneas CR-TI1 e CR-TI2 encontram-se distante aproximadamente 200 m (Figura 30), possuem o mesmo tipo de manejo, ações climáticas e acredita-se que o mesmo tipo de solo. A barragem CR-TI2 está a montante da barragem CR-TI1. A principal diferença entre elas é a proximidade com um barramento superficial, a CR-TI2 é mais próxima; e, a entrada de sedimentos pela boca do poço, que ocorre na CR-TI1. Nota-se que a condutividade elétrica das duas barragens apresenta comportamentos divergentes nos dois períodos avaliados. Além disso, a barragem CR-TI2 apresenta uma grande variação. Pode existir alguma contribuição da água subterrânea confinada, através de fissuras na barragem subterrânea, que fazem com que essa variação se torne maior, ou o barramento superficial pode exercer forte influência no barramento subterrâneo, podendo estar completamente seco no primeiro período de coleta. Seria necessário avaliar por um período maior essas duas barragens para entender a dinâmica que ocorre entre elas.



Figura 30. Barramentos subterrâneos estudados no município de Campo Redondo, comunidade Timbaúba.

Diante do exposto, percebe-se a grande influência negativa dos dados obtidos na barragem CR-TI2 na geração dos mapas de condutividade elétrica com o interpolador IDW. Ainda no barramento CR-TI2, nota-se que o erro médio absoluto e o erro médio quadrático obtidos no período seco e chuvoso são bem próximos, porém o erro médio relativo é bastante diferente. Isso ocorre devido a metodologia do cálculo do erro, na qual é utilizado o erro médio absoluto dividido pelo valor de referência, que no caso do período chuvoso era inferior a 1, aumentando consideravelmente o valor do erro.

Apesar da grande diferença de condutividade elétrica entre as barragens CE-A1 e CE-A2, a distância entre as mesmas (2080 m) minimiza os erros apresentados na geoestatística.

Ao analisar os dados das barragens da comunidade Melancias, no município de Apodi (A-M1, A-M2 e AM3) nota-se que as barragens A-M2 e A-M3 apresentam condutividades elétricas inferiores à da barragem A-M1, mesmo a distância entre elas não sendo tão grande (1.685 m e 1.490 m, respectivamente). Nota-se que a influência da barragem A-M1 sobre os dados obtidos, com o interpolador IDW, nas barragens A-M2 e AM-3 é praticamente a mesma, visto que a distância pode ser considerada igual.

6 CONCLUSÕES

As variáveis relacionadas aos riscos de salinidade do solo e toxicidade das plantas reduziam sua concentração após o período chuvoso, enquanto que as variáveis relacionadas aos problemas de obstrução dos sistemas de irrigação localizada aumentavam.

A variação da condutividade elétrica entre o período seco e chuvoso tende a aumentar com o aumento da salinidade da barragem.

Não foi possível obter uma correlação entre a presença de barramento superficial a montante e redução na variação da condutividade elétrica entre o período seco e chuvoso.

A maioria das barragens são classificadas como C2-S1 em relação ao risco de salinidade e sodicidade do solo.

A presença de aglomerados rurais (vazamentos de fossas sépticas), a utilização de dejetos de animais com fertilizantes e decomposição de matéria orgânica (cultivo de capim na área da barragem) pode elevar os teores de salinidade das barragens subterrâneas do semiárido potiguar.

A alcalinidade e a presença de algas e a concentração de íons ferro são as principais variáveis relacionadas à obstrução dos sistemas de irrigação localizada.

As variáveis relacionadas a salinidade apresentam maior influência na variação hidroquímica da água das barragens, nos dois períodos estudados. A condutividade elétrica e os íons de cloreto apresentam a maior carga fatorial dessa salinidade.

O interpolador IDW se configurou como uma boa ferramenta na geração de mapas de variabilidade da condutividade elétrica da água de poços de barragens subterrâneas do semiárido potiguar.

As áreas que apresentavam maior condutividade elétrica no final do período seco, são similares às áreas de maior condutividade elétrica obtidas no final do período chuvoso.

7 REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12.244 – Construção de poço para captação de água subterrânea. Rio de Janeiro, 2006. 6 p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9.896 – Glossário de Poluição das Águas – Terminologia. Rio de Janeiro, 1993. 94 p.
- Almeida, O. A. Qualidade da água de irrigação. 1ed. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2010. 234 p.
- ANA - Agência Nacional de Águas -. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2019. Agência Nacional de Águas. Brasília: ANA, 2019. 100 p
- ANA – Agência Nacional de Águas. Mapa do Semiárido Brasileiro – 2017. <<https://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/metadata.show?id=76&currTab=simple>> 6 Abr 2020.
- ANA – Agência Nacional de Águas. Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas. <http://dadosabertos.ana.gov.br/datasets/b78ea64219b9498c8125cdef390715b7_0>. 2012.
- Andrade Neto, C. O. Aproveitamento imediato da água de chuva. Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA), v. 1, n. 1, p. 073-086, 2013.
- Andrade, T. S.; Montenegro, S. M. G. L.; Montenegro, A. A. A.; Rodrigues, D. F. B. Variabilidade espaço-temporal da condutividade elétrica da água subterrânea na região semiárida de Pernambuco. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.16, n.5, p.496–504, 2012.
- Araújo, J. C. Recursos hídricos em regiões semiáridas. In: Gheyi, H. R.; Paz, V. P. S.; Medeiros, S. S.; Galvão, C. O. Recursos hídricos em regiões semiáridas. Campina Grande, PB: Instituto Nacional do Semiárido; Cruz das Almas, BA: Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2012. Cap. 2, p. 30-43.
- Ayers, R. S. & Westcot, D. W. A qualidade da água na agricultura. 2.ed. Tradução Gheyi, H. R., Medeiros, J. F., Damasceno, F. A. V. Campina Grande: UFPB, 1999. 153p.
- Brasil. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS: 24º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2018. Brasília: SNS/MDR, 2019. 180 p. <http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2018/Diagnostico_AE2018.pdf> 6 Abr 2020
- Brito, L. T. L.; Silva, D. A.; Cavalcanti, N. B.; Anjos, J. B.; Rego, M. M. Alternativa tecnológica para aumentar a disponibilidade de água no semi-árido. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.3, n.1, p.111-115, 1999.

- Campos, J. N. B. Secas e políticas públicas no semiárido: ideias, pensadores e períodos. *Sociedade e Ambiente, Estudos Avançados*, v. 28, n. 82, p. 65-88, 2014.
- Chianca, C. G. C.; Batista, R. O.; Silva, C. K. Silva; Souza, A. A. Qualidade da água de barragens subterrâneas do município de Caraúbas/RN *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 2, p. 7444-7456, 2020.
- Cirilo, J. A. Políticas públicas de recurso hídricos para o semi-árido. *Estudos Avançados*, v. 22 n. 63, p. 61-82, 2008.
- Cirilo, J. A.; Abreu, G. H. F. G.; Costa, M. R.; Goldemberg, D.; Costa, W. D.; Baltar, A. M.; Azevedo L. G. T. Soluções para o Suprimento de Água de Comunidades Rurais Difusas no Semi-Árido Brasileiro: Avaliação de Barragens Subterrâneas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 8, n.4, p. 5-24, 2003.
- Cirilo, J. A. & Costa, W. D. Barragem Subterrânea: Experiência em Pernambuco, IX Conferência Internacional sobre Sistemas de Captação de Água de Chuva, Petrolina, 1999.
- Cordeiro, G. G. Qualidade de água para fins de irrigação - conceitos básicos e práticas Petrolina, PE: Embrapa SemiÁrido, 2001. 32 p.
- Costa, W. D. e Costa Filho, W. D. Barragens Subterrâneas & Barragens de Assoreamento Conceitos e Construção. In: Antonino, M. O. *Cadernos do Semiárido: riquezas & oportunidades*. Recife, PE: Conselho Regional de Engenharia e Agronomia de Pernambuco. Editora UFPE, 2015. v. 3, n.1, 52 p.
- Costa, A. M. B.; Melo, J. G.; Silva, F. M. Aspectos da salinização das águas do aquífero cristalino no estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. *Águas Subterrâneas*, v.20, n.1, p.67-82, 2006.
- CPRM – Serviço Geológico Brasileiro. Projeto cadastro da infra-estrutura hídrica do Nordeste. Relatório Preliminar, 1ª Etapa - 225.000 km², Versão Beta, 2002, p. 21. <https://www.cprm.gov.br/publique/media/hidrologia/mapas_publicacoes/cadastramento_fontes_semiarido_brasileiro.pdf> 6 Abr 2020.
- Dantas, L. C. A. Avaliação das barragens subterrâneas no regime de um curso d'água na região do semi-árido do RN. Natal: UFRN, 2009. 113p. Dissertação Mestrado.
- Diniz, M. T. M. & Pereira, V. H. C. Climatologia do estado do Rio Grande do Norte, Brasil: sistemas atmosféricos atuantes e mapeamento de tipos de clima. *Boletim Goiano de Geografia*. V. 35, n. 3, p. 488-506, set./dez., 2015.
- Dubreuil, V.; Fante K. P.; Planchon, O.; Sant'anna Neto, J. L. Os tipos de climas anuais no Brasil: uma aplicação da classificação de Köppen de 1961 a 2015. *Revista franco-brasilera de geografia* v. 37, 19p. 2018.

- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Instruções técnicas da Embrapa Semiárido: Barragens Subterrâneas. nº 49, Petrolina, 2011.
- Feitosa, L. S. Aspectos limnológicos da pequena açudagem no semiárido: estudo de caso dos açudes do Assentamento 25 de Maio, Madalena, Ce. Fortaleza: UFC, 2011. 121p. Dissertação Mestrado.
- Ferreira, D. M.; Navoni, J. A.; Araújo, A. L. C.; Tinoco, J. D.; Amaral, V. S. Wastewater use in agriculture: analytical limits of sewage for impact control in Brazil. *Revista Caatinga*, Mossoró, v. 32, n. 4, p. 1048 – 1059, 2019.
- FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. Software QualiGraf. 2014. <<http://www5.funceme.br/qualigraf/>> 6 Abr 2020.
- França, F. M. C.; Pinheiro, J. C. V.; Carvalho, R. M. Barragem subterrânea no Semiárido do Ceará: caracterização e análise da viabilidade econômica. *Parcerias Estratégicas / Centro de Gestão e Estudos Estratégicos*, v. 21, n. 42, p. 17-44, 2016.
- França, F. M. C. Indicadores integrados de sustentabilidade e análise de decisão multicritério de barragens subterrâneas no estado do Ceará. Fortaleza: UFC, 2016. 167p. Tese Doutorado.
- Gama, D. C. e Jesus, J. B. Principais solos da região Semiárida do Brasil favoráveis ao cultivo do *Eucalyptus L'* Heritier. *BIOFIX Scientific Journal*, v. 5, n. 2, p. 214-221, 2020.
- Gomes, M. C. R.; Franca, R. M. Uso de análise multivariada para subsidiar o monitoramento da qualidade da água subterrânea na bacia sedimentar do Araripe, sul do estado do Ceará. *Geociências*, v. 38, n. 1, p.195 -205, 2019.
- Gomes, M. C. R. e Cavalcante, I. N. Aplicação da análise estatística multivariada no estudo da qualidade da água subterrânea. *Revista Águas Subterrâneas* v. 31, n. 1, p. 134-149, 2017.
- Hallak, R. & Pereira Filho, A. J. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.26, n.4, 591 - 608, 2011.
- Helena, B. A.; Pardo R.; Vega, M.; Barrado, E.; Fernandez, J. M.; Fernandez, L. Temporal evolution of groundwater composition in an alluvial aquifer (Pisuerga river, Spain) by principal component analysis. *Water Research*, v. 34, p.807-816, 2000.
- Helena, B. A.; Vega, M.; Barrado, E.; Pardo R.; Fernandez, L. A case of hydrochemical characterization of an alluvial aquifer influenced by human activities. *Water, Air, and Soil Pollution* v.112 p.365–387, 1999.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística & EMBRAPA Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Mapa de Solos do Rio Grande do Norte. escala 1:5.000.000,

- adaptada para 1:2.000.000 e atualizado pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos de 2018, 5ª edição. 2001.
- Jakob, A. A. E. e Youg, A. F. O uso de métodos de interpolação espacial de dados nas análises sociodemográficas. In: XV Encontro Nacional de Estudos Populacionais, 2006. Anais eletrônico, Caxambu: ABEP, 2006. <<http://www.abep.org.br/publicacoes/index.php/anais/article/view/1530>> 6 Abr 2020.
- Krejcie, R. V. e Morgan, D. W. Determining sample size for research activities. *Educational and Psychological Measurement*, v. 30, p. 607-6010, 1970.
- Lima, A. O.; Dias, N. S.; Fernandes, C. S.; Lima Filho, F. P.; Rivera, R. C.; Sousa, Y. L. E. G.; Oliveira, L. L. P.; Sarmiento, J. D. A.; Lemos Neto, H. S. Concentration of Traces Metals in Underground Dams in the Semi-Arid of the Rio Grande do Norte State, Brazil: Case Study of the Sub-Basin of the Cobras River. *Water, Air, Soil, Pollut.* v. 231, n. 178, 9 p., 2020.
- Lima, S. L., Silva, M. T., Souza, W. G., Siqueira, M. S., Andrade, A. S., Melo, M. M. M. S. Space and temporal episode standards dry in the State of Rio Grande do Norte. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*. v. 9, n. 6, p. 330-342, 2019a.
- Lima, A. O.; Lima Filho, F. P.; Dias, N. S.; Rivera, R. C.; Ferreira Neto, M.; Souza, A. M.; Rego, P. R. A.; Fernandes, C. S. Variation of the water table and salinity in alluvial aquifers of underground dams in the semi-arid region of Rio Grande do Norte, Brazil. *Bioscience Journal*, v. 35, n. 2, p. 477-484, 2019b.
- Lima, A. O.; Lima Filho, F. P.; Dias, N. S.; Reis Júnior, J. A.; Souza, A. M. Gpr 3d profile of the adequateness of underground dams in a sub-watershed of the brazilian semiarid. *Revista Caatinga*, v. 31, n. 2, p. 523 – 531, 2018.
- Lima, A. O.; Dias, N. S.; Lima Filho, F. P.; Ferreira Neto, M.; Rego, P. R. A.; Souza, A. M. Hydrochemistry of alluvial aquifer in the Cobra River sub-basin. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.21, n.11, p.785-790, 2017a.
- Lima, A. O.; Lima Filho, F. P.; Dias, N. S.; Rego, P. R. A.; Blaco, F.F.; Ferreira Neto, M. Mechanisms controlling surface water quality in the Cobras River sub-basin, northeastern Brazil. *Revista Caatinga*, v. 30, n. 1, p. 181 – 189, 2017b.
- Lima, A. O.; Dias, N. S.; Ferreira Neto, M.; Santos, J. E. J.; Rego, P. R. A.; Lima Filho, F. P. Barragens subterrâneas no semiárido brasileiro: análise histórica e metodologias de construção. *Irriga*, v. 18, n. 2, p. 200-211, 2013.
- Lima, A. O. Nova abordagem metodológica para locação, modelagem 3D e monitoramento de barragens subterrâneas no semiárido brasileiro. Natal: UFRN, 2013. 243p. Tese Doutorado.
- Maia, C. E.; Rodrigues, K. K. R. P.; Lacerda, V. S. Relação entre bicarbonato e cloreto em águas para fins de irrigação. *Irriga*, edição especial, p.206-219, 2012.

- Montenegro, A. A. A.; Montenegro, S. M.G. L. Olhares sobre as políticas públicas de recursos hídricos para o semiárido. In: Gheyi, H. R.; Paz, V. P. S.; Medeiros, S. S.; Galvão, C. O. Recursos hídricos em regiões semiáridas. Campina Grande, PB: Instituto Nacional do Semiárido; Cruz das Almas, BA: Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2012. Cap. 1, p. 1-27.
- Moreschi, I. C.; Paes R. P.; Calheiros, D. F. Poluição Difusa na Bacia Hidrográfica do Rio Miranda, Mato Grosso do Sul. E&S - Engineering and Science, v. 2, ed. 4, p.72-86, 2015.
- Mota, S. Controle do desperdício e reuso. In: Hofmeister, W. Água e desenvolvimento sustentável no Semi-árido. Fortaleza: Fundação Konrad Adenauer, 2002. Série debates n°24, p. 53-68.
- Oliveira, J. N. P. A influência da poluição difusa e do regime hidrológico peculiar do semiárido na qualidade da água de um reservatório tropical. Natal: UFRN, 2012. 115 p. Dissertação Mestrado.
- Oliveira, J. B.; Alves, J. J.; França, F. M. C. Barragem subterrânea. In: Favela Neto, J. Cartilhas Temáticas: Tecnologias e práticas hidroambientais para convivência com o semiárido. Fortaleza, CE: Secretaria de Recursos Hídricos, 2010. v. 3, 31 p.
- Rabemananaa, V.; Violette S.; Marsily, G.; Robain, H.; Deffontaines, B.; Andrieux, P.; Bensimon, M.; Parriaux, A. Origin of the high variability of water mineral content in the bedrock aquifers of Southern Madagascar. Journal of Hydrology, n. 310, p. 143-156, 2005.
- Ramalho, M. F. J. L. A fragilidade ambiental do Nordeste brasileiro: o clima semiárido e as imprevisões das grandes estiagens. Sociedade e Território, Natal, v. 25, n° 2, Edição Especial, p. 104-115, jul./dez., 2013.
- Richards, L. A. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Washington, DC: USDA, Agricultural Handbook, n. 60, 1954. 166 p.
- Rodrigues, G. S. e Irias, L. J. M. Considerações sobre os Impactos Ambientais da Agricultura Irrigada. Embrapa Meio Ambiente, Circular Técnica 7, 2004.
- Santos, H. G.; Jacomine, P. K. T.; Anjos, L. H. C.; Oliveira, V. A.; Lumbrreras, J. F.; Coelho, M. R.; Almeida, J. A.; Araújo Filho, J. C.; Oliveira, J. B.; Cunha, J. F. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed., rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.
- Santos, A. C. Noções de Hidroquímica. In: Feitosa, F. A. C.; Manoel Filho, J.; Feitosa, E.C.; Demetrio, J. G. A. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 3ed. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008. Cap. 5.1, p. 325-357.
- Santos, M. O.; Freitas, I. M.; Britto, L. T. L.; Anjos, J. B. Barragem subterrânea: água para uso na agropecuária. Manual Técnico, n.17. Niterói: Programa Rio Rural, 13f, 2008.

- Silva, M. S. L.; Lima, A. O.; Moreira, M. M.; Ferreira, G. B.; Barbosa, A. G.; Melo, R. F.; Oliveira Neto, M. B. Barragem subterrânea. In: Ximenes, L. F.; Silva, M. S. L.; Brito, L. T. L. Tecnologias de convivência com o semiárido brasileiro. Fortaleza, CE: Banco do Nordeste do Brasil, 2019. Cap. 2, p.223-281.
- Silva, M. S. L.; Paraíba, R. B. V.; Oliveira Neto M. B.; Anjos, J. B.; Cunha, T. J. F.; Cardoso, L. B.; Mota, C. L. Comunicado Técnico 64: Avaliação da Qualidade da Água para fins de Irrigação em Áreas de Barragens Subterrâneas no Semiárido do Nordeste Brasileiro. Embrapa Solos UEP Nordeste. 6p. 2011
- Silva, M. S. L.; Parahyba, R. B. V.; Oliveira Neto, M. B.; Leite, A. P.; Santos, J. C. P.; Cunha, T. J. F.; Moreira, M. M.; Ferreira, G. B.; Anjos, J. B.; Melo, R. F. Circular Técnica 45: Potencialidades de classes de solos e critérios para locação de barragens subterrâneas no Semiárido do Nordeste brasileiro. Embrapa Solos UEP Nordeste. 7p. 2010.
- Souza, N. G. M.; Silva, J. A.; Maia, J. M.; Silva, J. B.; Nunes Júnior, E. S.; Meneses, C. H. S. G. Tecnologias sociais voltadas para o desenvolvimento do semiárido brasileiro. Journal of Biology & Pharmacy and Agricultural Management, v. 12, n. 03, 12p., 2016.
- Souza, G. S.; Lima, J. S. S.; Xavier, A. C.; Rocha, W. S. D. Krigagem ordinária e inverso do quadrado da distância aplicados na espacialização de atributos químicos de um argissolo. Scientia Agraria, v. 11, p. 073-081, 2010.
- SUDENE - Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. Resolução n° 107/2017 de 27 de julho de 2017a. Estabelece critérios técnicos e científicos para delimitação do Semiárido Brasileiro e procedimentos para revisão de sua abrangência. <<http://sudene.gov.br/images/2017/arquivos/Resolucao-107-2017.pdf>> 6 Abr 2020.
- SUDENE - Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. Resolução n° 115/2017 de 23 de novembro de 2017b. Aprova a Proposição n° 113/2017, que acrescenta municípios a relação aprovada pela Resolução CONDEL n° 107, e 27 de julho de 2017. <<http://sudene.gov.br/images/arquivos/conselhodeliberativo/resolucoes/resolucao115-23112017-delimitacaodosemiarido.pdf>> 6 Abr 2020.
- StatSoft. Statistica: data analysis software system: versão demonstrativa, 2004 <<http://www.statsoft.com/Portals/0/support/Download/TRIAL12.exe>> 16 Set 2019.
- Von Sperlin, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 4 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. 472 p.
- Zanella, M. E. Considerações sobre o clima e os recursos hídricos do semiárido nordestino. Caderno Prudentino de Geografia, n.36, volume especial, p. 126-142, 2014.
- WARRICK, A.W. & NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. Applications of soil physics. New York: Academic Press, 1980. 350p.