



INSTITUTO SUPERIOR POLITÉCNICO DE GAZA

DIVISÃO DE AGRICULTURA

CURSO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA AGRÍCOLA E ÁGUA RURAL

**ANÁLISE DA VARIABILIDADE TEMPORAL DA HIDROQUÍMICA DA
ÁGUA SUBTERRÂNEA NO LEITO SECO DO RIO LIMPOPO E SUA
INFLUÊNCIA NA QUALIDADE DE ÁGUA PARA O CONSUMO E
AGRICULTURA EM GUIJÁ E MACARRETANE**

Monografia Científica submetida a Divisão de Agricultura como requisito para a
obtenção do grau de Licenciatura em Engenharia hidráulica agrícola e água rural

Autora: Mirza Taela Rabeca Xavier Dos Santos

Tutor: Engº Paulo Sérgio Lourenço Saveca (MSc)

Lionde, Novembro de 2022



INSTITUTO SUPERIOR POLITÉCNICO DE GAZA

Monografia científica sobre “análise da variabilidade temporal da hidroquímica da água subterrânea no leito seco do Rio Limpopo e sua influência na qualidade de água para o consumo e agricultura em Guijá e Macarretane”, apresentado ao Curso de Engenharia Hidráulica Agrícola e Água Rural na Divisão de Agricultura do Instituto Superior Politécnico de Gaza, como requisito para a obtenção do grau de Licenciatura em Engenharia Hidráulica Agrícola e Água Rural.

Júri

Supervisor Paulo Sérgio Lourenço Saveca
(Eng.º Paulo Sérgio Lourenço Saveca, MSc)

Avaliador (1) Raul Chambal
(Eng.º Raul Chambal, MSc)

Avaliador(2) Algardas Mabunda
(Eng.º Algardas Mabunda)

Lionde, Novembro de 2022

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABELAS	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
RESUMO	XIII
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objectivos	1
1.1.1. Geral:	1
1.1.2. Especificos:.....	1
1.2. Problema e justificação	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Ciclo hidrológico	3
2.2. Água subterrânea	4
2.3. Aquíferos	5
2.3.1. Aquífero freático.....	5
2.3.2. Aquífero confinado.....	5
2.3.3. Aquífero semi-confinado	5
2.3.4. Aquífero poroso.....	6
2.3.5. Aquíferos aluvionais.....	6
2.4. Qualidade de água.....	6
2.5. Variabilidade da qualidade de água	7
2.5.1. Factores que influenciam a variabilidade temporal da hidroquímica da água subterrânea	7
2.6. Qualidade da água para o consumo humano.....	8
2.6.1. Parâmetros de qualidade da água destinada ao consumo humano e seus riscos para a saúde pública	8
2.6.2. Parâmetros físicos e organolépticos	9
2.6.3. Parâmetros químicos	9
2.7. Classificação da qualidade da água de irrigação.....	9
2.7.1. Parâmetros de qualidade de água para irrigação	11
2.7.3. Parâmetros químicos	12
2.8. Processos hidroquímicos.....	16
2.8.1. Faces hidroquímicas	16
2.8.2. Reação hidroquímica em águas subterrâneas	16

2.8.3.	Diagrama de Piper	17
2.8.4.	Diagrama de Stiff.....	17
2.9.	Balanço iónico	18
3.	MATERIAL E MÉTODOS.....	19
3.1.	Descrição da área de estudo	19
3.1.1.	Clima	20
3.1.2.	Relevo e Solos	20
3.1.3.	Hidrografia.....	20
3.1.4.	Água Subterrânea	21
3.1.5.	Geologia	21
3.2.	Metodologia e procedimentos de campo	22
3.2.1.	Colecta de amostras	22
3.2.2.	Medição de parâmetros físico-químicos da água subterrânea e superficial 24	
3.2.3.	Determinação e comparação da qualidade de água subterrânea.....	25
3.2.4.	Mapeamento da qualidade de água subterrânea e o grau de variação hidroquímica.....	25
3.2.5.	Análise e interpretação de dados	26
4.	RESULTADOS	27
4.1.	Medição dos parâmetros físico-químicos da água superficial e subterrânea... 27	
4.1.1.	Determinação e comparação da qualidade de água subterrânea por época hidrológica	31
4.1.2.	Classificação da qualidade de água para consumo humano nos períodos chuvoso e seco	31
4.1.3.	Fases hidroquímicas na água	33
4.1.4.	Configuração geométrica da relação iónica na água	34
4.1.5.	Classe de qualidade da água subterrânea para irrigação agrícola nos períodos seco e chuvoso	36
4.2.	Mapas de qualidade de água subterrânea e o grau de variação hidroquímica .	37
5.	DISCUSSÃO	46
5.1.	Parâmetros físico-químicos da água superficial e subterrânea	46
5.2.1.	Classificação da qualidade de água para consumo humano nos períodos chuvoso e seco	49
5.2.2.	Fases hidroquímicas na água	50
5.2.3.	Configuração geométrica da relação iónica na água	50

5.2.4. Classe de qualidade da água subterrânea para irrigação agrícola nos períodos seco e chuvoso	51
5.3. Mapas de qualidade de água subterrânea e o grau de variação hidroquímica .	51
6. CONCLUSÃO.....	52
7. RECOMENDAÇÃO	53
8. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	54

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros físicos e organolépticos	9
Tabela 2 - Parametros quimicos	9
Tabela 4 - Limites da relação de absorção do sódio.....	13
Tabela 5 - Balanço Iônico de Macarretane	27
Tabela 6 - Balanço Iônico de Guijá	27
Tabela 7 - Resultados da análise estatística descritiva na água superficial e subterrânea em Macarretane para Época chuvosa	28
Tabela 8 - Resultados da análise estatística descritiva na água superficial e subterrânea em Guijá	29
Tabela 9 - Resultados da análise estatística descritiva na água superficial e subterrânea em Macarretane para época seca	30
Tabela 10 - Resultados da análise estatística descritiva na água superficial em Guijá	30
Tabela 11 - Comparação dos resultados das análises com o diploma ministerial nº 180/2004 e Organização Mundial da Saúde em Macarretane para época chuvosa.....	31
Tabela 12 - Comparação dos resultados das análises com o diploma ministerial nº 180/2004 e Organização Mundial da Saúde em Guijá para época chuvosa.....	32
Tabela 13 - Comparação dos resultados das análises com o diploma ministerial nº 180/2004 e Organização Mundial da Saúde em Macarretane para época seca.....	32
Tabela 14 - Comparação dos resultados das análises com o diploma ministerial nº 180/2004 e Organização Mundial da Saúde em Guijá para época seca	32
Tabela 15 - Classe de qualidade de água para irrigação usando RAS para Guijá.....	36
Tabela 16 - Classificação usada na derminação dos parâmeros físico-químicos da fonte de água superficial em Macarretane	46
Tabela 17 - Classificação usada na derminação dos parâmeros físico-químicos da fonte de água subterrânea em Macarretane.....	47
Tabela 18 - Classificação usada na derminação dos parâmeros físico-químicos da fonte de água superficial em Guijá	47
Tabela 19 - Classificação usada na derminação dos parâmeros físico-químicos da fonte de água subterrânea em Gujá.....	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo hidrológico	4
Figura 2 - Diagrama de classificação de água para irrigação	11
Figura 3 - Diagrama de Piper	17
Figura 4 - Diagrama de Stiff.....	18
Figura 5 - Mapa dos distritos de Chókwè (Posto Administrativo de Macarretane) e Guijá (Vila sede de caniçado) e a respectiva área de estudo.....	19
Figura 6 - Mapa de geologia de Chókwè e Guijá.....	22
Figura 7 - Localização dos pontos de monitoria da qualidade de água subterrânea e superficial no leito seco do rio Limpopo	23
Figura 8 - Representação dos instrumentos de campo usados para a medição dos parâmetros físico-químicos da água	24
Figura 9 - Faces hidroquímicas da água subterrânea e superficial no diagrama de Piper em Macarretane	33
Figura 10 - Faces hidroquímicas da água subterrânea e superficial no diagrama de Piper em Guijá	34
Figura 11 - Configuração geométrica dos iões no diagrama de Stiff em Macarretane	35
Figura 12 - Configuração geométrica dos iões no diagrama de Stiff em Guijá	35
Figura 13 - Classes de qualidade de água para irrigação usando RAS e CE para Macarretane	37
Figura 14 - Classes de qualidade de água para irrigação usando RAS e CE para Guijá	37
Figura 15 - Distribuição espacial do pH na água superficial em Macarretane durante a época seca e chuvosa	38
Figura 16 - Distribuição espacial da CE na água superficial em Macarretane durante a época seca e chuvosa	38
Figura 17 - Distribuição espacial do cálcio na água superficial em Macarretane durante a época seca e chuvosa	39
Figura 18 - Distribuição espacial do magnésio na água superficial em Macarretane durante a época seca e chuvosa	39
Figura 19 - Distribuição espacial do bicarbonato na água superficial em Macarretane durante a época seca e chuvosa	40
Figura 20 - Distribuição espacial do cloro na água superficial em Macarretane durante a época seca e chuvosa	40

Figura 21 - Distribuição espacial do STD na água superficial em Macarretane durante a época seca e chuvosa	40
Figura 22 - Distribuição espacial dos STD na água subterrânea em Macarretane durante a época seca e chuvosa	41
Figura 23 - Distribuição espacial do pH na água subterrânea em Macarretane durante a época seca e chuvosa	41
Figura 24 - Distribuição espacial do magnésio na água subterrânea em Macarretane durante a época seca e chuvosa	41
Figura 25 - Distribuição espacial do bicarbonato na água subterrânea em Macarretane durante a época seca e chuvosa	42
Figura 26 - Distribuição espacial da CE na água subterrânea em Macarretane durante a época seca e chuvosa	42
Figura 27 - Distribuição espacial do cloro na água subterrânea em Macarretane durante a época seca e chuvosa	42
Figura 28 - Distribuição espacial do cálcio na água subterrânea em Macarretane durante a época seca e chuvosa	43
Figura 29 - Distribuição espacial do pH na água superficial em Guijá durante a época seca e chuvosa	43
Figura 30 - Distribuição espacial do magnésio na água superficial em Guijá durante a época seca e chuvosa	44
Figura 31 - Distribuição espacial do bicarbonato na água superficial em Guijá durante a época seca e chuvosa	44
Figura 32 - Distribuição espacial da CE na água superficial em Guijá durante a época seca e chuvosa	44
Figura 33 - Distribuição espacial do cloro na água superficial em Guijá durante a época seca e chuvosa	44
Figura 34 - Distribuição espacial da cálcio na água superficial em Guijá durante a época seca e chuvosa	45
Figura 35 - Distribuição espacial dos STD na água superficial em Guijá durante a época seca e chuvosa	45

LISTA DE ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS

%	Percentagem
A4Labs	Arid african Alluvial Aquifers
BI	Balanço iónico
Ca ²⁺	Ião Cálcio
CE	Condutividade eléctrica
Cl ⁻	Ião Cloro
HCO ₃ ⁻	Ião Bicarbonato
IC	Ion Chromatography
ICP	Indutively Coupled Plasm
K ⁺	Ião Potássio
Km ²	Quilómetro quadrado
meq/l	Meliquivalente por litro
mg/l	Miligramas por litro
Mg ²⁺	Ião Magnésio
MISAU	Ministério da Saúde
Mn ²⁺	Ião Manganésio
Na ⁺	Ião Sódio
NO ₃ ⁻	Ião Nitrato
OMS	Organização Mundial da Saúde
pH	Potencial hidrogenóico
QGIS	Geographic Information System
RAS	Razão de Adsorção de Sódio
SO ₄ ²⁻	Ião Sulfato
STD	Sólidos Totais Dissolvidos
USSL	Laboratório de Salinidade dos Estados Unidos
WISH	Windows Interpretation System for Hydrogeologists



INSTITUTO SUPERIOR POLITÉCNICO DE GAZA

DECLARAÇÃO

Declaro por minha honra que este Trabalho de Culminação do Curso (TCC) é resultado da minha investigação pessoal e das orientações do meu tutor, o seu conteúdo é original e todas as fontes consultadas estão devidamente mencionadas no texto, nas notas e na bibliografia final.

Declaro ainda que este trabalho não foi apresentado em nenhuma outra instituição para propósito semelhante ou obtenção de qualquer grau académico.

Lionde, 01 de Dezembro de 2022

(Mirza Taela Rabeca Xavier Dos Santos)

Mirza Taela Rabeca Xavier Dos Santos

DEDICATÓRIA

Dedico esta monografia aos meus pais Manuel António Xavier Dos Santos e Felizarda Adelina Jochua, pilares da minha formação como ser humano, que têm trabalhado arduamente para garantir as melhores condições possíveis para que eu possa avançar e alcançar graus maiores que este. Foi por vocês que cheguei até aqui e é por vocês que se Deus quiser irei continuar..

Às minhas irmãs Ana Priscila Xavier Dos Santos e Ezequiela Kaylane Xavier Dos Santos, que este trabalho lhes sirva de inspiração para que possam atingir e ultrapassar as conquistas por mim alcançadas durante essa jornada tão desafiadora.

Ao meu melhor amigo e namorado Sultan Hussene, dedico este trabalho por ser meu maior incentivador. Agradeço por compreender as minhas ausências, por não medir esforços em me ajudar e pelo companheirismo ao longo desse ciclo de aprendizagem.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar quero agradecer ao meu bom Deus, estou mais que convicta que sem ele nada disso seria real, que me tem permitido superar obstáculos e realizar feitos além de minha capacidade. Foram anos sofridos, angustiantes, ansiosos mas, sobretudo valiosos. Hoje percebo que as noites, algumas mal dormidas e outras em claro, a privação do lazer, a ausência entre os familiares e amigos e as horas despendidas em estudos, trabalhos e tarefas valeram a pena. E muito! Valeu pela experiência de vida, pelas pessoas as quais tive a honra e a sorte de conhecer, por tudo que conheci e aprendi.

À minha família, em especial aos meus tios Celestina Jochua e Soares Xerinda que me apoiou de todas as formas possíveis para conseguir realizar este trabalho, sendo base fundamental, com apoio sentimental, moral e financeiro. Essa que me amparou, apostando e crendo que tudo isso é o começo de muitas das minhas futuras realizações.

A minha amiga, Cathya Albertina Nhamucho por ser minha incentivadora. Agradeço por não medir esforços em me ajudar, que sempre em momentos de incertezas, clareou minha mente e a inspiraram, tanto em pequenos debates e simples conversas, por aguentar tantas crises de estresse e ansiedade, e pelo companheirismo ao longo desse ciclo de aprendizagem, pois a felicidade só é verdadeira se for compartilhada.

Aos meus amigos da “Team Diamond” Ailton, Onésia, Dimilton, Elton e Rostina pelo apoio e incentivo durante a caminhada, sem esquecer das sessões de estudos carregadas de diversões em jogos de UNO, 30Segundos, Monopoly e pães com badjias. Ao meu companheiro de batalha Ailton Ófelia que incansavelmente se dedicou a garantir que minha paixão pela ciência não tenha fim, com quem partilhei muitas e longas noites de peregrinação em estudos à distância.

Ao meu tutor, Eng. Paulo Sérgio Lourenço Saveca, que conseguiu me guiar ao decorrer desse percurso com grande maestria, por sua dedicação, paciência e disponibilidade para auxiliar de modo indescritível na realização deste trabalho. Obrigado pelos ensinamentos, atenção, amizade e dedicação ao longo da realização desse trabalho.

Em suma, agradeço a todos que, directa ou indirectamente, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

A variabilidade espacial e temporal dos recursos hídricos nas zonas semi-áridas e áridas representa um desafio para a produção agrícola e consumo humano. Devido às mudanças climáticas acompanhadas de eventos extremos (secas e cheias) o rio Limpopo deixou de ser perene, tornando a prática de agricultura mais difícil especialmente para os pequenos agricultores que são dependentes da disponibilidade da água superficial e da precipitação, que só ocorre em média quatro meses por ano, com cerca de 500 a 800 mm. O presente estudo visa analisar a variabilidade temporal dos processos hidroquímicos da água subterrânea para o consumo humano e irrigação agrícola. Esta pesquisa teve como base os dados das épocas seca e chuvosa de amostras de água colhidas em furos instalados ao longo do leito seco do rio Limpopo em Guijá e Macarretane. In-situ, os parâmetros físico-químicos da água foram medidos usando pHmetro, EC-meter e Alkalinity checker, onde fez-se a monitoria do grau de mineralização da água superficial e subterrânea, assim como a medição do nível de lençol freático com conductivímetro e sonda eléctrica, respectivamente. Um total de 13 amostras de água foram colectadas das quais 6 de água superficial e 7 de água subterrânea a uma profundidade que varia entre 3 a 13,6 metros. Para a análise e interpretação dos dados foram usados os seguintes softwares: Minitab® 19.1 para análise descritiva dos dados, e WISH para produção dos diagramas de Piper para classificação da água quanto ao tipo, tipo de interação água-rocha e sua evolução.

Todos os parâmetros físico-químicos estão dentro dos limites aceitáveis para irrigação e consumo humano e foram determinados no laboratório da IGS-África de Sul usando os métodos ICP e IC e de qualidade de água para o consumo humano segundo as normas do MISAU, com excepção do Na^+ , Mn e Cl^- que apresentaram valores fora dos limites admissíveis segundo a OMS, podendo assim constituir um risco para a saúde.

Para irrigação a água é classificada em duas classes (C2-S1 e C1-S1), sendo que a classe C2-S1 apresenta-se como a mais abundante com cerca de 90%.

Palavras-chave: Águas subterrâneas, variabilidade temporal, processos hidroquímicos, qualidade de água para irrigação e consumo humano.

ABSTRACT

The spatial and temporal variability of water resources in semi-arid and arid zones represents a challenge for agricultural production and human consumption. Due to climate change accompanied by extreme events (droughts and floods) the Limpopo River is no longer perennial, making the practice of agriculture more difficult especially for small farmers who are dependent on the availability of surface water and precipitation, which only occurs on average. four months a year, with about 500 to 800 mm. The present study aims to analyze the temporal variability of hydrochemical processes in groundwater for human consumption and agricultural irrigation. This research was based on data from the dry and rainy seasons of water samples collected from boreholes installed along the dry bed of the Limpopo River in Guijá and Macarretane. In-situ, the physical-chemical parameters of the water were measured using pHmeter, EC-meter and Alkalinity checker, where the degree of mineralization of surface and underground water was monitored, as well as the measurement of the water table level with a conductimeter. and electrical probe, respectively. A total of 13 water samples were collected, of which 6 were surface water and 7 were groundwater at a depth ranging from 3 to 13.6 meters. For the analysis and interpretation of the data, the following software were used: Minitab® 19.1 for descriptive analysis of the data, and WISH for the production of Piper diagrams to classify water according to the type, type of water-rock interaction and its evolution.

All physical-chemical parameters are within acceptable limits for irrigation and human consumption and were determined in the IGS-South Africa laboratory using the ICP and IC methods and water quality for human consumption according to MISAU standards, with the exception of Na^+ , Mn and Cl^- which presented values outside the admissible limits according to the WHO, thus being able to constitute a risk to health.

For irrigation, water is classified into two classes (C2-S1 and C1-S1), with the C2-S1 class being the most abundant with about 90%.

Keywords: Groundwater, temporal variability, hydrochemical processes, water quality for irrigation and human consumption.

1. INTRODUÇÃO

Dentre os recursos naturais fundamentais existentes no planeta terra, a água é o que possui maior destaque, pois a sua disponibilidade e acesso são necessários a todo tipo de vida no planeta, bem como para a maioria dos meios de produção (CHAVES, 2014).

Em decorrência da escassez das águas superficiais, o uso de fontes hídricas subterrâneas tem aumentado consideravelmente em todo mundo. Vários países de todo o mundo, tem utilizado as águas subterrâneas como meio de suprimento das necessidades (CHAVES, 2014).

Considera-se água subterrânea toda água que se encontra abaixo da superfície terrestre, estando intimamente ligada com as águas superficiais, que são resultante do processo lento de infiltração das águas das chuvas (ou de outras fontes) que preenchem os poros e interstícios do solo, formando os aquíferos (Libânio, 2010).

A variabilidade temporal dos recursos hídricos é um factor que limita o desenvolvimento socio-económico e influencia na qualidade e quantidade dos recursos hídricos subterrâneos nas regiões semiáridas. A análise de variáveis climatológicas, nas escalas temporal e espacial, contribui significativamente para a investigação da alta diversidade climática local, que impacta diretamente a disponibilidade hídrica e a maioria das atividades antrópicas, como a produtividade agrícola (Souza & Nascimento, 2020).

O presente trabalho pretende analisar a variabilidade temporal da hidroquímica das águas subterrâneas no leito seco do rio Limpopo e sua influência na qualidade para o consumo humano e irrigação agrícola, no distrito de Chókwè no Posto Administrativo de Macarretane e Guijá.

1.1. Objectivos

1.1.1. Geral:

- ❖ Analisar a variabilidade temporal da hidroquímica da água subterrânea no leito do rio Limpopo e sua influência na qualidade para o consumo e agricultura.

1.1.2. Específicos:

- ❖ Medir os parâmetros físico-químicos da água superficial e subterrânea;

- ❖ Determinar e comparar a qualidade de água subterrânea por época hidrológica;
- ❖ Mapear a qualidade de água subterrânea e o grau de variação hidroquímica.

1.2. Problema e justificação

Sabe-se de antemão que na bacia hidrográfica de Limpopo, o grau de mineralização da água associados com a variabilidade espacial e temporal das condições hidrológicas criam riscos e incertezas na produção e produtividade agrícola, fazendo com que a qualidade de água não seja adequada para a agricultura ou consumo humano. Diante disso a prática de agricultura irrigada tem sido difícil, especialmente para os pequenos agricultores dessa região que são dependentes do fluxo insignificante do rio Limpopo e da precipitação, que só ocorrem em apenas quatro (04) meses do ano hidrológico para dar continuidade com as suas actividades agrícolas.

Diante disso, a água subterrânea surge como fonte alternativa para satisfação das necessidades hídricas das plantas bem como para o consumo humano, principalmente nas épocas de estiagem. Estudos realizados por (ABI, 2018), (Chambal, 2020) e (Vilanculo, 2021) mostraram que a água subterrânea que ocorre em alguns pontos no leito seco do rio Limpopo é uma excelente fonte alternativa de água que possa garantir a prática da agricultura por todo o ano hidrológico. No entanto, poucos estudos existem sobre a variabilidade da qualidade de água subterrânea que ocorre no leito seco, o que torna desafiante e difícil a gestão da mesma devido a ausência de informação sobre os processos hidroquímicos e a respectiva quantidade em diferentes épocas hidrológicas ao longo da bacia hidrográfica de Limpopo. Do outro lado, a área de estudo faz parte do semi-árido de Limpopo com enormes problemas de elevado grau de mineralização da água subterrânea ($CE=12000$ uS/cm), o que torna a água não aproveitável para irrigação e consumo humano, conforme reportado por (Saveca et al., 2017). Assim sendo, o conhecimento sobre a variabilidade hidroquímica da qualidade da água subterrânea irá permitir saber o tipo de sistema de tratamento adequado em função da hidroquímica, o tipo de cultura a ser praticada e o tipo de sistema de rega a ser usado.

O presente estudo visa trazer informação sobre a variabilidade temporal da qualidade das águas subterrâneas dos aquíferos aluvionares (com enfoque nos depósitos de areia do leito do rio em Macarretane e Guijá), de modo que se compreenda a tipificação da variabilidade hidroquímica e a sua implicação nos padrões de qualidade de água para irrigação e abastecimento.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Ciclo hidrológico

O Ciclo hidrológico é o processo mais importante actuando na dinâmica externa da Terra, movimentando a água através da atmosfera, superfície (rios, lagos, mares, geleiras) e subsuperfície (água subterrânea), gerando condições para o aparecimento da vida, essencial para as actividades humanas, bem como para manter o equilíbrio do planeta (BASTOS, 2013)

O ciclo hidrológico pode ser definido como uma sequência fechada de fenómenos nos quais a água passa da superfície do globo terrestre para a atmosfera, na fase gasosa, e volta a atingir aquela superfície nas fases líquida ou sólida. Segundo o ciclo hidrológico as águas podem ser classificadas como:

- Meteoricas – chuvas, neves, granizo.
- Superficiais – rios, lagos, reservatórios.
- Subterrâneas – as águas subterrâneas podem estar em aquíferos.

Após a precipitação, parte da água escorre pela superfície e outra parcela infiltra e percola no interior do subsolo como mostra a Figura 01, em diferentes intervalos de tempo, pois a infiltração depende de factores como: porosidade do solo, presença ou não de cobertura vegetal, inclinação do terreno, regime de chuva, entre outros factores. Ao se infiltrar no solo, a água da chuva passa por uma porção de terreno chamada de zona não saturada, onde os poros são preenchidos parcialmente por água e ar. A outra parcela da água, devido à gravidade, continua em movimento atingindo zonas mais profundas. As zonas saturadas são as mais profundas, onde os poros são totalmente preenchidos (BASTOS, 2013)

Nem toda a água subterrânea está integrada no ciclo hidrológico recente. No interior da terra existe água que nunca fez parte da componente superficial ou atmosférica do ciclo hidrológico da água juvenil. Para além desta, podem ainda considerar-se outros tipos de águas subterrâneas, nomeadamente, a água magmática, água meteórica (Aboo, 2013).

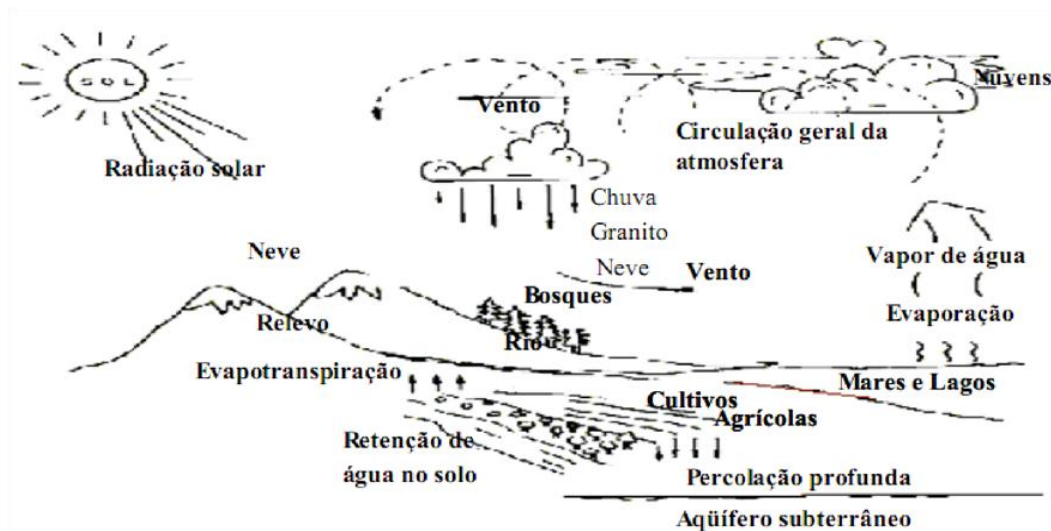


Figura 1 - Ciclo hidrológico

Fonte - Almeida, 2010 adaptado de Reichardt 1990

2.2. Água subterrânea

As águas subterrâneas constituem o segundo maior reservatório de água doce do planeta terra e o seu estudo reveste-se de grande interesse para as mais diversas actividades humanas. Em vastas áreas do globo, as águas utilizadas são exclusivamente subterrâneas, captadas através de nascentes naturais, poços, furos (Aboo, 2013).

Em sentido mais restrito, a água subterrânea é aquela que se encontra abaixo da superfície freática, ou seja, na zona de saturação. Na maioria das vezes, a água subterrânea não necessita de tratamento para o seu consumo, devido ao processo de filtragem natural do subsolo. Fazem parte deste manancial: poços e furos profundos (Aboo, 2013).

Atualmente, o rápido crescimento das populações humanas e do desenvolvimento económico provocou a grave deterioração da qualidade das águas subterrâneas, especialmente nos países em desenvolvimento (Fallatah, 2018).

A qualidade da águas subterrâneas muitas das vezes depende de vários factores tais como a condições do aquífero, litologia da região onde se encontra, a sua velocidade de circulação, qualidade da água de infiltração e o movimento de substâncias transportadas pela mesma (Aboo, 2013).

2.3. Aquíferos

Aquífero é um reservatório subterrâneo de água, caracterizado por camadas ou formações geológicas suficientemente permeáveis, constituído de rochas sedimentares ou rochas maciças compactas, capazes de armazenar e transmitir água (BASTOS, 2013).

A litologia do aquífero, ou seja, a sua constituição geológica (porosidade/permeabilidade intergranular ou de fissuras) é que irá determinar a velocidade da água em seu meio, a qualidade da água e a sua quantidade como reservatório.

2.3.1. Aquífero freático

Aquífero livre ou freático é aquele constituído por uma formação geológica permeável e superficial, totalmente aflorante em toda a sua extensão, e limitado na base por uma camada impermeável. A superfície superior da zona saturada está em equilíbrio com a pressão atmosférica, com a qual se comunica livremente (ABAS, 2008).

Os aquíferos livres têm a chamada recarga directa. Em aquíferos livres o nível da água varia segundo a quantidade de chuva. São os aquíferos mais comuns e mais explorados pela população. São também os que apresentam maiores problemas de contaminação.

2.3.2. Aquífero confinado

Este aquífero é limitado na parte superior e inferiormente por camadas impermeáveis. O nível de piezométrico em qualquer ponto do aquífero confinado excede o nível do limite superior do aquífero e por isso quando se abre um poço ou um furo, a água sobe acima desse limite superior. A água subterrânea está confinada sob uma pressão maior que a pressão atmosférica (Hipólito & Vaz, 2011).

2.3.3. Aquífero semi-confinado

Em comparação com o aquífero confinado, um aquífero semiconfinado é limitado por uma camada permeável e por uma semipermeável ou por duas camadas semipermeáveis. No entanto as camadas semipermeáveis são apenas no sentido vertical (perpendicular a sua espessura) (Hipólito & Vaz, 2011).

2.3.4. Aquífero poroso

Aquífero poroso ou sedimentar ocorre nas chamadas rochas sedimentares e constitui o mais importante aquífero pelo grande volume de água que armazena e por sua ocorrência em grandes áreas (ROSC, 2013).

Uma particularidade desse tipo de aquífero é a sua porosidade quase sempre homogeneamente distribuída, permitindo que a água flua para qualquer direcção, em função tão-somente dos diferenciais de pressão hidrostática ali existente. Essa propriedade é conhecida como isotropia.

2.3.5. Aquíferos aluvionais

Os aquíferos aluviais em rios sazonais são um recurso ainda subutilizado em muitas regiões (semi) áridas da África. Esses chamados aquíferos de rios de areia fornecem armazenamento de água natural de fácil acesso porque são rasos e que ocasionalmente são inundados com o escoamento da água da chuva durante a estação chuvosa (Duker et al., 2020; Mpala et al., 2016). Eles constituem uma fonte renovável potencial significativa de água para o desenvolvimento da irrigação. Embora o leito do rio pareça seco na maior parte do ano, há um fluxo perene de água subterrânea na areia. Essa água fluindo abaixo da superfície é um recurso valioso para as comunidades locais (Mpala et al., 2016).

2.4. Qualidade de água

A qualidade das águas subterrâneas é dada, a princípio, pela dissolução dos minerais presentes nas rochas que constituem os aquíferos. Mas, ela pode sofrer a influência de outros factores como composição da água de recarga, tempo de contacto água ou meio físico, clima e até mesmo a poluição causada pelas actividades humanas (Capucci et al., 2001).

Os parâmetros químicos são os mais importantes para se caracterizar a qualidade da água, pois permitem classificar seu conteúdo mineral, determinar o grau de contaminação, caracterizar picos de concentração de poluentes tóxicos e avaliar o equilíbrio bioquímico que é necessário para a manutenção da vida aquática (Filho et al., 2020).

Vários estudos mostram que a qualidade da água dos depósitos fluviais de areia é boa em geral e mesmo excelente em comparação com a qualidade da água de superfície (Hussey, 2003, 2007; Oniward et al., 2011). De fato, um processo de filtração ocorre em depósitos de sedimentos e remove o principais contaminantes. De facto, como os rios de areia são sistemas rasos, a população local pode facilmente poluir as águas subterrâneas. Por isso, (Herbert et al., 1997) afirmou em um estudo conduzido em Botswana que um determinado cuidados devem ser tomados para salvaguardar a qualidade da água nesses sistemas vulneráveis.

De acordo com a (FAO, 2004), a qualidade da água do rio Limpopo torna-se gradualmente mais pobres a jusante de Chókwè e apenas os sistemas fluviais de areia têm uma água. Como ilustração, um monitoramento da qualidade da água realizado por (Chilundo et al., 2008) mostrou que a água do rio Limpopo estava poluída com metais pesados (Zn, Cu, Cd e Fe) de tal forma que não respeita as diretrizes nacionais de potabilidade de Moçambique.

2.5. Variabilidade da qualidade de água

A análise temporal permite aos gestores a tomada de medidas mais rápidas e eficientes sobre o bom uso da água e tal ação implica no levantamento sistemático de dados em pontos de amostragem selecionados, tendo por finalidade acompanhar a evolução das condições da qualidade da água ao longo do tempo, garantindo sua manutenção futura. A análise espacial visa avaliar o comportamento de um determinado parâmetro de qualidade para pontos situados ao longo de um mesmo corpo hídrico (Formiga, 2015). Por meio da avaliação espacial é possível identificar trechos críticos, em que a qualidade da água esteja comprometida e ainda contribuir no gerenciamento dos recursos hídricos, não se restringindo apenas aos gestores envolvidos com a bacia, mas também a qualquer pessoa interessada em desenvolver acções que visem à preservação e à gestão das águas (Santos et al., 2010).

2.5.1. Factores que influenciam a variabilidade temporal da hidroquímica da água subterrânea

Os componentes químicos presentes na água são variáveis e apresentam correlações com as características específicas de cada ambiente, sujeitas a constantes mudanças que ocorrem nos diversos sistemas ambientais pela ação antrópica (Gastaldini et al., 2001; Kazi et al., 2009).

O cenário dos impactos das mudanças climáticas em regiões semiáridas aponta para uma alteração das precipitações com uma tendência de redução, afetando a disponibilidade dos recursos hídricos e seus efeitos diretos no balanço hídrico, escoamento e fluxo dos rios (Krol & Bronstert, 2007). Estas dinâmicas do clima por sua vez alteram os processos hidrológicos, dificultando a avaliação dos impactos na química da água tornando-os impossibilitados de serem estudados isoladamente (McNeil et al., 2005). Entre estes, destacam-se como importante, os processos hidrológicos, onde a qualidade dos recursos hídricos se apresenta como uma variável vulnerável e sensível às constantes mudanças do ambiente (Hounslow, 1995)(Perreira et al., 2006; Santiago et al., 2002).

2.6. Qualidade da água para o consumo humano

A qualidade da água é um conjunto de características físicas, químicas e biológicas que ela apresenta, de acordo com a sua utilização. Os padrões de classificação mais usados pretendem classificar a água de acordo com a sua potabilidade e a segurança que apresenta para o ser humano e para o bem-estar dos ecossistemas (Mendes & Oliveira, 2004).

A avaliação da qualidade física consiste na identificação de parâmetros que representem, de forma indirecta, a concentração de sólidos em suspensão ou dissolvidos na água (Prescott et al., 2002; J. M. P. Silva et al., 2002). Quanto à qualidade química, esta é aferida pela própria identificação do componente na água, por meio de métodos laboratoriais específicos. Tais componentes químicos não devem estar presentes na água acima de certas concentrações determinadas com o auxílio de estudos epidemiológicos e toxicológicos (Prescott et al., 2002).

Os limites para parâmetros individuais foi fixado com base em seu efeito quando o valor excede ou menos na concentração, conforme sugerido pela Organização Mundial da Saúde (OMS, 2004) e pelo Ministério da Saúde (MISAU, 2004).

2.6.1. Parâmetros de qualidade da água destinada ao consumo humano e seus riscos para a saúde pública

A água contém diversos componentes, os quais provêm do próprio ambiente natural ou foram introduzidos a partir de atividades humanas. Para caracterizar uma água, são determinados diversos parâmetros, os quais representam as suas características físicas,

químicas e biológicas. Esses parâmetros são indicadores de qualidade das águas e constituem impurezas quando alcançam valores superiores ao estabelecido para determinado uso (Mota, 2003).

2.6.2. Parâmetros físicos e organolépticos

Tabela 1 - Parâmetros físicos e organolépticos

Parâmetro	Limite máximo admissível	Unidade	Riscos para a saúde pública
Ph	6,5 –8,5		Sabor, corrosão, irritação da pele
Condutividade eléctrica	50 –2000	µmhos/cm	
Sólidos totais dissolvidos	1000	Mg/l	Sabor, corrosão

Fonte - (MISAU, 2004)

O limite admissível pela OMS para CE é de 1400 µmhos/cm (OMS, 2004) e o nível permitido para TDS em águas subterrâneas é de 1000 mg/L.

2.6.3. Parâmetros químicos

Tabela 2 - Parametros quimicos

Parâmetro	Limite máximo admissível	Unidades	Riscos para a saúde pública
Cloro residual total	0,2 – 0,5	mg/l	Sabor e cheiro desagradável
Dureza total	500	mg/l	Depósitos, corrosão e espumas
Sólidos totais dissolvidos	100	mg/l	Sabor desagradável

Fonte - (MISAU, 2004)

2.7. Classificação da qualidade da água de irrigação

A classificação da qualidade de água para irrigação pode ser feita com base na proposta do USSL, publicada em 1954 a qual apresenta um diagrama de classificação com

principal enfoque na irrigação, basea-se na RAS como indicador de perigo de alcalinização ou sodificação no solo e a CE como indicador de perigo de salinização do solo, quanto maior for RAS menos apropriada é a água para fins de irrigação. (Cordeiro, 2001; FEITOSA et al., 2008).

a) Classes de água levando em consideração o risco de salinidade

As águas são divididas em quatro (04) classes segundo sua condutividade eléctrica (CE):

C1 - Água de baixa salinidade (CE de 0 à 0.25 dS/m a 25°C), pode ser usada para irrigação na maior parte dos cultivos em quase todos os tipos de solo, com pouca probabilidade de desenvolver problemas de salinidade;

C2 - Água de salinidade média (CE de 0.25 a 0.75 dS/m a 25°C), pode ser usada sempre que houver um grau moderado de lixiviação;

C3 - Água com alta salinidade (CE de 0.75 a 2.25 dS/m a 25°C), não pode ser usada em solos com drenagem deficiente e mesmo com drenagem adequada, podem ser necessárias práticas especiais para controle de salinidade e só deve ser aplicada para irrigação de plantas tolerantes aos sais;

C4 - Água com salinidade muito alta (CE de 2.25 a 5.00 dS/m a 25°C), não pode ser usada em condições normais, apenas ocasionalmente, em circunstâncias muito especiais, tais como em solos muito permeáveis e plantas altamente tolerantes aos sais.

b) Classes de água levando em consideração o risco de sodicidade

As águas são divididas em quatro classes tomando como base valores limites de RAS em função da CE com as seguintes interpretações:

Água com baixo teor de sódio ($S_1 \leq 10$): pode ser usada para irrigação em quase todos os solos, com pouco perigo de desenvolvimento de problemas de sodificação;

Água com teor médio de sódio ($10 < S_2 \leq 18$): estas águas só devem ser usadas em solos de textura arenosa ou em solos orgânicos de boa permeabilidade, uma vez que em solos de textura fina (argilosos) o sódio representa perigo;

Água com alto teor de sódio ($18 < S_3 = 27$): pode produzir níveis tóxicos de sódio trocável na maior parte dos solos, necessitando assim de práticas especiais de manejo tais como: drenagem, fácil lavagem, aplicação de matéria orgânica;

Água com teor muito alto de sódio ($S_4 > 27$): geralmente inadequada para irrigação exceto quando a salinidade for baixa ou média ou o uso de gesso ou outro corretivo torne possível o uso dessa água.

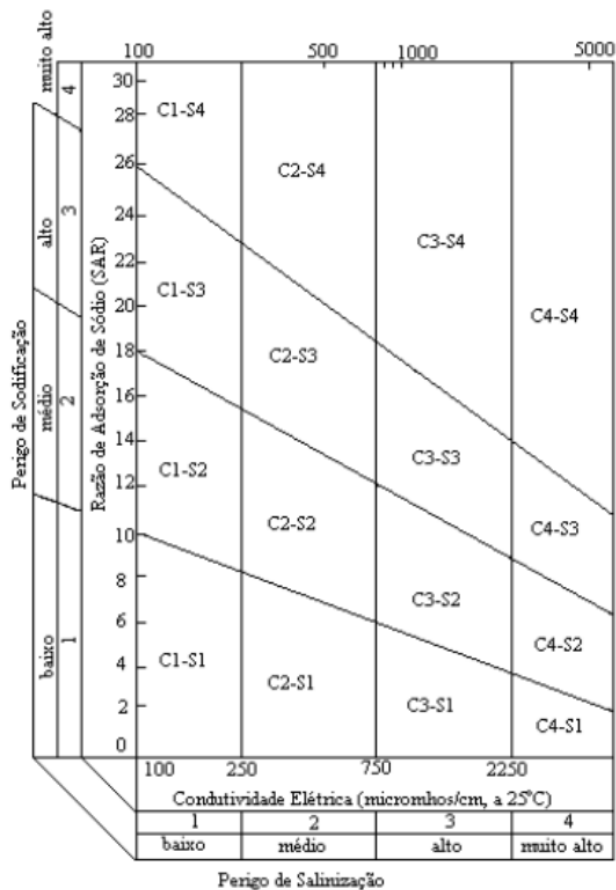


Figura 2 - Diagrama de classificação de água para irrigação

Fonte - (Cordeiro, 2001)

2.7.1. Parâmetros de qualidade de água para irrigação

Os parâmetros da amostra de água são analisados em laboratório. Alguns parâmetros como temperatura, condutividade, alcalinidade, oxigênio dissolvido, pH, são determinados no campo (ABREHA, 2014).

2.7.2. Parâmetros físicos

a) Temperatura

Em relação a temperatura da água, ela é importante por acelerar reações químicas e reduzir a solubilidade dos gases, bem como acentuar sabores e odor das águas naturais. No geral a água subterrânea apresenta pequena variação térmica, pois a sua temperatura não é influenciada pela mudança da temperatura atmosférica (CERQUEIRA, 2014).

b) Condutividade eléctrica

A condutividade eléctrica é a variável mais empregada para se avaliar o nível de salinidade, é dependente da temperatura, constituindo um os principais elementos de classificação da qualidade das águas para irrigação (Ribeiro et al., 2005). Este parâmetro está relacionado com a presença de iões dissolvidos na água, que são partículas carregadas eletricamente. Quanto maior for a quantidade de iões dissolvidos, maior será a condutividade eléctrica da água. Portanto, em água subterrânea os valores da condutividade eléctrica são normalmente usados como indicadores do grau de mineralização.

c) pH

O termo pH (potencial hidrogeniónico) é definido como uma expressão usada para identificar a intensidade da condição ácida ou básica de uma solução e é uma maneira de expressar a concentração do ião hidrogênio. As unidades de pH são o logaritmo negativo da concentração do ião hidrogênio (equação 1), expressa em moles por litro (Formiga, 2015).

$$\text{pH} = -\log(\text{H}^+)$$

Equação 1

Onde:

pH: Potencial hidrogeniônico;

H⁺: ião hidrogênio

2.7.3. Parâmetros químicos

a) Razão de adsorção de sódio

Este índice denota a proporção relativa em que se encontra o Na⁺ em relação com o Ca²⁺ e o Mg²⁺, catiões divalentes que competem com o sódio pelos lugares de intercâmbio do solo. Esta consideração é de grande importância quando há predominância do ião sódio, que induzirá trocas de iões cálcio e magnésio pelos de sódio nos solos, o que pode conduzir à degradação do mesmo, com a consequente perda de sua estrutura e permeabilidade. (ALMEIDA, 2010).

A razão de adsorção de sódio ou sodicidade é a medida de concentração relativa de sódio em relação ao cálcio e magnésio em águas subterrâneas (Haritash et al., 2014).

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}}} \text{ (meq/L)} = \frac{\text{Na}^+}{\frac{\sqrt{\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}}}{2}} \text{ (mmol/L)} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

Na - Concentração de sódio na água, em mmol/L;

Ca_o - Concentração de cálcio na água, corrigida pela relação HCO₃⁻/Ca (mmol/L) e CEa (dS/m);

Mg - Concentração de magnésio na água, em (mmol/L).

Tabela 3 - Limites da relação de absorção do sódio

Limites da relação de absorção do sódio

RAS (meq/L)	Observações
0- 10	Excelente
10 – 18	Boa
18 – 26	Regular
> 26	Má – perigo de alcalinidade

Fonte - (CELLIGOI, 2011)

b) Magnésio (Mg²⁺)

Os minerais mais comuns fornecedores de magnésio para as águas subterrâneas são: magnesite, biotita, granada, olivina, anfibólios e piroxénios (FEITOSA citado por FORMIGA, 2015). Estes minerais são mais estáveis diante do intemperismo químico do que os minerais fornecedores de cálcio, por isso, seu teor nas águas subterrâneas é significativamente menor.

Em região de rochas carbonáticas, o mineral dolomita é um importante fornecedor de magnésio. Nas águas subterrâneas ocorre com teores que variam entre 1 mg/L e 40 mg/L (Formiga, 2015).

c) Sulfato (SO₄²⁻)

O Sulfato é o anião dos mais abundantes iões na natureza. Surge nas águas subterrâneas através da dissolução de solos e rochas. Os íons sulfato SO₄²⁻ são encontrados na água devido à lixiviação das rochas sedimentares incluindo o xisto.

A maior contribuição são os depósitos de Sulfato como gipsite ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e anidrita (CaSO_4), e, além disso, a oxidação de matéria orgânica e os despejos industriais (Formiga, 2015).

d) Potássio (K^+)

O ião potássio (K^+) é um elemento abundante na crosta terrestre. Entretanto, é pouco observado nas águas subterrâneas devido a sua intensa actividade em processos de troca iônica, além de ser facilmente adsorvidos pelos minerais de argila, é bastante utilizado pelos vegetais. Esse ião corresponde a sais de solubilidade muito elevadas e difíceis de precipitar. Os teores de potássio nas águas subterrâneas são inferiores a 10 mg/L, sendo mais frequentes entre 1 e 5 mg/L (Formiga, 2015).

e) Sódio (Na^+)

O ião sódio (Na^+) é um dos metais alcalinos mais importantes e abundantes nas águas subterrâneas. Possui ampla distribuição nas fontes minerais, baixa estabilidade química dos minerais que o contêm, a solubilidade elevada é de difícil precipitação quando em solução, ocorre nas águas subterrâneas geralmente na forma de cloretos, tendo como minerais fontes os plagioclasicos, fedspastoides, amfibolios e piroxenios. A concentração de sódio nas águas subterrâneas pode variar com a profundidade do poço e alcançar maiores concentrações do que nas águas superficiais (FEITOSA et al., 2008; Formiga, 2015).

f) Cálcio (Ca^{2+})

Representa um dos principais elementos responsáveis pela dureza na água. É amplamente distribuído em rochas e solos. As fontes geológicas são muitas, tendo como exemplos anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) e calcita (CaCO_3), os iões de cálcio possuem de moderado a elevada solubilidade, normalmente se precipita como carbonatos de cálcio, responsável pela dureza da água que é uma das principais constituintes da mesma, pois lhes confere sabor salgado em concentrações acima de 70mg/L, e apresentam-se em geral sob a forma de bicarbonatos e raramente como carbonato, e como um dos elementos mais abundantes do planeta pois em minerais como calcita, aragonita, dolomita e nas rochas calcárias. Os teores de cálcio nas águas subterrâneas variam em geral de 10- 100 mg/ (FEITOSA et al., 2008).

g) Nitrato

Os nitratos (NO_3^-) são solúveis em água. Nos corpos de água está geralmente presente em concentrações moderadas, como agente natural do processo de nitrificação. As principais fontes de poluição por nitratos são os adubos incorporados ao solo para finalidades agrícolas e efluentes de estação de tratamento de esgoto (Formiga, 2015).

h) Sólidos totais dissolvidos

Sólidos totais dissolvidos nas águas é toda matéria que permanece como resíduo, após evaporação e secagem da amostra a uma temperatura entre 103° e 105°C , durante um tempo fixado (SILVA citado por FORMIGA, 2015). O parâmetro STD é um indicador de determinação da qualidade da água, pois avalia o peso total dos constituintes minerais presentes na água, por unidade de volume. O conteúdo de STD é calculado adicionando a massa de iões mais SiO_2 , como mostra a equação (Formiga, 2015).

i) Cloretos (Cl^-)

Os cloretos estão presentes em quase todas as águas e normalmente estão associado ao sódio, suas principais características são alta solubilidade, muito estável em solução e dificilmente se precipitam, a alta solubilidade é o lento movimento da água subterrânea que provocam um aumento gradativo de cloretos em de áreas de recarga, em direcção das áreas de descarga, as águas subterrâneas geralmente apresentam teores inferiores a 100mg/L (FEITOSA et al., 2008).

j) Bicarbonatos (HCO_3^-)

Os iões de bicarbonatos não se oxidam nem se reduz em águas naturais, porém podem precipitar com muita facilidade como bicarbonatos de cálcio, variam entre $50\text{-}350\text{ mg/L}$ em águas doces, podendo chegar a 800mg/L , são benéficos aos vegetais principalmente na forma dos bicarbonatos de cálcio. O bicarbonato pode resultar na dissolução de feldspatos sódicos e calcários, podendo precipitar com certa facilidade como bicarbonato de cálcio (CaCO_3), mas estes iões não sofrem oxidação e nem redução nas águas naturais (FEITOSA et al., 2008).

2.8. Processos hidroquímicos

A hidroquímica permite estabelecer a evolução da composição das águas subterrâneas ao longo do seu trajeto de percolação nas rochas. Permite ainda relacionar a esta evolução as direções, sentidos do fluxo e o tempo de permanência das águas nos aquíferos. A ocorrência dos fenómenos modificadores da composição química das águas no interior dos aquíferos, trocas de base, reduções de sulfatos e ferro, oxido-reduções, concentrações, dissoluções e precipitações, limita uma melhor caracterização da história evolutiva do percurso de água (Silva, 1983). A compreensão dos processos físico-químicos permite uma melhor interpretação da interação água /rocha e da qualidade da água para um determinado uso específico

2.8.1. Faces hidroquímicas

As faces hidroquímicas são o resultado da (inter) relação entre os iões básicos ou principais mais predominantes na água e representados pela parte catiónica e aniónica. As faces hidroquímicas em águas, podem ser determinadas com base em diagramas hidroquímicos para modelos de água. Existem diferentes modelos usados para a determinação de faces hidroquímicas em águas subterrâneas, sendo que os diagramas de Piper em combinação com o diagrama de Stiff são os mais usados. A representação gráfica de dados hidroquímicos constitui uma ferramenta de trabalho muito eficiente na interpretação das propriedades de água, assim como para fazer comparações e correlações iónicas. Esta representação, também permite ver com facilidade o comportamento e a evolução da qualidade de água em um determinado território depois de um certo período ou tempo (DE FREITA & CRONEL, 2010).

2.8.2. Reação hidroquímica em águas subterrâneas

O padrão ou tendência da dispersão dos pontos nos triângulos individuais dos catiões (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) e dos aniões (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-) no diagrama de Piper, pode indicar algumas reações de precipitação ou dissolução troca de iões e mistura de águas. Quando os dados exibem uma tendência linear em direcção a um vértice do triângulo dos catiões ou aniões conseqüentemente um aumento ou diminuição da concentração dos STD, podendo ser indicativo respectivamente de precipitação ou dissolução progressiva (FEITOSA et al., 2008; MELO, 2014).

2.8.3. Diagrama de Piper

O diagrama piper é o gráfico mais utilizado em estudos hidroquímicos de águas subterrâneas para representar as facções químicas de um conjunto de amostras de água (Moreno Merino et al., 2021).

É utilizado para classificar os distintos grupos de águas quanto aos íons dominantes (Cloretada, Sódicas, Carbonatas, Magnesianas, bicarbonatadas.). Este sistema de classificação é baseado na sobrepujança de determinados íons sobre outros, a água é denominada quanto ao anião ou catião, cujas concentrações estão expressas em meq/L, é que ultrapassam em 50% nas suas respectivas somas. Se nenhum deles ultrapassa este valor, a água é denominada de acordo com os dois aniões ou catiões mais abundantes. Para plotar diagrama, transforma-se separadamente o valor de cada íão expresso em meq/L em percentagem total de aniões e de catiões (FEITOSA et al., 2008; R. CUSTODIO, 1996).

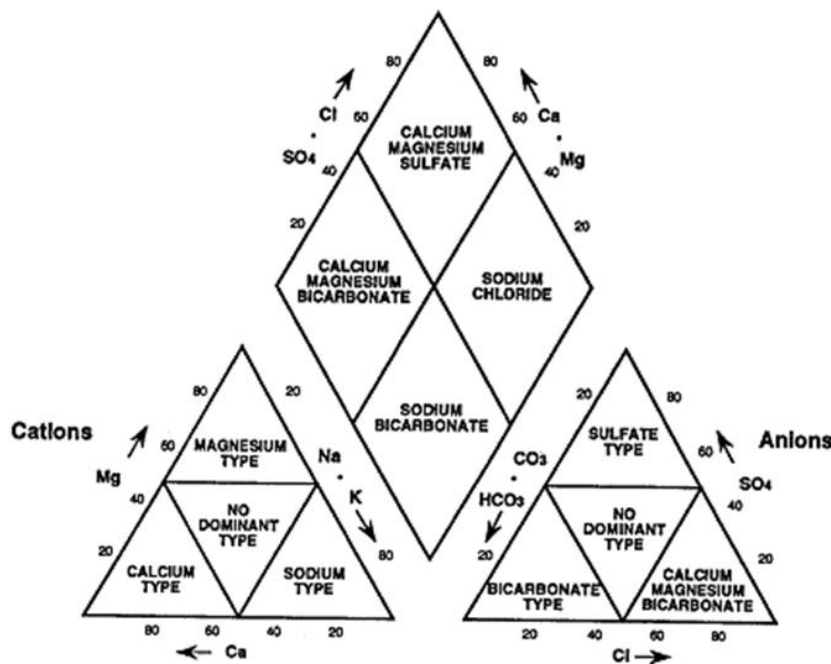


Figura 3 - Diagrama de Piper

Fonte - Lonergan e Cange, 1994.

2.8.4. Diagrama de Stiff

O diagrama de Stiff apresenta, de maneira distintiva, as principais características hidroquímicas de uma amostra. Para a sua elaboração são

utilizados quatro eixos horizontais paralelos, que se estendem nas duas direções a partir de um eixo central vertical (Stiff, 1951).

Concentrações em miliequivalentes (meq/L) de cátions são plotadas à esquerda do eixo central vertical, e as concentrações de aniões, também em miliequivalentes são plotadas à direita deste eixo. Os pontos são então conectados, resultando em um polígono irregular (Stiff, 1951).

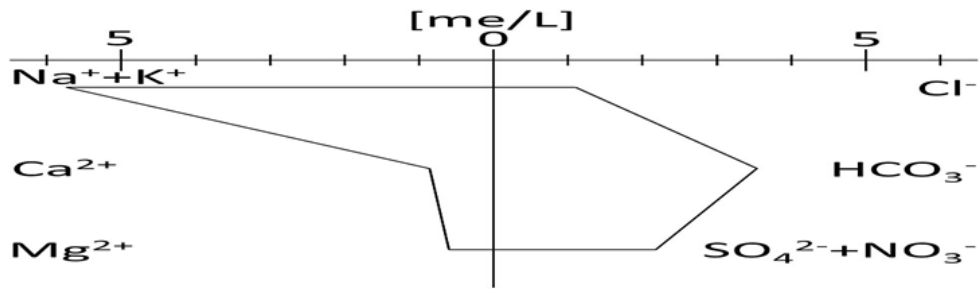


Figura 4 - Diagrama de Stiff

Fonte - Paris de Ferrer, M. (2001)

2.9. Balanço iônico

(MANASSÉS, 2009) define o balanço iônico como sendo uma ferramenta fundamental para uma pesquisa hidroquímica. Um diagnóstico hidroquímico consistente possui concentração dos cátions bem próximos da concentração dos aniões (FEITOSA et al., 2008). O balanço iônico é dado pela fórmula abaixo e permite determinar o coeficiente de erro da análise, este coeficiente tem como objectivo resultar em um baixo erro, de no máximo 10% que pode ser expresso pela seguinte equação (CERQUEIRA, 2014)

$$BI(\%) = \frac{\sum \text{cations} - \sum \text{anions}}{\sum \text{cations} + \sum \text{anions}} \times 100 \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

BI – Equação do balanço iônico

$$\sum \text{Catiões [meq/l]} = [\text{Na}^+] + [\text{K}^+] + [\text{Mg}^{2+}] + [\text{Ca}^{2+}]$$

$$\sum \text{Aniões [meq/l]} = [\text{Cl}^-] + [\text{SO}_4^{2-}] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{NO}_3^-]$$

3. MATERIAL E MÉTODOS

Apresenta-se neste capítulo a descrição do local onde foi realizado o trabalho, seguido da cronologia das actividades realizadas e respectivas metodologias adoptadas. Elas são fundamentadas no suporte teórico acima evidenciado e, em alguns casos, trazem um suporte adicional.

3.1. Descrição da área de estudo

O estudo realizou-se no distrito de Chókwè, no Posto Administrativo de Macarretane concretamente na aldeia da Barragem e no distrito de Guijá na vila sede de caniçado, ao longo do rio Limpopo. O distrito de Chókwè está situado a Sul da província de Gaza, no curso médio do rio Limpopo, tendo como limites a Norte o rio Limpopo que o separa dos distritos de Massingir, Mabalane e Guijá, a Sul o distrito de Bilene e o rio Mazimuchope que o separa do distrito de Magude, a Este confina com os distritos de Bilene e Chibuto e a Oeste com os distritos de Magude e de Massingir.

O distrito de Guijá está situado a Sudoeste da Província, entre as latitudes 23°50' e 24°50'S, e entre as longitudes 32°25' e 33°40'E (MAE, 2005).

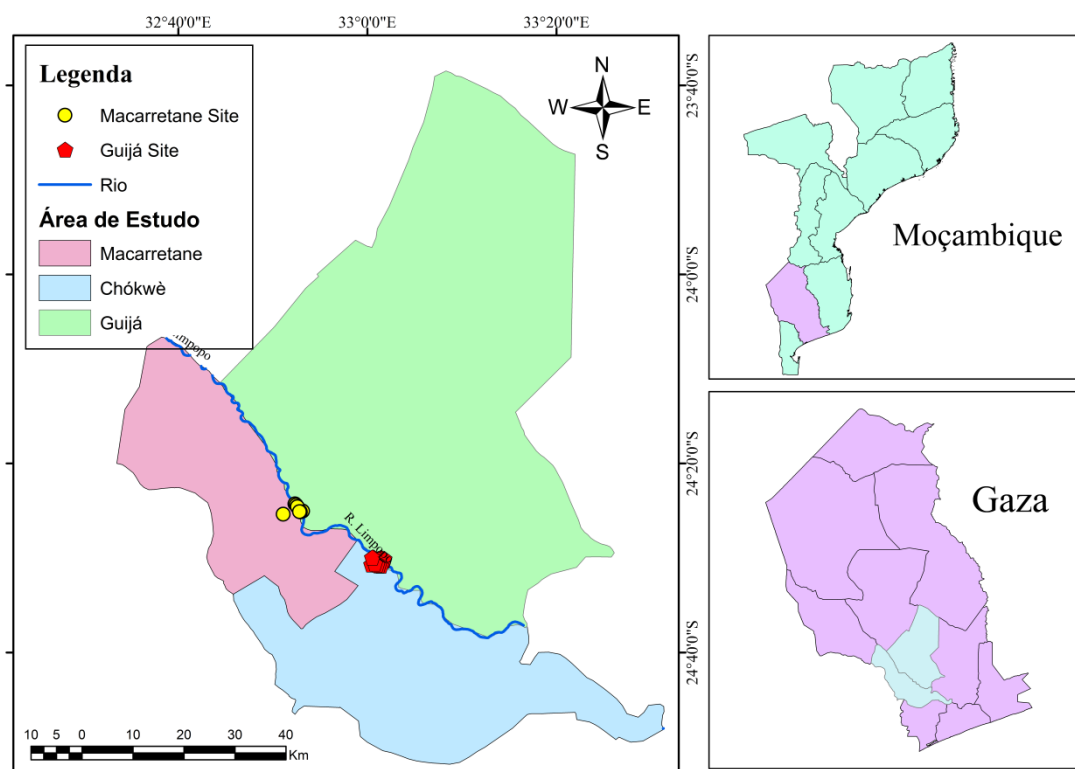


Figura 5 - Mapa dos distritos de Chókwè (Posto Administrativo de Macarretane) e Guijá (Vila sede de caniçado) e a respectiva área de estudo

3.1.1. Clima

O clima dos distritos é dominado pelo tipo semi-árido (seco de savana), onde a precipitação varia de 500 a 800 mm, confirmando o gradiente do litoral para o interior, enquanto a evapotranspiração potencial de referência (ET_o) é da ordem dos 1400 a 1500 mm. As temperaturas médias anuais variam entre os 22 °C e 26 °C e a humidade relativa média anual entre 60-65%.

A baixa pluviosidade, aliada às elevadas temperaturas, resulta numa acentuada deficiência de água. A irregularidade das chuvas ocasiona estiagem e secas frequentes, mesmo durante a estação das chuvas (MAE, 2005).

3.1.2. Relevo e Solos

Todo o distrito de Chókwè é uma planície com menos de 100 metros de altitude e composta por aluviões ao longo do rio Limpopo, que atravessa todo o distrito no sentido NW-SE, e por depósitos indiferenciados no resto do distrito (PA's de Macarretane e Lionde). Verifica-se a ocorrência de terraços no extremo Sudeste do distrito (PA de Chilembene), junto ao distrito de Bilene. Em Macarretane, na zona de Matuba, e na parte sudeste de Chivongoene (Guijá) ocorrem argilas vermelhas e a norte da vila do caniçado (Mubangoene) há ocorrência de solos arenosos (MAE, 2005).

3.1.3. Hidrografia

Os distritos têm um grande potencial hidrográfico, sendo banhado pela margem direita do Rio Limpopo (Macarretane) e pelo Rio Mazimuchope, possuindo ainda os riachos periódicos de Ngonwane, Munhuane, Chuezi, Nhambabwe e as lagoas de Chinangue, Ngondzo, Nha-nhai, Mbalambe e Khokhotiva. Na margem esquerda do rio (Guijá) sendo ainda percorrido pelos riachos Nandjote, Piane, Chichacuane e Balabala, que se juntam em Chibuto para formar o rio Chagane. a. Para além destes rios, destacam - se lagoas de Bambeni, e Linguaze (MAE, 2005).

Os seus caudais são muito baixos durante a estação seca, tendo reduzido bastante no Baixo Limpopo (desde a barragem de Macarretane até à foz do rio, em Zongoene), devido à construção de reservatórios e barragens nos países a montante.

As águas do rio Limpopo tendem a ser altamente mineralizadas (salinas) devido a vários motivos, nomeadamente: (a) o facto de o rio drenar uma área de captação árida;

(b) o afluxo da água salina drenada dos vários sistemas de regadio existentes ao longo das suas margens, o que aumenta a condutividade e concentração de sais em direcção a jusante; e (c) o gradiente do rio ser baixo no período seco, ocorrendo penetração da água do mar (salgada) para o interior, até 80 km da costa (MAE, 2005).

3.1.4. Água Subterrânea

A maior parte dos aquíferos do distrito do Chókwè são profundos (mais de 100 metros), variando de alta produtividade e boa qualidade de água (na cidade de Chókwè, Lionde e maior parte de Macarretane), a baixa produtividade e qualidade medíocre da água (numa parte de Macarretane).

A água no distrito do Chókwè, incluindo a cidade de Chókwè, é obtida principalmente através de furos que existem nas localidades. As áreas que estão fora do sistema de regadio não têm acesso a fontes melhoradas de água e, durante a estação seca, os seus residentes são obrigados a percorrer grandes distâncias à procura de água (MAE, 2005).

3.1.5. Geologia

A geologia na maior parte da Bacia do Limpopo em Moçambique é caracterizada por espessos depósitos de sedimentos marinhos do Pleistocénico, denominados Mananga, localizados em áreas relativamente elevadas e, por depósitos arenosos do Quaternário. Esta região apresenta uma textura franco-arenosa com elevada percentagem de areia grossa. A bacia do Limpopo é partilhada por quatro países nomeadamente a África do Sul, Moçambique, Botswana e o Zimbabwe. Estende-se por uma área de cerca de 412.000 Km² (MAE, 2005).

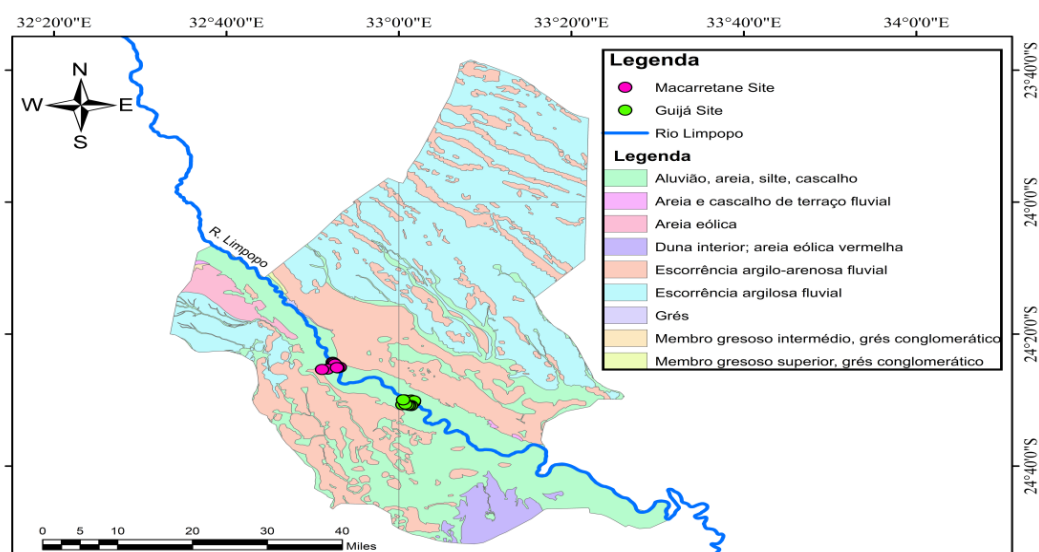


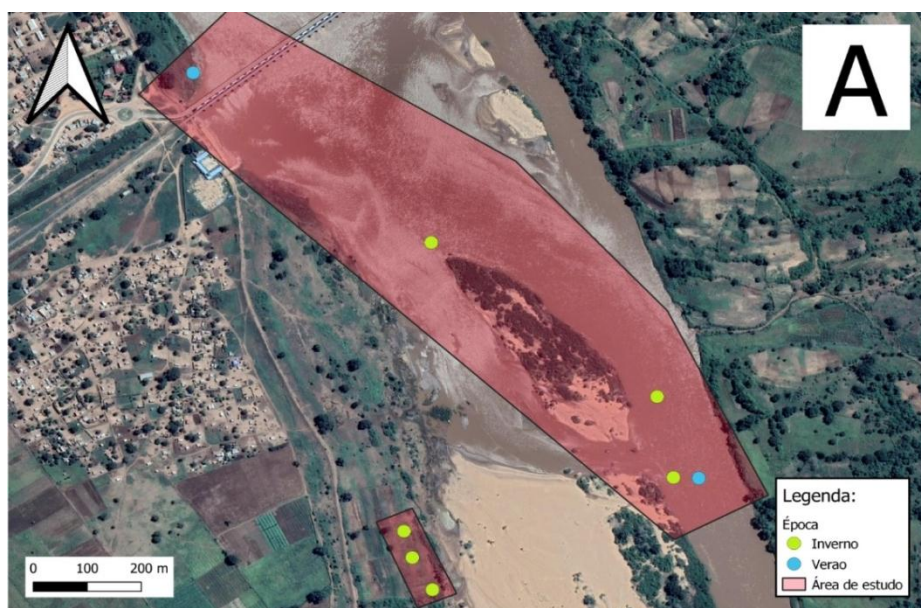
Figura 6 - Mapa de geologia de Chókwè e Guijá

3.2. Metodologia e procedimentos de campo

3.2.1. Colecta de amostras

Para estudar a variabilidade temporal da hidroquímica da água subterrânea no leito do rio Limpopo e sua influência na qualidade para o consumo e agricultura em Macarretane e Guijá, foram definidos dezassete (17) pontos de colectas de água. Dos quais sete (7) poços de monitoria representativos a água subterrânea previamente instalados no leito seco do rio Limpopo com cerca de 10m de profundidade caracterizados por serem piezómetros de tubo galvanizado, cada piezómetro com um total de 10 ranhuras, em cortes de 2 a 4 cm de comprimento, perpendicular do comprimento do cano e distantes 1 a 1,5 cm um do outro, alinhados em duas, com uma disposição simétrica a 5m de distância desde a extremidade inferior do piezómetro, permitindo deste modo a entrada da água subterrânea. Houve também a necessidade de colecta de dez (10) amostras de água superficial no próprio rio Limpopo sendo também representativo a área em estudo.

Após a coleta as amostras foram acondicionadas em recipientes plásticos tipo pet (500 mL), limpas e esterilizadas, observando-se o detalhe de preencher todo o recipiente, de modo a se evitarem alterações na composição original da água e foram armazenadas numa temperatura ambiente e transportadas ao laboratório num período de 24h-48h para a realização de análises de alguns parâmetros, de forma a não exceder o prazo de validade das amostras.



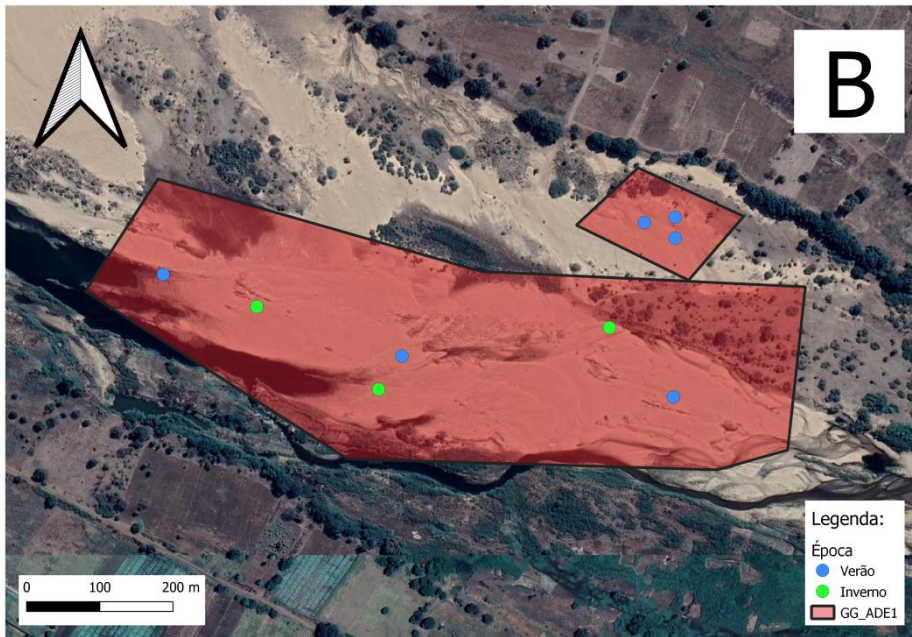


Figura 7 - Localização dos pontos de monitoria da qualidade de água subterrânea e superficial no leito seco do rio Limpopo

A- Aldeia de Barragem em Macarretane (Chókwè); B- Vila Sede de Caniçado (Guijá)

Frequência de amostragem

Para o presente estudo foram colhidas amostras de águas para as duas (02) épocas hidrológicas (chuvosa e seca) de 2020 a 2021, sendo colhidas amostras de água correspondentes as duas épocas hidrológicas e por forma a garantir a variabilidade temporal da hidrogeoquímica da água, foram feitas monitorias mensais dos parâmetros físicos-químicos das águas subterrâneas e superficiais com auxílio de medidores portáteis (instrumentos da hanna), foram realizadas análises in situ os seguintes parâmetros: Condutividade eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), pH e temperatura . Foram igualmente colhidas um total de 10 amostras de água subterrâneas e superficiais, amostras essas que foram enviadas para o laboratório da IGS para sua respetiva análise.

Em seguida foram feitas as anotações na caderneta de campo de todas as características de campo. Porém no acto de monitoria antes da leitura dos parâmetros nas fontes de água subterrânea foi medido o nível de água em cada poço com o auxílio da sonda eléctrica e posterior registo dos dados. Diferentemente da água superficial a leitura era directa em pontos previamente estabelecidos para o estudo.



Figura 8 - Representação dos instrumentos de campo usados para a medição dos parâmetros físico-químicos da água

1 - Furo de água; 2- Sonda eléctrica; 3 - Cheker; 4 – pH-meter; 5- Condutivímetro portátil; 6 - Reagente para o pH

3.2.2. Medição de parâmetros físico-químicos da água subterrânea e superficial

As amostras de água subterrânea foram colectadas com auxílio do Bailer e imediatamente colocadas em garrafas plásticas, bem identificadas ou etiquetadas com local. Para a água superficial foram seguidos o procedimento de limpeza e as amostras foram colectadas directamente no rio com as garrafas plásticas. No processo de colecta da água superficial, a boca das garrafas estava virada para o sentido contrário do fluxo de água superficial, para permitir a entrada natural da água em condições de campo.

As análises laboratoriais foram feitas no Institute for Groundwater Studies (IGS), University of the Free State- Africa de Sul. As análises consistiram na determinação dos catiões (NH_4^+ , Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) e aniões (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-) presentes na água subterrânea e superficial. O método usado para a determinação dos catiões foi Inductively Coupled Plasma (ICP) e para a determinação da análise aniónica foi o método Ion Chromatography (IC).

3.2.3. Determinação e comparação da qualidade de água subterrânea

Para a determinação das classes da qualidade da água para irrigação, usou-se a classificação da água proposta pelo Laboratório de Salinidade dos Estados Unidos (USSL). Com o método da USSL classificou-se a água olhando para dois parâmetros principais a condutividade eléctrica (CE) e a razão de adsorção de sódio (RAS), visualizando no diagrama a que classe pertencem. O diagrama de classificação da água para irrigação, foi feito no software WISH versão 3.0.2. A RAS foi calculada baseando-se em três parâmetros químicos como mostra a equação

$$RSA^0 = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca^0 + Mg}{2}}} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

RAS° = Razão de adsorção de sódio corrigida;

Na⁺ - Concentração de sódio na água, em mmolc L-1;

Ca° - Concentração de cálcio na água, corrigida pela relação HCO₃⁻/Ca (mmolc L-1) e CEa (dS.m-1);

Mg²⁺ - Concentração de magnésio na água, em mmolc L-1.

A determinação e identificação do grau de potabilidade da água subterrânea para o consumo humano foi feito a partir das análises de um conjunto de parâmetros microbiológicos e físico-químicos, de acordo com as normas da OMS e MISAU.

3.2.4. Mapeamento da qualidade de água subterrânea e o grau de variação hidroquímica

A fim de determinar a variabilidade temporal da qualidade das águas subterrâneas no leito seco do rio Limpopo foi feita a georeferenciação (levantamento das coordenadas em GPS), dos pontos onde foram feitas as coletas de amostras de água de modo a se produzir mapas com o QGIS 2.18.

Para além do QGIS para a interpolação dos dados espaciais, foi usado o software de qualidade de água WISH 3.0.2 é uma interface gráfica, fornecendo a maioria das funcionalidades para o gerenciamento e interpretação de dados do dia-a-dia. Fornece

diferentes opções de interpretação de dados, onde encontram-se incluídas a análise espacial, análise de série temporal, diagramas químicos especializados, análise de teste de bombeamento, registros hidrogeológicos simples e detalhados, contornos e secções (SADC, 2017).

3.2.5. Análise e interpretação de dados

Para a classificação dos parâmetros físico-químicos da qualidade da água na irrigação foi utilizado o software WISH versão 3.0.2, as interpretações dos resultados foram baseadas na metodologia proposta pela United States Laboratory (USSL), cuja avaliação basea-se combinação de RAS e CE da água. Também, foi usado o pacote Microsoft, Excel 2019 para a análise estatística descritiva básica (média, máximo, mínimo) para observar algumas variações ligeiras dos parâmetros analisados nas fontes hídricas da área do estudo. Os dados das análises de água foram determinados utilizando o método gráfico (Diagrama Triangular de Piper e Stiff). Estes diagramas foram utilizados para classificar distintos grupos de água quanto aos íons predominantes. Antes da caracterização da água subterrânea através da composição química de íons predominantes, avaliou-se a qualidade dos resultados, a partir do cálculo do BI de ambas as fontes (água superficial e subterrânea) para verificar e validar os resultados das análises químicas antes que fossem feitas as suas respectivas interpretações (análise estatística ou gráfica) de forma qualitativa e quantitativa.

4. RESULTADOS

4.1. Medição dos parâmetros físico-químicos da água superficial e subterrânea

Antes da interpretação dos parâmetros físico-químicos, primeiro calculou-se o balanço iônico (BI).

Para o presente estudo, foram analisadas 17 amostras de águas, sendo dez (10) de água superficial e sete (07) de água subterrânea para Macarretane e para Guijá. Das nove (09) amostras analisadas em Macarretane, todas apresentam um BI abaixo de 10% e os valores variam entre 0,39% e 8,26% como mostra a tabela 5. Para Guijá, das oito (08) amostras analisadas, apenas duas (02) advindas dos poços de monitoria previamente instalados no leito seco do rio apresentaram um valor de BI superior a 10%, conforme mostra a tabela 6, o que indica um desequilíbrio entre a concentração dos cátions e aniões na água subterrânea.

Tabela 4 - Balanço Iônico de Macarretane

Macarretane	Ca ²⁺ meq/L	Mg ²⁺ meq/L	Na ⁺ +K meq/L	CO ₃ ⁻ +HCO ₃ ⁻ meq/L	Cl ⁻ meq/L	SO ₄ ²⁻ meq/L	Σcátions meq/L	Σaniões meq/L	BI (%)
Rio Montante 1	1,25	1,48	1,42	2,06	1,12	0,94	4,15	4,12	0,39
Rio Montante 2	1,44	1,88	2,82	2,23	2,25	1,12	6,15	5,61	4,58
Rio Ponto 1	1,93	2,05	2,09	2,96	1,53	0,72	6,07	5,2	7,7
Rio Ponto 2	1,35	1,98	2,14	2,36	1,44	1,01	5,48	4,82	6,47
Rio Ponto 3	1,44	2,08	2,42	2,41	1,76	1,11	5,94	5,27	5,92
Furo 1	2,77	2,65	2,42	3,43	2,18	1,29	7,84	6,89	6,43
Furo 2	3,21	2,93	2,43	3,61	2,28	1,51	8,58	7,41	7,33
Furo 3	2,9	2,37	2,09	3,29	1,99	1,22	7,35	6,5	6,15
Dona Anita	3,3	3,09	2,67	3,87	2,25	1,55	9,05	7,67	8,26

Tabela 5 - Balanço Iônico de Guijá

Guijá	Ca ²⁺ meq/L	Mg ²⁺ meq/L	Na ⁺ +K meq/L	CO ₃ ⁻ +HCO ₃ ⁻ meq/L	Cl ⁻ meq/L	SO ₄ ²⁻ meq/L	Σcátions meq/L	Σaniões meq/L	BI (%)
Furo 1	2,32	2,05	0,9	3,39	0,47	0,18	5,27	4,04	13,16
Furo 2	1,15	0,75	0,65	1,69	0,36	0,12	2,54	2,16	8,21
Furo 3	2	1,68	1,08	3,08	0,53	0,09	4,76	3,7	12,61
Rio Ponto 1	1,55	1,64	1,91	2,27	1,9	1,06	5,11	5,24	1,26
Rio Ponto 2	1,5	1,73	2,04	2,24	1,98	1,08	5,27	5,31	0,38
Rio Ponto 3	1,5	1,73	2,09	2,26	1,99	1,12	5,31	5,38	0,59
Rio Ponto 4	1,6	1,81	2,22	2,28	2,24	1,19	5,63	5,71	0,75
Rio Ponto 5	1,24	2,04	2,09	3,19	2,05	0,73	5,37	5,97	5,34

Com os resultados dos parâmetros físico-químicos foi feita uma análise estatística descritiva para cada parâmetro das duas fontes de água utilizando o software MiniTAB19. As análises estatísticas são tabuladas nas tabelas (7 e 8) e os parâmetros físico-químicos são pH, condutividade elétrica (CE), sólidos totais dissolvidos (STD), e os cátions e ânions individuais.

Tabela 6 - Resultados da análise estatística descritiva na água superficial e subterrânea em Macarretane para Época chuvosa

Variável	Macarretane Água Superficial				Macarretane Água Subterrânea			
	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
pH	7,942	7,77	8,1	0,127	6,825	6,77	6,86	0,0387
EC	49,82	43,85	52,81	3,8	72,74	65,57	79,73	6,08
Ca	29,66	25	38,6	5,24	60,91	55,44	66,02	5,01
Mg	23,05	18	25,3	2,97	33,54	28,76	37,54	3,88
Na	46,84	30	62,2	11,73	53,13	45,86	59,22	5,5
K	5,502	4,38	6,63	1,103	3,52	3,14	3,78	0,282
HCO ₃	146,62	125,9	180,29	20,51	216,52	200,55	236,03	15,37
F	0,28	0,1	0,41	0,1155	0,28	0,24	0,33	0,0374
Cl	57,43	39,53	79,9	14,99	77,16	70,52	80,96	4,69
NO ₃	0,202	0,06	0,31	0,091	0,265	0,2	0,4	0,092
SO ₄	47,05	34,44	54	7,93	66,81	58,8	74,37	7,7
TDS	357,4	289,6	388,8	41	513,1	468,2	557,9	39,9

O pH das amostras de água subterrânea é ácido com um valor médio de 6,83 e ligeiramente básico com uma média de 7,94 para água superficial. Nas águas subterrâneas os valores das variáveis EC, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ apresentam valores de médias, e intervalos de máximo-mínimo superiores em relação as águas superficiais, com exceção do K⁺ que apresenta um resultado de média superior em relação a fonte subterrânea.

Para a fonte de água subterrânea o HCO₃⁻ é o anião dominante com uma variação de 200.55- 236.03 mg/L, seguido pelo anião Cl⁻ com uma variação de 70.52-80-96 mg/L e a ordem de abundância dos cátions é Ca²⁺> Na⁺> Mg²⁺> K⁺, e para os aniões é HCO₃⁻> Cl⁻> SO₄²⁻. Com base nas médias, a fonte superficial comparativamente com a fonte subterrânea apresentou o maior número de variáveis com resultados relativamente baixos, apesar de ter a similaridade dos aniões dominantes, o HCO₃⁻ - que varia de 125,9 a 180,29mg/L, seguido pelo Cl⁻ que varia de 39,53 a 79,9 mg/L. A ordem de abundância da água superficial para os cátions é Na⁺> Ca²⁺> Mg²⁺> K⁺ e para os aniões é HCO₃⁻> Cl⁻> SO₄²⁻> NO₃⁻.

Tabela 7 - Resultados da análise estatística descritiva na água superficial e subterrânea em Guijá

Variável	Guijá Água Superficial				Guijá Água Subterrânea			
	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
pH	7,1067	7,04	7,23	0,1069	7,972	7,86	8,24	0,1522
EC	34,51	23,56	42,3	9,76	58,09	55,64	61,07	2,6
Ca	36,46	22,94	46,43	12,14	34,38	30	48,89	8,15
Mg	18,12	9,1	24,78	8,1	21,756	20	24,78	1,832
Na	18,24	12,91	23,08	5,1	44,79	41	48	2,58
K	3,253	2,96	3,43	0,256	4,722	3,61	5,1	0,626
HCO ₃	165,8	102,9	206,8	55,3	149,4	136,9	194,8	25,4
F	0,1533	0,14	0,17	0,01528	0,392	0,19	0,46	0,1139
Cl	16	12,62	18,7	3,1	72,14	67,52	79,53	4,54
NO ₃	0,26	0,22	0,33	0,0608	0,298	0,19	0,35	0,0622
SO ₄	6,3	4,49	8,84	2,27	49,78	34,92	57	8,62
TDS	265,4	171,1	326,8	82,9	378,7	355,8	426,8	29

Tanto a fonte de água subterrânea como a superficial apresentam um valor médio de pH > 7 (com características básicas). Nas águas subterrâneas os valores das variáveis EC, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ apresentam valores de médias, e intervalos de máximo-mínimo superiores em relação as águas superficiais, com exceção do Ca²⁺ e HCO₃⁻ em que a água superficial tem uma média superior em relação a água subterrânea.

A ordem de abundância dos cátions na fonte subterrânea é Na⁺ > Ca²⁺ > Mg²⁺ > K⁺ e com base nas médias, abundância dos aniões é HCO₃⁻ > Cl⁻ > SO₄²⁻ > NO₃⁻, sendo o HCO₃⁻ o anião dominante com uma variação de 36,9- 94,8 mg/L, seguido pelo anião Cl⁻ com uma variação de 67,52-79,53 mg/L e para fonte superficial a ordem é Ca²⁺ > Na⁺ > Mg²⁺ > k⁺.

Durante a época seca o pH das amostras de água subterrânea é básico com um valor médio de 7,697 e com características ácidas com uma média de 8,49 para água superficial. Nas águas subterrâneas os valores das variáveis EC, Ca²⁺, Mg²⁺, apresentam valores de médias, e intervalos de máximo-mínimo superiores em relação as águas superficiais. Com base nas médias, a fonte superficial comparativamente com a fonte subterrânea apresentou o maior número de variáveis com resultados relativamente baixos, o HCO₃ – apresentou valores que variam de 146,62 a 260,31 mg/L, seguido pelo Cl⁻ que varia entre 57,43 a 64,39 mg/L.

Tabela 8 - Resultados da análise estatística descritiva na água superficial e subterrânea em Macarretane para época seca

Variável	Macarretane Água Superficial				Macarretane Água Subterrânea			
	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
pH	8,49	8,43	8,59	0,0872	7,697	7,24	7,97	0,398
EC	527,67	511	537	14,47	697	619	746	68,5
Ca ²⁺	29,66	28,06	32,06	2,01	44,35	41,68	46,49	2,45
Mg ²⁺	30,6	29,85	31,22	0,694	48,06	43,51	51,12	4,02
HCO ₃ ⁻	129,36	126,92	131,8	2,44	260,31	244,88	278,25	16,83
Cl	51,4	49,63	53,18	1,78	64,39	54,92	70,9	8,39
TDS	363,04	351,57	369,46	9,95	479,8	425,9	513,3	47,1

Durante a época seca o pH das amostras de água subterrânea é básico com um valor médio de 7,697 e com características ácidas com uma média de 8,49 para água superficial. Nas águas subterrâneas os valores das variáveis EC, Ca²⁺, Mg²⁺, apresentam valores de médias, e intervalos de máximo-mínimo superiores em relação as águas superficiais. Com base nas médias, a fonte superficial comparativamente com a fonte subterrânea apresentou o maior número de variáveis com resultados relativamente baixos, o HCO₃⁻ apresentou valores que variam de 146,62 a 260,31 mg/L, seguido pelo Cl⁻ que varia entre 57,43 a 64,39 mg/L.

Tabela 9 - Resultados da análise estatística descritiva na água superficial em Guijá

Variável	Guijá Água Superficial			
	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
pH	8,38	8,3	8,43	0,07
EC	537,7	519	570	28,1
Ca	33,93	32,06	35,27	1,671
Mg	30,437	29,95	31,12	0,609
HCO ₃	134,51	126,92	139,68	4,71
Cl	53,17	49,6	58,49	4,69
TDS	345,6	319,2	360,5	22,9

A fonte de água superficial apresenta um valor médio de pH 8,38 (com características ácidas).

4.1.1. Determinação e comparação da qualidade de água subterrânea por época hidrológica

4.1.2. Classificação da qualidade de água para consumo humano nos períodos chuvoso e seco

As tabelas 9, 10, 11 e 12 apresentam os resultados das amostras de água superficial e subterrânea referentes aos períodos chuvoso e tabelas 9 e 10 para a época seca para os dois locais.

Os resultados obtidos foram confrontados com os valores para os parâmetros físico-químicos da água de acordo com o Diploma Ministerial nº 180/2004 de 15 de Setembro de 2004, do Ministério da Saúde e pela Organização Mundial da Saúde, que estabelece os padrões de potabilidade da água para os demais usos preponderantes.

Observou-se que durante a época chuvosa, dos seis (06) parâmetros analisados apenas dois (2) estão fora dos limites admissíveis de qualidade de água para o consumo humano em Macarretane e Guijá sendo eles o Ca^{2+} e Cl^- segundo as normas do MISAU, e apenas um (01) parâmetro o Cl^- esta fora dos limites admissíveis de qualidade de água para o consumo humano na área de estudo, segundo as normas da OMS.

Tabela 10 - Comparação dos resultados das análises com o diploma ministerial nº 180/2004 e Organização Mundial da Saúde em Macarretane para época chuvosa

PARÂMENTRO	RIO PONTO 1	RIO PONTO 2	RIO PONTO 3	FURO 1	FURO 2	FURO 3	DONA ANITA	MISAU	OMS
pH	7,94	8,1	7,77	6,77	6,83	6,86	6,84	6,5-8,5	6,5-8,5
EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	52,14	48,21	52,81	70,53	75,14	65,57	79,73	50-2000	1400
STD(mg/L)	384,07	348,32	375,99	493,68	532,46	468,18	557,92	1000	600
Cl(mg/L)	54,23	51,17	62,33	77,25	80,96	70,52	79,91	250	5
Ca(mg/L)	38,6	27,1	28,7	55,4	64,2	58	66	50	-
Mg(mg/L)	24,9	24,1	25,3	32,2	35,7	28,8	37,5	50	-

De acordo com a (WHO, 2004) as diretrizes para qualidade da água potável não fazem recomendações sobre as concentrações mínimas do cálcio e magnésio devido às incertezas em torno dos nutrientes desses minerais. Não há informações científicas

suficientes sobre os benefícios ou perigos do consumo a longo prazo de águas com excesso desses minerais para permitir que quaisquer recomendações fossem feitas.

Tabela 11 - Comparação dos resultados das análises com o diploma ministerial nº 180/2004 e Organização Mundial da Saúde em Guijá para época chuvosa

PARÂMENTRO	FURO 1	FURO 2	FURO 3	RIO PONTO 1	RIO PONTO 2	RIO PONTO 3	RIO PONTO 4	RIO PONTO 5	MISAU	OMS
pH	7,05	7,23	7,04	7,86	7,91	7,92	7,93	8,24	6,5-8,5	6,5-8,5
EC (µS/cm)	42,3	23,56	37,67	55,64	55,9	57,19	60,66	61,07	50-2000	1400
STD(mg/L)	326,75	171,06	298,495	355,83	360,99	365,27	384,72	426,79	1000	600
Cl(mg/L)	16,69	12,62	18,7	67,52	70,22	70,62	79,53	72,79	250	5
Ca(mg/L)	46,4	22,95	40	31	30	30	32	48,887	50	None
Mg(mg/L)	24,8	9,1	20,5	20	21	21	22	24,776	50	None

Durante a época seca, dos seis (06) parâmetros analisados apenas um (01) esta fora dos limites admissíveis de qualidade de água para o consumo humano em Macarretane e Guijá sendo ele o Mg²⁺ segundo as normas do MISAU, e apenas um (01) parâmetro o Cl⁻ esta fora dos limites admissíveis de qualidade de água para o consumo humano na área de estudo, segundo as normas da OMS.

Tabela 12 - Comparação dos resultados das análises com o diploma ministerial nº 180/2004 e Organização Mundial da Saúde em Macarretane para época seca

PARÂMENTRO	DONA ANITA	FURO 1 (Dona Ania)	FURO 2 (Dona Teresa)	RIO PONTO 1	RIO PONTO 2	RIO PONTO 3	MISAU	OMS
pH	7,97	7,84	7,88	8,59	8,45	8,43	6,5-8,5	6,5-8,5
EC (µS/cm)	61,9	74,6	72,7	51,1	53,7	53,5	50-2000	1400
STD(mg/L)	425,87	513,25	500,18	351,57	369,46	368,08	1000	600
Cl(mg/L)	54,95	70,9	67,36	49,63	53,18	51,4	250	5
Ca(mg/L)	41,68	46,49	44,89	28,06	32,06	29,66	50	
Mg(mg/L)	43,51	51,12	49,56	30,73	31,22	29,85	50	

Tabela 13 - Comparação dos resultados das análises com o diploma ministerial nº 180/2004 e Organização Mundial da Saúde em Guijá para época seca

PARÂMETRO	RIO PONTO 1	RIO PONTO 2	RIO PONTO 3	MISAU	OMS
pH	8,3	8,43	8,41	6,5-8,5	6,5-8,5
EC (µS/cm)	52,4	57	51,9	50-2000	1400
STD (mg/L)	360,51	392,12	357,07	1000	600
Cl (mg/L)	49,63	58,49	51,4	250	5
Ca (mg/L)	34,47	35,27	32,06	50	-
Mg (mg/L)	31,12	29,95	30,24	50	-

4.1.3. Faces hidroquímicas na água

A classificação química da água foi possível através do diagrama triangular de Piper como pode ser visualizado nas figuras 10 e 11. Este tipo de diagrama como salientado anteriormente foi representativo para as amostras do presente estudo. De acordo com a classificação catiónica, em Macarretane, ambas fontes enquadram-se na classe de águas mistas, isto é, sem dominância de nenhum catião. Diferentemente da classificação aniônica na água subterrânea e superficial há dominância de HCO_3^- , sendo consideradas águas que pertencem a classe bicarbonatada. As amostras apresentam uma face hidroquímica classificada como água bicarbonatada cálcica ou magnésiana segundo a projeção geral no losango do diagrama de Piper.

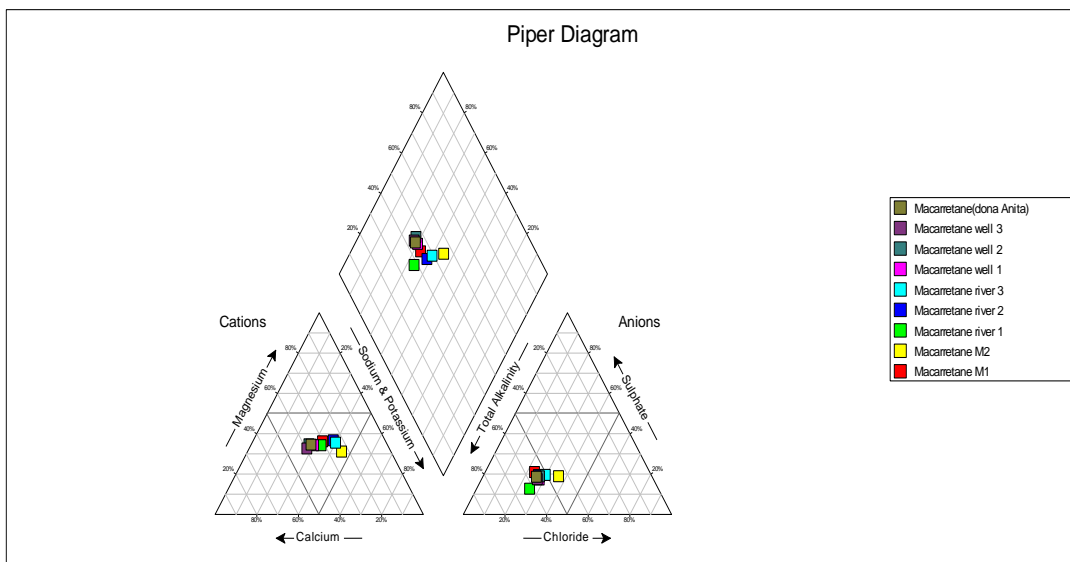


Figura 9 - Faces hidroquímicas da água subterrânea e superficial no diagrama de Piper em Macarretane

Para Guijá, o diagrama triangular de Piper revela que a qualidade de água nas amostras de água subterrânea e superficial é provavelmente controlada por dissolução, precipitação ou intemperismo de silicatos, com conseqüente formação dos iões Ca^{2+} , Mg^{2+} e o HCO_3^- , um grupo de iões mais abundantes do local. Para as amostras analisadas o diagrama triangular de Piper mostrou um grupo predominante classificando a água como do tipo bicarbonatada cálcica ou magnésiana ($\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}-\text{HCO}_3^-$), demonstrando são águas jovens.

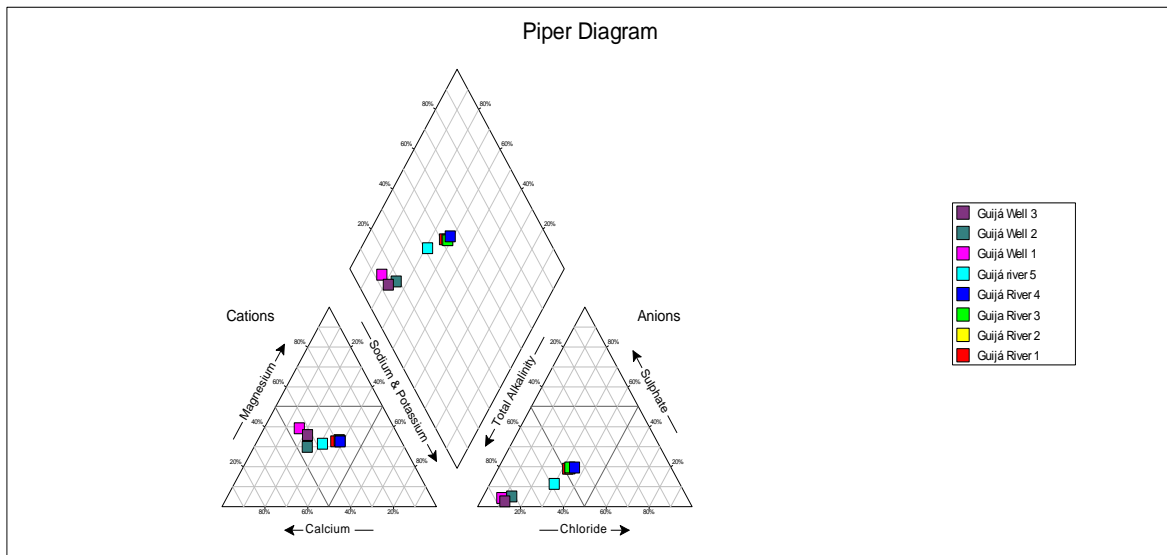


Figura 10 - Faces hidroquímicas da água subterrânea e superficial no diagrama de Piper em Guijá

4.1.4. Configuração geométrica da relação iônica na água

A figura 12 e 13 representam o diagrama de Stiff que ilustra o resultado do equilíbrio iônico a partir da configuração geométrica dos iões nas amostras de água.

Existe uma feição geométrica semelhante nas amostras, com variação apenas na concentração dos iões. Em todos os furos em Macarretane, nota-se uma maior concentração de HCO_3^- , e em quatro dos quais apresentam maior concentração de Ca^{2+} . Nos restantes três furos verifica-se uma diferença, representando uma percentagem significativa para todos os iões, e o Ca^{2+} encontra-se em menor percentagem.

A geometria apresentada pelas amostras do rio nos pontos (River 1, River 2 e River 3) tem maiores valores para catião Na^+ e para o anião HCO_3^- . Para as amostras dos furos (Well , Well 2 e Well 3), incluindo o da dona Anita, apresentam uma geometria diferente em comparação com a da água superficial, com um alto teor de HCO_3^- , Ca^{2+} e Mg^{2+} sendo típica de um campo de águas bicarbonatadas cálcicas magnesianas.

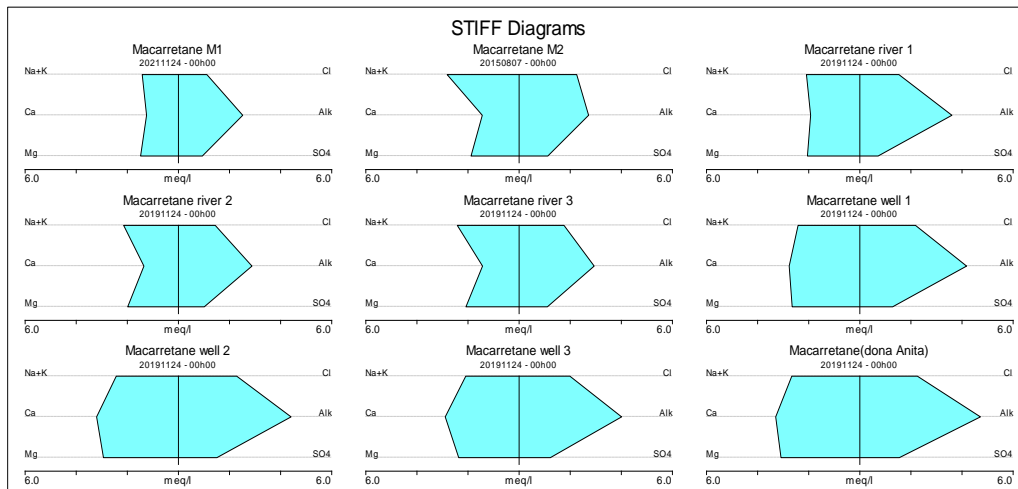


Figura 11 - Configuração geométrica dos íões no diagrama de Stiff em Macarretane

Em Guijá, existe uma configuração geométrica semelhante entre a água superficial e subterrânea. Nos pontos Guijá River 1, 2, 3, 4 e 5 (figura 13), o anião HCO_3^- mostra-se com elevada concentração e nos catiões somente o ponto Guijá river 4 indicou para elevadas concentrações de $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ e os restantes pontos Guijá River 1, 2, 3 e 5 para catião o Ca^{2+} . Indicando provável predominância de dissolução de minerais. Na água subterrânea os pontos Guijá well 1, 2 e 3 (Figura 13) também foram observadas similaridade de concentração elevada de HCO_3^- . Diferente da água superficial, o catião Ca^{2+} mostra-se com tendência de elevada concentração de acordo com a configuração geométrica, o tipo de água predominante águas bicarbonatadas cálcicas/magnesianas para todas as amostras de água (superficial e subterrânea).

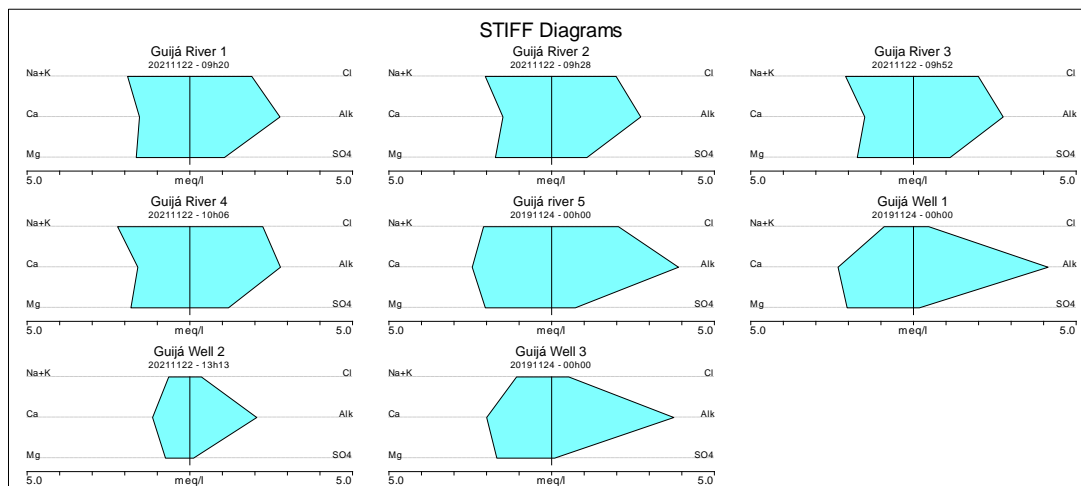


Figura 12 - Configuração geométrica dos íões no diagrama de Stiff em Guijá

4.1.5. Classe de qualidade da água subterrânea para irrigação agrícola nos períodos seco e chuvoso

A classificação da qualidade de água e o seu aproveitamento para fins de irrigação foi baseada na RAS, que mostra que a água superficial e subterrânea para os dois locais tem valores menores do que 10 meq/L (tabela 9 e figura 10 para Macarretane, tabela 2 e figura 11 para Guijá). Na água superficial observa-se maiores valores (mínimo, média e máximo) em comparação com a água subterrânea, apresentando 1.117meq/L, 2.098meq/L, 1.38meq/L, 1.530meq/L e 1.698meq/L; 1.420meq/L, 1.334meq/L, 1.230meq/L, 1.442meq/L para Macarretane e 1.412meq/L, 1.507meq/L, 1.542meq/L, 1.510meq/L, 1.336meq/L; 0.552meq/L, 0.557meq/L, 0.740meq/L para Guijá respectivamente.

Tabela 9 - Classe de qualidade de água para irrigação usando RAS para Macarretane

Nº	Nome da fonte	RAS (meq/L)
1	Macarretane Rio Montante 1	1.117
2	Macarretane Rio Montante 2	2.098
3	Macarretane Rio Ponto 1	1.381
4	Macarretane Rio Ponto 2	1.530
5	Macarretane Rio Ponto 3	1.698
6	Macarretane Furo 1	1.420
7	Macarretane Furo 2	1.334
8	Macarretane Furo 3	1.230
9	Macarretane (Dona Anita)	1.442

Tabela 14 - Classe de qualidade de água para irrigação usando RAS para Guijá

Nº	Nome da Fonte	RAS (meq/L)
1	Guija Furo 1	0.552
2	Guija Furo 2	0.577
3	Guija Furo 3	0.740
4	Guija Rio Ponto 1	1.412
5	Guija Rio Ponto 2	1.507
6	Guija Rio Ponto 3	1.542
7	Guija Rio Ponto 4	1.510
8	Guija Rio Ponto 5	1.336

No diagrama de classificação de água para irrigação da USSL (figura 14 e 15), observa-se que a maioria das amostras de água nos dois locais para irrigação são

classificadas como C2-S1 (salinidade média, baixo teor de sodicidade. Em Guijá, apenas uma (01) amostra apresentou predominância de classe C1S1 (Guijá well 2), ou seja, com o risco de sódio baixo e com médio risco de salinidade.

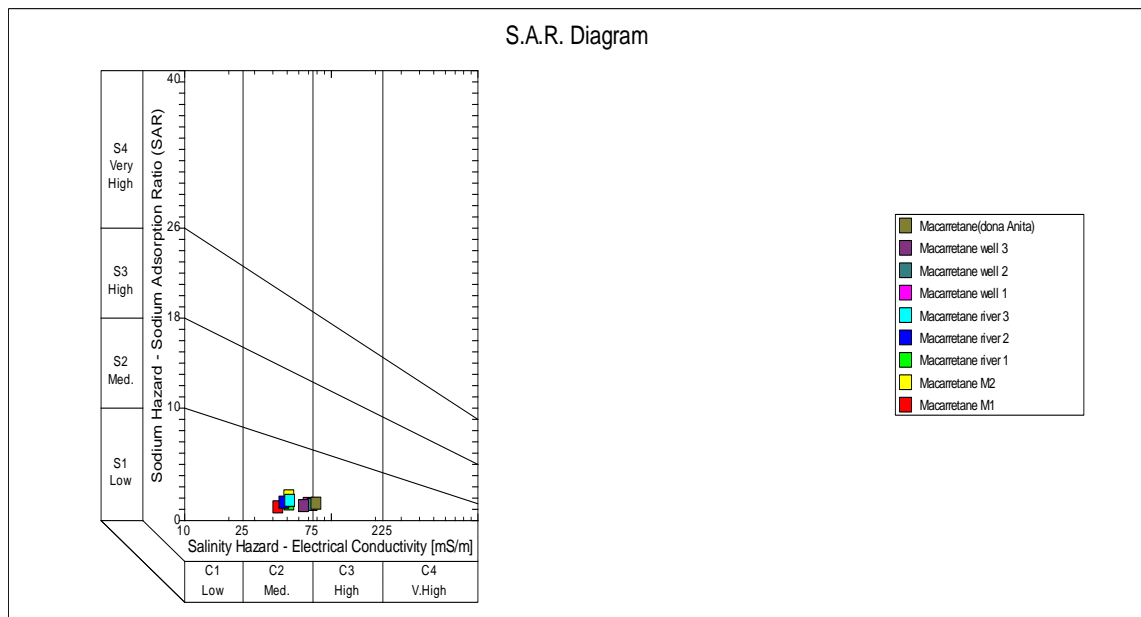


Figura 13 - Classes de qualidade de água para irrigação usando RAS e CE para Macarretane

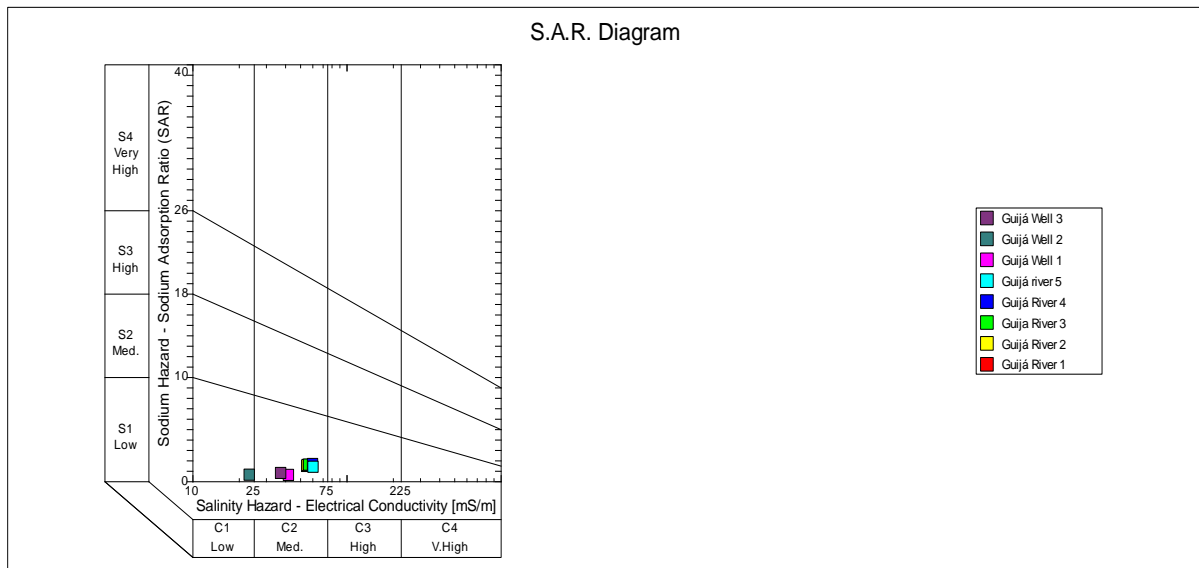


Figura 14 - Classes de qualidade de água para irrigação usando RAS e CE para Guijá

4.2. Mapas de qualidade de água subterrânea e o grau de variação hidroquímica

Os mapas de concentração média dos valores de cada parâmetro foram gerados afim de ilustrar espacialmente a distribuição e comportamento dos mesmos. O método de

interpolação utilizado no tratamento dos dados foi a Krigagem. A utilização desse método de interpolação justifica-se pois está associada a definição B.L.U.E. (best linear unbiased estimator) que é uma linha de regressão que foi calculada usando o critério dos mínimos quadrados e onde nenhuma das suposições é violada. Ele terá uma variância menor do que qualquer outro estimador do parâmetro populacional.

Os parâmetros analisados foram espacializados para os dois locais conforme os mapas temáticos indicados nas figuras abaixo durante a época hidrológica.

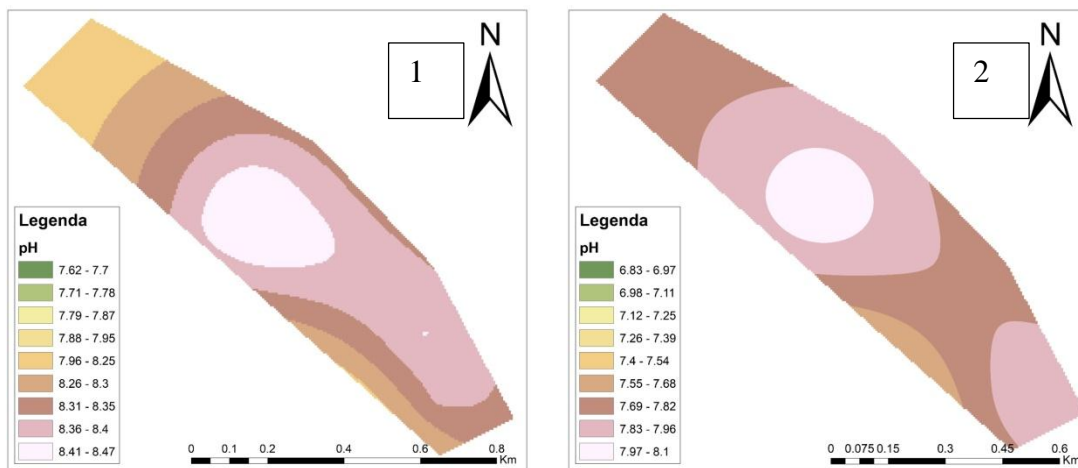


Figura 15 - Distribuição espacial do pH na água superficial em Macarretane durante a época seca e chuvosa

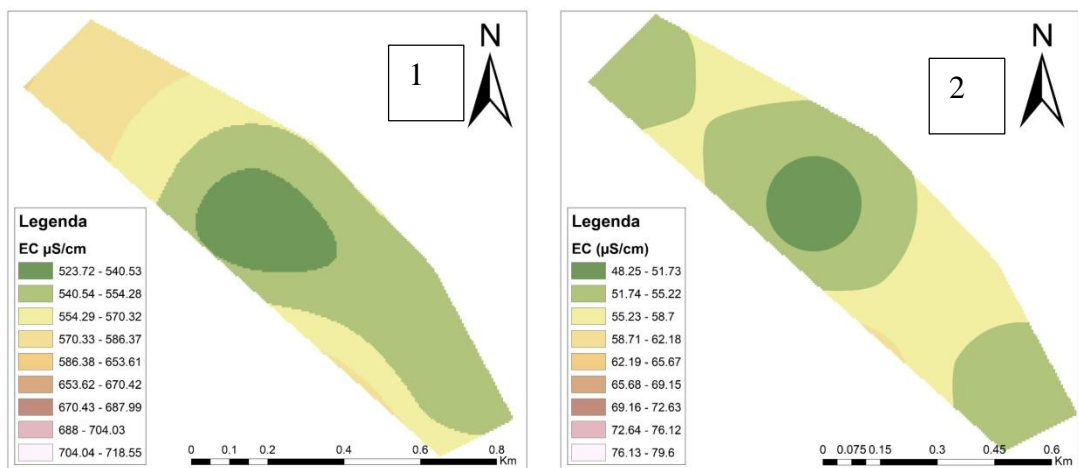


Figura 16 - Distribuição espacial da CE na água superficial em Macarretane durante a época seca e chuvosa

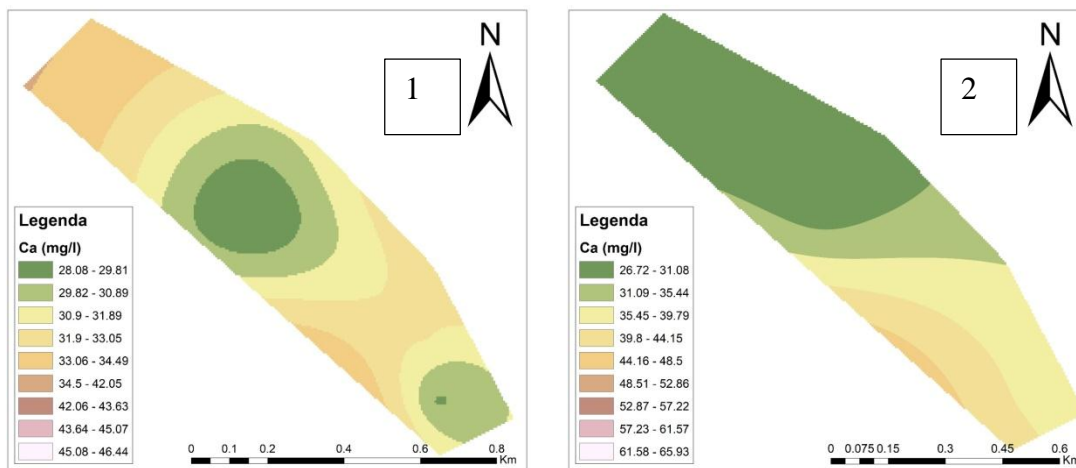


Figura 17 - Distribuição espacial do cálcio na água superficial em Macarretane durante a época seca e chuvosa

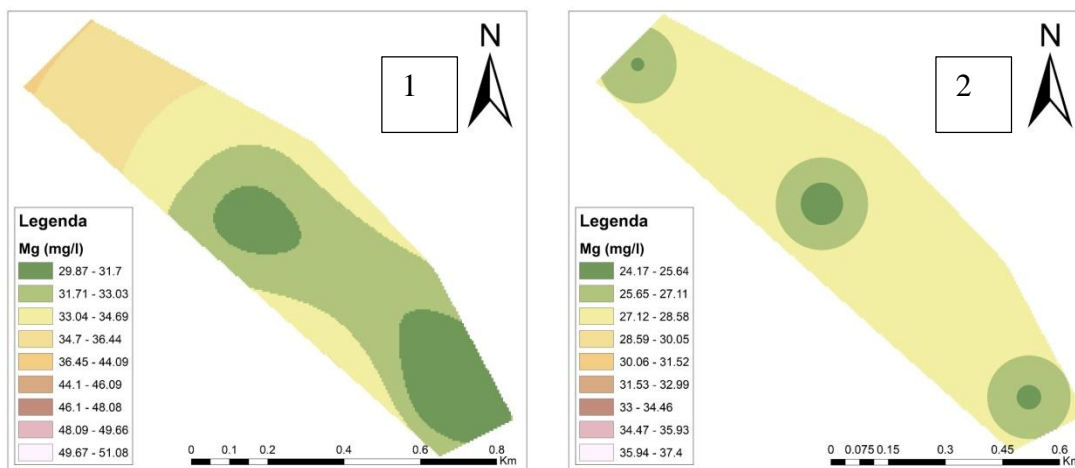


Figura 18 - Distribuição espacial do magnésio na água superficial em Macarretane durante a época seca e chuvosa

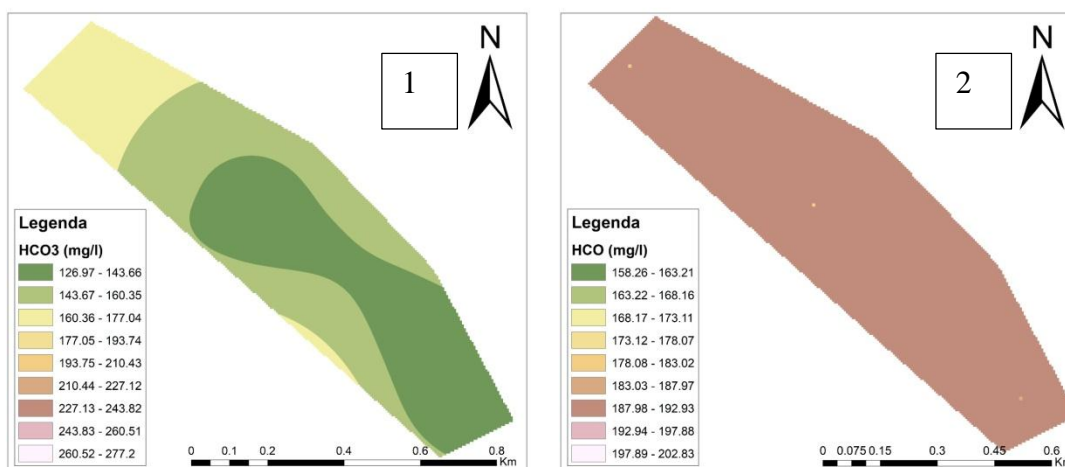


Figura 19 - Distribuição espacial do bicarbonato na água superficial em Macarretane durante a época seca e chuvosa

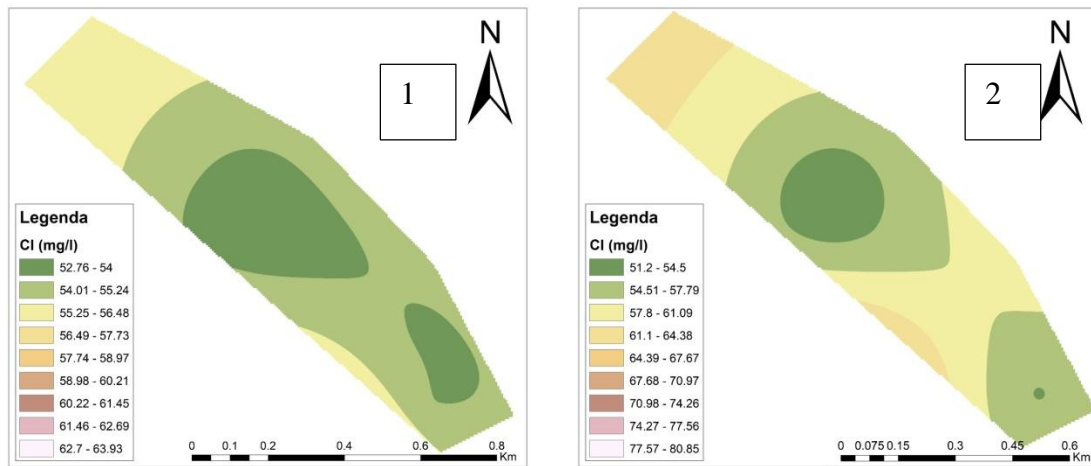


Figura 20 - Distribuição espacial do cloro na água superficial em Macarretane durante a época seca e chuvosa

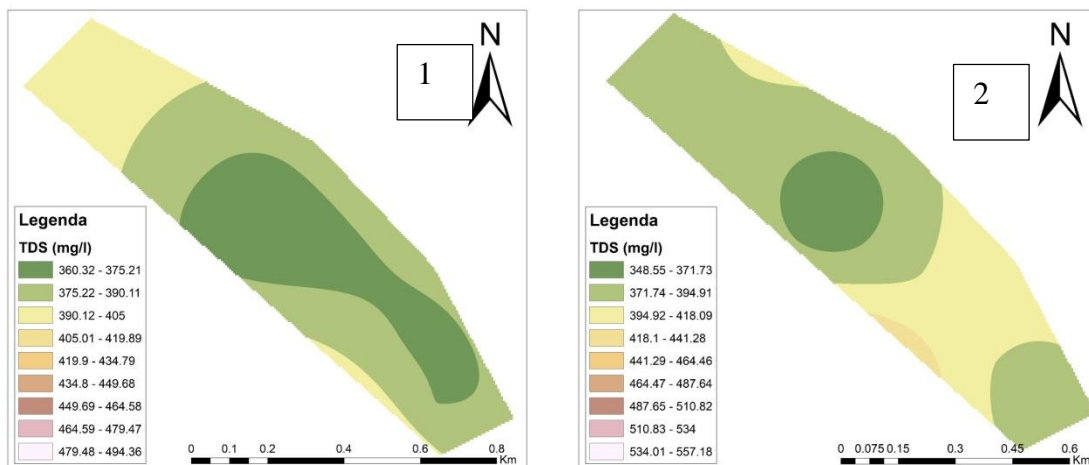


Figura 21 - Distribuição espacial do STD na água superficial em Macarretane durante a época seca e chuvosa

Analisando os resultados nessas figuras, observa-se que em Macarretane, os parâmetros físico-químicos da água superficial apresentaram variabilidade temporal não tão significativas entre si, sendo que a concentração dos iões é relativamente maior durante a época chuvosa comparando com a época seca, apesar dessas variações serem pequenas. Pois no período chuvoso, com o abastecimento do aquífero, as concentrações sofrem algum carreamento e/ou dispersão desses elementos.

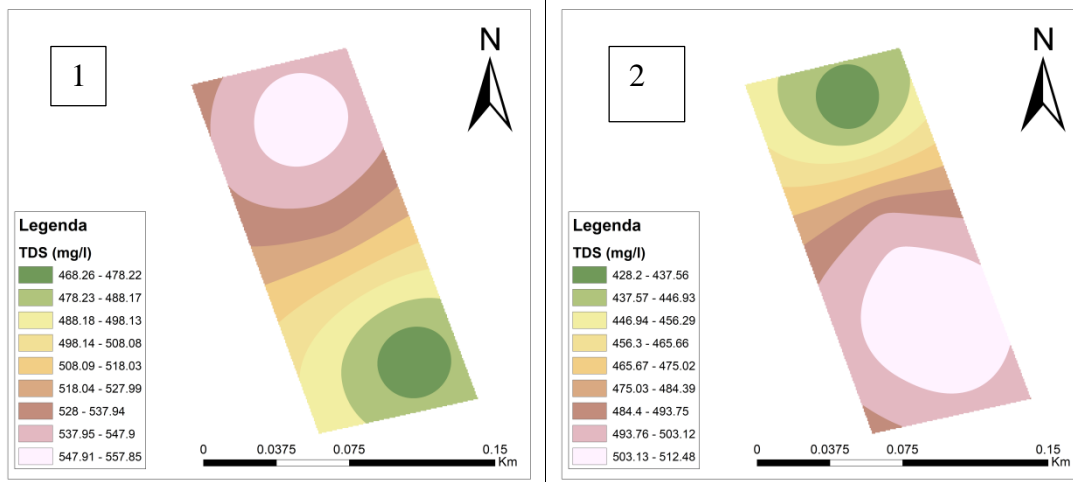


Figura 22 - Distribuição espacial dos STD na água subterrânea em Macarretane durante a época seca e chuvosa

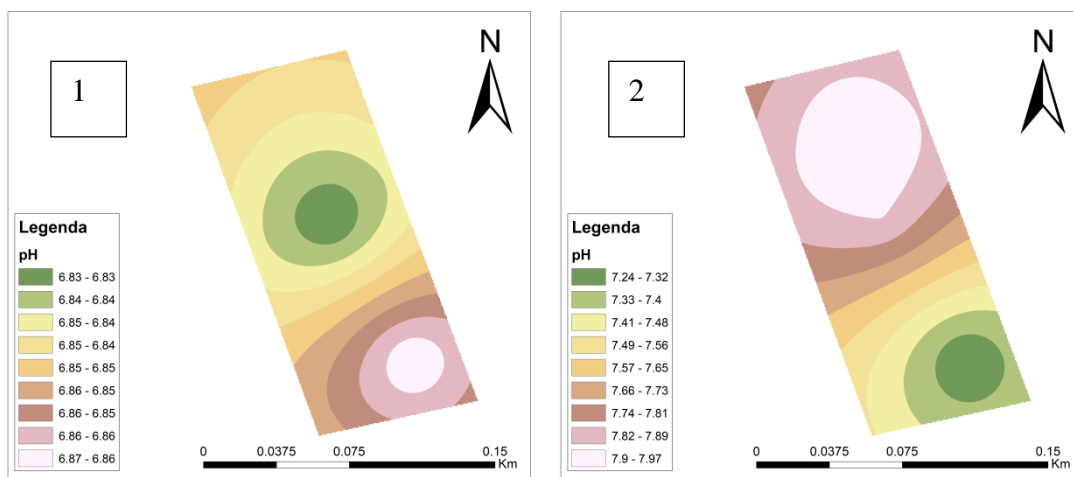


Figura 23 - Distribuição espacial do pH na água subterrânea em Macarretane durante a época seca e chuvosa

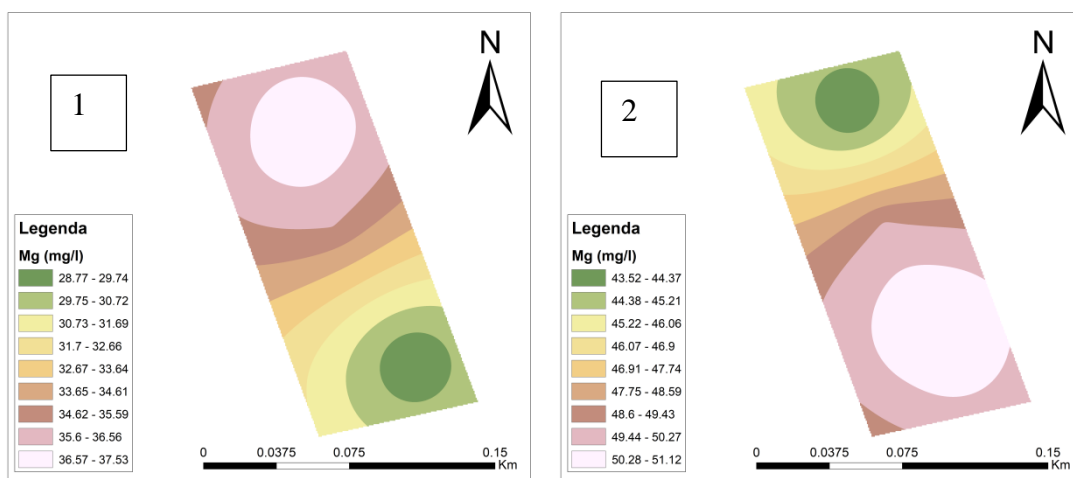


Figura 24 - Distribuição espacial do magnésio na água subterrânea em Macarretane durante a época seca e chuvosa

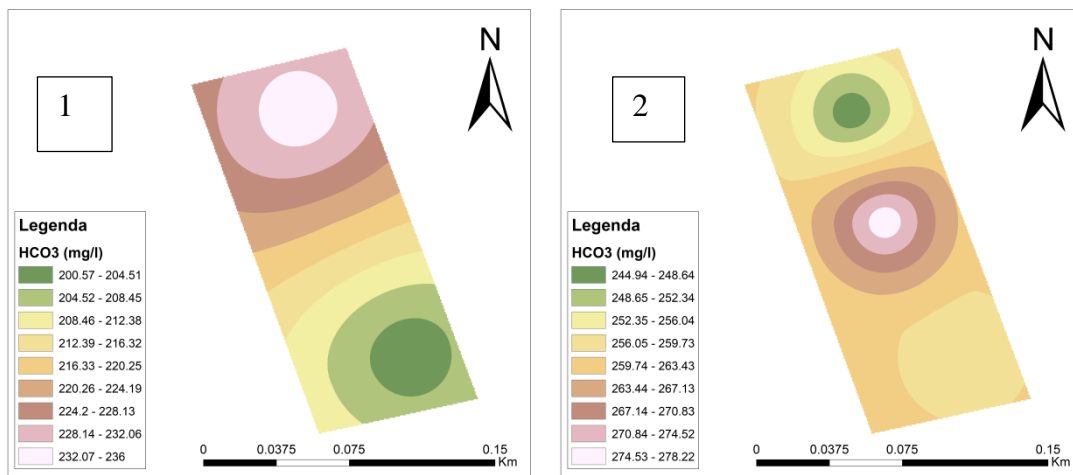


Figura 25 - Distribuição espacial do bicarbonato na água subterrânea em Macarretane durante a época seca e chuvosa

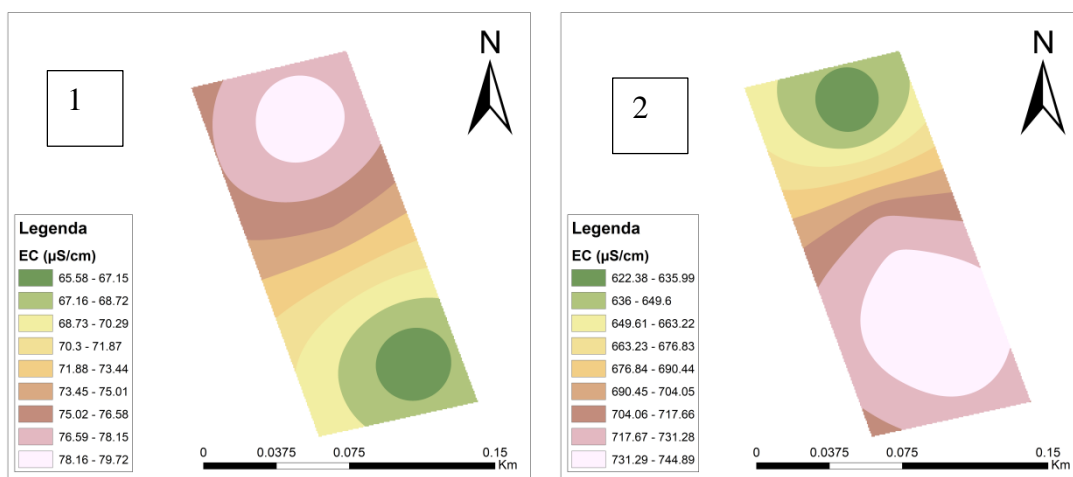


Figura 26 - Distribuição espacial da CE na água subterrânea em Macarretane durante a época seca e chuvosa

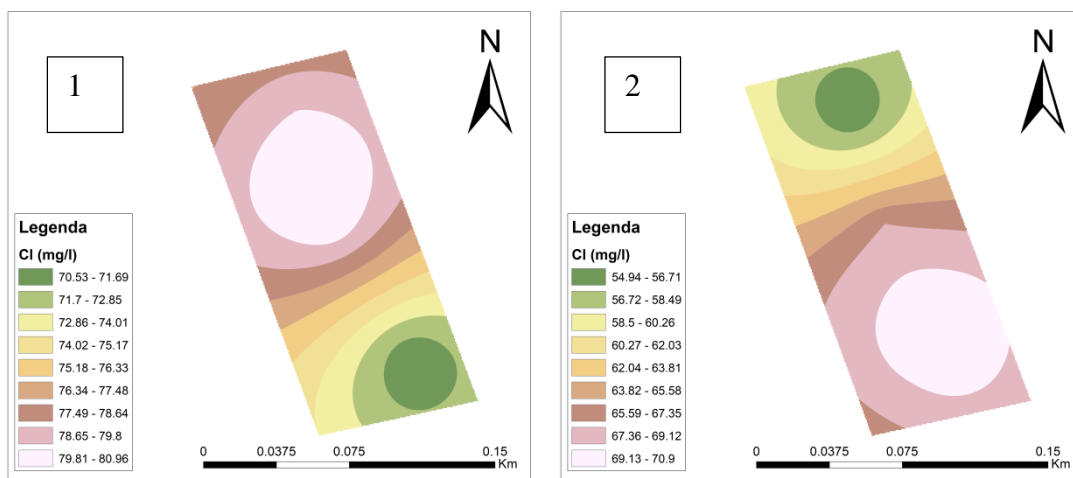


Figura 27 - Distribuição espacial do cloro na água subterrânea em Macarretane durante a época seca e chuvosa

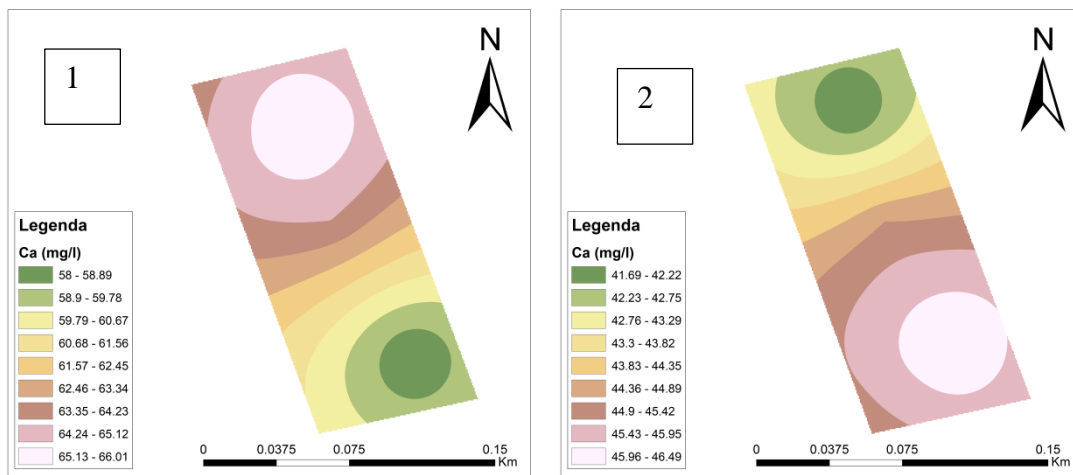


Figura 28 - Distribuição espacial do cálcio na água subterrânea em Macarretane durante a época seca e chuvosa

Ainda em Macarretane, os parâmetros físico-químicos da água subterrânea apresentaram variabilidade temporal significativas, mostrando que no local, a concentração dos íons é relativamente maior durante chuvosa, com exceção de alguns elementos como pH, Mg^{2+} e HCO_3^- , em que a concentração dos íons é relativamente maior durante seca.

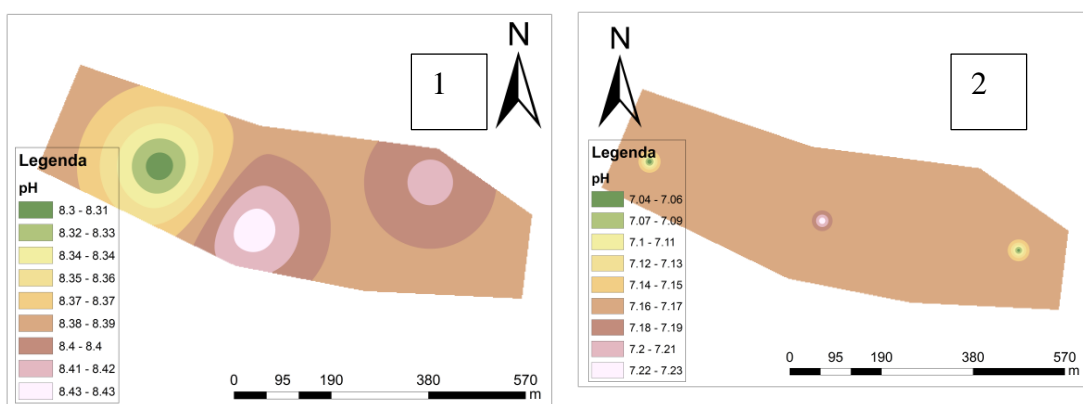


Figura 29 - Distribuição espacial do pH na água superficial em Guijá durante a época seca e chuvosa

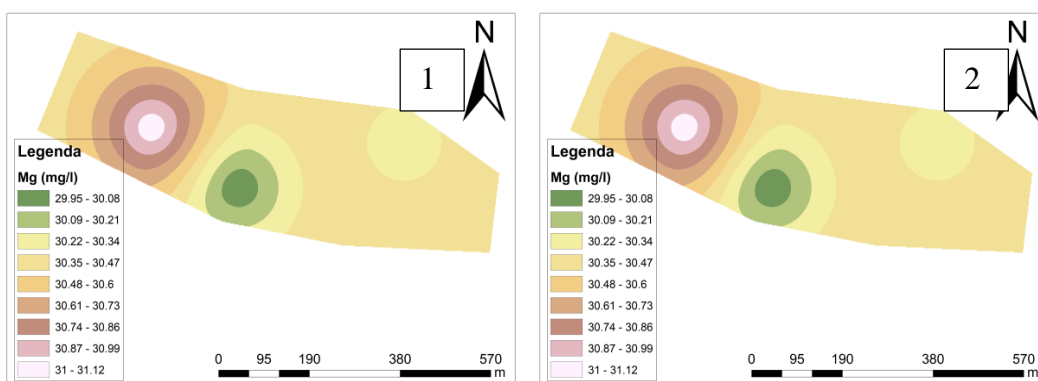


Figura 30 - Distribuição espacial do magnésio na água superficial em Guijá durante a época seca e chuvosa

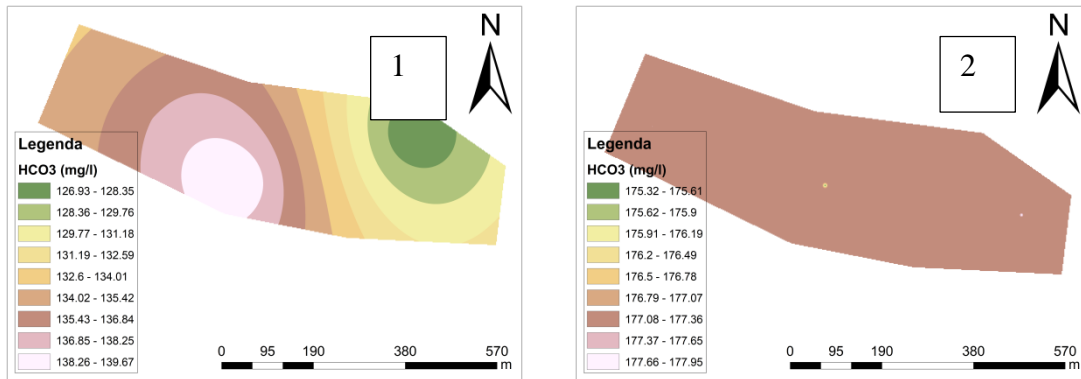


Figura 31 - Distribuição espacial do bicarbonato na água superficial em Guijá durante a época seca e chuvosa

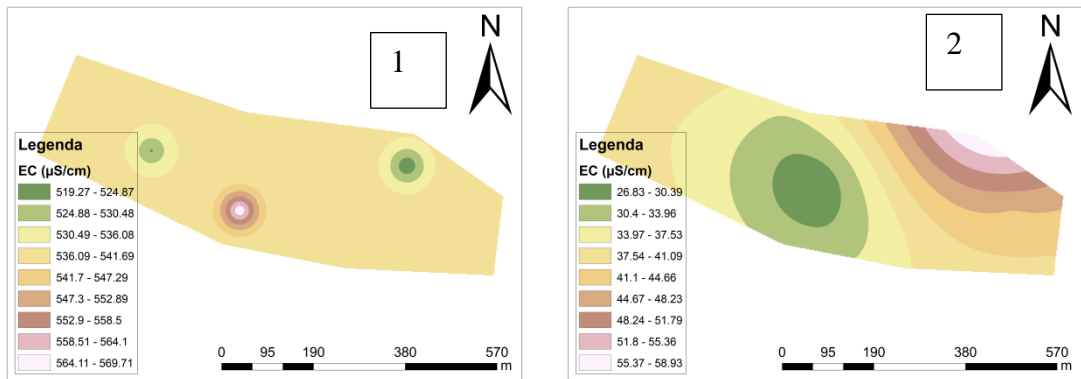


Figura 32 - Distribuição espacial da CE na água superficial em Guijá durante a época seca e chuvosa

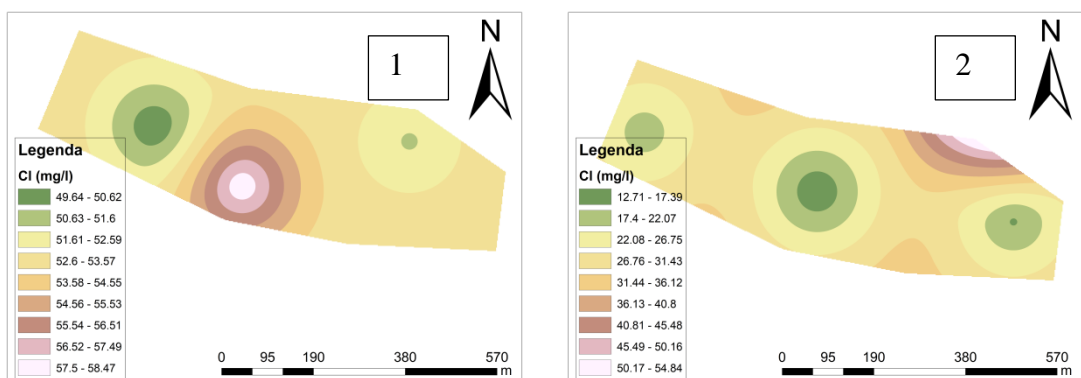


Figura 33 - Distribuição espacial do cloro na água superficial em Guijá durante a época seca e chuvosa

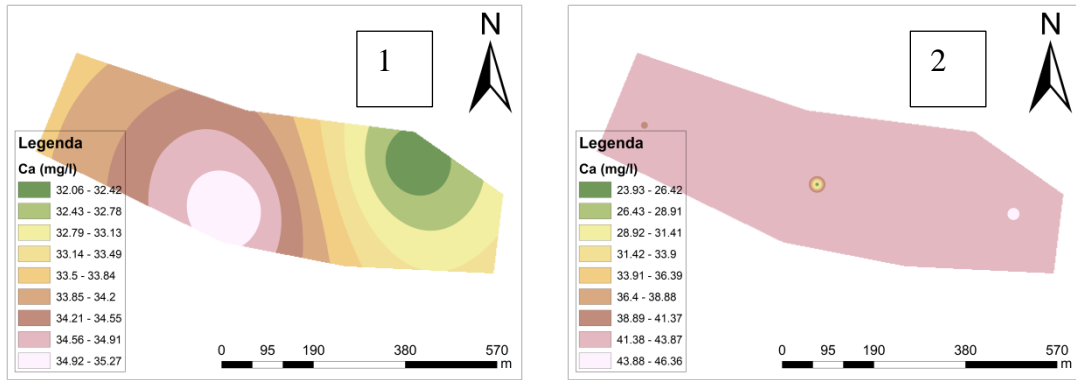


Figura 34 - Distribuição espacial da cálcio na água superficial em Guijá durante a época seca e chuvosa

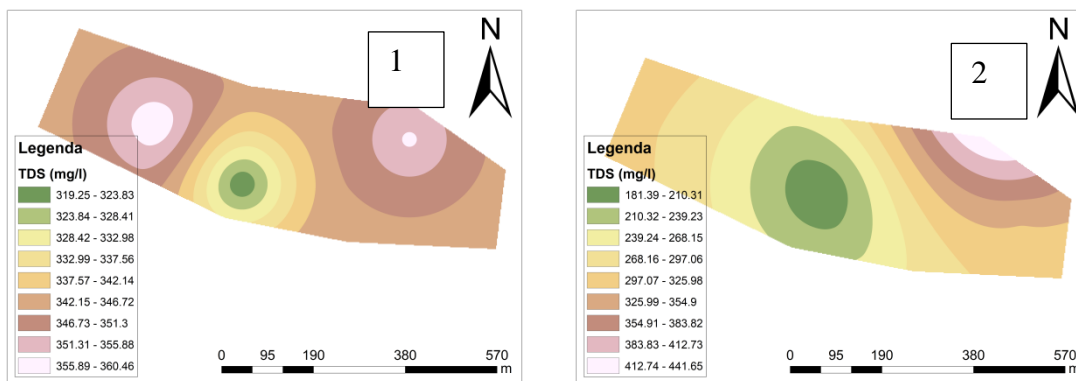


Figura 35 - Distribuição espacial dos STD na água superficial em Guijá durante a época seca e chuvosa

Os parâmetros físico-químicos da água superficial em Guijá apresentaram variações temporais um pouco significativas entre si, sendo que durante a época chuvosa a concentração dos iões é maior a época seca, com exceção do HCO_3^- que é maior no período seco o que pode indicar a presença de águas alcalinas.

5. DISCUSSÃO

5.1. Parâmetros físico-químicos da água superficial e subterrânea

Na avaliação da qualidade de água e dos processos hidroquímicos que nela ocorrem há que ter em consideração o equilíbrio entre os constituintes iônicos da água. Em análises boas e completas é de se esperar um balanço com diferenças inferiores a 2%, entretanto aceitam-se valores de até 10%, em função das condições inadequadas de análise e dos laboratórios, além da possível presença de íons não analisáveis (Kertscher et al., 1998; MANASSÉS, 2009).

Para o presente estudo os resultados de todas as amostras de água (superficiais e subterrâneas) estão dentro dos limites aceitáveis (BI<10%) e que os resultados provenientes das interpretação da composição química da água irão refletir a realidade de campo para Macarretane e apenas duas amostras em Guijá (River Well 1 e 3) apresentam um BI>10%.

Os parâmetros físico-químicos analisados nas amostras das duas fontes de água da área de estudo, encontram-se dentro dos limites aceitáveis da água usada para irrigação agrícola e consumo humano (tabela 9 e 10), facto esse que é comprovado por diferentes fontes bibliográficas citadas na tabela 13, 14, 15 e 16.

Tabela 15 - Classificação usada na derminação dos parâmetros físico-químicos da fonte de água superficial em Macarretane

Parâmetro	Mínimo	Máximo	Média	Unidade	Limites aceitáveis	% Amostras	Classificação usada
pH	7,77	8,1	7,94			100%	ALMEIDA, 2010
CE	43,85	52,81	49,82	µS/cm		100%	ALMEIDA 2010
Ca	1,248	1,926	1,48	meq/L	0-20	100%	ALMEIDA 2010
Mg	1,481	2,081	1,896	meq/L	0-5	100%	ALMEIDA 2010
Na	1,305	2,706	2,037	meq/L	0-10	100%	ALMEIDA 2010
K	0,112	0,161	0,14	meq/L	0-2	100%	ALMEIDA, 2010
HCO ₃	2,063	2,955	2,403	meq/L	1,5-8,5	100%	ALMEIDA, 2010
Cl	1,115	2,254	1,62	meq/L	0-10	100%	ALMEIDA 2010

NO3	0,06	0,31	0,202	mg/L	0-10	100%	ALMEIDA 2010
SO4	34,44	54	47,05	meq/L	0-20	100%	ALMEIDA, 2010
TDS	289,6	388,8	388,8	mg/L	200-400	100%	

Tabela 16 - Classificação usada na derminação dos parâmeros físico-químicos da fonte de água subterrânea em Macarretane

Parâmetro	Mínimo	Máximo	Média	Unidade	Limites aceitáveis	% Amostras	Classificação usada
pH	6,77	6,86	6,825			100%	ALMEIDA, 2010
CE	65,57	79,73	72,74	µS/cm		100%	ALMEIDA 2010
Ca	2,7665	5,533	3,0394	meq/L	0-20	100%	ALMEIDA 2010
Mg	2,3661	4,732	2,759	meq/L	0-5	100%	ALMEIDA 2010
Na	1,995	1,995	2,311	meq/L	0-10	100%	ALMEIDA 2010
K	0,08	0,08	0,09	meq/L	0-2	100%	ALMEIDA, 2010
HCO3	3,287	3,287	3,548	meq/L	1,5-8,5	100%	ALMEIDA, 2010
Cl	1,989	1,989	2,177	meq/L	0-10	100%	ALMEIDA 2010
NO3	0,2	0,40	0,265	mg/L	0-10	100%	ALMEIDA 2010
SO4	1,224	2,448	1,391	meq/L	0-20	100%	ALMEIDA, 2010
TDS	468,2	557,9	513,1	mg/L	200-400	100%	

Tabela 17 - Classificação usada na derminação dos parâmeros físico-químicos da fonte de água superficial em Guijá

Parâmetro	Mínimo	Máximo	Média	Unidade	Limites aceitáveis	% Amostras	Classificação usada
pH	7,04	7,23	7,107			100%	ALMEIDA, 2010
CE	34,51	42,3	72,74	µS/cm		100%	ALMEIDA 2010
Ca	1,144	2,289	1,819	meq/L	0-20	100%	ALMEIDA 2010
Mg	0,749	1,497	1,491	meq/L	0-5	100%	ALMEIDA 2010
Na	0,562	0,562	0,793	meq/L	0-10	100%	ALMEIDA 2010

K	0,076	0,076	0,0832	meq/L	0-2	100%	ALMEIDA, 2010
HCO3	1,686	0,686	2,717	meq/L	1,5-8,5	100%	ALMEIDA, 2010
Cl	0,356	0,356	0,451	meq/L	0-10	100%	ALMEIDA 2010
NO3	0,22	0,33	0,26	mg/L	0-10	100%	ALMEIDA 2010
SO4	0,093	0,0035	0,131	meq/L	0-20	100%	ALMEIDA, 2010
TDS	71,1	326,8	265,4	mg/L	200-400	100%	

Tabela 18 - Classificação usada na determinação dos parâmetros físico-químicos da fonte de água subterrânea em Gujá

Parâmetro	Mínimo	Máximo	Média	Unidade	Limites aceitáveis	% Amostras	Classificação usada
pH	7,86	8,24	7,97			100%	ALMEIDA, 2010
CE	55,64	61,07	58,1	µS/cm		100%	ALMEIDA 2010
Ca	1,497	2,994	1,716	meq/L	0-20	100%	ALMEIDA 2010
Mg	1,645	3,291	1,781	meq/L	0-5	100%	ALMEIDA 2010
Na	1,783	1,783	1,948	meq/L	0-10	100%	ALMEIDA 2010
K	0,092	0,092	0,121	meq/L	0-2	100%	ALMEIDA, 2010
HCO3	2,243	2,243	2,448	meq/L	1,5-8,5	100%	ALMEIDA, 2010
Cl	1,905	1,905	2,035	meq/L	0-10	100%	ALMEIDA 2010
NO3	0,19	0,35	0,3	mg/L	0-10	100%	ALMEIDA 2010
SO4	0,003	0,003	0,0048	meq/L	0-20	100%	ALMEIDA, 2010
TDS	355,8	426,8	379	mg/L	200-400	100%	

5.2. Determinação e comparação da qualidade de água subterrânea por época hidrológica

De acordo com (Nur et al., 2012) quando a relação apresenta valores acima da linha simétrica (equilíbrio 1:1) ocorre intemperismo de carbonatos e abaixo o intemperismo de silicatos. Em Macarretane, cerca de 85% de amostras de água subterrânea apresentam

intemperismo de carbonatos e 90% de amostras de água superficial apresentam intemperismo de silicatos. Esta diferença de processos hidroquímicos pode ser feita pelo facto de a água superficial fluir num ambiente geológico com ocorrência de sedimentos rochosos contendo argilas, o que poderá possibilitar a interação entre os minerais silicatados com a água do rio. Por outro, a existência de intemperismo de carbonatos na água subterrânea, pode ser pelo facto de, a água subterrânea na maior parte da zona a jusante em relação a região de estudo, existir sedimentos litológicos com carbonatos o que poderá facilitar o transporte dos mesmos durante o fluxo subterrâneo e respectiva ocorrência nos locais onde colectou-se as amostras. E em Gujá, e a qualidade de água nas amostras de água subterrânea e superficial é provalvemente controlada por dissolução, precipitação ou intemperismo de silicatos, com consequente formação dos iões cálcio, magnésio e o bicarbonato, um grupo iões mais abundantes na área de estudo.

Estudos realizados por (ABI, 2018) em Macarretane e Gujá, revelam que a água subterrânea que ocorre no leito seco é recarregado anualmente durante o período chuvoso, quando o rio 38 apresenta um fluxo contínuo. Entretanto, durante o processo de recarga a água do rio transporta sedimentos rochosos com argilas, areia que de forma directa tem influência nos processos hidroquímicos que controlam a qualidade de água. Em áreas com deposição de argilas haverá ocorrência de argilas que irão controlar a qualidade de água quando os minerais silicatados interagirem com a água.

5.2.1. Classificação da qualidade de água para consumo humano nos períodos chuvoso e seco

Com os resultados obtidos foi feita uma comparação com os valores máximos permitidos encontrados no diploma ministerial nº 180/2004 e Organização Mundial da Saúde que dispõe sobre o controle e vigilância da qualidade da água para o consumo humano.

Nas tabelas 7, 8 9 e 10 é possível observar que de acordo com a resolução vigente no País, dentro da área de estudo, todos os parâmetros estão dentro do limite, classificando a água como apta para o consumo humano durante toda a época hidrológica.

Segundo (Gasparotto, 2011) as variações nos valores de pH diante as águas superficiais ou subterrâneas podem ter indícios das ações humanas como lançamento de efluentes domésticos e industriais ou indícios naturais como fotossíntese e dissolução de rochas.

A análise de cloretos é uma forma de obter um importante resultado, pois ele nos permite encontrar o teor de sal presente na água de uma forma rápida e fácil (SANTOS & FELICIANO, 2008). Nos locais de amostragem, os resultados de cloretos apresentaram valores dentro do permitido segundo a legislação moçambicana revelando que a salinidade da água, neste caso, está apta ao consumo.

5.2.2. Faces hidroquímicas na água

Com base nas amostras de água foi determinada a sua tipologia usando o diagrama de Piper, esse que por sua vez permitiu classificar a água como sendo do tipo bicarbonatada cálcica ou magnésiana (Ca/Mg-HCO₃) em toda área de estudo.

De acordo com (Reginato & Strieder, 2004), o campo predominante das águas bicarbonatadas cálcicas ou magnésianas está relacionado com a composição química das litologias que hospedam o sistema aquífero. Essa relação evidencia que a fonte original dos cátions Ca²⁺, Na⁺ e Mg²⁺ está associada com a alteração dos silicatos que constituem as rochas caracterizadas por um enriquecimento de cálcio e magnésio do topo para a base do aquífero, comprovando a existência de um controle litoquímico.

5.2.3. Configuração geométrica da relação iônica na água

As figuras geométricas representadas no diagrama de Stiff mostram diferentes concentrações de íons na água. As amostras representativas da fonte de água subterrânea, apresentam maiores concentrações dos íons Ca²⁺, Mg²⁺ e HCO₃⁻, enquanto as figuras geométricas dos resultados obtidos com base nas amostras da água superficial, apresentam maiores concentrações dos íons Na⁺ e HCO₃⁻ para os dois locais. Apesar das diferenças acima citadas tanto as amostras das águas subterrâneas, como as das águas superficiais, a água subterrânea em Guijá, foram observadas similiaridade de concentração elevada de HCO₃⁻ o cátion Ca²⁺ mostra-se com tendência de elevada concentração.

A diferença na concentração dos íons também depende do volume da água do aquífero, tipo de ambiente geológico e formas de ocupação, características hidrogeológicas das camadas ou corpos aquíferos, características inerentes a água (pH, solubilidade, agressividade, entre 39 outros), reações químicas e biológicas que acontecem dentro do próprio sistema de fluxo subterrâneo e características climáticas como pluviometria, evaporação, evapotranspiração e variação da temperatura (Bortolin et al., 2014).

5.2.4. Classe de qualidade da água subterrânea para irrigação agrícola nos períodos seco e chuvoso

Com os resultados laboratoriais obtidos com base nas duas fontes de água, o diagrama da USSL permitiu classificar a água para irrigação em duas classes distintas, tendo como a primeira classe C2-S1 e a segunda C1-S1.

De acordo com (Guedes et al., 2016) as águas que apresentam uma concentração menor a 10 meq/L para RAS são consideradas boas para irrigação não apresentando um risco de sodicidade para o solo, a classe de água C2-S1 é classificado com um médio risco e salinidade e baixo risco de sodicidade, podendo ser usada para irrigação com pouca probabilidade do solo ter níveis perigosos de sodicidade. As águas de Classe C1, podem ser usadas para irrigar culturas na maioria dos solos, com pequenos riscos quanto a salinização, salvo se a permeabilidade deste for extremamente baixa. As águas de classe C2, devem ser usadas com precaução e de preferência em solos siltoarenosas, siltosas e areno- argilosas, quando houver uma lixiviação moderada os vegetais de franca tolerância salina podem ser cultivados, como por exemplo milho na maioria dos casos sem perigo. As águas de classe S1, podem ser utilizados para quase todas os solos com baixo risco de formação de teores nocivos de sódio. A classe C2S1 encontrada nos dois locais (Macarretane e Gujá) apresenta qualidade de água considerada boa, enquanto que a classe de C1S1 (Gujá), excelente.

5.3. Mapas de qualidade de água subterrânea e o grau de variação hidroquímica

Considerando os padrões de potabilidade, os demais parâmetros analisados estiveram de acordo com o preconizado pela legislação vigente para os demais usos nos dois locais.

A análise espacial evidenciou que as maiores concentrações dos parâmetros: condutividade elétrica, STD, cálcio, magnésio, cloreto e bicarbonato estão na água subterrânea em Macarretane para época chuvosa e as maiores concentrações dos parâmetros cloro, Ph, cálcio e bicarbonato para época seca em Gujá. Portanto, esses parâmetros variam de acordo com a formação geológica do local.

6. CONCLUSÃO

As águas subterrâneas desempenham um papel decisivo no desenvolvimento agrícola, particularmente nas regiões áridas e semiáridas. Portanto, sua qualidade e adequação para irrigação são importantes. No presente estudo, os principais íons da água subterrânea e superficial foram analisados para uma melhor caracterização da variabilidade temporal dos parâmetros físico-químicos no leito seco do rio Limpopo.

Os parâmetros físico-químicos, entre os dois locais apresentaram variações significativas entre si, sendo que em Macarretane, a concentração dos íons na água subterrânea é maior em relação à Guija. Na água superficial, a concentração dos íons é maior em Guijá em relação a Macarretane. Assim sendo, os elementos cuja concentração apresentou uma ligeira variabilidade foram Ca^{2+} , Cl^- , EC, HCO_3^- e STD.

Para o consumo humano a água nos dois locais (Macarretane e Guijá), de acordo com os parâmetros químicos, segundo as normas da MISAU foi classificada como apta para o consumo humano e segundo a legislação da OMS a maioria dos parâmetros químicos esta dentro dos limites aceitáveis nos dois locais com exceção do Na^+ , Mn e Cl^- que apresentaram valores altos podendo assim constituir um risco para a saúde.

Para irrigação a água é classificada em duas classes (C2-S1 e C1-S1), sendo que a classe C2-S1 apresenta-se como a mais abundante com cerca de 90%. A classe C2-S1 para os dois locais, apresenta um teor médio de salinidade enquanto que C1-S1 (Guijá) apresenta baixo de salinidade. De uma forma geral ambas classes de qualidade de água apresenta baixo risco do teor de sodicidade o uso da água na irrigação em pequena escala das culturas não irá causar problemas na estrutura do solo.

Entretanto as águas subterrâneas do leito seco do rio Limpopo são adequadas para a irrigação e não apresentam variabilidade de qualidade durante o período seco e chuvoso do ano.

Os resultados deste estudo fornecem orientação para uma gestão das águas subterrâneas como fonte alternativa para fins de irrigação e consumo humano na bacia do Limpopo. No entanto, as limitações deste estudo são que não aplica os metais para avaliar a qualidade da água para uso agrícola e abastecimento humano, portanto, mais pesquisas serão necessárias.

7. RECOMENDAÇÃO

Com presente estudo de variabilidade hidroquímica está evidente que o sistema de aquífero alluvionar apresenta parâmetros físico-químicos dentro dos padrões de qualidade de água para o consumo humano e irrigação agrícola. Contudo, devido a vulnerabilidade que os aquíferos não confinados são sujeitos (caso concreto da área de estudo) recomenda-se que sejam feitas outras pesquisas adicionais para melhor garantir a segurança na qualidade de água para uso múltiplo. Tais pesquisas devem avaliar o efeito dos assentamentos comunitários nas margens do rio Limpopo, a prática da agricultura intensiva assim como outras actividades correlacionadas, quanto a sua contaminação microbiológica e química, incluindo a respectivas variabilidade durante as épocas hidrológicas (seca e chuvosa).

8. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ABAS. (2008). *Águas Subterrâneas – O que são? – ABAS.*
- ABI, A. (2018). *Assessing the groundwater dynamics, recharge and storage potential in the Limpopo river sand deposits.*
- Aboo, V. C. (2013). *Consumo de Águas Minerais Naturais e de Nascente - Causas e Impacte para o Meio Ambiente: Estudo de Caso da Cidade de Nampula, 2009-2011.*
- ABREHA, A. G. (2014). *HYDROGEOCHEMICAL AND WATER QUALITY INVESTIGATION ON IRRIGATION AND DRINKING WATER SUPPLIES IN THE MEKELLE REGION, NORTHERN ETHIOPIA.*
- ALMEIDA, O. A. de. (2010). *Qualidade da água de irrigação.* Embrapa Mandioca e Fruticultura.
- BASTOS, M. L. (2013). *CARACTERIZAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA – ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE CRUZ DAS ALMAS – BAHIA.*
- Bortolin, T. A., Reginato, P. A. R., Leão, M. I., & Schneider, V. E. (2014). Hidrogeologia e hidroquímica dos aquíferos fraturados associados às rochas vulcânicas ácidas no Município de Carlos Barbosa (RS). *Revista Ambiente & Água*, 9, 55–67.
- Capucci, E., Martins, A. M., Mansur, K. L., & Monsorens, A. L. M. (2001). *Poços tubulares e outras captações de águas subterrâneas: Orientação aos usuários.* Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável - SEMADS.
- CELLIGOI, A. (2011). *Considerações sobre análises químicas de águas subterrâneas.* Londrina.
- CERQUEIRA, F. C. (2014). *CERQUEIRA, F. C. (2014). Hidroquímica e vulnerabilidade natural à contaminação da água subterrânea no município de São João da Barra, RJ. Rio de Janeiro: UENF*
- Chambal, N. E. S. (2020, dezembro). *AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS HIDROQUÍMICOS E QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA NO LEITO SECO DO RIO LIMPOPO PARA IRRIGAÇÃO AGRÍCOLA EM MACARRETANE.*

- CHAVES, A. D. C. G. (2014). *Caracterização das águas subterrâneas usadas na irrigação de hortaliças em comunidades rurais no município de POMBAL/PB. Universidade Federal De Campina Grande, POMBAL-PB.*
- Chilundo, M., Kelderman, P., & O’Keeffe, J. H. O. (2008). Design of a water quality monitoring network for the Limpopo River Basin in Mozambique. *Physics and Chemistry of the Earth.*
- Cordeiro, G. G. (2001). *Qualidade de Água para Fins de Irrigação (Conceitos básicos e práticos).*
- DE FREITA, F., & CRONEL, A. (2010). *Caracterización Hidrogeoquímica de las aguas subterráneas del acuífero-Las piedras. Venezuela: S.n.*
- Duker, A., Cambaza, C., Saveca, P., Ponguane, S., Mawoyo, T. A., Hulshof, M., Nkomo, L., Hussey, S., Van den Pol, B., Vuik, R., Stigter, T., & van der Zaag, P. (2020). Using nature-based water storage for smallholder irrigated agriculture in African drylands: Lessons from frugal innovation pilots in Mozambique and Zimbabwe. *Environmental Science & Policy, 107*, 1–6.
- Fallatah, O. (2018). *Assessing Groundwater Quantity and Quality Variations in Arid Regions Due to Climate Changes and Anthropogenic Factors: Case Study Saudi Arabia* [University of Rhode Island]. <https://doi.org/10.23860/diss-fallatah-othman-2018>
- FAO. (2004). *Drought impact mitigation and prevention in the Limpopo River Basin, Land and water discussion paper.*
- FEITOSA, F. A., FILHO, J. M., FEITOSA, E. C., & DEMETRIO, J. G. (2008). *HIDROGEOLOGIA. Conceito e Aplicações. Rio de Janeiro: CPRM. Serviço geológico do Brasil.*
- Filho, F. C. de M., Ramos, J. F., Silva, A. P. de S., & Velardez, G. F. (2020). Avaliação dos parâmetros físico-químicos de águas de diferentes fontes na região do Curimataú Paraibano / Evaluation of physical-chemical parameters of waters from different sources in the region of Curimataú Paraibano. *Brazilian Journal of Development, 6*(10), Art. 10.
- Formiga, A. C. de S. (2015). *Variação espaço/temporal da qualidade da água subterrânea do Município Juazeiro do Norte – Ceará.*
- Gasparotto, F. A. (2011). *Avaliação Ecotoxicológica e Microbiológica da Água de Nascentes Urbanas no Município de Piracicaba-SP* [Text, Universidade de São Paulo].

- Gastaldini, M. C. C., Mendonça, A. S. F., Paiva, J. B. D., & Paiva, E. (2001). Conceitos para a avaliação da qualidade da água. *PAIVA, JBD; PAIVA, EMCD Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas. Porto Alegre: ABRH*, 428–451.
- Guedes, T., Santos, J., Feitosa, A., & Nogueira, D. (2016). Qualidade das águas subterrâneas e superficial da comunidade de Barro Vermelho, município de Aurora, Ceará, para fins de irrigação. *Tecnologia e Ciência Agropecuária*, 10, 37.
- Haritash, A. K., Gaur, S., & Garg, S. (2014). *Assessment of water quality and suitability analysis of River Ganga in Rishikesh*. *Appl Water Sci*.
- Herbert, R., Barker, J., Davies, J., & Katai, O. (1997). *Exploiting Groundwater from Sand Rivers in Botswana Using Collector Wells*.
- Hipólito, J. R., & Vaz, Á. C. (2011). *Hidrologia e Recursos Hídricos, João Reis Hipólito—Livro—Bertrand*.
- Hussey, S. W. (2007). *Water from sand rivers: Guidelines for abstraction*. Loughborough University.
- Kazi, T. G., Arain, M. B., Jamali, M. K., Jalbani, N., Afridi, H. I., Sarfraz, R. A., Baig, J. A., & Shah, A. Q. (2009). Assessment of water quality of polluted lake using multivariate statistical techniques: A case study. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 72(2), 301–309.
- Krol, M. S., & Bronstert, A. (2007). Regional integrated modelling of climate change impacts on natural resources and resource usage in semi-arid Northeast Brazil. *Environmental Modelling & Software*, 22(2), 259–268.
- Libânio, M. (2010). *Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água*.
- MAE. (2005). *PERFIL DO DISTRITO DE PERFIL DO DISTRITO DE CHÓKWÈ PROVÍNCIA DE GAZA*.
- MANASSÉS, F. (2009). *CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA DA ÁGUA SUBTERRÂNEA DA FORMAÇÃO SERRA GERAL NA REGIÃO SUDOESTE DO ESTADO DO PARANÁ*.
- McNeil, V. H., Cox, M. E., & Preda, M. (2005). Assessment of chemical water types and their spatial variation using multi-stage cluster analysis, Queensland, Australia. *Journal of Hydrology*, 310(1), 181–200.

- MELO, N. Z. (2014). *Considerações hidroquímicas da água de poços que exploram o sistema aquífero serra geral (SASG) NAREGIÃO DE LONDRINA-PR. LONDRINA: UTFP.*
- Mendes, B. S., & Oliveira, J. S. (2004). *Qualidade da Água para Consumo Humano.* Lidel.
- MISAU. (2004). *Diretrizes para a qualidade da água potável: Recomendações (Vol. 1).*
- Moreno Merino, L., Aguilera, H., González-Jiménez, M., & Díaz-Losada, E. (2021). D-Piper, a modified piper diagram to represent big sets of hydrochemical analyses. *Environmental Modelling & Software*, 138, 104979.
- Mota, S. (2003). Introdução à engenharia ambiental. *Introdução à engenharia ambiental*, 419–419.
- Mpala, S. C., Gagnon, A. S., Mansell, M. G., & Hussey, S. W. (2016). The hydrology of sand rivers in Zimbabwe and the use of remote sensing to assess their level of saturation. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 93, 24–36.
- Nur, A., Ishaku, J. M., & Yusuf, S. N. (2012). Groundwater Flow Patterns and Hydrochemical Facies Distribution Using Geographical Information System (GIS) in Damaturu, Northeast Nigeria. *International Journal of Geosciences*, 3(5), Art. 5.
- Oniward, S., Gumbo, T., Gabriel, S., Rusere, F., Ndeketeya, A., & Moyo, D. (2011, janeiro 1). *Evaluation of the Sand Abstraction Systems for Rural Water Supply: The case of Lupane District, Zimbabwe.*
- Perreira, L., Santiago, M. M. F., Frischkorn, H., & De Araújo, J. C. (2006). *A salinidade das águas superficiais e subterrâneas na bacia da gameleira, município de Aiuaba-CE. Águas Subterrâneas.*
- Prescott, L. M., Harley, J. P., & Klein, D. A. (2002). *Microbiology 5th Edition.*
- R. CUSTODIO, E.-L. (1996). *SUBTERR HIDROLOGIA. TOMO I (2ª edição).* OMEGA.
- Reginato, P. A. R., & Strieder, A. J. (2004). CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA DOS AQUIFEROS FRATURADOS DA FORMAÇÃO SERRA GERAL NA REGIÃO NORDESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. *Águas Subterrâneas.*
- Ribeiro, G., Maia, C., & Medeiros, J. (2005). Uso da regressão linear para estimativa da relação entre a condutividade elétrica e a composição iônica da água de irrigação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 9.

- ROSC, F. da S. C. para os D. da C. (2013). *O Direito à Água e ao Saneamento como um Pilar Chave para o Desenvolvimento Humano, Moçambique.*
- SADC, G. M. I. (2017). *Windows Interpretation System for the Hydrogeologists (WISH) Training COMING SOON.*
- Santiago, M. M. F., Texeira, Z. A., Frischkorn, H., & Mendes filho, J. (2002). *As águas subterrâneas no cristalino do Semi-árido no Ceará—Brasil: O Município de Tauá.*
- Santos, J. F., Pulido-Calvo, I., & Portela, M. M. (2010). *Variabilidade temporal e espacial das secas em Portugal Continental.*
- Saveca, P. S. L., Lukas, E., & Gomo, M. (2017). *SPATIAL VARIABILITY OF PHYSICOCHEMICAL PARAMETERS AND SUITABILITY OF GROUNDWATER FOR DRINKING IN THREE ADMINISTRATIVE ZONES OF THE CHÓKWÈ DISTRICT, MOZAMBIQUE .*
- Silva, D. F. D. C. L. D. B. (2006). *Apostila de Hidrologia | Ciclo da Água | Hidrologia.*
- Souza, T. S. de, & Nascimento, P. dos S. (2020). ANÁLISE DA VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA NA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO RECÔNCAVO SUL (BA). *Revista Brasileira de Climatologia*, 27(0), Art. 0.
- Stiff, H. A., Jr. (1951). The Interpretation of Chemical Water Analysis by Means of Patterns. *Journal of Petroleum Technology*, 3(10), 15–3.
- Vilanculo, V. F. (2021, dezembro). *ESTUDO DA VARIABILIDADE HIDROQUÍMICA DA ÁGUA SUBTERRÂNEA NO LEITO SECO DO RIO LIMPOPO E O SEU APROVEITAMENTO NA IRRIGAÇÃO EM GUIJÁ.*
- WHO. (2004). *World Health Organization (2004) Guidelines for drinking-water quality. 1.*