



FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Licenciatura em Geologia Aplicada

Projecto Científico

**CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA E AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE
INTRÍNSECA DO SISTEMA AQUÍFERO DA REGIÃO METROPOLITANA DO
GRANDE MAPUTO APLICANDO O MODELO DRASTIC**

Salomão Daniel Muchuane

Maputo, 2024



FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
Licenciatura em Geologia Aplicada

Projecto Científico

**CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA E AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE
INTRÍNSECA DO SISTEMA AQUÍFERO DA REGIÃO METROPOLITANA DO
GRANDE MAPUTO APLICANDO O MODELO DRASTIC**

Salomão Daniel Muchuane

Supervisor: Professor Doutor Elónio Muiuane
Co-supervisor: Dr. Agostinho Vilanculos (DNGRH)

Maputo, 2024

Dedicatória

*Ao meu ante querido pai **Daniel Muchuane**, que em vida deu tudo de bom e todo o apoio para a minha escolarização, a minha mãe **Rosa Ernesto Nhabanga** por todo incentivo, paciência e dedicação.*

*Aos meus antes queridos irmãos **Arnaldo, José Américo, Laura e Venâncio** por tudo que representaram na minha vida.*



Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço a Deus pela vida e por ter permitido que esse passo tão importante em minha vida se realizasse. Agradeço aos meus pais que de forma incansável e sem pedir nada em troca nunca mediram esforços para que eu me formasse e durante o processo da formação serviram muitas vezes de inspiração e força para que eu não desistisse. Pelos valores e ensinamentos que me foram transmitidos que serviram como guia para alcançar todas as metas e objectivos traçados.

Aos Meus irmãos, que sempre se demonstraram amigos e dispostos a ajudar no que precisasse, pelo apoio moral e pela partilha de experiencias que fizeram com que escolhesse o melhor caminho. A minha parceira Rosa Orlando, pelo companheirismo e apoio diário que me motivam a querer crescer tanto na vida pessoal como profissional. Um agradecimento especial aos meus supervisores Prof. Dr. Elónio Muiuane e Dr. Agostinho Vilanculos pelo apoio e acompanhamento durante a realização do trabalho e pela transmissão dos conhecimentos que foram de extrema importância para a realização do trabalho.

Aos técnicos da Direcção Nacional de Gestão de Recursos Hídricos (DNGRH) em especial a dra. Filoca que apesar de terem suas ocupações disponibilizaram parte do seu tempo para ajudar no trabalho. Ao corpo docente do Departamento de Geologia e em especial ao Dr. Farisse pelo apoio, aos meus colegas de turma com quem partilhei os melhores momentos durante a formação, em especial aos que faziam parte de meu grupo de estudo o Nevasse Mabota, André Vilanculos, Agostinho Niquisse, Roberto Timba, Venâncio Taimo, Maria Adelaide, Elídio Massuanguanhe, Massinga, Leonardo Xerinda, Luis Nhancoengue, Sandra Sitóe, Zibane, Abilio Manjaze, Valter Mabasso, Egidio Govate, Subtílio, Isalina, Ângelo Chemane, Temóteo, Isabel, Magaduie, Lembura, José Bata, Luís Junior, Sendela, Siquela e Angelino Zucua com os quais desenvolvi laços de amizade e que serviram de ombro amigo nos momentos mais difíceis na UEM.

Agradeço também a minha família em geral, que são os melhores que podia ter e sempre me acompanharam em todos os momentos. Agradeço aos técnicos de laboratório, Biblioteca e do Registo Académico do Departamento de Geologia da UEM pela hospitalidade e simpatia.

À Direcção da DNGRH por disponibilizar parte muito importante do material usado para o estudo e a todos funcionários em geral que se demonstraram sempre aptos a ajudar.

A todos que directa ou indirectamente contribuíram para a realização deste trabalho vai o meu muito Kanimambo.

Declaração de Honra

*Eu, **Salomão Daniel Muchuane**, declaro por minha honra, que este trabalho científico é resultado da minha investigação pessoal e das orientações dos meus supervisor e co-supervisor e que o seu conteúdo é original e todas as fontes consultadas estão devidamente mencionados tanto no texto como na sua bibliografia final.*

Declaro ainda que este trabalho nunca foi feito e nem apresentado nesta presente Instituição para obtenção de qualquer grau académico.

O candidato

(Salomão Daniel Muchuane)

Resumo

Este trabalho tem como enfoque caracterizar e avaliar o estado actual da vulnerabilidade do sistema aquífero da RMGM, assim como mapear as zonas de risco. A região é constituído por um aquífero freático e um aquífero semi-confinado que compõem o sistema aquífero inserido na bacia sedimentar Meso-Cenozóica do Sul de Moçambique, formada pela orogenia associada ao sistema de rift da África Oriental com orientação N-S. O material aquífero é formado predominantemente por dunas costeiras e dunas do interior, com zona não saturada dominada por materiais arenosos e argilosos, eventualmente, arenosos finos.

No presente estudo, aplicou-se o Modelo DRSTIC para o cálculo da vulnerabilidade natural do sistema aquífero, pois constitui um sistema padronizado de avaliação da vulnerabilidade de águas subterrâneas a partir de parâmetros hidrogeológicos; tendo sido avaliados sete (7) parâmetros importantes, nomeadamente: **D**- Profundidade da água (Depth to water); **R**-Recarga (Net Recharge); **A**-Material do Aquífero (Aquifer media); **S**-Tipo de solo (Soil media); **T**-Topografia (Topography); **I**-Material da zona vadosa (Impact of the Vadose zone media) e **C**-Condutividade hidráulica (Hydraulic Conductivity of the aquifer).

Com o levantamento, compilação e análise destes parâmetros, foram produzidos mapas com recurso ao software informático ArcGIS versão 10.2, que permitiu identificar e mapear o grau de susceptibilidade à poluição do sistema aquífero, em diferentes pontos da área de estudo, tendo sido detectados Quatro categorias de vulnerabilidade nomeadamente, *reduzida, média, elevada e muito elevada*.

A metodologia revelou que a vulnerabilidade natural do aquífero freático da Região do Grande Maputo é média nas áreas arenosas, baixa nas áreas argilosas, alta e muito alta para as áreas em que não ocorre a camada confinante. Foram interpretados 749 dados de piezómetros correspondentes às actividades de monitoramento, pesquisas realizadas nos últimos 5 anos pela DNGRH e perfis hidrogeológicos disponíveis em projectos de monitoramento realizados pela ARA-Sul, (2012); espera-se que os resultados do estudo feito desempenhem um papel fundamental no auxílio à gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos, no planeamento, práticas conservacionistas, monitoramento visando à definição de áreas que devem ser protegidas, de modo a garantir, a integridade dos sistemas aquíferos em termos de quantidade e qualidade da água na área de estudo bem como servem de base para estudos futuros.

Palavras Chave: Vulnerabilidade, Aquífero, SIG, DRASTIC.

LISTA DE ABREVIATURAS

ARA-SUL, IP	Administração Regional de Águas de Sul-Instituição Pública;
BdD	Banco de Dados;
CE	Condutividade Eléctrica;
DNGRH	Direcção Nacional de Gestão de Recursos Hídricos;
DNA	Direcção Nacional de Águas;
DNG	Direcção Nacional de Geologia;
ETAR	Estação de Tratamento de Águas Residuais;
DPOPH	Direcção Provincial de Obras Publicas e Habitação;
FIPAG	Fundo de Investimento e Património de Água;
MITADER	Ministério de Terra, Ambiente e Desenvolvimento Rural;
GIS	Geographical Information System – (SIG - Sistema de Informação Geográfica);
IDW	Interpolador Inverso das Distâncias;
WFT	Interpolador Inverso das Distâncias;
STRM	Shuttle Radar Topography Mission;
CDs	Centros de Distribuição;
INE	Instituto Nacional de Estatística;
INAM	Instituto Nacional de Meteorologia;
CFPAS	Centro de Formação Profissional em Águas e Saneamento;
MOPHRH	Ministério das Obras Públicas, Habitação e Recursos Hídricos;
PA	Política de Águas;
RMGM	Região Metropolitana do Grande Maputo;
UEM	Universidade Eduardo Mondlane;
RPEAS	Regulamento de Pesquisa e Exploração de Águas Subterrâneas;
ENGRH	Estratégia Nacional de Gestão de Recursos Hídricos.

UNIDADES

°C	Graus centígrados;
ha	Hectare;
m	Metro;
m/d	Metro por dia;
m³	Metro cúbico;
m³/h	Metro cúbico por hora;
m³/s	Metro cúbico por segundo;
mm/ano	Milímetro por ano;
µS/cm	MicroSiemen por centímetro.

LISTA DE FIGURAS E TABELAS

Figura 1: Classificação dos aquíferos quanto ao grau de confinamento Delineação da área de estudo.....	6
Figura 2: Classificação dos aquíferos quanto ao tipo de permeabilidade.....	6
Figura 3: Distribuição da água no subsolo.....	7
Figura 4: Factores de Poluição das águas subterrâneas.....	8
Figura 5: Delimitação da área de estudo.....	18
Figura 6: Mapa geológico da RMGM com localização dos perfis.....	19
Figura 7: Perfis litostratigráficos da RMGM.....	20
Figura 8: Morfologia da área de estudo.....	22
Figura 9: Distribuição temporal da Precipitação e temperatura média da RMGM.....	23
Figura 10: Distribuição espacial da cobertura vegetal na área de estudo	24
Figura 11: Uso e aproveitamento de solos.....	24
Figura 12: Delimitação do Sistema aquífero da RMGM.....	26
Figura 13: Produtividade do Sistema aquífero da área de estudo.....	27
Figura 14: Cenário de vulnerabilidade de sistemas aquíferos na Estação Drive-in (Zimpeto).....	28
Figura 15: Fluxograma de etapas e procedimentos para a condução do estudo.....	30
Figura 16: Ilustração dos Parâmetros Hidrogeológicos do Método DRASTIC.....	31
Figura 17: Espacialização dos furos.....	35
Figura 18: Distribuição espacial do Parâmetro D.....	36
Figura 19: Distribuição espacial do Parâmetro R.....	37
Figura 20: Distribuição espacial do Parâmetro A.....	38
Figura 21: Distribuição espacial do Parâmetro S.....	39
Figura 22: Distribuição espacial do Parâmetro T.....	40
Figura 23: Distribuição espacial do Parâmetro I.....	41
Figura 24: Distribuição espacial do Parâmetro C.....	43
Figura 25: Índice DRASTIC Total na área de estudo.....	45

Tabelas

Tabela 1: Porosidade e Retenção específica dos materiais consolidados e não consolidados.....	11
Tabela 2: Factores hidrogeológicos na vulnerabilidade de um aquífero.....	13
Tabela 3: Classes de vulnerabilidade em aquíferos Classes de vulnerabilidade em aquíferos.....	14
Tabela 4: Principais métodos de avaliação da vulnerabilidade de aquíferos.....	14-15
Tabela 5: Estudos de avaliação da vulnerabilidade usando os métodos de índices.....	16
Tabela 6: Sequência litostratigráfica da Região do Grande Maputo.....	20
Tabela 7: Parâmetros DRASTIC com os respectivos índices (w) e os pesos (p) aplicados.....	32-33
Tabela 8: Condutividade hidráulica de materiais geológicos.....	42-43
Tabela 9: Classificação de magnitudes da condutividade hidráulica.....	44
Tabela 10: Resumo de calculos dos Valores de ponderação do índice DRASTIC.....	45
Tabela 11: Dispersão percentual dos Índices DRASTIC na área de estudo.....	46
Tabela 12: Classes de vulnerabilidade da RMGM utilizando os método de índice GOD e DRASTIC.....	46

Anexo 1:

Figura 1: Mapa geológico e Perfis litostratigráficos do sistema aquífero da RMGM (ARA-Sul, 2012).

Tabela 1: Códigos de Cores para os índices DRASTIC.

Figura 2: Galeria de fotos ilustrando vários cenários de vulnerabilidade na zona do Ricatla.

Anexo 2:

Figura 3: Galeria de fotos ilustrando o Panorama de vulnerabilidade extrema dos sistemas aquíferos na baixa do Ricatla- Marracuene

Tabela 2: Resultados de cálculo da recarga pelo método WTF.

Anexo 3:

Figura 4: Panorama da vulnerabilidade do Bairro de Matendene na época chuvosa.

Índice

Dedicatória.....	i
Agradecimentos	ii
Declaração de Honra.....	iii
Resumo	iv
lista de Abreviaturas	v
Unidades	vi
Lista de Figuras e Tabelas.....	vi-vii
1. Capítulo 1: Introdução.....	1
1.1 Apresentação do Problema.....	1
1.2. Objectivos	2
1.2.1. Objectivo Geral.....	2
1.2.2. Objectivos Específicos.....	2
1.3. Relevância do Estudo.....	3
a) Social.....	3
b) Científica.....	3
c) Ambiental.....	4
1.4. Organização do Trabalho	4
2. Capítulo III: Revisão Bibliográfica.....	4
2.1 Águas subterrâneas.....	4
2.2. Classificação dos Aquíferos quanto ao tipo de confinamento:.....	5
a) Aquífero Livre (Freático).....	5
b) Aquífero Confinado (cativo).....	5
2.3. Classificação dos Aquíferos quanto ao tipo de permeabilidade:.....	5
a) Aquífero Fissurado.....	5
b) Aquífero Cársico.....	5
c) Aquífero Poroso.....	5
2.4. Localização e Distribuição da Água no Subsolo.....	6
2.5. Impactos da Exploração das Águas Subterrânea.....	7
2.6. Enquadramento Legislativo.....	8
2.7. Estimativa da recarga de aquífero pelo Método Water Table Flutuation (WTF).....	9
2.9.1. Geoprocessamento e Sistemas de Informação Geográfica.....	16
a) Geoprocessamento.....	16
b) SIG-Sistemas de Informação Geográfica.....	17
3. Capítulo II: Descrição da Área de Estudo.....	17
3.1. Informações Gerais.....	17
3.2. Enquadramento Geológico.....	18
3.3. Geologia Local.....	19
3.4. Descrição Litostratigráfico da Área de Estudo.....	20
a) Cretássico.....	21
b) Terciário.....	21
c) O Miocénico.....	21
d) Quaternário.....	21
3.5. Geomorfologia, Solos, Clima, Precipitação e Temperatura.....	22
a) Morfologia da área de estudo.....	22

b) Solos.....	23
c) Clima, Precipitação e Temperatura.....	23
d) Vegetação.....	24
e) Actividades Económicas.....	25
3.6. Caracterização Hidrogeológica do Sistema Aquífero da RMGM.....	25
a) Enquadramento Hidrogeológico.....	25
b) Delimitação do sistema aquífero.....	25
c) Produtividade do Sistema Aquífero	26
d) Captação das águas subterrâneas.....	28
4. CAPÍTULO IV: Materiais e Métodos.....	29
a) Metodologia e Etapas do Estudo.....	29
b) Descrição do Modelo DRASTIC.....	31-32
c) Integração e Manipulação de Dados em SIG.....	33
d) Espacialização dos dados.....	34
5. CAPÍTULO V: Apresentação e Discussão dos Resultados.....	35
5.1. Apresentação dos Resultados.....	35
a) Profundidade do nível freático (D).....	35
b) Recarga (R).....	36
c) Material do aquífero (A).....	37
d) Solo (S).....	38
e) Topografia (T).....	39-40
f) Impacto da zona não saturada (I).....	41
g) Permeabilidade ou Condutividade hidráulica (C).....	42
h) Determinação do Índice Drastic Total.....	44
i) Mapeamento do Índice DRASTIC Total.....	45
5.2. Discussão dos Resultados.....	46
a) Índice de vulnerabilidade DRASTIC.....	46-48
6. CAPÍTULO VI: Conclusões e Recomendações.....	49
6.1. Conclusões.....	50-51
6.2. Recomendações.....	51
a) Município e Obras Públicas.....	51
b) ARA Sul, IP e FIPAG.....	51
c) Residentes de áreas adjacentes e Sociedade Civil.....	52
d) Ao Departamento de Geologia	52
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53-61

1. Capítulo I: Introdução

A água é o recurso natural mais precioso do planeta Terra. Compreender a dinâmica das águas subterrâneas resultou em avanços socio-econômicos e novas perspectivas para as populações nativas de regiões anteriormente inóspitas como é o caso dos grandes bairros de expansão. No sentido inverso do processo de melhora da qualidade de vida, é crescente a presença de atividades antrópicas com consumo exacerbado de água e com alto potencial risco poluidor. (RUSSO, A. S., 2009).

Segundo Mulholland (2012), a entrada de poluentes nos sistemas aquáticos tem diminuído a disponibilidade de água de boa qualidade e aumento dos custos de seu tratamento para posterior utilização e quando contaminada, a água constitui uma das principais vias de exposição a várias doenças no homem e insucesso na produção.

Desse modo, estudar e mapear áreas consideradas vulneráveis à contaminação das águas subterrâneas com vista a compreender os níveis de risco representa uma forma de contribuir para o conhecimento e elucidação dos aspectos-chave na gestão dos recursos hídricos subterrâneos (ARA-Sul, 2011).

Na tentativa de atender a este desafio, devido à sua importância na literatura científica e sua aplicação em estudos no mundo todo e a disponibilidade de dados favoráveis, definiu-se o DRASTIC como o método mais adequado para avaliação da vulnerabilidade intrínseca à contaminação das águas subterrâneas na área Metropolitana do Grande Maputo, uma vez que a expansão urbana, o desenvolvimento da indústria e comércio nos últimos anos influencia na crescente busca pela água subterrânea, e consequente aparecimento de actividades potenciais de contaminação da água subterrânea, colocando a segurança hídrica subterrânea em termos de quantidade e qualidade na Região Metropolitana do Grande Maputo (RMGM) em particular ameaçada.

1.1 Apresentação do Problema

A água é um recurso importante não só para a vida existente no planeta Terra mas também é fundamental para o desenvolvimento da humanidade, pois é utilizada em três grandes setores da sociedade actual: o setor industrial, o agropecuário e o ambiente doméstico. Neste contexto, a pressão da procura de água de qualidade é grande, considerando o aumento populacional,

suas necessidades básicas, aumento da sua poluição muitas vezes por negligência humana e admitindo a hipótese de todos os aquíferos serem vulneráveis a contaminantes caracterizados pela sua persistência e mobilidade, gerados por uma actividade significativa numa dada região (Foster *et al.*, 1988).

Neste contexto, pese embora existam estudos sobre a vulnerabilidade à poluição dos aquíferos, na área de estudo, os modelos de índices utilizados e o nível de detalhe revelam-se incipientes, o que pode impactar directamente na qualidade de água, pois estes aquíferos abastecem cerca de 60% da população que vive dentro dessa área (Silva, 2019).

Mediante esta problemática, a pesquisa procura responder à seguinte questão científica:

“Qual é a caracterização e o grau de vulnerabilidade natural à poluição do sistema aquífero da Região Metropolitana do Grande Maputo”?

Esta pergunta será respondida pela aplicação integrada de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e métodos de análise de vulnerabilidade de águas subterrâneas, no caso concreto deste estudo será utilizado o modelo **DRASTIC**, um sistema padronizado de avaliação da vulnerabilidade de aquíferos a partir de parâmetros hidrogeológicos, geomorfológicos, físicos e de parametrização das características dos aquíferos (Aller *et al.*, 1987).

1.2. Objectivos

1.2.1. Objectivo Geral

Contribuir para o aumento da capacidade de gestão dos recursos hídricos subterrâneos, através da caracterização e avaliação da vulnerabilidade à contaminação do sistema aquífero da área Metropolitana do Grande Maputo.

1.2.2. Objectivos Específicos

- Diagnosticar a situação actual de contaminação do sistema aquífero;
- Aplicar o método DRASTIC para gerar os índices de vulnerabilidade à contaminação do sistema aquífero e integrá-los ao ambiente SIG;
- Gerar mapas temáticos de vulnerabilidade à contaminação do sistema aquífero permitindo que futuros trabalhos venham fazer análises comparativas dos resultados obtidos aplicando outros modelos e priorizar áreas para estudos de qualidade da água.

1.3. Relevância do Estudo

Considera o candidato ser uma área de investigação que o Departamento de Geologia da UEM deve tomar com seriedade porque aplica os conhecimentos da geologia ao serviço da sociedade moçambicana e do mundo em geral, em particular os gestores da área de recursos hídricos, pois os resultados esperados vão permitir às autoridades competentes priorizar acções mitigadoras para as áreas com deficiência do saneamento básico, criação e implementação de medidas de protecção dos aquíferos, mapeamento de áreas susceptíveis à poluição dos sistemas aquíferos assim como na gestão sustentável dos recursos hídricos (Oliveira *et al.*, 2017).

A RMGM, tratando-se de uma zona residencial Peri-urbana em franca expansão e desenvolvimento sócio-económico, torna-se necessário a implementação desta pesquisa com vista a mapear e categorizar os graus de risco à contaminação devido á acção humana resultante do uso e ocupação do solo, acesso á água e saneamento do meio. Os métodos de determinação da vulnerabilidade de aquíferos são actualmente utilizados como ferramentas de auxílio às propostas de protecção das águas subterrâneas associadas á actividades de gestão dos recursos hídricos, de planeamento e ordenamento territorial (Costa, 2012). Pelo que o projecto impacta nas três esferas de actividade nomeadamente a Social, Científica e Ambiental.

a) Social

A avaliação da vulnerabilidade de aquíferos à poluição é um dos aspectos de maior importância para subsidiar o planeamento de uso do solo e gerir a instalação e funcionamento de empreendimentos potencialmente impactantes nos recursos hídricos subterrâneos (Brollo *et al.* 2000). Este tipo de avaliação é de grande importância para orientar mecanismos de gestão ambiental de territórios, diante das mais diversas actividades antrópicas.

b) Científica

O presente trabalho ajudará em futuros estudos de identificação de medidas de gestão adequadas dos recursos hídricos, pois o aumento da ocupação demográfica e agro-industrial da RMGM aumenta também a busca pelo precioso líquido, este trabalho irá cooperar no conhecimento científico sobre a vulnerabilidade da área de estudo, comparação com outros métodos, assim como para o incremento de estudos na RMGM.

c) Ambiental

Este estudo é importante para se conhecer, detalhadamente, a actual situação do grau de vulnerabilidade do sistema aquífero do Grande Maputo e, mapear onde ele é menos vulnerável à poluição.

1.4. Organização do Trabalho

O presente trabalho está dividido em 6 capítulos, nomeadamente:

- **Capítulo I:** é o capítulo que compreende a introdução, a descrição do problema, a justificativa do tema, os objectivos e a organização do trabalho.
- **Capítulo II:** Contém a revisão da literatura sobre os aspectos relevantes para o trabalho. A revisão da literatura foi baseada em livros e estudos semelhantes feitos tanto em Moçambique como em outras partes do mundo.
- **Capítulo III:** é o capítulo que se refere à área de estudo, contém informações gerais referentes à área de estudo, nomeadamente o enquadramento Geológico, a localização, a descrição das características fisiográficas e climáticas, a caracterização hidrogeológica e captação da água assim como as características sócio-económicas da área de estudo.
- **Capítulo IV:** este capítulo descreve os materiais e métodos usados para a realização do trabalho.
- **Capítulo V:** é o capítulo onde são apresentados e discutidos os resultados da pesquisa.
- **Capítulo VI:** Apresenta as conclusões e recomendações.

2. Capítulo II: Revisão Bibliográfica

2.1 Águas subterrâneas

Define-se água subterrânea como a parcela de água que se encontra no subsolo da superfície terrestre, preenchendo os espaços vazios existentes entre os grãos do solo, rochas e fissuras, e está disponível em todas as regiões da Terra, constituindo importante recurso natural (Tundisi, 2003 citado por Silva, 2019).

Segundo o mesmo autor, as águas subterrâneas são armazenadas em reservatórios subterrâneos denominados aquíferos. Estes reservatórios são classificados quanto à pressão a que está submetida a água neles contida e quanto ao tipo de permeabilidade.

2.2. Classificação dos Aquíferos quanto ao tipo de confinamento:

a) Aquífero Livre (Freático)

Aqueles em que a superfície livre da água nele contida está à pressão atmosférica. Assim, num determinado ponto, um furo que atravesse, total ou parcialmente, um aquífero livre, o nível da água ou nível freático, coincidirá com o limite superior da zona saturada nesse ponto. Os aquíferos livres são superficiais ou sub-superficiais, o que facilita a sua exploração e recarga, mas também a sua contaminação;

b) Aquífero Confinado (cativo)

Aquífero limitado superior e inferiormente por formações semi-permeáveis ou praticamente impermeáveis. Nos aquíferos confinados, a água está submetida a uma pressão superior à pressão atmosférica e todos os poros ou outros espaços estão completamente saturados de água. A Figura 1 ilustra a classificação dos aquíferos quanto ao tipo de confinamento.

2.3. Classificação dos Aquíferos quanto ao tipo de permeabilidade:

a) Aquífero Fissurado

Em que formação geológica é constituída por rochas duras cujas fracturas/fissuras permitem a circulação de água, conferindo-lhe “permeabilidade fissural”.

b) Aquífero Cársico

Em que a formação geológica é geralmente constituída por rochas carbonatadas com cavidades por vezes de grandes dimensões, resultantes da dissolução dos materiais que a constituem e que lhe permitem um rápido escoamento subterrâneo;

c) Aquífero Poroso

Em que a formação geológica contém poros ou interstícios resultantes do arranjo dos materiais que a constituem deixando espaços vazios e que lhe conferem “permeabilidade intersticial”. A Figura 2 ilustra a classificação dos aquíferos quanto ao tipo de permeabilidade:



Figura 1: Tipos de aquíferos quanto ao grau de confinamento (Linhares, 2009).

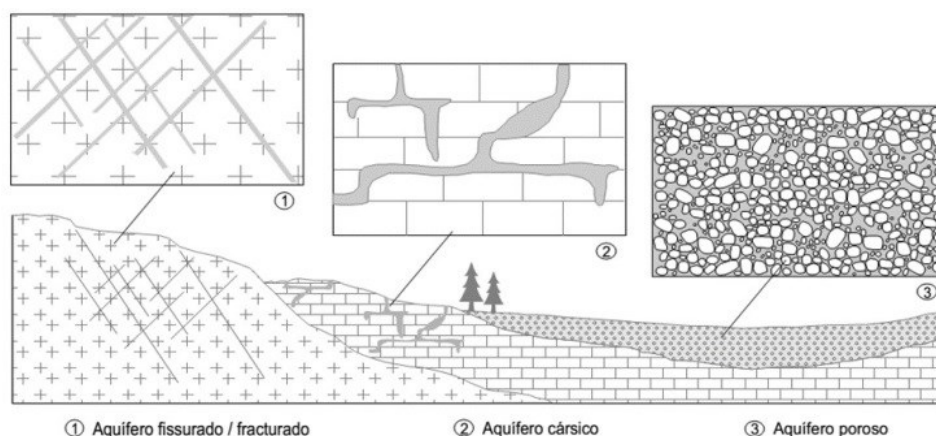


Figura 2: Classificação dos aquíferos quanto ao tipo de permeabilidade (Fonte: CS/04, 2012).

2.4. Localização e Distribuição da Água no Subsolo

Segundo Capucci et al. (2001), o movimento descendente da água no subsolo, ocorre gradualmente preenchendo os espaços porosos, saturando a faixa interior dos solos e rochas. A porção parcialmente preenchida denomina-se zona não saturada ou zona vadosa enquanto a parte onde os interstícios estão repletos de água é denominada zona saturada.

Segundo Tucci & Cabral (2003) citados por Silva (2012), a zona vadosa, é ocupada parcialmente pela água e ar, na qual ocorrem as principais interações entre os contaminantes e o solo. Nesta zona distinguem-se três regiões:

- Zona de humidade do solo (parte mais superficial);
- Franja capilar (região mais próxima do nível freático) e
- Zona intermediária (região compreendida entre as duas zonas anteriores).

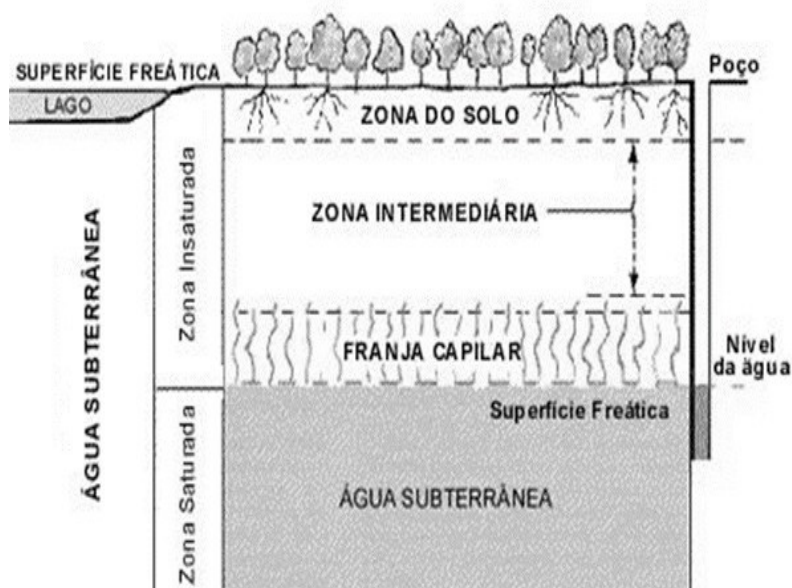


Figura 3. Distribuição da água no subsolo Fonte:

https://tse42.mm.bing.net/th?Id=OIP. oIWQQOh6bzaF_7qMpCb0wHaEa&w=241&h=160&c=7&o=5&pid=1.7.

A zona não saturada pode estar ausente em áreas onde o nível freático coincide com a superfície do solo o que torna os aquíferos muito mais vulneráveis (Silva, 2012).

A zona saturada é a região abaixo do nível freático, onde os espaços porosos estão totalmente preenchidos pela água. A zona de saturação está limitada pela linha de saturação, na parte superior e por uma barreira impermeável, na parte inferior (Figura 3). A zona vadosa está limitada pela superfície do terreno e pela linha de saturação (Silva, 2012).

2.5. Impactos da Exploração das Águas Subterrânea

Os principais impactos da exploração das águas subterrâneas traduzem-se na poluição e na exploração excessiva das mesmas, atendendo que às baixas velocidades de infiltração e aos processos biológicos, físicos e químicos que ocorrem no solo e na zona não saturada, os aquíferos são naturalmente mais protegidos da poluição, porém, ao contrário das águas superficiais, uma vez ocorrida a poluição, as baixas velocidades de fluxo tendem a promover uma recuperação muito lenta da qualidade (Jones, 1997).

Segundo o mesmo autor apesar de estarem menos expostas aos contaminantes e mais protegidas do que as águas superficiais, as águas subterrâneas podem ser poluídas e/ou contaminadas sempre que os poluentes e/ou contaminantes atravessam a zona não saturada do solo, o que faz pensar que não existe nenhum aquífero invulnerável, sendo a contaminação

controlada principalmente por fatores hidrogeológicos (Tabela 3). A poluição das águas subterrâneas pode ser de forma directa ou indirecta, ambas podem estar relacionadas com actividades humanas e/ou por processos naturais como ilustra a Figuras 4.

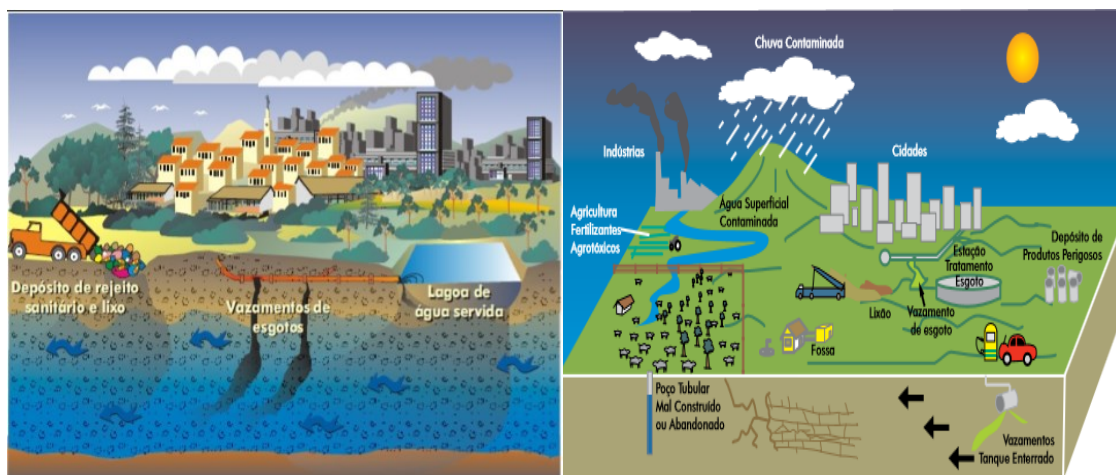


Figura 4: Fontes de poluição por resíduos sólidos, vazamento de esgotos domésticos e industriais. (Linhares, 2009).

Além da poluição do aquífero outro potencial impacto da exploração dos mesmos é a superexploração. Villar (2008) explica que a exploração excessiva, ocorre quando a extracção de água subterrânea ultrapassa os limites de produção do aquífero, ou seja, quando a extracção de água ultrapassa o volume infiltrado provocando danos ao meio ambiente ou para o próprio recurso podendo afectar o escoamento básico dos rios, deslocamento da pluma de poluição para locais do aquífero, avanço da cunha salina (intrusão salina), subsidência de solos, secar nascentes bem como influenciar os níveis mínimos dos reservatórios.

2.6. Enquadramento Legislativo

A Lei de Águas (nº 16/91 de 3 de Agosto) e os respectivos regulamentos e a Política de Águas (PA) constituem instrumentos legais importantes na gestão dos recursos hídricos em Moçambique. A lei em conformidade com a consagração constitucional estipula que a água de domínio público compreende todas as águas do interior (lagoas e albufeiras), as águas superficiais, os leitos dos rios e a água subterrânea.

Com a aprovação da lei de águas em Agosto de 1991, foi instituída em Agosto de 1995 a política de água (PA) e revista em Agosto 2007. Esta política tem como objectivo:

- Satisfação das necessidades básicas de abastecimento de água para o consumo humano e melhoramento do saneamento;
- Utilização eficiente da água para o desenvolvimento económico;
- Água para conservação ambiental, redução da vulnerabilidade a cheias e secas, e
- Promoção da paz e integração regional, bem como garantir os recursos hídricos para o desenvolvimento de Moçambique.

Esta política impinge directrizes para a gestão dos recursos hídricos, superficiais bem como subterrâneas, tanto que para a operacionalização da mesma, foi criada em Agosto de 2007 a Estratégia Nacional de Gestão de Recursos Hídricos (ENGRH).

Para efectivação do que é preconizado na Lei de Água sobre a atribuição ao Ministro da Saúde competências para estabelecer parâmetros através dos quais deverá reger o controlo da qualidade da água para que seja considerada potável e própria para o consumo humano, foi aprovado em 2004 o Regulamento da Qualidade de água para o consumo humano, o diploma ministerial nº 180/2004 de 15 de Setembro. Este diploma fixa os parâmetros de qualidade de água para o consumo humano e as modalidades de realização do seu controlo, visando proteger a saúde humana dos efeitos nocivos resultantes de qualquer contaminação que possa ocorrer nas diferentes etapas do sistema de abastecimento de água desde a captação até a disponibilização ao consumidor.

Em 2012, foi aprovado o Regulamento de Pesquisa e Exploração de Águas Subterrâneas-RPEAS, Decreto nº 18/2012 de 5 de Julho. Este decreto estabelece os requisitos técnicos a que deve obedecer a pesquisa, captação, uso e aproveitamento de águas subterrâneas no território nacional.

2.7. Estimativa da recarga de aquífero pelo Método Water Table Flutuation (WTF)

Segundo Brears (2014), para a gestão das águas subterrâneas, a estimativa da recarga de aquíferos é extremamente importante. Na visão dos mesmos autores, existem vários métodos que podem ser usados para estimar a recarga dos aquíferos, cada um destes métodos possui características e aplicações distintas. Segundo Usgs, (2016) as técnicas analíticas mais utilizadas actualmente para estimativa da recarga dos aquíferos são os métodos da Water Table Flutuation (WTF), o método do balanço hídrico e Estimativa Darcyniana.

Segundo Hirata, (2008) a maior vantagem do método WTF é sua simplicidade, não sendo necessário ter em conta os mecanismos de transporte que regem a passagem de água na zona não saturada, o que permite desconsiderar, por exemplo, a existência de caminhos preferenciais de fluxo; o nível medido em um poço é representativo para uma área de pelo menos algumas dezenas de metros quadrados à sua volta, dá respostas rápidas á eventos chuvosos, e baseia-se na hipótese de que a recarga do aquífero livre é inteiramente atribuída à elevação do seu nível freático, ΔH .

A recarga é obtida mediante a equação 1, proposta por Healy e Cook (2002); Scanlon *et al.* (2002) citado por Lucas *et. al.*, (2012):

$$\Delta S_{gw} = R = S_y * \Delta H \Delta t = S_y * \Delta H \Delta t \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

R -recarga do aquífero;

ΔS_{gw} -Variação do armazenamento de água;

S_y -Retenção específica do aquífero;

Δt -Intervalo de tempo;

Segundo Baum (2015), a equação 1, assume que toda a água que infiltra, quando atinge a superfície piezométrica entra imediatamente em armazenamento e todas as outras componentes do balanço hídrico subterrâneo na zona saturada (evapotranspiração subterrânea, fluxo de base, entrada e saída de fluxo subsuperficial) aplicado em uma bacia hidrográfica são nulas durante o período de recarga subterrânea.

A equação para a obtenção da retenção específica do aquífero é obtida através da expressão 2, proposta por Healy and Cook, 2002 citado por Baum (2015):

$$S_y = \phi - S_r \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

ϕ - é a porosidade

S_r - é a produção específica do aquífero.

Os valores padrão da porosidade e retenção específica para os diferentes materiais geológicos são arrolados na Tabela 1:

Tabela 1. Porosidade e Retenção específica dos materiais consolidados e não consolidados.

Material geológico	$\emptyset$ - Porosidade (%)	S_r -Produção específica (%)
Sedimentos não consolidados		
Cascalhos	25 – 35	15 – 30
Areia	25 – 45	10 -30
Silte	35 -50	5 -10
Argila	45 -55	1 -5
Areia e Cascalho		10-20
Rochas Consolidadas		
Arenito	5 -30	3 -15
Rocha calcária e dolomite	1 -20	0,5 -10
Rocha calcária Karst	5 -30	2 -15
Argila xistosa	1 -10	0,5 -5
Basalto vesicular	10 -40	5 -15
Basalto fracturado	5 -30	2 -10
Rocha vulcânica	10- 60	5 – 20
Granito e gnaiss puro	0,01 – 2	< 0,1
Granito e gnaiss	1-5	0,5 -5

Fonte: Freeze and Cherry (1979); Todd (1980); Driscoll (1986) citados por Chapman and Chilton (1996)

Porosidade $\emptyset$, vazão específica (S_r), Retenção específica $S_y = \emptyset \cdot S_r$, Recarga $R = S_y \cdot \Delta H$.

Os procedimentos do cálculo da recarga podem ser visto nos Anexos 1.

2.8. Vulnerabilidade e Risco de Contaminação em Sistemas Aquíferos

a) Evolução histórica do conceito de vulnerabilidade

Embora controverso, o conceito de vulnerabilidade de aquíferos foi introduzido na década de 60, altura em que foi desenvolvida a abordagem conceitual para a proteção de recursos hídricos subterrâneos, baseada em monitorização, mapeamento, modelação e tecnologias de

remediação (Kovalevsky et al., 2004). Segundo Hirata (2001), o termo foi inicialmente utilizado por Le Grand em 1964, nos EUA, distanciando-se de Vrba & Zaporozec (1994) que afirmam que foi no final da década de 60. Para Foster et al., (2006), o conceito começou a ser usado a partir da década de 1970, na França por Albinet e Margat.

Desde então, o conceito de vulnerabilidade passou a ter várias definições:

- Segundo Lobo, (1997). A Vulnerabilidade de um aquífero é definida como a suscetibilidade da qualidade da água subterrânea face à exposição a uma carga de contaminante, determinada pelas características intrínsecas do aquífero;
- Define-se como vulnerabilidade de um aquífero, o maior ou menor grau de sensibilidade que o aquífero apresenta em tolerar uma contaminação (Silva, 2012).
- Segundo Ferreira (1998) citado por Santos *et al.* (2020), a vulnerabilidade é distinta do risco de poluição, portanto o risco não depende só da susceptibilidade, mas também da existência de cargas poluentes significativas que possam entrar no ambiente subterrâneo.
- Foster (1987) utilizou a expressão “vulnerabilidade à poluição dos aquíferos” para representar as características intrínsecas que determinam a sensibilidade dos sistemas hidrogeológicos para serem negativamente afetados por uma carga poluente.

Este autor também distinguiu as designações de vulnerabilidade à poluição da de risco de poluição, visto que este último resulta quer da vulnerabilidade natural do aquífero quer da carga poluente que é, ou será, aplicada no ambiente subterrâneo em resultado da atividade humana. Consequentemente, é possível existir um aquífero com alto grau de vulnerabilidade, mas sem risco de poluição, caso não haja carga poluente, ou de haver um risco de poluição exponencial apesar do índice de vulnerabilidade ser baixo.

Neste contexto, as actividades desenvolvidas na superfície serão repercutidas nas águas subterrâneas através da propagação de substâncias contaminantes, podendo alterar a sua qualidade.

Tabela 2: Fatores hidrogeológicos na vulnerabilidade de um aquífero.

Vulnerabilidade por	Dados Hidrogeológicos	
	Necessários	Normalmente Disponíveis
Inacessibilidade Hidráulica	• Grau de confinamento do aquífero; • Profundidade do nível freático ou da água subterrânea; • Condutividade hidráulica vertical e teor de humidade da zona não saturada ou camada confinante.	Tipo de confinamento da água subterrânea; Profundidade até ao nível freático ou ao teto do aquífero confinado.
Capacidade de Atenuação	• Distribuição granulométrica dos sedimentos e fissuras na zona vadosa ou camada confinante; • Mineralogia dos estratos na zona vadosa ou camada confinante.	• Grau de consolidação/fissuração dos estratos; • Caracterização litológica dos estratos.

Fonte: Foster et al. (2006)

b) Tipos e classes de vulnerabilidade

Quanto ao tipo a vulnerabilidade pode ser:

(i) intrínseca ou natural: utilizada como ferramenta de auxílio às propostas de proteção das águas subterrâneas, em atividades de gestão dos recursos hídricos e de planeamento e ordenamento territorial, e que está relacionada com os fatores hidrogeológicos do meio (características do aquífero, solo e materiais geológicos), e

(ii) específica ou integrada: definida pelos potenciais impactos resultantes do uso do solo e contaminantes associados, ou seja, refere-se ao perigo de deterioração em relação a poluentes específicos (Vrba & Zaporozec, 1994).

Quanto a Classe a vulnerabilidade pode ser classificada conforme a Tabela 3. De salientar que as classes de vulnerabilidade variam em função do método utilizado para o estudo, sendo o método EPPNA com o número de classes (oito classes).

Tabela 3: Classes de vulnerabilidade em aquíferos.

Classe de vulnerabilidade	Definição
Extrema	Vulnerável à maioria dos contaminantes, com impacto rápido em muitos cenários de contaminação.
Alta	Vulnerável a diversos contaminantes (excepto os que são fortemente adsorvidos ou rapidamente transformados) e em diferentes situações de contaminação.
Moderada	Vulnerável a alguns contaminantes, apenas quando continuamente lançados ou lixiviados.
Baixa	Vulnerável apenas a contaminantes conservadores, a longo prazo, quando contínua e amplamente lançados ou lixiviados.
Insignificante	Presença de camadas confinantes sem fluxo vertical de água subterrânea (percolação).

Fonte: Foster et al. (2006).

2.9. Métodos de análise da vulnerabilidade em aquíferos

Existem vários métodos de avaliação da vulnerabilidade de um aquífero (Tabela 4) que auxiliam na identificação dos principais fatores que podem promover a poluição e/ou contaminação da água subterrânea. Este tipo de análise é particularmente importante na definição de ações de preservação e manutenção das águas subterrâneas, bem como, na gestão de Instituições responsáveis pela implementação de políticas de controle e conservação da água (Auge, 2008).

Tabela 4: Principais métodos de avaliação da vulnerabilidade de aquíferos, Adaptado de Auge (2008); Artuso et al. (2002); Bós & Thomé, (2012) e Foster et al. (2006).

Método	Fatores	Autor(es)
MAIA	Profundidade água, espessura do solo, declive, capacidade específica, recarga potencial, densidade de fraturas e transmissividade do aquífero.	Maia & Cruz (2011)
BÓS	Profundidade água subterrânea, recarga, litologia do aquífero, solo, topografia, influência da zona vadosa, condutividade hidráulica e ocupação do solo.	Bós (2007).
IS	Profundidade da água, recarga aquífera, litologia, topografia e ocupação do solo.	Francés et al. (2001)
EPPNA	Características litológicas e hidrogeológicas.	Eppna (1998).
Ekv	Espessura da zona vadosa e permeabilidade da zona saturada.	Auge (1995).

AVI	Espessura da zona vadosa acima do aquífero e condutividade hidráulica.	Stempvoort et al. (1992).
SINTACS	Profundidade do nível freático, infiltração efetiva, características da zona não saturada, tipo de solo, características do aquífero, condutividade hidráulica e topografia.	Civita (1994).
GOD	Grau de confinamento da água subterrânea, ocorrência de estratos de cobertura e profundidade da água.	Foster (1987).
DRASTIC	Profundidade água subterrânea, recarga, litologia do aquífero, solo, topografia, impacto da zona vadosa e condutividade hidráulica.	Aller et al. (1987).
Mapa de Vulnerabilidade Aquífero	Características litológicas, áreas de recarga e descarga.	Duarte (1980).
Poluição dos Aquíferos	Geologia (litologia e estrutura).	Taltasse (1972).

A escolha do método para avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas numa região depende de fatores, como conhecimento e divulgação da metodologia, quantidade e qualidade da informação disponível, a escala e objectivo do estudo; sendo o número de parâmetros determinante, para avaliação da simplicidade do estudo, o grau de detalhe e precisão.

Alguns métodos são mais conhecidos e divulgados do que outros. Na América do Norte, o DRASTIC é o mais divulgado e utilizado para qualificar a vulnerabilidade de sistemas aquíferos. Na América Latina, embora o DRASTIC seja usado, também se utiliza o método GOD. Em Espanha e Inglaterra, o GOD é bastante utilizado enquanto que nos restantes países europeus, é mais utilizado o método SINTACS (Auge, 2008).

Em África, particularmente em Moçambique, os métodos de avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos são conhecidos, mas pouco difundidos, sendo os estudos baseados principalmente em análises da qualidade de água e, conseqüentemente, bastante distantes da utilização e aplicação de métodos da vulnerabilidade, contudo os estudos existentes demonstram que há uma tendência convista a inverter o cenário a nível do país e em particular na RMGM, conforme os dados da Tabela 5.

Tabela 5: Estudos de avaliação da vulnerabilidade utilizando métodos de índices.

Ano	Tema	Autor
2012	Análise de Vulnerabilidade e Delineação da Área de Protecção do Aquífero de Nhartanda e Matundo-Cidade De Tete-	Govate
2012	Estudos Ambientais e Sociais para o Sistema de Abastecimento de Água do Grande Maputo	FIPAG
2012	Gestão Sustentável da Água Subterrânea na Área Metropolitana do Grande Maputo	ARA-Sul, IP.
2018	Vulnerabilidade em Sistemas Aquíferos no Vale de Nhartanda, Cidade de Tete, Moçambique.	Bande
2018	A avaliação da vulnerabilidade do aquífero freático no Bairro 25 de Junho- Cidade de Chimoio pelo Método DRASTIC	Boanha
2020	Avaliação da Vulnerabilidade à Poluição dos Aquíferos da Área Metropolitana do Grande Maputo Aplicando o Método GOD .	Naylla
2020	Avaliação do Risco de contaminação da Água Subterrânea, no Município de Xai-Xai, Aplicando o Método DRASTIC Modificado.	Uamusse
2020	Hydrogeochemical aquifer characterization and its implication for groundwater development in the Maputo district, Mozambique.	Cendón <i>et al.</i>
2022	Uma Contribuição Para A Avaliação Da Vulnerabilidade Natural De Contaminação Da Água Subterrânea No Aquífero De Grande Maputo Aplicando O Método GOD .	Mabote

2.9.1. Geoprocessamento e Sistemas de Informação Geográfica

a) Geoprocessamento

Segundo de Xavier da Silva (2001), o Geoprocessamento pode ser compreendido como um conjunto de técnicas computacionais, que operam sobre base de dados (que são registro de ocorrências) georreferenciados, para transformá-los em informação (que é um acréscimo de conhecimento) relevante.

Câmara e Davis (2001) ressaltam que, as técnicas e ferramentas computacionais utilizadas pelo Geoprocessamento, também conhecidas como *Sistemas de Informação Geográfica (SIG)*, permitem realizar análises complexas, ao integrar dados de diversas fontes, e ao criar bancos de dados geo-referenciados tornando possível automatizar a produção de documentos cartográficos.

b) SIG-Sistemas de Informação Geográfica

As aplicações SIG são frequentemente usadas para estimar a vulnerabilidade da água subterrânea devido à facilidade de uso e eficiência em manipular, analisar, e incorporar dados numéricos, geológicos e hidrogeológicos com uma componente espacial (Shirazi *et al.*, 2012). Um SIG, ou no inglês GIS (Geographic Information System), pode ser considerado um conjunto manual ou computacional de procedimentos utilizados para armazenar e manipular dados georeferenciados sendo uma ferramenta que automatiza tarefas até então realizadas manualmente e facilita a realização de análises complexas, através da integração de dados de diversas fontes (ARONOFF, 1991).

De acordo com Câmara (1995), as principais características de um SIG, compreendem integrar numa única base de dados informações espaciais provenientes de dados cartográficos, dados de censo, cadastro urbano e rural, imagens de satélite, redes e modelos numéricos de terreno; oferecer mecanismos para combinar as várias informações, através de algoritmos de manipulação, análise, consulta, recuperação, visualização e plotar o conteúdo da base de dados geocodificados.

Segundo Longley et al., (2013) os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), além de aplicar o conhecimento na resolução de problemas, auxiliam no processo de sistematização do conhecimento, tornando simples a tarefa de organizar e armazenar dados, acessar e recuperar essas informações, manusear e sintetizar soluções.

Segundo Câmara, (2005) a principal diferença de um SIG para qualquer outro sistema de informação é sua capacidade de armazenar tanto atributos descritivos como a geometria dos diversos dados geográficos.

3. Capítulo III: Descrição da Área de Estudo

3.1. Informações Gerais

A área do estudo situa-se na parte sul de Moçambique na Província de Maputo e é enquadrada pelos Distritos de Moamba (a Oeste), os Municípios da Matola e de Maputo (a Sul), o Distrito de Marracuene e Oceano Índico (a Este) e a norte pelo Distrito da Manhica. A zona é uma planície (altitude abaixo de 200m), e ocupa uma área de aproximadamente 6.300 km². O ponto mais alto é a encosta oriental das Montanhas dos Pequenos Libombos em Namahacha.

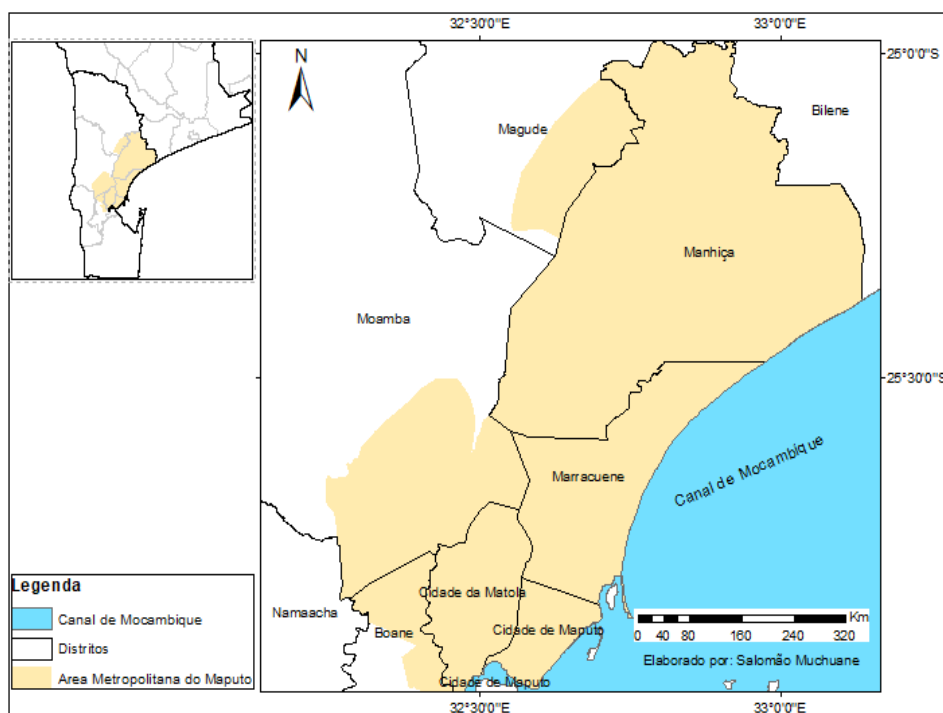


Figura 5. Delineação da área de estudo (Fonte: Adaptado de CENACARTA, 2023).

3.2. Enquadramento Geológico

Segundo Muchangos (1999), geologicamente, Moçambique apresenta duas grandes unidades geológicas: (i) **Pré-câmbrica**, subdividida em inferior ou arcáica (representada pelo cratão rodesiano), com 200 Ma, constituída por rochas metamórficas de protólitos magmáticos e sedimentares e Superior (conhecido por cinturão de Moçambique), constituída por rochas com cerca de 500 Ma, individualizando-se em 3 províncias geológicas: Moçambique, Niassa e Médio-Zambeze; e (ii) **Fanerozóica** constituída essencialmente por rochas sedimentares, com idade entre 300-700 Ma, subdividida em: Karroo, Jurássico, Cretácico, Terceário e Quaternário.

A RMGM é constituída por formações sedimentares, Fanerozóicas do Médio Zambeze, pertencentes ao período mais recente da Era Cenozóica- o Quaternário. As unidades litológicas estão representadas maioritariamente por rochas sedimentares consolidadas e não consolidadas com grés de cor cinzenta-acastanhada, arenitos em alguns casos constituídos por diferentes componentes incluindo argila, silte que fazem a camada confinante no sistema aquífero, dunas costeiras e interiores de areia vermelha bem evidente na zona da ponta vermelha, toda extensão Este do Distrito de Marracuene, e rochas cristalinas como é o caso dos riolitos e basaltos da formação de Karroo.

3.3. Geologia Local

A RMGM faz parte da bacia sedimentar Meso-Cenozóica do sul do Save relacionada com o sistema do rift entre Madagáscar e África o que sustenta a orientação (N-S) de maior parte dos vales ao longo do território nacional.

Segundo Salman e Abdula (1994), a base desta bacia sedimentar consiste de basaltos e riolitos pertencentes aos depósitos de Karroo de idade pérmico ao jurássico, cobertos por sedimentos cretássicos, terciários e quaternários cuja espessura aumenta em direcção à costa, enquanto o teor de argila aumenta para o interior.

Segundo Bouman (1985), citado por Cendón et al. (2020), distinguem-se três domínios litológicos sedimentos na área de estudo: a) Dunas costeiras modernas expandindo-se para o norte, paralelas à costa e ao rio Incomáti (são compostas por areias finas e claras); b) aluviões dos vales, sedimentos argilosos nas margens dos rios Incomáti, Matola e Infulene; c) Dunas interiores também denominadas “dunas velhas” ou “dunas de areia vermelha” (formação Ponta Vermelha) estendendo-se até à costa limítrofe da cidade de Maputo e compostas por areia ferruginosa intercalada por alguns leitos de argila com teor de argila aumentando a noroeste.

O Mapa da Figura 6 e a Tabela 7 ilustram a geologia e a sequência litostratigráfica da RMGM.



Figura 6: Mapa geológico da RMGM com localização dos perfis (Cendón et al., 2020).

Tabela 6: Sequência litostratigráfica da RMGM.

Período		For. geológica	Litologia	Deposição
Cretácico		For. Grudja	Grés fino/glauconítico/calcários margosos e argilas siltosas	Marinho
		For. Maputo	Grés fino/glauconítico/siltoso	
		For. Karroo	Basaltos e riolitos dos Libombos	Continental
		For. Mapinhane	Grés Calcário/Conglomerático	Transgressão /regressão
		For. Boane	Grés feldspáticos/argiloso	
Terciário	Paleocénico-Eocénico	For. Salamanga	Grés, arenitos, margas e calcários	Transgressão /regressão
		For. Tembe	Calcários/Margas/Calcarenitos	
		For. Inharrime	Argilas e grés	
	Miocénico	For. Santiago	Grés e grés argiloso/calcário	
Quaternário	Pleistocénico	For. Cacho e	Aluviões/Argila e dunas interiores/costeiras	Continental
	Olocénico	Macia	Grés costeiro, cobertura arenosa areias finas/argila.	Continental

Fonte: Adaptado do autor. Baseado em Salman e Abdula, 1994.

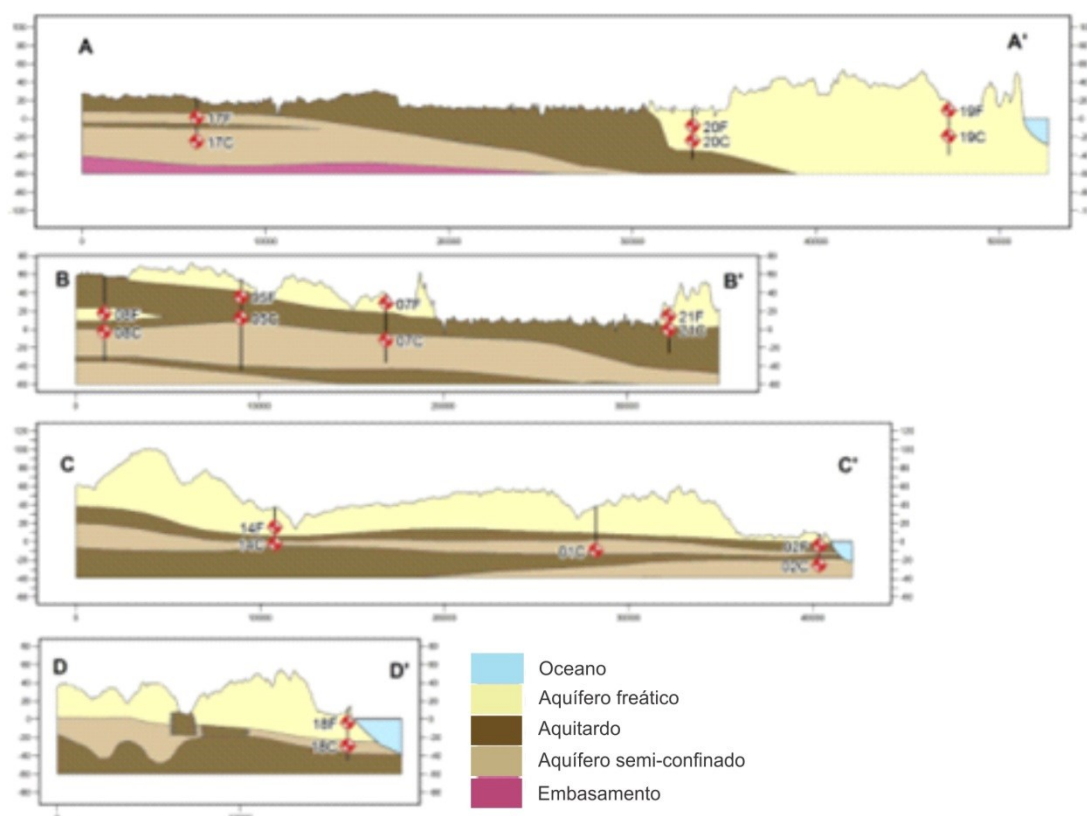


Figura 7: Perfis litostratigráficos da RMGM. Cendón et al., 2020 baseado em (ARA-Sul, 2014).

3.4. Descrição Litostratigráfico da Área de Estudo

A RMGM é caracterizada pelas seguintes formações geológicas: Cobertura Quaternária, Cobertura Meso-Cenozóico e Sistema Karroo.

a) Cretássico

É composto por sedimentos marinhos argilo-siltosos com glauconite da formação de Maputo, que sobrepõem os basaltos de Karroo. Na fase final do Cretássico, uma sedimentação semelhante a anterior originou a formação de Grudja.

b) Terciário

É composto pela deposição da formação de Salamanga composta por grés, calca-arenitos e calcários de Paleocénico.

c) O Miocénico

É representado por depósitos de diferentes fácies correspondentes a formação de Santiago constituída por grés e grés argiloso e por vezes grés calcário. Durante o pleocénico zonas circunvizinhas de Maputo foram sujeitas localmente a pequenas transgressões, mas no geral houve uma transgressão caracterizada por erosão e alteração.

d) Quaternário

A formação de depósitos mais novos foi resultado fundamentalmente de uma migração contínua da linha de costa. No início Pleistocénico era regressivo com a erosão de depósitos miocénicos (formação de Santiago) em algumas zonas alcançando o Oligocénico (formação de Inharrime). Durante a transgressão torroniana formaram-se dunas vermelhas da formação de Cacho (entre Marracuene e Maputo) e para Oeste as dunas da formação de Macia, depositadas na regressão precedente. A subida do nível do mar registada durante o Olocénico foi responsável pela deposição do grés costeiro aflorante na zona litoral Leste de Maputo tido como formações recentes na escala geológica.

Na cobertura quaternária são observados terraços aluvionares, aluviões, dunas e depósitos indiferenciados e ocorrem em grande parte a Este da área de estudo. Na cobertura meso-cenozóico são observadas as rochas carbonatadas, o calcário composto predominantemente por calcita e a dolomite, aos quais ocorrem na extremidade Oeste da área de estudo. O Sistema Karroo de origem quase inteiramente continental formou-se no intervalo do Carbónico Inferior a

Jurássico, pertencem à era secundária-*Série Stormberg*. Os riolitos e basaltos, ocupam a faixa Sudoeste da área de estudo, conforme ilustra a Figura 2.

3.5. Morfologia, Solos, Clima, Precipitação e Temperatura.

a) Morfologia da área de estudo

A zona é caracterizada por uma vasta área planáltica que se mantém acima de 40 m de altitude; a área da cidade é drenada pelo vale do infulene e pelo rio Matola que desaguam no estuário que forma a Baía de Maputo. Trata-se do sector terminal dos rios, até onde o canal fluvial é percorrido pelas correntes de maré. Segundo R. Paskoff (1985) a definição de estuário implica uma ampla abertura sobre o mar. Ora, Muitas vezes os estuários correspondem a sectores alargados dos cursos de água, o que faz sentido se pensarmos que grande parte dos litorais nossos contemporâneos são litorais de submersão, que resultaram da invasão marinha de vales fluviais que, durante as glaciações, sofreram um escavamento importante, a favor de uma descida do nível do mar estimada entre 120 e 140m o que nos nossos dias pode se reflectir no grau de salinidade das águas em alguns locais onde hoje não se vê o mar, como é o caso de todas as lagoas da área de estudo. A Figura 3 representa o Modelo Digital de Elevação da RMGM, que confere os aspectos geomorfológicos da área de estudo.

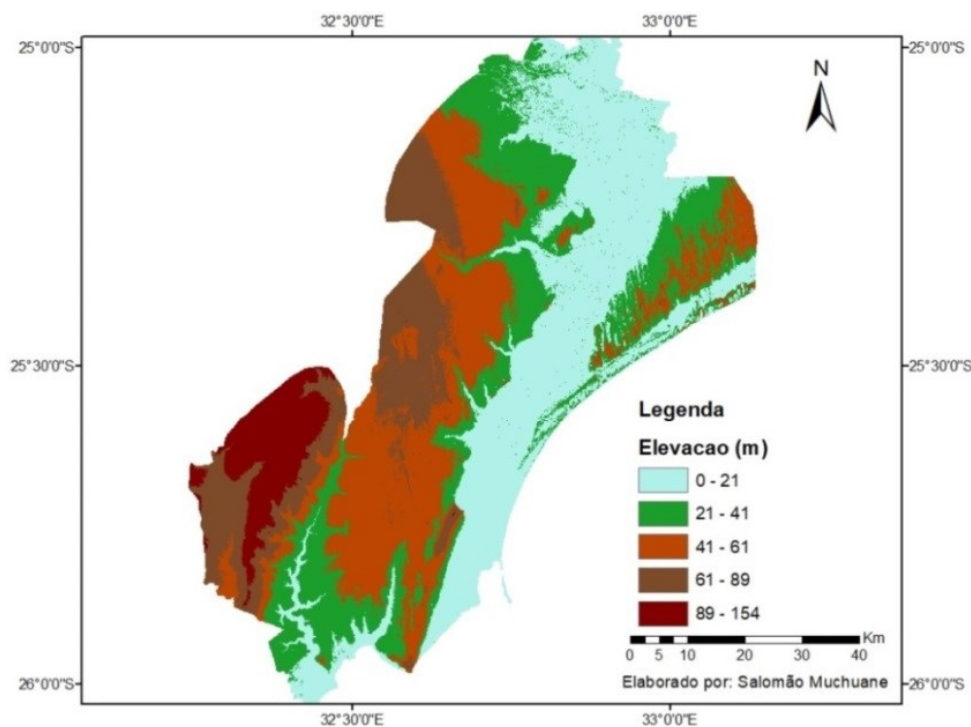


Figura 8. Morfologia da Área de Estudo (Adaptado de CENACARTA, 2013).

b) Solos

Os tipos de solos predominantes na RMGM são arenosos variando em amarelados a Oeste, alaranjados a Sudoeste e a Noroeste, e a Sudoeste os solos basálticos pretos e os solos riolíticos. O Sudeste da área de estudo, apresenta solos de sedimentos marinhos estuarinos, os solos derivados de grés vermelho e uma pequena parte encontra-se no Centro e por fim destaca-se uma faixa a Norte ao Centro os aluviões argilosos (Figura 21).

c) Clima, Precipitação e Temperatura.

O clima pode ser caracterizado como tropical, com chuvas de verão, a temperatura média mensal na região é pouco estável, com média anual de cerca de 23° C e a temperatura máxima média varia entre 25 °a 35 °C e a mínima de 14 °a 20 °C. A precipitação média anual atinge 798 mm e aumenta em direcção a norte para 842 °a 890 mm em Marracuene e Manhiça respectivamente.

Conforme a Figura 9 pode-se observar que os meses mais chuvosos são entre Dezembro a Março e as chuvas vão decrescendo de Abril a Agosto, voltando a incrementar a partir do mês de Setembro. De acordo com o INAM as temperaturas médias variam entre 23°C e 26°C, sendo que as temperaturas mais elevadas são verificadas de Outubro a Março baixando de Abril e Julho voltando a subir em Setembro, conforme a Figura. 9.

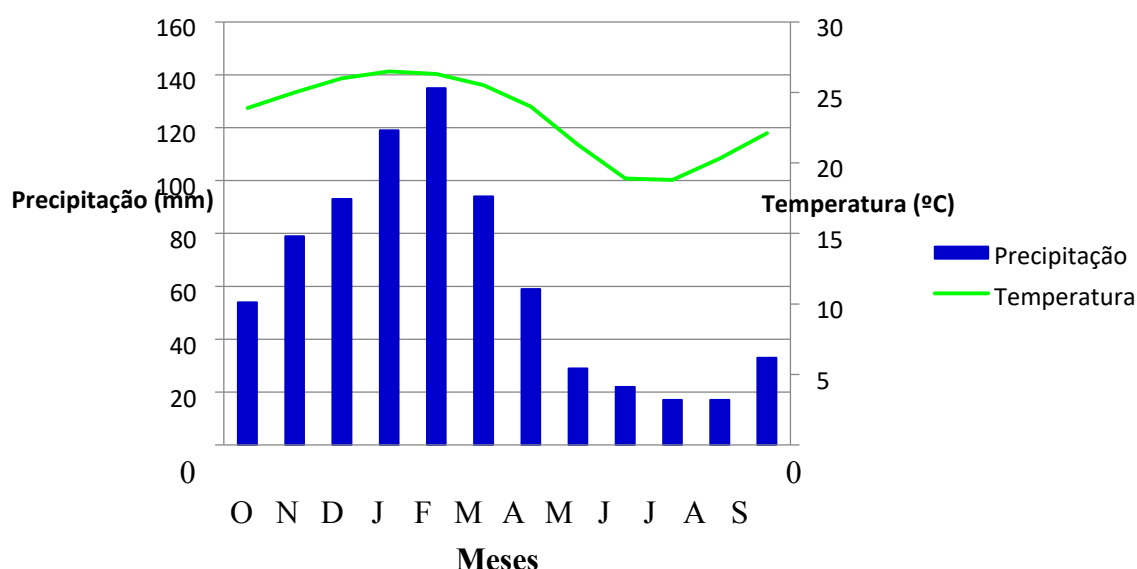


Figura 9. Distribuição temporal da precipitação (mm) e temperatura média mensal (°C) na área de estudo (Adaptado de CENACARTA, 2013).

d) Vegetação

Maior parte da RMGM está coberta por vestígios de floresta primária que se encontra a Oeste, Sudoeste, Sul e Nordeste. A Sudoeste também se encontra a vegetação do tipo savana arbórea em quanto que na faixa Nordeste predomina Matagal coberto. Uma porção da vegetação do tipo savana encontra-se distribuída a Noroeste, a Sudoeste, a Sudeste e uma pequena porção a Sul da área de estudo (Figura 10).

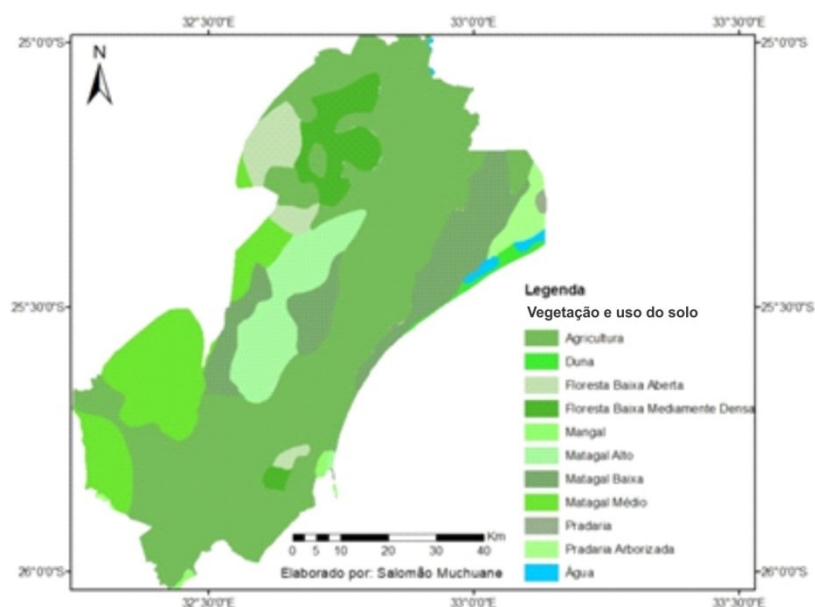


Figura 10: Distribuição espacial da cobertura vegetal na área de estudo (Adaptado de CENACARTA)

A vegetação é predominantemente dispersa do tipo arbustivo e cobre as dunas do interior, a população vive de agricultura não irrigada de pequena escala, mesmo assim é possível encontrar ao longo dos rios Matola, Infulene, Umbeluzi, Incomati e dos “sopés” das dunas interiores zonas com agricultura irrigada bastante intensa (FIPAG, 2012).



Figura 11. Uso e aproveitamento das terras férteis ao longo das margens do rio Mulaúze.

e) Actividades Económicas

A RMGM apresenta áreas urbanas e rurais. A área rural ocupa a maior parte dos distritos de Marracuene, Moamba, Boane e Manhiça onde predominam as seguintes actividades: agricultura, pecuária e extracção de recursos naturais tais como as rochas ornamentais, calcário, britas, areia e lenha. A área urbana ocupa as cidades da Matola e Maputo, onde predominam as seguintes actividades: a agricultura, comércio formal e informal e indústria (INE, 2017).

3.6. Caracterização Hidrogeológica do Sistema Aquífero da RMGM

a) Enquadramento Hidrogeológico

Segundo Weconsult (2016), Moçambique está dividida em 6 Províncias hidrogeológicas: (i) Complexo de Base (Pré-Câmbrico); (ii) Terrenos Vulcânicos (Karoo e pós Karroo); (iii) Bacia Sedimentar do Médio Zambeze (Karoo); (iv) Bacia Sedimentar de Maniamba (Karoo); (v) Bacia Sedimentar do Rovuma (Meso-Cenozóico) e; (vi) Bacia Sedimentar de Moçambique, a sul do Save (Meso-Cenozóico), onde se enquadra o sistema aquífero da área Metropolitana do Grande Maputo. Segundo ARA-Sul (2012), a bacia é do tipo sinforme assimétrica, constituída predominantemente 70% de rochas sedimentares consolidadas e não consolidadas consequentemente, uma área potencial para o armazenamento e fornecimento de água subterrânea e se sobrepõem ao embasamento basáltico e riolítico da formação de Karroo com baixíssima vocação hidrogeológica. A Formação Grudja do Cretácico Superior, composta por argilas e areias finas são geralmente consideradas como *aquitardo*, o *aquífero freático* refere-se à água subterrânea rasa dentro das dunas do Quaternário (interior e costeiros) e materiais aluviais ao longo do vale do rio Incomati e por *aquífero semi-confinado* refere-se principalmente ao Paleógeno mais profundo (Formação Salamanga) e a materiais Neógenos mais jovens do Mioceno até idade do Plioceno.

b) Delimitação do sistema aquífero

O rio Incomati faz fronteira a norte, noroeste e nordeste; a intrusão salina determina o limite a Este enquanto na parte sudoeste do sistema a delimitação é feita pela interface da água fresco-salobra. A Oeste do rio Matola, o aquífero é quase ausente, mas a sua espessura aumenta na parte noroeste do sistema aquífero; A oeste os afloramentos dos Pequenos Libombos são considerados como fronteira. Na parte sul, a base do sistema é formada por camadas de argila,

que contêm água salobra, enquanto que, na parte norte é formado por rochas duras (provavelmente de origem vulcânica). A Interface da água doce/ salobra - salgada: é aparte "útil" do sistema aquífero está ligado por uma interface de água fresca e salobra ou salina, e toda a parte sul do sistema aquífero, a interface é bastante superficial e pode ser uma ameaça para a captação de águas subterrâneas, conforme ilustra a Figura 12.

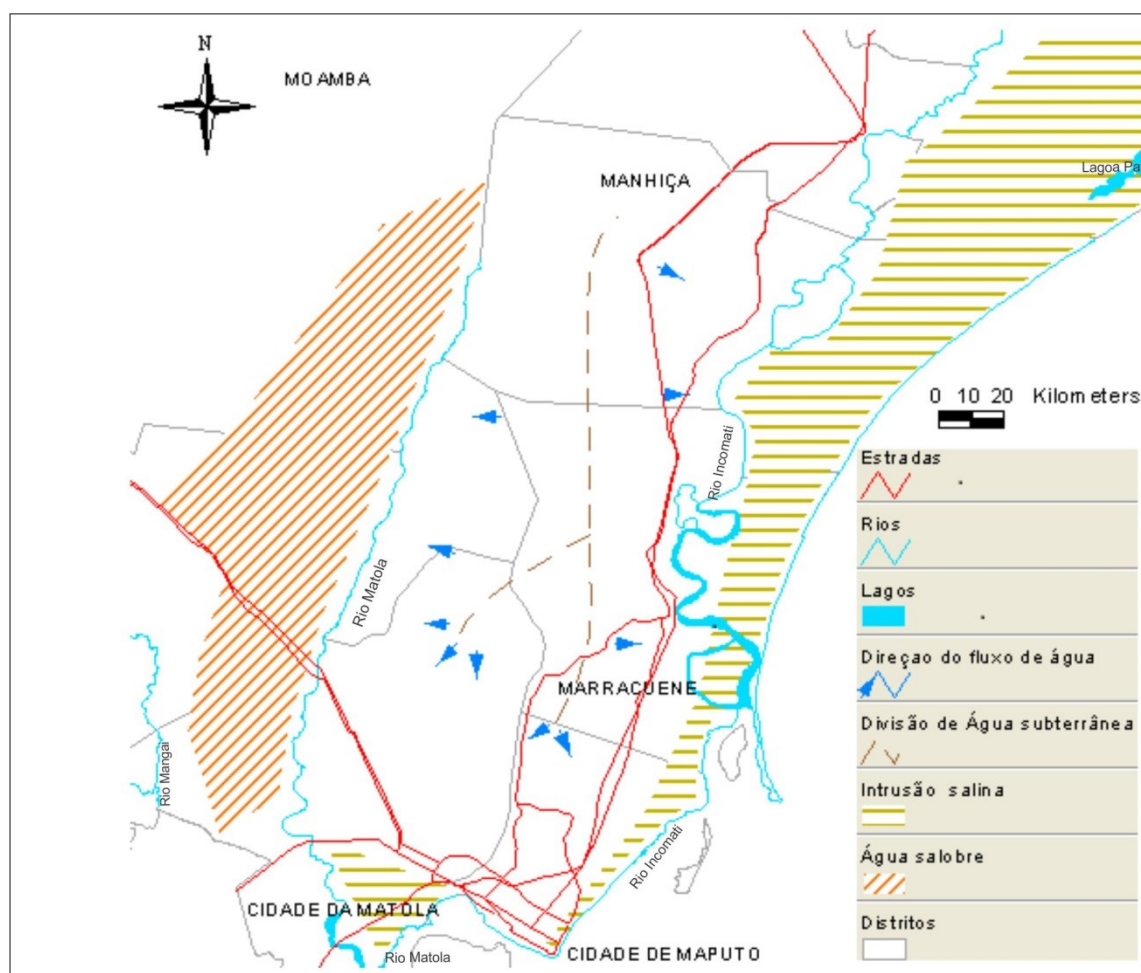


Figura 12. Delimitação do Sistema Aquífero da área Metropolitana do Grande Maputo.

Fonte: ARA-Sul, IP (2012).

c) Produtividade do Sistema Aquífero

Quanto á produtividade distinguem-se na área de estudo 5 tipos de aquíferos nomeadamente: aquíferos muito produtivos ($> 50 \text{ m}^3/\text{h}$) predominando numa pequena faixa Norte até ao Centro onde temos os aquíferos produtivos ($10\text{-}50 \text{ m}^3/\text{h}$). A Este da área estudo, predomina uma faixa de aquíferos moderados ($3\text{-}10 \text{ m}^3/\text{h}$) e a Oeste ocupado por maior parte dos aquíferos com uma produtividade limitada ($Q < 5 \text{ m}^3/\text{h}$). Por fim, numa pequena faixa Sudeste predominam os aquíferos com produtividade muito limitada ($Q < 3 \text{ m}^3/\text{h}$), como ilustra a Figura 13.

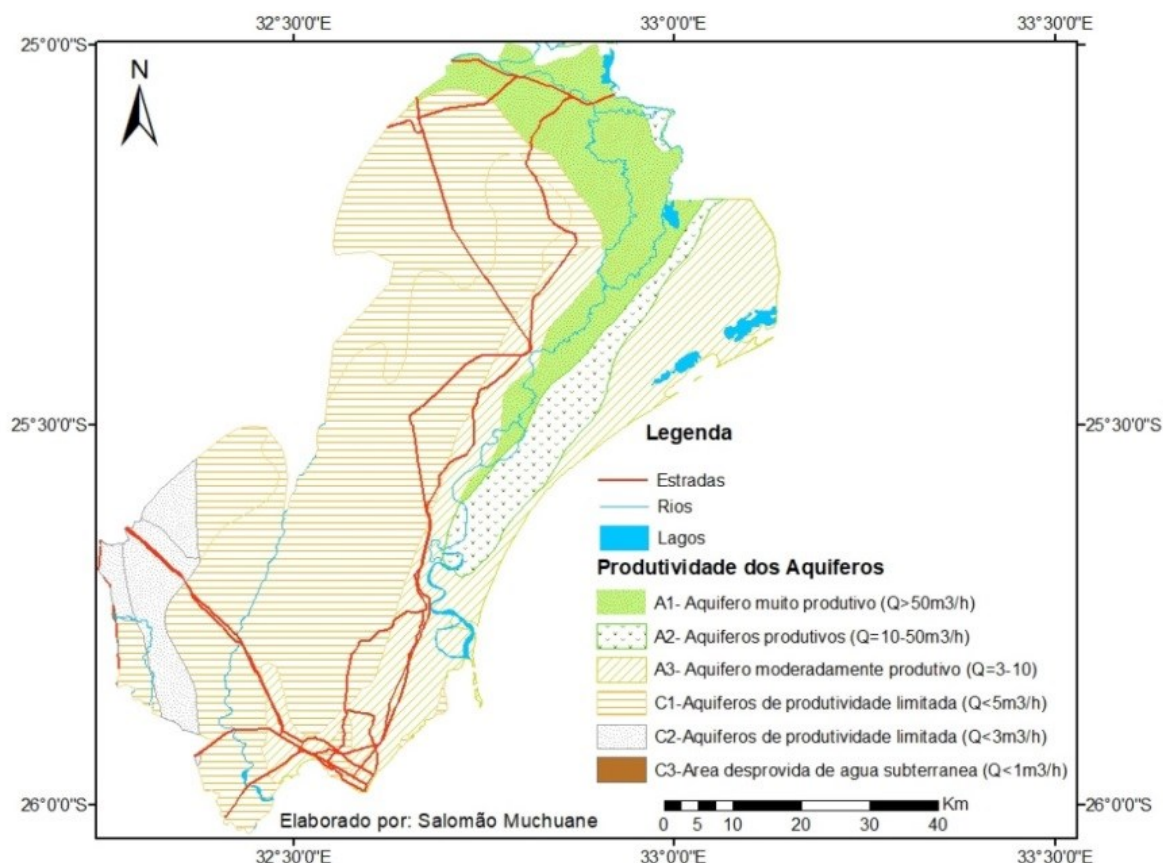


Figura 13. Produtividade dos Aquíferos da Área de Estudo (Adaptado de CENACARTA, 2013).

Segundo ARA-Sul (2012), na maioria dos locais, foram instalados piezómetros (Figura 7), um no aquífero freático superior e um no aquífero semi-confinado, as profundidades do furo final variam de 7 a 63 m. Durante o programa de perfuração, verificou-se que a camada confinante varia em espessura, sendo 0-10 m no sul e sudeste e até 60 m no noroeste. Em geral, o aquífero freático é recarregado na parte elevada das dunas de areia e as águas subterrâneas em unidades freáticas e semi-confinadas fluem em direcção aos vales dos rios e ao oceano. Segundo Cendón et al. (2020) a proximidade da linha da costa assim como o baixo perfil topográfico, pode indicar provável intrusão salina.

No concernente ao abastecimento de água e saneamento, o Sul da área de estudo é abastecido pela água captada no rio Umbelúzi e tratada numa estação (ETAR) adjacente à captação, com uma capacidade actual de 144. 000. 00 m³/dia, (FIPAG, 2012).

Segundo MOPHRH (2019) a RMGM tem os seguintes principais Centros Distribuidores: CD. Intaka; CD. Laulane; CD. Tsalala; CD. Matola Rio; CD. Matola; CD. Alto Maé; CD. Catembe e CD. Boane.

d) Captação das águas subterrâneas

Nas visitas de reconhecimento efectuadas pelo autor deste estudo, com objectivo de identificar as áreas com potencial de vulnerabilidade tendo em conta ao seu histórico /e actividades actuais de relevo, dentre os vários pontos escolhidos pelo autor foi possível constatar que os poços constituem a principal fonte de captação de águas subterrâneas em famílias de baixa renda, e os furos mecânicos reservados á famílias de alta renda para o uso doméstico, empresas, escolas, hospitais e fornecedores privados que usam como fonte de renda. Salientar que no conto geral os poços visitados são caracterizados por apresentarem fracas condições sanitárias, por falta de revestimento, ou revestidos por manilhas com alto grau de oxidação das suas paredes, poços sem cobertura, poços localizados muito próximos à latrina/fossas sépticas e outros próximos a estação de tratamento de aguas residuais na zona da antiga fábrica de 2M, o que directa ou indirectamente pode contribuir para a turbidez e contaminação das águas subterrâneas por dejectos humanos e águas residuais domésticas.



Figura 14. Cenário de vulnerabilidade de sistemas aquíferos na Estação Drive-in (Zimpeto).

As principais ameaças para captação de águas subterrâneas na área de estudo são:

- **Intrusão salina** ao longo das zonas costeiras, Figura 12;
- **Avanço da interface água doce-salobra** na parte Oeste e Norte do sistema;
- **Elevação do nível da água salobra** nos Vales de Infulene e do rio Incomati melhor destacada na zona de Praia de Macaneta;
- **Poluição de Nitratos** na parte sudeste do sistema aquífero devido ao excessivo uso e aproveitamento das terras férteis ao longo das margens do rio Mulaúze, rio Maputo e rio Incomate (Figura 11).

- **A contaminação bacteriológica** não se limita a uma zona específica porque está associada à factores locais. Por estas razões, todos os furos em áreas urbanas são vulneráveis à contaminação fecal.

4. CAPÍTULO IV: MATERIAIS E MÉTODOS

a) Metodologia e Etapas do Estudo

A metodologia adotada para a realização deste trabalho consistiu na integração das seguintes actividades: Inicialmente foi realizado um reconhecimento geral da evolução sócio-económico, expansão urbana, água e saneamento da área de estudo, o que permitiu a identificação do tema de interesse para o desenvolvimento deste estudo.

Seguiram-se trabalhos de gabinete, consistiram no levantamento bibliográfico, cartográfico que possibilitaram obter informações privilegiadas sobre a área de estudo, a citar, caracterização geral da geologia, clima, vegetação, solos, hidrologia assim como a caracterização do sistema aquífero na RMGM. Foi também feita a triagem da base de dados Excel (BdD), com informações hidrogeológicas da área de estudo fornecida pela DNGRH, o que veio a tornar o estudo menos honeroso e possível de ser feito a nível de gabinete.

Com recurso ao geoprocessamento e integração dos SIG, no caso, software ArcGis 10.2, foi feito a avaliação e mapeamento da vulnerabilidade natural das águas subterrâneas na RMGM utilizando o método DRASTIC, desenvolvido por Aller et al. (1987).

Para uma melhor condução e alcance dos objectivos do estudo, a pesquisa foi dividida em quatro etapas conforme ilustra o fluxograma Figura 15; a citar (1) Recolha de dados, (2) Sistematização da base de dados, (3) Processamento dos dados e (4) apresentação dos resultados.

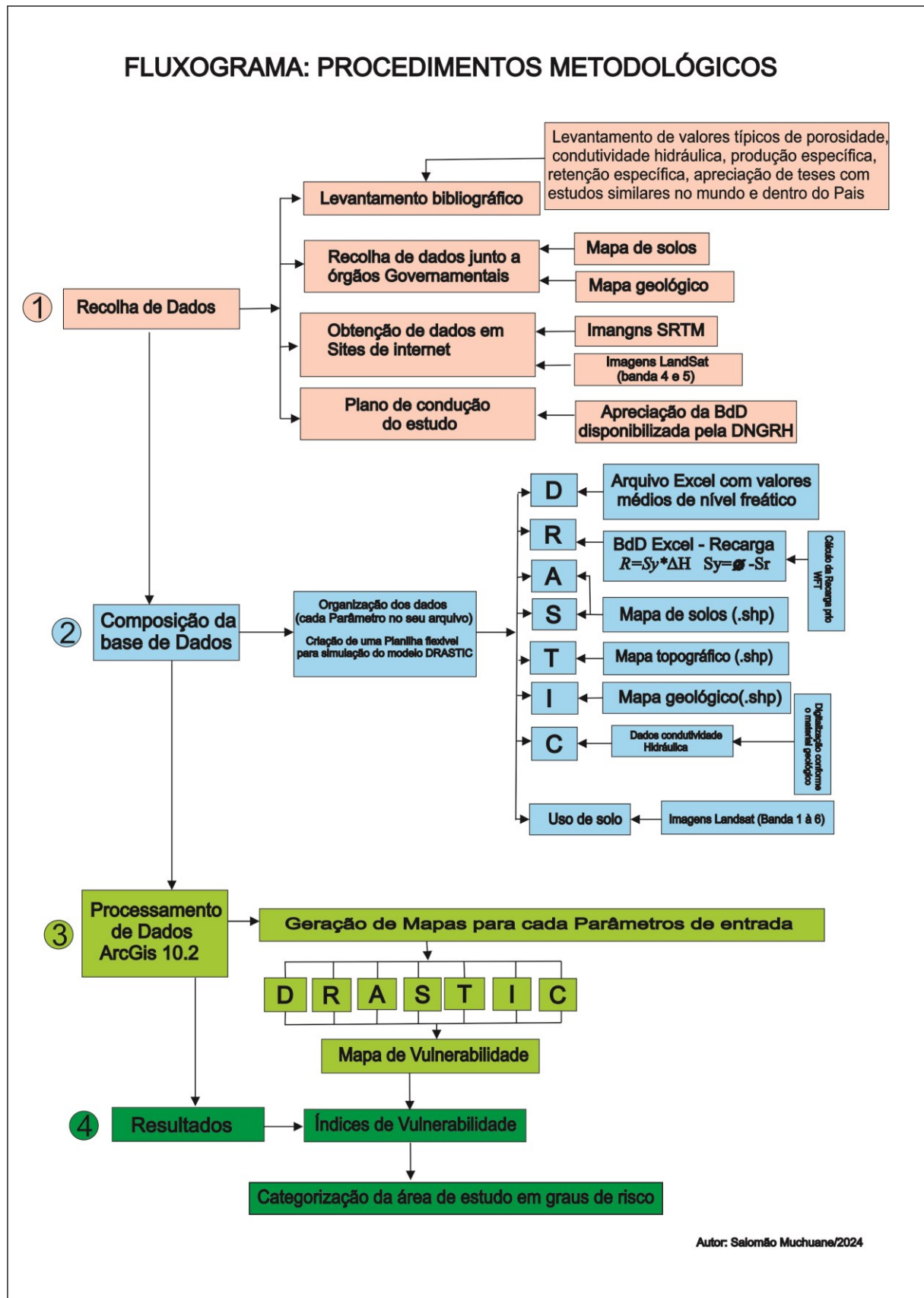


Figura 15. Fluxograma de etapas e procedimentos usados para a condução do estudo.

Fonte: Adaptado do Autor

Compõem as justificativas referentes à escolha do método as seguintes premissas baseadas em Rosa et al (2001) e Santos (2010), a grande quantidade de referencial teórico, uma vez que, o mapeamento da vulnerabilidade baseado no método DRASTIC é bastante difundido, disponibilidade de dados adequados para se alcançar os objetivos do trabalho, agrega na sua definição atributos de importância para a avaliação da vulnerabilidade, tais como: topografia, recarga, condutividade hidráulica assim como a dimensão da área de estudo.

Apesar de este método utilizar um elevado número de parâmetros, apresenta uma maior confiabilidade dos índices de vulnerabilidade finais, o que é corroborado pelo grande número de autores que aplicaram o método, como Mela Junior (2002), Lobo Ferreira e Oliveira (1998), Nobre (2006), Melo Junior e Kozersky (2008), por outro lado a disponibilização de informações necessária para a aplicação do modelo por parte de instituições governamentais.

b) Descrição do Modelo DRASTIC

O índice DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) foi desenvolvido inicialmente pela agência de proteção ambiental dos E.U.A para identificar a vulnerabilidade das águas subterrâneas.

O índice DRASTIC, equação (3), corresponde à soma ponderada de sete factores DRASTIC que correspondem à avaliação de parâmetros hidrogeológicos, como ilustra a Figura 16.

Índice = $Dw * Dp + Rw * Rp + Aw * Ap + Sw * Sp + Tw * Tp + Iw * Ip + Cw * Cp$ Equação (3) onde:

w—índice padrão de avaliação do parâmetro e **p**—peso atribuído ao parâmetro pelo autor

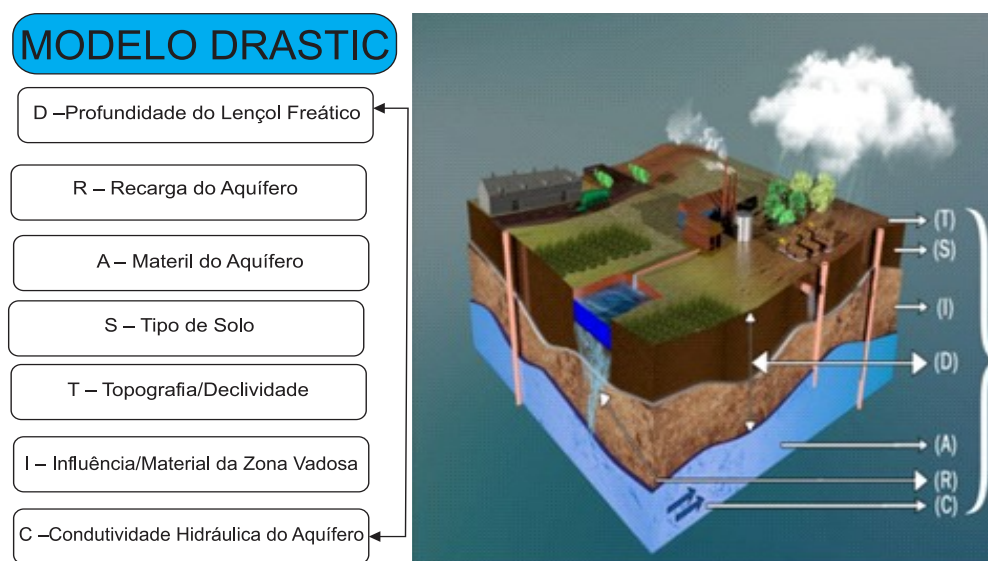


Figura 16. Parâmetros Hidrogeológicos do Método DRASTIC. Fonte: Adaptado pelo Autor.

O método DRASTIC foi norteado segundo quatro premissas (Aller *et al.*, 1987), que são:

Primeira: o contaminante é introduzido na superfície;

Segunda: o contaminante desloca-se em direção às águas subterrâneas através da infiltração de águas meteóricas e;

Terceira: o contaminante tem a mobilidade da água;

Quarto: a região em estudo possui área superior ou igual a 0,4 km².

Os índices (*w*) destacados em amarelo na Tabela 7, variam de 1 a 5, sendo atribuído peso 1 a variável que exerce menor influência de contaminação e índice 5 a variável que exerce maior influência na contaminação do aquífero. Após a geração de cada parâmetro de entrada, a esses são atribuídos, um peso de hierarquização dos valores (*p*) entre 1 e 10, dependendo da sua classe de atributo, determinada pelas condições locais da área de estudo.

Tabela 7: Parâmetros DRASTIC com os respectivos índices (*w*) e os pesos (*p*) aplicados.

D-Profundidade da água zona Insaturada (m)							
V	0 – 2	2 – 4	4 – 9	9 – 15	15 – 23	23 – 30	>30
P	10	9	7	5	3	2	1
W=5	Ind=(37/7)*5=26,42						
R-Recarga (mm/ano)							
V	0 – 53	53 – 104	104 – 177	177 – 254	>254		
P	1	3	6	8	9		
W=4	Ind=(27/5)*4=21,6						
A-Material do Aquífero				S-Tipo de Solo			
V			P	V			P
	Camada confinante		1	Pouco Profundo sobre cobertura calcária			10
	Sedimentos organicos		2	Dunas			9
	Depósitos indeferenciados		3	Arenoso			8
	Terraços aluvionares		4	Post mananga			6
	Marga, Grés calcário		5	Mananga com cobertuta arenosa			7
	Arenito maciço/calcário		6	Siltosos			5
	Calcário Cárstico		7	Sedimentos marinhos			4
	Areia e cascalho		8	Aluvionares argilosos			3

	Basalto		9	Argiloso desagregada e não expansível		1
W=3	Ind=(30/5)*3=18			Ind=(53/9)*2=11,7		W=2
T-Topografia/ (declividade %)						
V	0 – 1	1 – 2	2 – 5	5 – 10	>10	
P	10	9	5	3	1	
W=1	Ind=(28/5)*1=5,6					
I-Impacto da Zona Vadosa (Insaturada)						
I-Impacto da Zona Insaturada	V			P		
	Camada confinante			1		
	Argila, silte			2		
	Areia siltosa			3		
	Rocha Calcária			5		
	Arenito fino a médio			6		
	Areia e cascalho com significativo silte e argila			7		
	Arenito cimentado			4		
	Areia e cascalho			8		
	Basalto			9		
W=5	Ind=(45/9)*5=25					
C-Conductividade Hidráulica (m/dia)						
V	0 – 12.2	12.2 – 40.7		40.7 – 81.5	>81.5	
P	2	6		9	10	
W=3	Ind=(27/4)*3=20,25					

Fonte: Aller *et al.* (1987) adaptado do autor (V-variáveis , P- pontuações atribuídas)

c) Integração e Manipulação de Dados em SIG

Segundo Lenzerini (2002). A integração de dados em SIG, de uma forma geral, visa dar ao usuário uma visão unificada dos dados, mesmo que estes estejam em diferentes bases, permitindo consultas e análises dos mesmos. Após mapear os parâmetros a serem analisados, uma importante etapa se faz com a interpolação dos mapas, a qual é realizada por meio de um SIG. Esta etapa refere-se à inferência de pesos e cargas a serem ponderados.

Seguiu-se o cruzamento dos sete Mapas: Mapa de profundidade do lençol freático (D), Mapa de recarga do aquífero (R), Mapa de material de aquífero (A), Mapa de tipo de solos (S), Mapa de topografia (T), Mapa de impacto da zona vadosa (I), e o Mapa de condutividade hidráulica (C). A soma dos produtos dos pesos e índices produziu a classificação final, transformada então em vulnerabilidade natural à contaminação do sistema aquífero na área de estudo.

Foi utilizado para o presente estudo uma base de dados com 749 piezômetros distribuídos ao longo da área de estudo (Figura 17) correspondente a pesquisas e monitoramento feito nos últimos 5 anos. Estes dados estão disponíveis na DNGRH; foram também utilizadas informações de estudos similares, efectuados por grandes firmas como é o caso da ARA-Sul, DNG, Centro de Formação Profissional de Água e Saneamento (CFPAS), CENACARTA, Dissertações e outras publicações na Internet. A metodologia DRASTIC classifica os índices obtidos de acordo com a tabela 2 Anexos.

Quanto maior for o índice DRASTIC, maior será a vulnerabilidade do aquífero à poluição. No entanto, um valor baixo do índice não significa que não possa ocorrer poluição, apenas que a mesma será menos provável e menor que em outras áreas.

d) Espacialização dos dados

Um melhor método de análise de dados baseia-se na interpolação dos dados, pois, os valores intermediários são preservados e o resultado final é uma superfície contínua de dados mais suavizados, minimizando os contrastes entre os polígonos (Jacob e Young, 2006).

O ArcGIS dispõe de diversos métodos, Ponderação do Inverso das Distâncias (IDW), Krigagem, Natural Neighbor e Spline. Para a interpolação de dados foi utilizado o interpolador IDW e o método foi imprescindível para o resultado alcançado no mapa final.

Segundo Vargas *et al.* (2018), a diferença entre o método de interpolador de (IDW) e os outros métodos é que no método interpolador de IDW há uma boa competência na modelagem dos parâmetros hidráulicos pois não estima valores maiores e menores que os máximos e mínimos dos dados. A espacialização dos furos é apresentada no Mapa da Figura 17, no qual é possível verificar que há uma maior concentração dos furos a Sul da área de estudo por apresentar a maior densidade populacional devido à urbanização. Este facto vai influenciar no método interpolador de IDW, visto que, quanto maior for a malha de amostragem, mais preciso será o resultado.

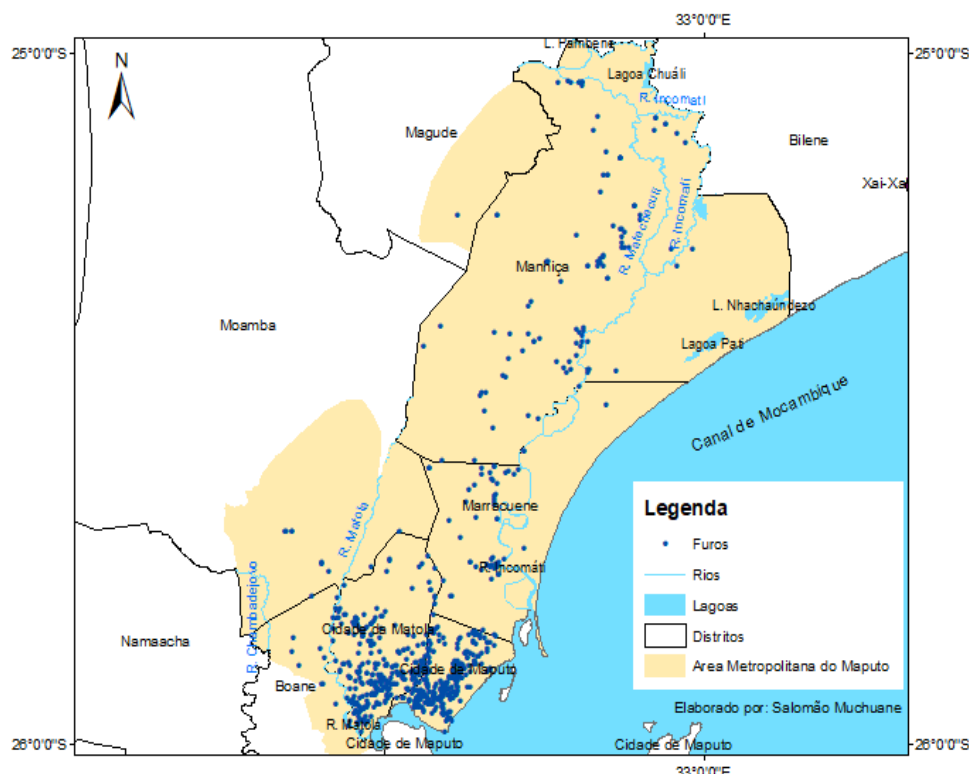


Figura 17. Espacialização dos furos e hidrologia da área de estudo (Adaptado de CENACARTA, 2013).

5. CAPÍTULO V: APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1. Apresentação dos Resultados

a) Profundidade do nível freático (D)

Implica na espessura da zona não saturada, onde a água da precipitação infiltra no solo arrastando consigo o contaminante, atingindo o aquífero. A ideia principal é que quanto menor for a profundidade do nível d'água, maior será a probabilidade de o aquífero ser contaminado (Aller *et al.*, 1987). Na Figura 18 é possível verificar uma variância da distância dos níveis estáticos dos aquíferos em relação a superfície terrestre na área de estudo, o que é testemunhado pelas pontuações atribuídas na Tabela 7. Verifica-se uma tendência na área Sul de estudo os aquíferos tendem a ser menos profundos em relação aos aquíferos da zona centro, Norte e sudoeste da área de estudo. No geral a maioria dos aquíferos a área de estudo têm profundidades compreendidas entre 9 m à < 30.0 m, mas é possível verificar que na parte sul existem embora ocupem uma parcela muito pequena, aquíferos com profundidades inferiores a 9 m e 1.5m recebendo pontuações 9 e 10 respectivamente.

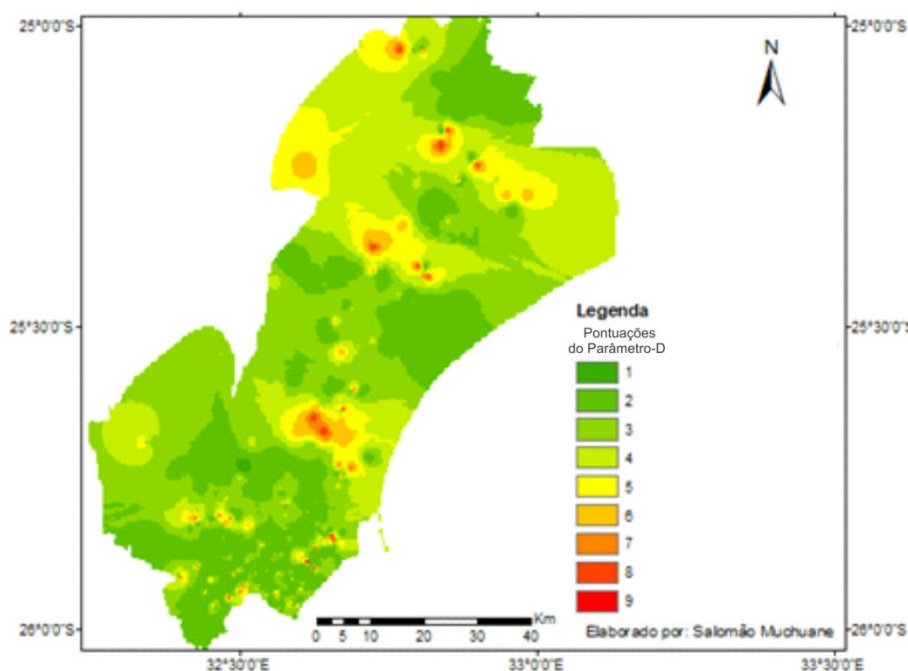


Figura 18. Distribuição espacial do parâmetro D na área de estudo (Adaptado de CENACARTA, 2013).

b) Recarga (R)

Segundo Ribeiro (2005), a recarga do aquífero é a quantidade de água por unidade de superfície do solo e que ajuda a realimentar a zona saturada (aquífero). É considerado o principal veículo transportador do contaminante e resulta essencialmente da fração da precipitação que não é evapotranspirada nem escoada superficialmente. Segundo Hirata e Fernandes, (2008) os índices de recarga dos aquíferos livres e o potencial de contaminação, são maiores nesses do que nas áreas com aquíferos confinados, pelo que, quanto maior for à recarga, maior será o potencial de contaminação da água subterrânea.

Para obtenção do parâmetro Recarga do Aquífero (R), realizou-se no SIG ArcGis 10.2, a espacialização dos 749 dados de recarga calculados pelo autor com base no método WFT descrito no capítulo III, sobre a base cartográfica do mapa geológico digitalizada.

A base de dados de monitorização do nível freático ΔH foi disponibilizada pela DNGRH referente aos últimos 5 anos e para o cálculo da recarga, foram usados valores típicos de porosidade, produção específica e retenção específica (Tabela 1) e com ajuda do interpolador *Kriging* do ArcMap 10.2, foi convertida a escala pontual de recarga para escala espacial resultando no mapa da Figura 19.

Os resultados obtidos expressam que, a taxa de recarga atinge os maiores índices nas Formações basálticas fracturadas e grés calcário carstico com valores acima de 465 mm

equivalente aos índices 7 a 9, correspondente a áreas mais vulneráveis seguida dos Sedimentos aluvionares com uma recarga média de 305 mm, com índices 5 e 6.

Entre as menores taxas de recarga, estão as regiões situadas sob as formações argiliticas, siltosa e areníticas cimentado com valores entre 75 mm e 215 mm recebendo índices entre de 1 a 4. O Parâmetro da Recarga é um dos parâmetros que recebe peso mais alto na ponderação do cálculo pelo modelo DRASTIC, portanto tem grande influência no índice final de Vulnerabilidade.

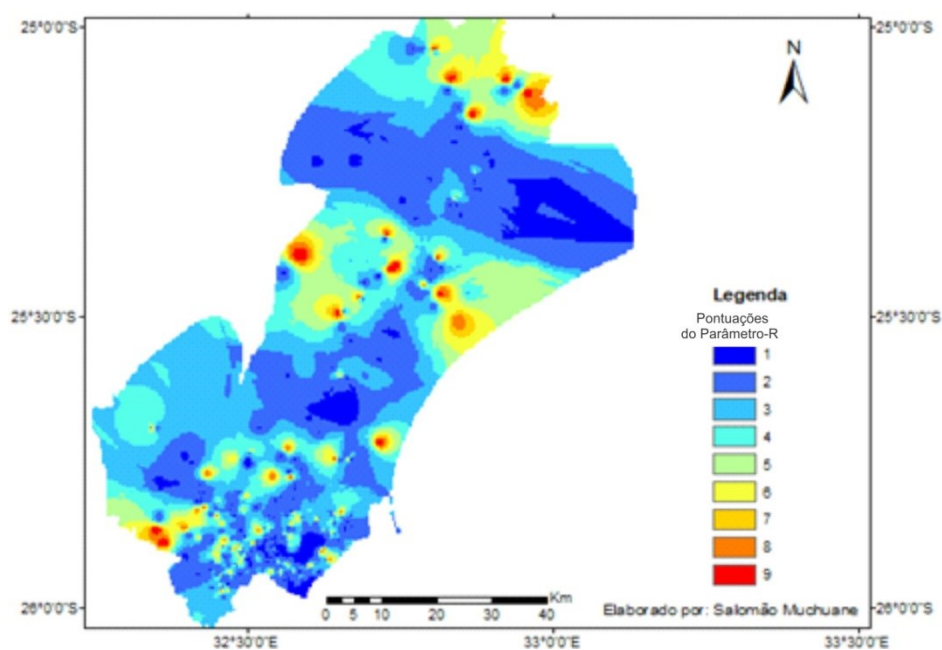


Figura 19. Distribuição espacial do parâmetro R na área de estudo.

c) Material do aquífero (A)

A natureza do aquífero de acordo com suas unidades geológicas determina a mobilidade do contaminante em atravessar a zona não saturada até atingir o nível freático, ou seja, o tempo de residência do contaminante (Aller *et al.*, 1987). Quanto maior for o tempo de residência do contaminante no aquífero, mais atenuado será o seu efeito. Quanto mais permeável for, mais vulnerável ele será. A Figura 20 mostra os pesos e os índices aplicados a esse parâmetro.

O parâmetro A é subdividido em 9 classes área de estudo é constituída maioritariamente por, areias, areias argilosos e siltosas, terraços e aluviões. Encontra-se também na área de estudo materiais compostos por rochas extrusivas e a pontuação assumida foi a mesma que se da ao Basalto (9) devido a similaridade nas características. O material de aquífero foi atribuído

índices 1 a 9. Analisando o mapa, os índices abaixo de 5 foi atribuído a zona onde há decorrência de solos argilosos como consequência da sua baixa porosidade a vulnerabilidade destes solos é reduzida. Em decorrência disso, a área onde apresenta índice maiores que 5, é ocupada maioritariamente por solos arenosos e rochas vulcânicas. Portanto, devido à alta condutividade hidráulica e por apresentar solos com partículas de grande granulometria, torna estas zonas muito vulneráveis a contaminação.

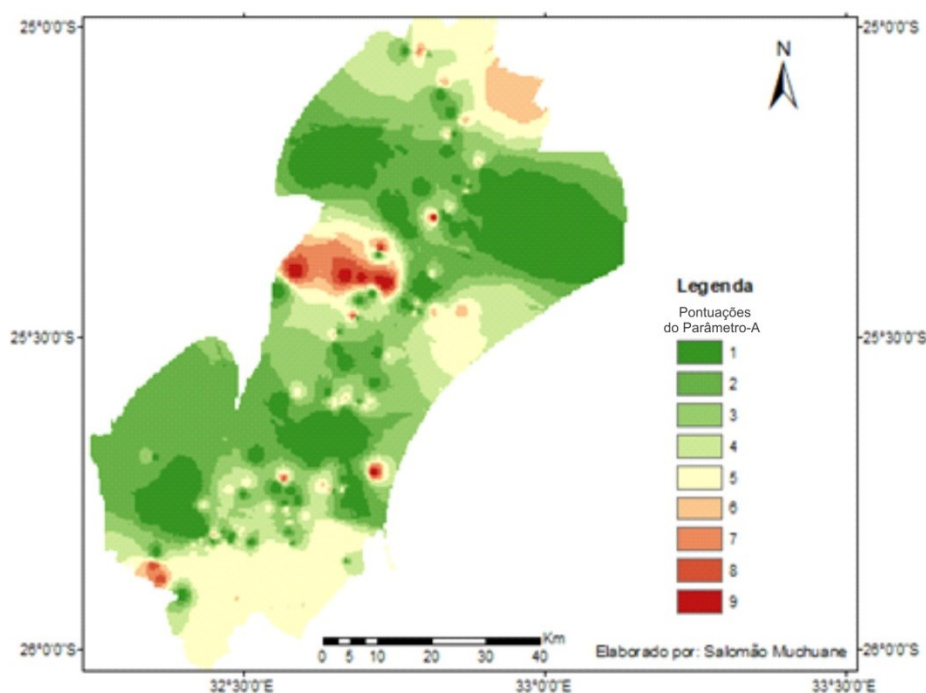


Figura 20. Distribuição espacial do parâmetro A na área de estudo.

d) Solo (S)

Corresponde à parte superior da zona vadosa ou não saturada, que se caracteriza pela atividade biológica intensa. Em conjunto com o parâmetro A eles determinam a quantidade de água de percolação que atinge a superfície freática. O enquadramento e a pontuação deste fator basearam-se no mapeamento da textura do solo que define a sua maior ou menor permeabilidade.

A maior parte da área de estudo é constituída por solos de textura arenosa, que receberam a maior pontuação (9), os solos arenosos, devido a sua granulometria possuem menos poder de atenuar o contaminante e impedir que este se infiltre no aquífero pois permitem a passagem de água com muita facilidade devido ao seu fraco poder de retenção. A menor pontuação, foi atribuída aos solos de textura franco argilosa pois apresentam menor vulnerabilidade devido ao

seu poder de atenuação que é relativamente maior que os solos de textura arenosa, porém a predominância desse tipo de solos na área de estudo é baixa podendo ser encontrados a Norte e ainda a Sudoeste. A Este e Nordeste da área de estudo há predominância de solos de textura Argilosa representados pela cor laranja e solos de mananga e arenosos receberam as pontuações 7 e 8 respectivamente.

Com relação aos solos que apresentam textura argilosa e silte-argilosos, resultantes da decomposição de rochas basálticas, além de estarem situados sob terrenos mais íngremes, sendo assim recebem cargas abaixo de 5 por serem menos vulneráveis. Solos Líticos receberam segundo a metodologia DRASTIC, carga 7, por estes localizarem-se, em sua maioria, sob relevos de alta declividade, onde a ação do escoamento superficial sobrepõe-se à infiltração, levando à formação de solos rasos de espessura normalmente entre 20 a 40 cm de profundidade. A análise dos solos da área de estudo detectou um total de 9 classes de solos.

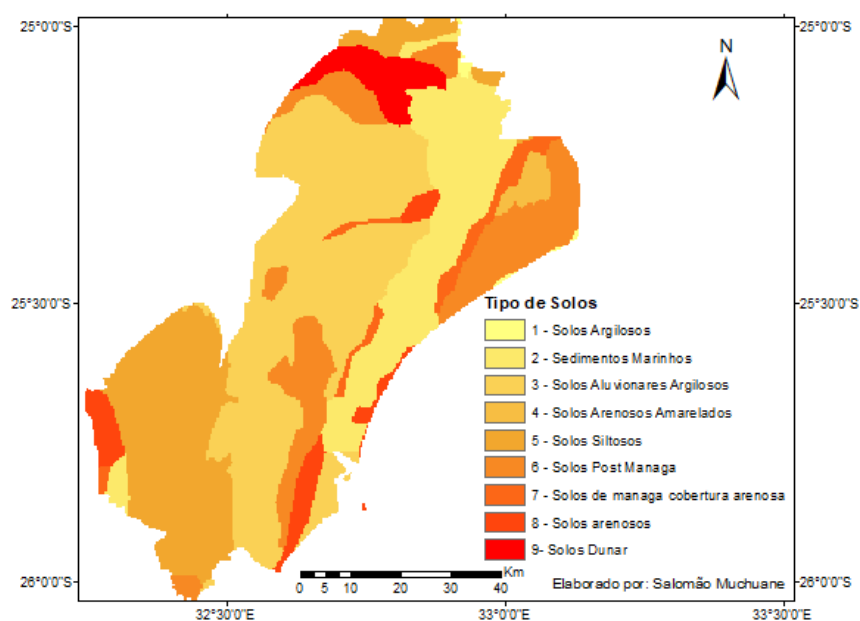


Figura 21. Distribuição espacial dos solos na área de estudo (Adaptado de CENACARTA, 1997).

e) Topografia (T)

Contribui para o cálculo do índice DRASTIC, em função do declive, quanto maior for o declive menor será o potencial de poluição, devido à maior escoamento superficial. A topografia tem sua relevância porque o gradiente e o sentido do fluxo subterrâneo frequentemente podem ser inferidos pela inclinação da superfície no caso dos aquíferos livres.

A topografia do terreno foi obtida através da interpretação visual da imagem digital de elevação SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), obtida gratuitamente pelo site *Earthexplorer*. Através da ferramenta *Arc Hydro tools* (que é uma extensão Arcmap), e por meio do comando *slope* foi interpolada a imagem SRTM e depois a geração da declividade do terreno na base percentual conforme ilustra o mapa da Figura 22.

Observa-se que o terreno apresenta-se na sua maioria com declividades baixas (0-2%) representadas pela coloração verde que recebe a pontuação mais elevada que é de 10, isto porque quanto menor for a elevação do terreno, menor será o escoamento superficial da água promovendo dessa forma maior probabilidade de infiltração da água e consequentemente a migração do contaminante para o aquífero, portanto os terrenos planos apresentam maior vulnerabilidade em relação aos terrenos mais íngremes.

Embora maior parte da região apresente declives entre 0-2 %, verifica-se uma pequena variação ao longo de toda área de estudo em que a acentuação do terreno chega a 4%, e a Sudeste representado pela cor amarelo chegando até 7%. Existem na área de estudo regiões em que o terreno apresenta declividades superiores a 7% extremamente associados aos altos topográficos, escarpas basálticas do Karroo e terraços da ponta vermelha que abrangem as cidades de Maputo e Marracuene.

Essas localidades diminuem o potencial de um contaminante atingir o aquífero, por se tratarem de áreas que permitem maior escoamento e menor infiltração.

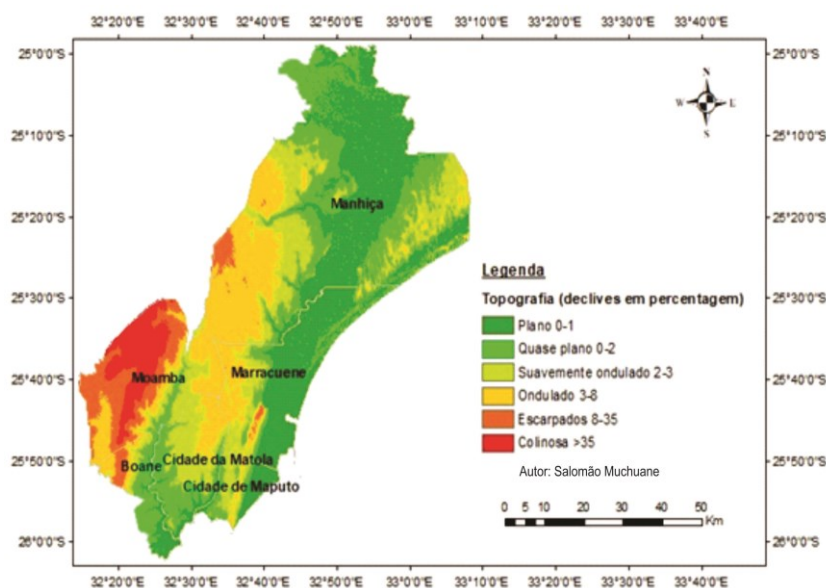


Figura 22. Distribuição espacial da topografia na área de estudo (Adaptado de CENACARTA, 1997).

f) Impacto da zona não saturada (I)

O parâmetro da influência da zona vadosa está relacionado ao tipo de material que compõe a zona não saturada, o mesmo vai determinar a velocidade vertical de percolação do contaminante até atingir o aquífero. Para este parâmetro foram encontradas 9 classes de um total de 11 classes. A zona não saturada/ vadosa da área de estudo é maioritariamente composta por areias há também presença de riólito com a pontuação 4 a pontuação 3 foi atribuída aos materiais de argila e silte, no entanto verificou-se na área a presença de grés que também recebeu a pontuação 3 por tratar-se de um material derivado de argila, foram atribuídas cargas mínimas (1), uma vez que, segundo a metodologia a presença de uma camada confinante minimiza a ação e tempo de contacto do poluente e retarda o processo de infiltração e recarga do aquífero. Para os Sedimentos Aluvionares, foram atribuídas as maiores cargas (8), por se tratarem de sedimentos com baixo teor de argila e silte e alta taxa de recarga. Os arenitos das Formações Grudja recebendo cargas entre 4 - 8. O parâmetro I juntamente com o parâmetro D são os mais importantes na determinação da vulnerabilidade do aquífero pelo método DRASTIC por essa razão recebem os maiores pesos (5). O resultado do mapeamento do parâmetro I, referente à litologia da zona não saturada na área de estudo, pode ser verificado na Figura 23.

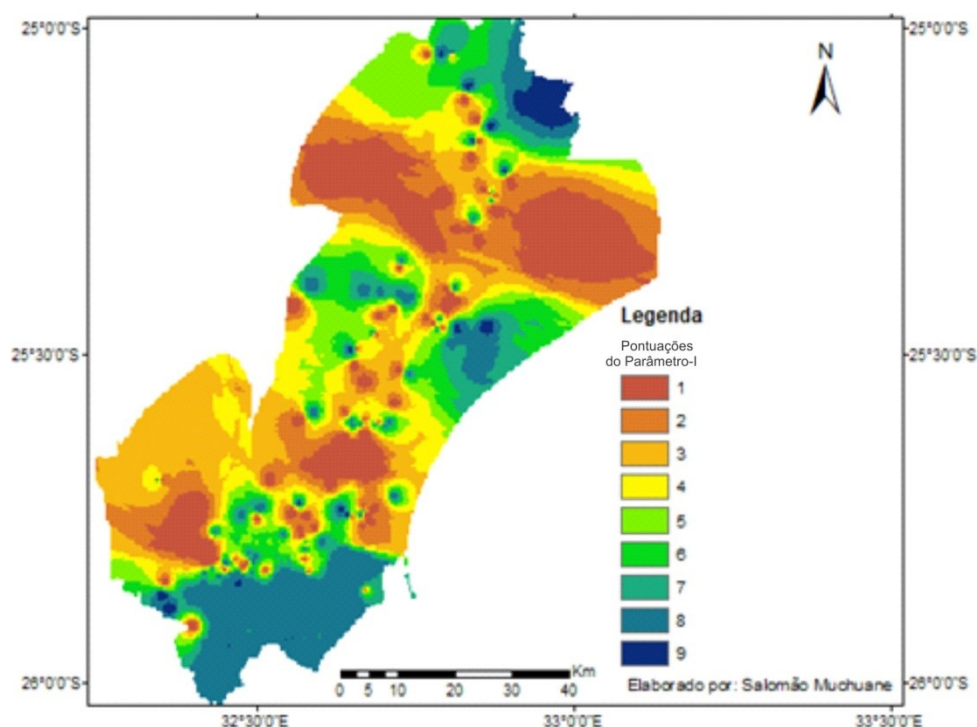


Figura 23. Distribuição espacial do parâmetro I na área de estudo.

g) Permeabilidade ou Condutividade hidráulica (C)

Segundo Fiori *et al.* (2010) a condutividade hidráulica determina a quantidade de água que atravessa o aquífero por unidade de tempo e por unidade de seção. A condutividade hidráulica tem a ver com a facilidade com que o meio aquífero transmite a água em meio poroso, isto é, a permeabilidade depende muito do tamanho e uniformidade dos grãos no caso de formações não consolidadas e do grau de alteração e fracturação no caso das formações rochosas, a temperatura e a viscosidade da água. Assim, quanto, maior for a taxa de transporte para o meio aquífero maior será a condutividade e maior será a possibilidade de contaminação do aquífero dado que os materiais, muito permeáveis, encurtam o tempo que o contaminante leva ao aquífero. Ressaltam ainda, que quando os valores de condutividade hidráulica (K) não forem amostrados em campo, esses podem ser encontrados na literatura, através das correlações do tipo de material com a sua possível condutividade hidráulica. E assim é possível, classificá-los em função de intervalos, conforme mostra a Tabela 8.

Tabela 8: Condutividade hidráulica de materiais geológicos (não consolidados, rochas sedimentares e cristalinas).

Material geológico	Condutividade hidráulica (m/s)
Sedimentos não consolidados	
Cascalhos	3.10^{-4} á 3.10^{-2}
Areia Grossa	9.10^{-7} á 6.10^{-3}
Areia media	9.10^{-7} á 5.10^{-4}
Areia Fina	2.10^{-7} á 2.10^{-4}
Silte	10^{-9} á 2.10^{-5}
Argila	10^{-11} á $4,7.10^{-9}$
Rochas Sedimentares	
Karst e Rochas calcárias eruptivas	10^{-6} á 2.10^{-2}
Dolomite e rochas calcárias	10^{-9} á 6.10^{-6}
Arenito	3.10^{-10} á 6.10^{-6}
Argilito	10^{-11} á $1,4.10^{-8}$
Sal	10^{-12} á 10^{-10}
Anidrita	4.10^{-13} á 2.10^{-8}
Argila Xistosa	10^{-13} á 2.10^{-9}
Rochas Cristalinas	
Basalto permeável	4.10^{-7} á 2.10^{-2}

Rochas ígneas e metamórficas fracturadas	8.10^{-9} á 3.10^{-4}
Granito intemperizado	$3,3.10^{-6}$ á $5,2.10^{-5}$
Rocha magmática, gabbro	$5,5.10^{-7}$ á $3,8.10^{-6}$
Basalto	2.10^{-11} á $4,2.10^{-7}$
Rochas ígneas e metamórficas não fracturadas	3.10^{-14} á 2.10^{-10}

Fonte: Domenico and Schwartz (1990), obtido do site AQTESOLV.

Os dados de condutividade hidráulica foram obtidos em estudos similares e tem como base a Litologia do meio aquífero.

Na região de estudo, a respeito deste parâmetro, podem-se destacar os resultados do trabalho de ARA-Sul (2012) que realizou o estudo da condutividade hidráulica no sistema aquífero da Região Metropolitana do Grande Maputo tendo encontrando quatro categorias: satisfatório, moderada, má e extremamente má, correspondente a magnitude $< 10^{-8}$ a $> 10^{-2}$ cm.s^{-1} . O comportamento do nível e CE na área de estudo é ilustrado na Figura 24.

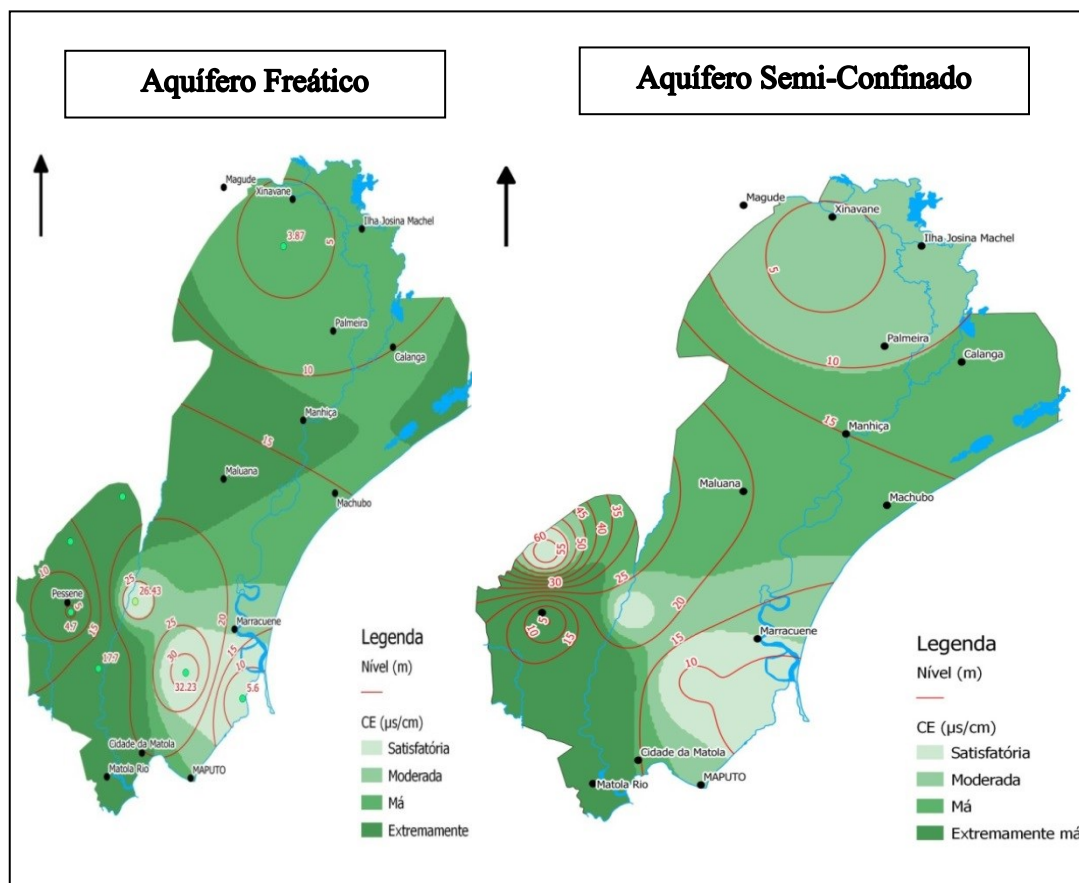


Figura 24. Distribuição espacial do parâmetro C na área de estudo. Fonte: (ARA-Sul, IP 2012).

Tabela 9: Classificação de magnitudes da condutividade hidráulica.

K(cm.s-1)	Magnitude	Exemplos de Materiais
$>10^{-3}$	Muito Satisfatório	Cascalho elasto-suportado /Fratura com abertura maior que 5 mm
10^{-3} a 10^{-5}	Satisfatório	Arenito Grosso, puro e bem selecionado
10^{-6}	Moderada	Arenito fino a média, com matriz/Solo arenoso
10^{-7} a 10^{-8}	Má	Solo argiloso/Siltito pouco fraturado/ Grauvaca/ Arenito
$<10^{-8}$	Extremamente Má	Siltito argiloso / Solo argiloso sem estruturação / Folhelho.

Fonte: Adaptado de Freeze e Cherry, (1996).

h) Determinação do Índice Drastic Total

Após mapear os parâmetros a ser analisada (Tabela 7), uma importante etapa se faz com a interpolação dos mapas, a qual é realizada por meio de um SIG. Esta etapa refere-se à inferência de pesos e cargas a serem ponderados. Seguiu-se o cruzamento dos sete Mapas (ficheiros *raster*) utilizados como dados de entrada (*inputs*): Mapa de profundidade do lençol freático (D), Mapa de recarga do aquífero (R), Mapa de material de aquífero (A), Mapa de tipo de solos (S), Mapa de topografia (T), Mapa de impacto da zona vadosa (I), e o Mapa de condutividade hidráulica (C). A soma dos produtos dos pesos e índices equação (1) produziu a classificação final, transformada então em vulnerabilidade natural à contaminação do sistema aquífero na área de estudo.

De acordo com os pesos associados a cada fator do índice DRASTIC, para o estabelecimento das classes de vulnerabilidade, foram multiplicados, os pesos dos parâmetros intermediários pelas cargas das variáveis e verificou-se que o índice final DRASTIC variou de 26,42 a 128,52 e de acordo com a escala de vulnerabilidade, corresponde à valores de vulnerabilidade baixa(reduzida), média e alta(elevada). Os valores referentes ao cálculo do somatório do índice DRASTIC são apresentados na Tabela 10.

$$\text{Índice DRASTIC} = DwDp + RwRp + AwAp + SwSp + TwTp + IwIp + CwCp \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{O Índice Total} &= 5*(37/7) + 4*(27/5) + 3*(30/5) + 2*(53/9) + 1*(28/5) + 5*(45/9) + 3*(27/4) \\ &= 26,42 + 21,6 + 18 + 11,7 + 5,6 + 25 + 20,25 \\ &= 128,52 \end{aligned}$$

Tabela 10: Cálculo de Valores de ponderação do índice DRASTIC.

Parâmetros	Σ	Classes	Média= $\Sigma/(\text{Classe})$	Pesos(w)	Índices=Média*Peso
D	37	7	5,28	5	26,42
R	27	5	5,4	4	21,6
A	30	5	6	3	18
S	53	9	5,88	2	11,7
T	28	5	5,6	1	5,6
I	45	9	5	5	25
C	27	4	6,75	3	20,25
					Total = 128,52

Fonte: Adaptado do autor

i) Mapeamento do Índice DRASTIC Total

Os dados referentes aos dois índices foram então compilados para o SIG ArcGis 10.2, para que o software realiza-se a ponderação e espacialização das classes de vulnerabilidade mediante o uso da ferramenta *Weighted Overlay*, Tendo resultado que, valores de vulnerabilidade obtidos até 66 são considerados baixos (reduzida); entre 66 e 92 a vulnerabilidade é considerada média; entre 92 e 118 a vulnerabilidade é considerada alta (elevada) e acima de 118 muito elevada e os resultados do mapeamento DRASTIC são apresentados no mapa da Figura 25, e os percentuais de distribuição/classe na Tabela 11.

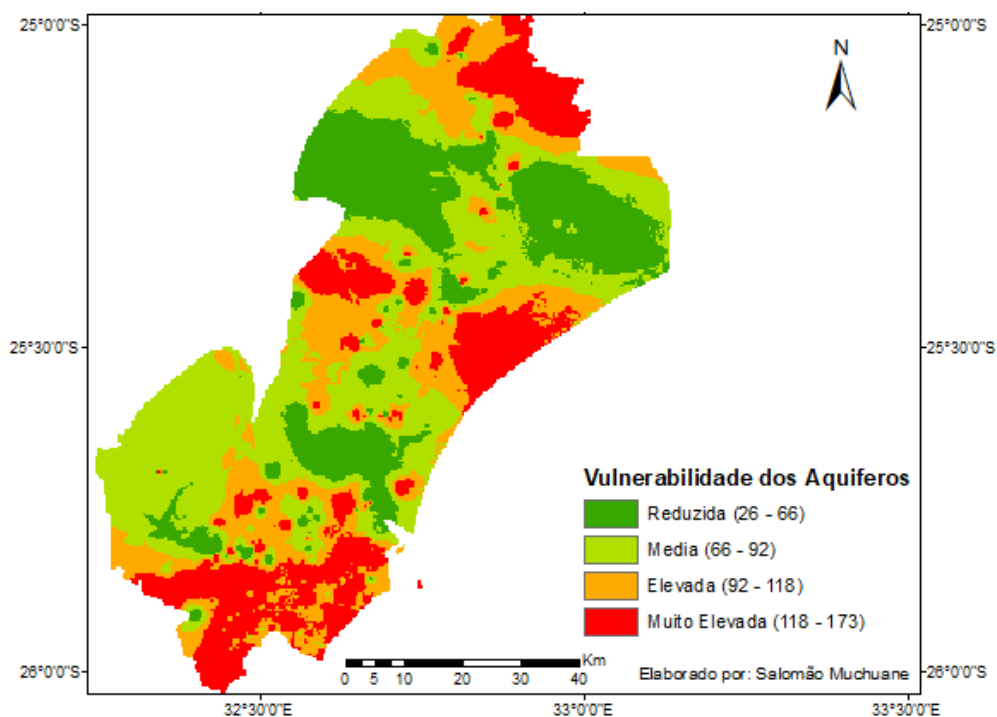


Figura 25: Classes de vulnerabilidade do Sistema Aquífero da Área Metropolitana do Grande Maputo.

Tabela 11: Dispersão percentual dos Índices DRASTIC na área de estudo. Fonte: Adaptado do autor.

Classes	Área em (%)
Muito elevada	19,79 %
Elevada (Alta)	22,45 %
Média	35,66 %
Reduzida (Baixa)	22,1 %
Total	100 %

O mapeamento do índice DRASTIC da RMGM, ilustrado na Figura 25, apresenta em sua maioria, uma média vulnerabilidade à poluição correspondendo a 35,66% da área do estudo, enquanto que as classes de elevada e muito elevada vulnerabilidade ocupam respectivamente 22,45% e 19,79% da área de estudo.

5.2. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

a) Índice de vulnerabilidade DRASTIC

Segundo o autor desta pesquisa a vulnerabilidade de um sistema aquífero pode ser entendida como uma medição do quão fácil ou difícil para um poluente ou uma contaminação, a partir da superfície, atingir um aquífero produtivo.

A avaliação do índice de vulnerabilidade feita pelo autor desta pesquisa utilizando o modelo DRASTIC, classificou o sistema aquífero da RMGM em 4 classes de vulnerabilidade, o que demonstra o nível de detalhe do modelo quando comparado com resultados do Índice GOD, utilizado na mesma área de estudo e em períodos diferentes por Naylla (2020) e Mabote (2022); uma vez que com o modelo GOD ambos detectaram respectivamente a existência de duas e três classes de vulnerabilidade, sendo que duas foram detectadas nos dois modelos conforme os dados apresentados na tabela 12.

Tabela 12: Classes de vulnerabilidade da RMGM utilizando os métodos de índice GOD e DRASTIC.

Classe de vulnerabilidade	Nayalla (2020)	Mabote (2022)	Muchuane (2024)	
	GOD (38 Pz)	GOD (18 Pz)	DRASTIC (749 Pz)	
Extrema (Muito elevada)			X	19,79%
Alta (Elevada)		X	X	22,45%
Moderada (Média)	X	X	X	35,66%
Baixa (Reduzida)	X	X	X	22,1%
Insignificante	X			

Fonte: Adaptado pelo Autor.

Entende o autor desta pesquisa que, os resultados da vulnerabilidade apresentados pelo índice GOD podem ser aparentes, atendendo o número de parâmetros utilizados para a avaliação, pois segundo Kaddour *et. al.*, (2018), em áreas de estudo próximas do mar, há um maior risco de poluição, através da intrusão salina, processo comum em aquíferos costeiros.

Em função das actividades antropológicas, isto é, o uso de fertilizantes e pesticidas, o mau sistema de saneamento, a falta de infra-estruturas de abastecimento de água, a perfuração desordenada de furos e sem seguir as regras básicas de posicionamento e as lixeiras são considerados factores que podem alterar o perfil actual da vulnerabilidade dos aquíferos, ao longo do tempo como já foi demonstrado em estudo (Muiuane, 2005).

Segundo Naylla (2020), as classes variam de insignificante (0-0.1) que ocupa a maior extensão e coincide com aquíferos semi-confinados cobertos por camada de argila e a baixa vulnerabilidade (0.1-0.3), ocupa também uma pequena parte dos aquíferos semi-confinados, e médio (0.3-0.5), nas zonas de Lagoa Phati, Chiau e Macandze situadas a Nordeste do distrito de Manhiça, onde predominam os aquíferos livres com uma cobertura arenosa contendo uma pequena percentagem de argila, que causa a diminuição da permeabilidade das areias e consequentemente, aumentam a inacessibilidade hidráulica do aquífero.

Segundo Mabote (2022), a metodologia GOD revelou que o sistema aquífero, apresenta vulnerabilidade baixa nas áreas argilosas, e em áreas com a presença da camada semi-confinante, média nas áreas arenosas e alta vulnerabilidade para as áreas em que esta não ocorre a camada confinante.

Esta informação significa que a argila desempenha um papel importante nos sistemas aquíferos, pois, actua como um filtro natural de poluentes, impedindo a passagem de contaminantes de interacção física, química e biológica constitui, uma barreira para que os processos de adsorção físico-químicos e de degradação bioquímica dos compostos percolantes não aconteçam, como já foi demonstrado em estudo (Oliveira et al. 2017).

De acordo com o método DRASTIC, a vulnerabilidade do sistema aquífero da RMGM, varia de Reduzida a Muito elevada. A vulnerabilidade reduzida (22,1 %) e muito elevada (19,79 %) verificada no sistema aquífero da RMGM é fortemente influenciada pelos parâmetros **D**, **R**, **A**, **I** e **C**, sendo os parâmetros **D**, **R** e **I** os mais determinantes, ao considerar, por exemplo, uma época muito chuvosa, o índice de vulnerabilidade chega a atingir níveis extremos, devido às

inundações, que promovem um contacto direto entre a água subterrânea e superficial. A ocupação do Solo na RMGM é dominada por actividades agro-pecuárias, parque industrial, e áreas de ocupação humana, nas quais se incluem áreas residenciais, de prestação de serviços, fábricas de cerâmica e comércio formal e informal.

Segundo INE (2012), toda a área Metropolitana do Grande Maputo está sujeita a focos de contaminação pontual e difusa, associados à falta de saneamento básico e sua morfologia plana agravando o facto de esgotos urbanos e industriais serem drenados no mar e curso dos rios Mulauze, rio Matola, rio incomati, rio Umbeluze e áreas adjacentes, dispersão de cemitérios municipais e familiares, que com infiltração e percolação das águas das chuvas através dos túmulos e solo provoca a lixiviação de uma série de compostos químicos orgânicos e inorgânicos através da zona não saturada, podendo alguns destes compostos atingir a zona saturada e, portanto poluir o aquífero.

- As áreas correspondentes à classe de **Reduzida vulnerabilidade** representam 19,79%. Tais áreas estão situadas, em sua maioria, sob as superfícies mais íngremes com declividade igual ou superior a 12% apresentam os maiores índices de espessura da zona insaturada chegando a superar os 142m e constata-se a presença de solos de textura avermelhada a amarela. A zona Nordeste da área de estudo é dominada pela presença de aquíferos livres. Constata-se que essas características hidrogeológicas, corroboram para que essas regiões apresentem os mais baixos índices de vulnerabilidade atendendo o grau da influência de actividades industrial e antrópicas desenvolvidas no local.
- As áreas referentes à **Média vulnerabilidade** representam 35,66%, da área total. Os médios índices de vulnerabilidade situam-se, principalmente, em áreas onde o sistema aquífero encontra-se confinado pelos sucessivos derrames basálticos do período Cretáceo, provenientes da Formação Karroo e em menor proporção os arenitos. Abaixo da zona insaturada verifica-se que as principais litologias correspondem às Formações do período Triássico e do Jurássico, arenitos finos e médios, argilas siltosas e calca-arenitos. Tais características geológicas fazem com que a área apresente uma média/alta condutividade hidráulica e média taxa de recarga (215 - 465 mm/ano). Constata-se que as regiões correspondentes à média vulnerabilidade, situam-se em sua maioria, sob superfícies pouco inclinadas com declividade média variando entre 1 e 6% e a espessura da zona insaturada variando entre 35 e 62m. Verifica-se a presença de solos com textura vermelhada, amarela e alaranjada, essas características influenciam e

diminuem a vulnerabilidade devido à textura médio/argilosa, fazendo com que essas áreas apresentem-se pouco vulneráveis.

- A **Elevada vulnerabilidade** representada pela cor laranja no Mapa final representa 22,45% da área total é característica em áreas que, não apresentam camada confinante, as principais litologias correspondem aos arenitos finos e médios, as quais apresentam condutividade hidráulica variando entre média a alta, e as maiores taxas recarga (>500 mm/ano).
- A área de **Muito elevada vulnerabilidade** destacada pela cor vermelha no Mapa final e ocupando 19,79% da área total, pode ser justificada pela elevada quantidade de recarga, pois é um dos fatores com maior ponderação no cálculo do modelo, a densidade dos furos e maior concentração de atividades económicas. Verifica-se também que na mesma área a zona vadosa é constituída por material permeável que facilita a infiltração e a zona vadosa recebe juntamente com a profundidade os maiores pesos no cálculo do modelo conforme os dados da tabela 7.

Esse resultado pode ser comparado com o estudo de Farinha (2014), em que nas áreas de vulnerabilidade muito alta também os valores de recarga são elevados e a zona vadosa é constituída por materiais permeáveis.

6. CAPÍTULO VI: CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1. Conclusões

Os valores de vulnerabilidade obtidos no estudo estão de acordo com as classes propostas pelo método e na área de estudo, foram detectadas 4 classes de vulnerabilidade: reduzida, média, elevada e muito elevada. Os valores encontrados variam de 26 (mínimo) à 173 (máximo) e a maior parte da área de estudo apresenta vulnerabilidade média com valores que variam de 66 à 92 correspondente a 35,6% da área de estudo.

Os resultados obtidos pela aplicação do método DRASTIC são eficientes na estimativa dos índices de vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas. No entanto, são restringidos pelo seu aspecto qualitativo e pela subjectividade; contudo, são importantes ferramentas a serem utilizadas especialmente pela administração pública, a fim de assessorar na tomada de decisões quanto ao tipo de empreendimento ou atividades possíveis de implantar numa determinada região, ou ainda indicar locais preferenciais para desenvolvimento de certas atividades assim como a delimitação das áreas de proteção dos sistemas aquíferos.

Os índices de vulnerabilidade determinados pelo método DRASTIC demonstram claramente que o sistema aquífero da RMGM é caracterizado por apresentar uma vulnerabilidade moderada a alta (66-118); de salientar que, as áreas que apresentam um índice extremo (Muito elevado), podem estar associadas aos eventos ciclônicos durante a época quente e húmida, que assolaram o país nos últimos 15 anos período em que os vales, poços artesanais sem cobertura, valas de drenagem, rios e esgotos domésticos e industriais ficam alargados recebendo todos os tipos de carga difusas, permitindo que a relação de trocas água superficial-água subterrânea ocorresse praticamente sem nenhum impedimento elevando desse modo o risco de contaminação.

Comparando os resultados obtidos pelo método DRASTIC, com estudos realizados na mesma área de estudo utilizando o método GOD, distinguem-se claramente pelo grau de detalhe associado a cada um dos métodos. O método DRASTIC avalia sete parâmetros, buscando uma análise mais precisa e detalhada do meio estudado, visto que quanto maior for o conhecimento da área estudada, melhor será a previsão do comportamento do subsolo e das possíveis fontes contaminantes; o método GOD, considera três parâmetros, o que no caso da área em estudo impactou na distribuição espacial dos índices de vulnerabilidade obtidos, uma vez que os índices GOD mostram-se praticamente homogêneos, facto que pode ser associado a quantidade de dados utilizados assim como a uniformidade das características hidrogeológicas do sistema aquífero da RMGM.

Apesar das duas metodologias apresentarem classificações com pequenas distinções na área de estudo, a tabela 12 revela resultados semelhantes: Vulnerabilidade Baixa, Moderada e Alta. As áreas com Muito Alta vulnerabilidade somente foram detectadas com o modelo DRASTIC.

Em suma, a metodologia empregue nesta pesquisa apresentou resultados bastante satisfatórios, pois a utilização das técnicas de geoprocessamento e o Método de Índice DRASTIC foram fundamentais para análise da vulnerabilidade e do risco de contaminação do sistema aquífero da RMGM, o método demonstrou ser mais pormenorizado, preciso e assertivo.

O mapeamento de vulnerabilidade e de risco irá despertar a necessidade de uma directiva legislativa para o processo de abertura de poços artesanais, furos assim como do uso e aproveitamento de terra, uma vez que a população da RMGM recorre a poços artesanais e furos convencionais para satisfação das suas necessidades hídricas a nível doméstico, industrial, na agricultura, assim como para minimizar conflitos de terra.

Os objectivos foram alcançados com satisfação, a metodologia DRASTIC permitiu a criação duma base de dados (BdD) espacial, seu processamento, cruzamento das informações geográficas e espaciais assim como exibição destas informações em forma de mapas temáticos.

6.2. Recomendações

Este estudo focalizou-se na análise da vulnerabilidade a contaminação do Sistema aquífero da RMGM, apresentando os resultados em forma de mapas. Não foi feito o estudo da qualidade da água do Sistema aquífero. Portanto as recomendações abaixo são direccionadas aos pesquisadores, aos estudantes, às Faculdades, ao MITADER (Ministério de Terra, Ambiente e Desenvolvimento Rural) e todas as instituições de investigação viradas à área ambiental:

a) Município e Obras Públicas

- Fiscalização e interdição da construção de infraestruturas clandestinas e desorganizadas;
- Repensar sobre o tipo de agricultura e interditar a prática das atividades agro-pecuárias nas zonas de recarga;
- Fomento do projeto de construção de infraestruturas sanitárias robustas e de baixa manutenção para as comunidades adjacentes;
- Contrato de gestão com operadores privados para operação e manutenção das unidades de saneamento;
- Construção de mais ETAR para as águas residuais da Cidade de Maputo e Matola que, posteriormente pode servir para a recarga artificial de aquíferos, a partir dos efluentes domésticos tratados;
- Estabelecer padrões de qualidade ambiental, fiscalizando e punindo os poluidores de forma que não compense a reincidência.

b) ARA Sul, IP e FIPAG.

- Conhecer a disponibilidade dos sistemas aquíferos e a qualidade das águas, sendo primordial ao estabelecimento de políticas de gestão das águas subterrâneas;
- Delimitação dos perímetros de Proteção nos furos e proteção das áreas de recarga;
- Aplicação do regulamento de pesquisa e exploração de águas subterrâneas: decreto: 18/2012;
- Há necessidade de actualizar a informação hidrogeológica e uma das alternativas é solicitar a autorização a ARA-Sul, IP para a perfuração e fazer o registo de todas as fontes existentes;
- Colher e analisar periodicamente a qualidade da água na área de estudo;

- Mapear áreas de risco e recuperar as atingidas, acompanhado do estabelecimento de canais de informação e conscientização para a importância da preservação ambiental, fechando o ciclo de cuidados na preservação dos recursos aquíferos;
- Efetuar o modelo de fluxo de água no sistema aquífero da RMGM.

c) Residentes de áreas adjacentes e Sociedade Civil

- Conscientização socio-ambiental da sociedade civil e da população da vizinhança, envolvendo-as em todas as atividades de proteção do sistema aquífero da RMGM;
- Se as medidas públicas são importantes, a educação ambiental da população é fundamental, pois qualquer indivíduo que promova o desenvolvimento de focos de poluição ou agressões ambientais deve ser denunciado às autoridades responsáveis. Outras sugestões, como a orientação de um profissional habilitado em águas subterrâneas na abertura e utilização de poços, contribuem para que o uso da água subterrânea não comprometa o futuro deste recurso, tanto por uma possível contaminação como por sobre exploração, e não exponha a saúde da população abastecida a possíveis doenças de origem hídrica, devido à utilização de mananciais inadequados ou contaminados, uma vez que as águas subterrâneas não são fontes invulneráveis e inesgotáveis e que sua poluição representa sérios riscos para a existência de vida Humana na Terra.

d) Ao Departamento de Geologia

-Abrir linha de pesquisa orientada para as áreas do ambiente e urbanização e qualidade da água para diferentes fins de uso nos bairros ou regiões com maior índice e/ou mais vulneráveis, pois inundações como são os casos de Ricatla, Matendene, Xihango e Matlemele, por forma a actualizar a informação e propor medidas adequadas para solução dos problemas ambientes que assolam as comunidades locais.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. [ARA SUL] (2011), Administração Regional das Águas do Sul *Sustainable Management of the Groundwater Resources in the Maputo Metropolitan Area*. Ministério das Obras Públicas, Habitação e Recursos Hídricos, Relatório.
2. Russo, A. S. (2009), Estimativa da vulnerabilidade de aquíferos utilizando sistemas de informações geográficas e geoestatística – UGRHI – PCJ. 75f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009, 75p.
3. Mulholland (2009), Dissertação de Mestrado-Geoquímica Aplicada à Avaliação da Qualidade so Sistemas Aquáticos da Bacia do Rio Paracatu (MG)-Brazil.
4. [ARA SUL] (2011), Administração Regional das Águas do Sul *Sustainable Management of the Groundwater Resources in the Maputo Metropolitan Area*. Ministério das Obras Públicas, Habitação e Recursos Hídricos, Relatório.
5. Foster, S. e Hirata, R. (1988), *Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data, Technical Manual*, Lima, p. 81.
6. Silva, R. (2019), Moçambique: Pior seca dos últimos trinta anos no sul do país. <https://www.dw.com/pt-002/mo%C3%A7ambique-pior-seca-dos-%C3%BAltimostrinta-anos-no-sul-do-pa%C3%ADs/a-47712800>.
7. Aller, L., Bennet, T., Lehr, J.H., Petty, R.J., Hackett, G. (1987), *DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Setting*. US Environmental Protection Agency, Ada, Oklahoma.
8. Oliveira, K. B. M., Oliveira L. M., Morais F. (2017), Utilização do método GOD para mapeamento da Vulnerabilidade à Contaminação das águas subterrâneas no Município de Lagoa da Confusão, Tocantins, Brasil, IBEAS- Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais.
9. Costa, T. T. (2012), Avaliação da Vulnerabilidade de aquíferos por meio de Análise de vazamentos de Postos de Combustível, Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Geotécnica do Núcleo de Geotecnia.
10. Brollo, J. M., Vedovello, R., Oda, G. H. (2000), Avaliação da Vulnerabilidade natural de aquíferos à contaminação através de um sistema gerenciador de informações geoambientais – Um instrumento de gestão ambiental, XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, São Paulo.
11. [CENACARTA] (2023), Centro Nacional de Cartografia e Teledetecção *Data basins*. Maputo: CENACARTA.

12. **Muchangos, A. (1999)**, Moçambique, Paisagens e Regiões Naturais, Maputo-Moçambique.159p.
13. **INAM – Maputo (2016)**, Resumo de Médias Mensais do Ano de 2016 a Março de 2018 – Maputo.
14. **WeConsult (2016)**, Estudo Hidrogeológico detalhado para Monitorização do sistema aquífero do Vale de Nhartanda–Cidade de Tete - Relatório sobre o Plano da Rede de Monitoramento do Sistema Aquífero, Tete. 64p.
15. **[FIPAG] (2012)**, Fundo de Investimento e Património do Abastecimento de Água. *Estudos Ambientais e Sociais para o Sistema de Abastecimento de Água do Grande Maputo*. Ministério das Obras Públicas e Habitação, Moçambique.
16. **[INE] (2017)**, Instituto Nacional de Estatística Estatísticas do Distrito: Cidade de Maputo, Maputo: Instituto Nacional de Estatística (INE).
17. **[ARA SUL] (2012)**, Administração Regional das Águas do Sul, *Sustainable Management of the Groundwater Resources in the Maputo Metropolitan Area*. Ministério das Obras Públicas, Habitação e Recursos Hídricos, Relatório.
18. **Cendón D.I., Haldorsen, S., Chen, J., Hankin, S., G.E.H., Nogueira, D.E.H., Momade, F., Achimo, M., Muiuane, E., Mugabe, J. & Stigter, T.Y., 2020**. *Hydrogeochemical aquifer characterization and its implication for groundwater development in the Maputo district, Mozambique*.
19. **[MOPHRH] (2019)**-Ministério de Obras Públicas, Habitação e Recursos Hídricos, Ponto de Situação dos Pequenos Libombos, Balanço e Cenários de Gestão, 34 slides.
20. **Silva, R. (2019)**, Moçambique: Pior seca dos últimos trinta anos no sul do país. <https://www.dw.com/pt-002/mo%C3%A7ambique-pior-seca-dos-%C3%BAltimostrinta-anos-no-sul-do-pa%C3%ADs/a-47712800>.
21. **Tundisi, J. G.(2003)**, Água no século XXI: enfrentando a escassez. São Carlos: RIMA, IIE.
22. **Linhares, F. M. (2009)**, Potencial Hidrogeológico e a Qualidade da Água Subterrânea do Município de Brejo do Cruz-PB. Tese de Bacharel.
23. **CS/04 (Comissão Sectorial para Água) (2012)**, Manual de Boas Práticas para Execução e Exploração de Furos de Captação de Águas Subterrâneas. Instituto Português da Qualidade.

24. **Capucci, E.; Martins, A.; Kátia Leite Mansur, K.; Monsores, A. (2001)**, Poços Tubulares e Outras Captações de Águas Subterrâneas: Orientação aos Usuários. Rio de Janeiro.
25. **Silva, F. V. Da;** Avaliação da Contaminação das Águas Subterrâneas Por Actividade Cemiterial na Cidade de Maceió. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) Universidade Federal de Alagoas. Maceió. 2012
26. **Linhares F. M. (2009)**, *Potencial Hidrogeológico e a Qualidade da Água Subterrânea do Município de Brejo do Cruz-PB*. Tese de Bacharel, Universidade Federal da Paraíba, Brasil. Disponível em: <http://www.geociencias.ufpb.br/leppan/gepat/files/potencial.pdf> acessado aos 13.06.24.
27. **Brears, E.; Post, R.;** NVCA Water Table Fluctuation Study. Nottawasaga Valley Conservation Authority. March. 2014.
28. **Jones, J. A. A. (1997)**. *Global Hidrology: processes, resources and environmental managemen*. England: Longman.
29. **Usgs (U.S. Geological Survey). LANDSAT 8 (L8): Data Users Handbook. Version 2.** March. 2016
30. **Usgs. (U.S. Geological Survey).** Product Guide: LANDSAT 8 Surface Reflectance Code (LASRC) Product. Version 4.3. March 2018.
31. **Hirata, R & Fernandes, J.A. (2008)**, *Vulnerabilidade à Poluição de Aquíferos*. In: Feitosa, Fernando. C (org). Hidrogeología: Conceitos e Aplicações. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID.
32. **Baum, C. A. (2015)**, Estimativa da Recarga de Aquífero Freático na Área Urbana de Frederico Westphalen. Trabalho de Conclusão de Curso. (Licenciada em Engenharia Ambiental e Sanitária). Universidade Federal de Santa Maria. Brasil.
33. **Direcção Nacional de Gestão de Recursos Hídricos [DNGRH] (2017).** *Elaboração do Plano Estratégico para Utilização e Desenvolvimento da Bacia Hidrográfica do Rio Zambeze (Vol. 4)*. DNGRH.
34. **Regulamento de Pesquisa e Exploração de Águas Subterrâneas (RPEAS) (2012).** Moçambique. Maputo: DNA
35. **Governo de Moçambique. (2007a).** *Política de Águas*, Direcção Nacional de Águas, Imprensa Nacional, Maputo;

36. **Regulamento da Qualidade de água para o Consumo Humano.** Diploma ministerial nº 180/2004 de 15 de Setembro
37. **(1991). *Lei de Aguas no 61/91***, Decreto de 3 de Agosto de 1991, Ia Serie No 31, Imprensa Nacional de Moçambique, Maputo;
38. **(2007c). *Regulamento de Licenças e Concessões de Águas***, Direcção Nacional de Águas, Imprensa Nacional, Maputo;
39. **Estratégia Nacional de Gestão de Recursos Hídricos.** Moçambique. Agosto. 2007
40. **Baum, C. A. (2015)**, Estimativa da Recarga de Aquífero Freático na Área Urbana de Frederico Westphalen. Trabalho de Conclusão de Curso. (Licenciada em Engenharia Ambiental e Sanitária). Universidade Federal de Santa Maria. Brasil.
41. **Brears, E.; Post, R.;** Nvca Water Table Fluctuation Study. Nottawasaga Valley Conservation Authority. March. 2014
42. **Rosa, R. (2013)**, Introdução ao Geoprocessamento. Universidade Federal De Uberlândia. Instituto de Geografia.
43. **Rosa, S. F. (2010)**, *Propriedades Físicas e Químicas de Um Solo Arenoso Sob o Cultivo de Eucalyptus spp.* Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil. Disponível em:

<https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/8671/ROSA%2c%20SUZANA%20FERREIRA%20DA.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acedido aos 29.06.2024.
44. **Tucci, C. E. M. (Org.) (1993)**, Hidrologia: Ciências e Aplicação. Porto Alegre ABRH/EDUSP. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos, 4).
45. **Tundisi, J. G. (2000)**, Limnologia e gerenciamento integrado de recursos hídricos: avanços conceituais e metodológicos. Ciência e Ambiente, v.1, n.21, p.9-20.
46. **Lucas, M. C.; Guanabara, R. C; Wendland, E.** Estimativa de recarga subterrânea em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani. Boletim Geológico e Mineiro. 2012.
47. **Rodríguez, A. C. (2005)**, Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados na Análise da Legislação Ambiental no Município de São Sebastião (SP). Dissertação (Mestrado em Geografia). Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo.

48. **Lobo-Ferreira, J.P., Oliveira, M.M., Moinante, M.J. (1997)**, Cartografia automática da vulnerabilidade de aquíferos com base na aplicação do método DRASTIC. Relatório final. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, relatório 60/97-GIAS.
49. **Lobo-Ferreira, J. P. (1998)**, *Vulnerabilidade a Poluição das Águas Subterrâneas: Fundamentos e Conceitos Para Uma Melhor Gestão dos Aquíferos de Portugal*. Lisboa: 4º Congresso da Água. Disponível em: www.aprh.pt/congressoagua98/files/com/023.pdf acessado aos 08.06.24.
50. **Foster, S. S. D. et al. (2006)**, Proteção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. São Paulo: SERVIMAR.
51. **Hirata, R. C. A. (2001)**, Oito perguntas e oito tentativas de respostas sobre a vulnerabilidade à poluição de aquífero. In: Seminario - Taller: Protección de Acuíferos frente a la contaminación, 1. 2001. Anais..., Toluca, Mexico. Disponível em <<http://tierra.rediris.es/hidrored/ponencias/Hirata.html>>. Acesso em 22 de out. de 2023.
52. **Foster, S. S. D. (1987)**, Fundamental concepts in aquifer vulnerability pollution risk and protection strategy. Proceedings of International Conference: Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants. Noordwijk, Países Baixos.
53. **Santos, R. A. (2010)**; Nascimento, S. A. M. Avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos cársticos: subsídios para uma gestão dos recursos hídricos subterrâneos. Cadernos de graduação, n. 7, p. 54-61.
54. **Ferreira, J. P., Leitão, T. E., Oliveira, M. M., Rocha, J. S., Barbosa, A. E. (2009)**, Protecção das origens superficiais e subterrâneas nos sistemas de abastecimento de água, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Instituto Regulador de Águas e Resíduos.
55. **Todd, D. K. (1959)**, *Groundwater Hidrology*. New York: John Wiley & Sons.
56. **Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D’Elia, M., Paris, M. (2006)**, Protecção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais, São Paulo.
57. **Santos, E. C. O., Gomes, A. C. C. O., Santos, C. O. & Lemke, A. P. (2020)**, *Análise da qualidade da água destinada ao consumo humano em comunidade rural no município de coxim/ms*.

58. **Silva Pereira, J. M. (2016)**, “Aplicação de SIG ao estudo da vulnerabilidade à poluição da água subterrânea na região da Serra da Estrela (Norte de Portugal)”, Universidade do Porto, Faculdade de Ciências (Relatório de Estágio de Licenciatura).
59. **Auge, M. (2008)**, Vulnerabilidade de aquíferos, Revista Latino-Americana de Hidrogeologia. Curitiba, n.º.4, p. 85-103.
60. **Câmara, G.; Davis, C.** Introdução. In: Câmara, G.; Davis, C.; Monteiro, A.M.V. (Org.). Introdução à ciência da geoinformação. São José dos Campos: INPE 2001.
Disponível em: < <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap1-introducao.pdf>>>.
Acesso em: Junho de 2024.
61. **Lobo Ferreira, J. P. & Oliveira, M. M. (2004)**, Groundwater vulnerability assessment in Portugal. Geofísica Internacional. Vol. 43, n. 4, pp. 541-550.
62. **Vrba, J. & Zaporozec, A. (1994)**, Guidebook on mapping groundwater vulnerability. International Association of Hydrogeologists. Verlag Heinz Heise, v.16. 131p.
63. **Fetter, C. W.** Applied hydrogeology. 4th Edition. New Jersey: Prentice Hall, 598 p., 2001.
64. **Santos, R. A.; Cruz, M. J. M.; Nascimento, S. A. M. (2010)**, Avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos cársticos: subsídios para uma gestão dos recursos hídricos subterrâneos. **Cadernos de graduação**, n. 7, p. 54-61.
65. **Lobo-Ferreira, J. P. (1998)**, *Vulnerabilidade a Poluição das Águas Subterrâneas: Fundamentos e Conceitos Para Uma Melhor Gestão dos Aquíferos de Portugal*. Lisboa: 4º Congresso da Água. Disponível em: www.aprh.pt/congressoagua98/files/com/023.pdf acedido aos 08.06.24.
66. **Santos, P.R.P. (2010)**, Estudo da Vulnerabilidade à Poluição do Aquífero Marizal na Região de Influência do Pólo Industrial de Camaçari (Pí) – BA. Mestrado profissional em gerenciamento e tecnologias ambientais no processo produtivo, Salvador.
67. **Rosa, M. J.; Nunes, L. M.; Campinas, M.; Stigter, T. Y.; Teixeira, M. R.; Vieira, J. (2001)**; Recursos hídricos para rega de campos de golfe no concelho de Albufeira, Universidade do Algarve, Faculdade de Ciências do Mar e do Ambiente.
68. **Aronoff, S. (1991)**, Geographic Information Systems: A Management Perspective. Ottawa: WDL Publications.
69. **Lenzerini, M.(2002)**, “Data Integration: A Theoretical Perspective”. *PODS 2002*: pp. 243-246.

70. **Melo Junior, H. R. (2002)**, Mapeamento da vulnerabilidade e análise de risco de contaminação como instrumentos de proteção das águas subterrâneas em áreas industriais: Caso da Albras, Barcarena-Pa. Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências. Dissertação de Mestrado, 152p.
71. **Jacob, A. A. E. e Young, A. F. (2006)**, O uso de métodos de interpretação de dados nas análises Sociodemográficas, Artigo Científico, p. 1-22.
72. **Erthexplorer**. Obtenção da imagem SRTM. Disponível em www.earthexplorer.usgs.gov/ acesso aos 20.01.2023
73. **Domenico, P. & Schwartz, F. (1990)**, Physical and chemical hydrogeology. John Wiley & Sons, Nova York, p. 824.
74. **Villar, P. C. (2008)**, *Gestão das Áreas de Recargas do Aquífero Guarani: O Caso do Município de Ribeirão Preto-São Paulo*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil. Disponível em:
<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/90/900131/tde-26052010-100627/publico/PilarVillar.pdf> acessado aos 17.07.2024.
75. **Muiuane, E. (2005)**, *The Quality of Groundwater in and around Maputo City, of Mozambique, Departament of Geology*.
76. **Naylla (2020)**, Avaliação da Vulnerabilidade à Poluição dos Aquíferos da Área Metropolitana do Grande Maputo Aplicando o Método GOD.
77. **Mabote (2022)**, Uma Contribuição Para a Avaliação da Vulnerabilidade Natural de Contaminação da Água Subterrânea no Aquífero de Grande Maputo Aplicando o Método GOD.
78. **Oliveira, D. C. (2013)**, *Modelos de Avaliação de Vulnerabilidade de Aquíferos*. Tese de Bacharel, Universidade Federal da Bahia, Bahia, Brasil. Disponível em:
http://www.twiki.ufba.br/twiki/pub/IGeo/GeolMono20122/Monografia_Daniel.pdf
acessado aos 08.06.2024.
79. **Farinha, T. C.G. (2014)**, *Análise do impacto da Gestão dos Recursos Hídricos no Estado Quantitativo e Qualitativo das águas Subterrâneas da Bacia Hidrográfica da Ribeira de Quarteira*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Algarve, Portugal.
Disponível: <https://sapientia.ualg.pt/bitstream/10400.1/7727/1/DISSERTACAO%20Telma%20Farinha.pdf> acessado aos 17.07.2024.

80. **INE. Instituto Nacional de Estatística/CENACARTA.** Centro Nacional de Cartografia e Teledetecção. Rede Hidrográfica. 1:250.000.

Disponível em <<http://www.ine.gov.mz/Dashboards.aspx>>. Acesso em 03 fev. 2023.

81. **Kaddour, K., Hacen, B. E., Hlima, D., Yasmina, D. (2018),** *Groundwater Vulnerability Assessment using GOD method in Boulimat coast District of District of Bejaia area North east Algeria. Journal of Biodiversity and Environmental*, vol.13, nº3, p. 109-116.

82. **Todd, D. K. (1959),** *Groundwater Hidrology*. New York: John Wiley & Sons.

83. **Kalaoum, J. (2016),** Avaliação da Vulnerabilidade de Contaminação do Sistema de Aquíferos do Município de Queimados-RJ. Dissertação do grau de Mestre em Engenharia Agrícola e Ambiental.

84. **Nobre, R.C.M. (2006),** Avaliação de Risco para o Uso e Proteção de Aquíferos. Estudo de Caso: Região Metropolitana de Maceió. Tese de Doutorado, Dep. Eng. Civil, COPPE/UFRJ, 296, disponível no endereço www.coc.ufrj.br, acessado em 25 de abril de 2013.

85. **Xavier-Da-Silva, J. (2001),** Geoprocessamento para análise ambiental. 1. Ed. Rio de Janeiro: D5 Produção Gráfica, v. 1. 228 p.

86. **Aller, L.; Bennet, T.; Lehr, J. H. & Petty, R. J. (1987).** - *Drastic: a standardized system for evaluation groundwater pollution using hydrogeologic settings*. United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Ada, Oklahoma, EPA 600/2-85/018.

87. **Salman, G. e Abdula, A. (1994),** *Development of the Mozambique and Rovuma edimentary Basins offshore Mozambique, Sedimentary geology*. Artigo Científico. vol. 1, p. 96.

Civitia, M. (1994). *La carte della vulnerabilità dei acquiferi all'inquinamento: teoria e pratica*. Bologna, Pitagora Editrice, 325 p;

88. **Direcção Nacional de Geologia – DNG. (1983).** *Mapa Geomorfológico de Moçambique*. escala 1:2.000.000, Maputo, Moçambique;

89. **Fetter, C. W, (1998).** *Applied Hydrogeology*, 2nd Edition, University of Wisconsin-Oshkosh;

90. **Freeze, A. & Chery, J.A. (1979).** *Groundwater*. New Jersey, Prentice-Hall, Englewood Cliffs. 604p;

91. **Healy, R. W. & Cook, P. G. (2002).** *Using groundwater levels to estimate recharge.* Hydrogeology Journal, 10 (1), 91-109;
92. **Melo Júnior, H. R. (2002).** *Mapeamento da Vulnerabilidade e Análise de Risco de Contaminação como instrumentos de Proteção das Águas Subterrâneas Industriais: Caso da Albrás, Barcarena.* Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 138p (Tese)
93. **Nobre, R. C. M. (2007).** *Groundwater vulnerability and risk mapping using GIS, modeling and a fuzzy logic tool.* Journal of Contaminant Hydrology, v. 94, p. 277-292;
94. **Oliveira, E. (2004).** *Vulnerabilidade e Caracterização da Qualidade da Água do Sistema Aquífero de Moura-Ficalho.* Dissertação de Mestrado em Georecursos, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa;
95. **Oliveira, M. M., Novo, M. E., Moinante, M. J. & Lobo Ferreira, J. P. (2000).** *Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Tejo. 1ª Fase - Análise e Diagnóstico da Situação Actual, Anexo Temático 4- Recursos Hídricos Subterrâneos, Tomo A - Caracterização Hidrogeológica,* LNEC. 607/1/13022, Lisboa, 379 pp.
96. **Ribeiro, L. (2005).** *Um Novo Índice de Vulnerabilidade Específico de Aquíferos à Contaminação: Formulação e Aplicações.* Actas do 7º SILUSBAAPRH, Évora, 15pp;
97. **Scanlon, B. R.; Healy, R. W.; Cook, P. G., (2002).** *Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge.* Hydrogeology Journal, 10 (1), 18-40;
98. **Tucci, C. E. M. (1993);** *Hidrologia- Ciências e Aplicação.* Porto Alegre: Editora da Universidade UFRGS: ABRH, 1993, 943 p;
99. **Vrba, J.; Zoporozec, A. (1994).** *Guidebook on mapping groundwater vulnerability.* IAH International Contribution for Hydrogeology, vol. 16. Hannover7 Heise; p. 131;