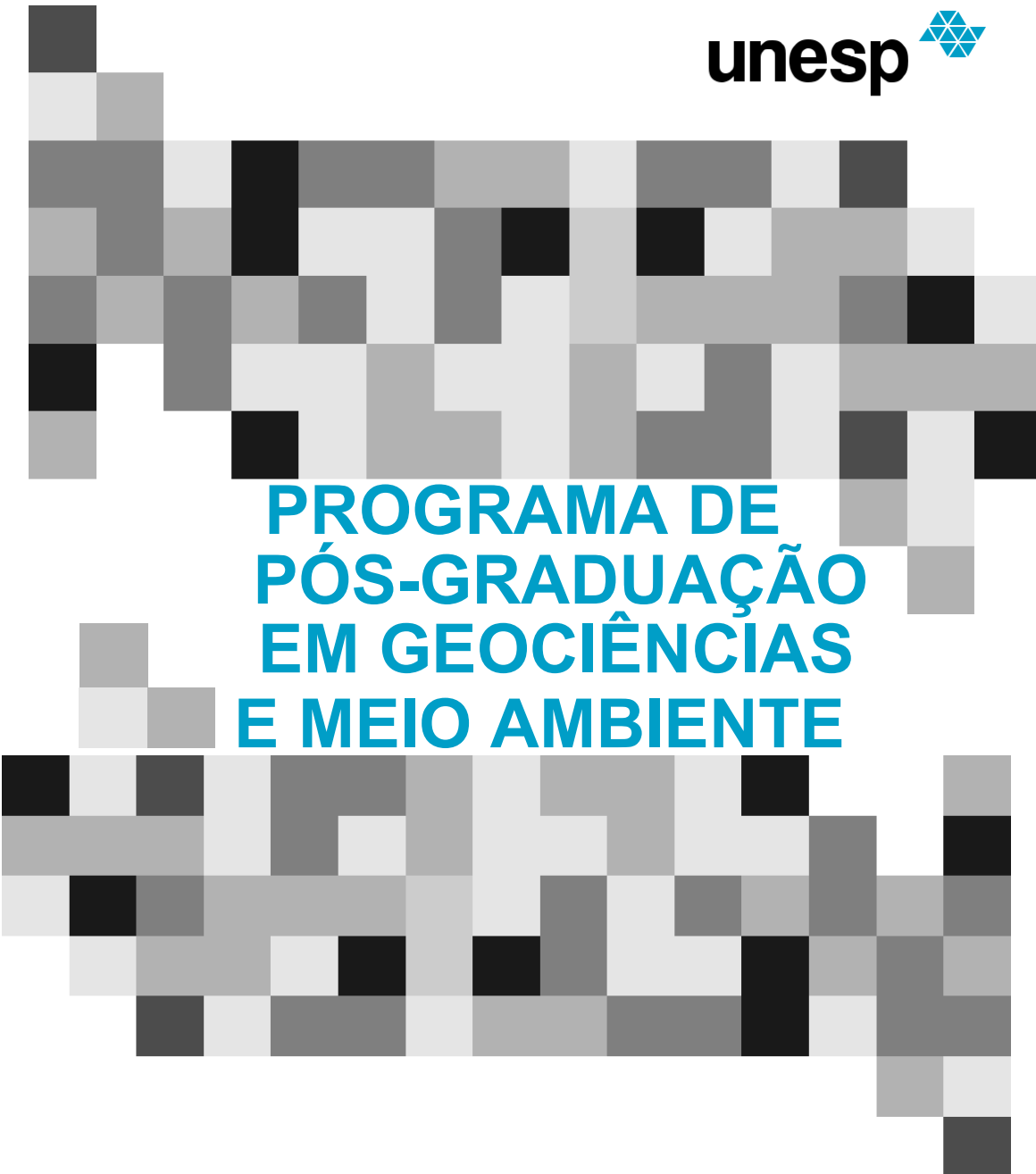


RESSALVA

Atendendo solicitação do autor,
o texto completo desta dissertação
será disponibilizado somente a partir
de 26/04/2025.



**PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO
EM GEOCIÊNCIAS
E MEIO AMBIENTE**

Modelo Geoelectrico-geológico das formações do complexo
cristalino de base no distrito de Mavago, Niassa, Moçambique

REINALDO ANTÓNIO DOMINGOS

Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

Rio Claro - SP
2024

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

REINALDO ANTÓNIO DOMINGOS

MODELO GEOELÉCTRICO-GEOLÓGICO DAS
FORMAÇÕES DO COMPLEXO CRISTALINO DE BASE
NO DISTRITO DE MAVAGO, NIASSA, MOÇAMBIQUE

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. César Augusto
Moreira

Rio Claro - SP
2024

D671m

Domingos, Reinaldo António

Modelo geoelectrico-geológico das formações do complexo cristalino de base no distrito de Mavago, Niassa, Moçambique / Reinaldo António Domingos. -- Rio Claro, 2024

217 p. : tabs., fotos, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: Cesar Augusto Moreira

1. Eletroresistividade. 2. água subterrânea. 3. complexo de base cristalino. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

REINALDO ANTÓNIO DOMINGOS

Modelo Geoeléctrico-geológico das formações do complexo
cristalino de base no distrito de Mavago, Niassa, Moçambique

Dissertação de Mestrado
apresentada ao Instituto de
Geociências e Ciências Exatas do
Câmpus de Rio Claro, da
Universidade Estadual Paulista
“Júlio de Mesquita Filho”,
como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em
Geociências e Meio Ambiente.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. César Augusto Moreira
IGCE/UNESP/Rio Claro (SP)

Prof. Dr. Elias Isler
IRN/UNIFEI/Itajubá (MG)

Profa. Dra. Livia Portes Innocenti Helene
FATEC-JAHU/Jaú (SP)

Conceito: Aprovado.

Rio Claro (SP), 26 de abril de 2024.

*Aos meus filhos Valdo, Alan,
Júnior e Wammy,
meus eternos
inspiradores*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. César Augusto Moreira, primeiro, pela disponibilidade para orientar a minha pesquisa, segundo, pela abnegada dedicação e comprometimento com o objecto de estudo, terceiro e último, pelo entusiasmo e confiança que transmitiu em mim.

Ao Prof. Didier e demais professores da UNESP, especialmente, aqueles com quem tive contacto, ainda que virtual, durante o leccionamento das várias disciplinas cursadas, pela sua paciência e dedicação à transmissão do conhecimento.

Ao Prof. Isaías Mafavisse, Director da Faculdade de Geociências da Unirovuma que, de forma incondicional, tornou possível o meu primeiro contacto com o Prof. César e UNESP e encorajamento para prosseguir até ao fim. Este agradecimento estende-se a toda Direcção e colegas da Faculdade de Geociências da UniRovuma.

A WE Consulta, pela oportunidade que me concederam de integrar a sua equipa de campo para aquisição de dados.

À Japan Techno Co., LTD, pela cedência de dados e sua utilização para fins académicos, particularmente na pessoa do sr. Yokogi e todo seu elenco que trabalhou nessa fase do projecto.

Ao SDPI de Mavago, na pessoa de Sr. Domingos, sempre pronto para colaborar e ceder informação relevante sobre os recursos hídricos e áreas afins, no seu distrito.

Aos meus saudosos pais, Manuel Domingos e Maria António Sebastião e toda a minha família, por acreditarem e me apoiarem ao longo desta interminável caminhada. A minha esposa, Leida Micaela Jorge Moisés e aos nossos filhos, Valdo, Alan, Júnior e Wammy e Alejandra, pela paciência nos momentos que tive que me afastar dos nossos momentos de convívio para atender à academia.

A todos meus colegas da Universidade Rovuma e amigos que colaboraram para a materialização deste desiderato.

RESUMO

Estudos destinados à alocação de pontos de captação da água subterrânea para os mais diversificados fins, podem levar a resultados contraproducentes, ora por inexperiência do pesquisador, ora pelas dificuldades impostas pela complexidade hidrogeológica da área de estudo. O Complexo de Base Cristalino é um desses contextos geológicos que oferecem maiores imprecisões. O distrito de Mavago, localizado na província de Niassa no norte de Moçambique, jaz sobre o Complexo Cristalino pré-câmbrico, com furos produtivos em áreas caracterizadas por resistividades excessivamente elevadas, desafiando o actual conhecimento científico sobre a matéria. Neste trabalho propôs-se a integração da análise topográfica, geológico-estrutural, geoelectrico-geológica e sua correlação com a distribuição espacial dos furos produtivos, para explicar o fenómeno. Os resultados mostram que uma tendência geral do fluxo da água é orientada de SW-NE. Na área de estudo, uma série de estruturas secundárias orientadas de NE-SW, ENE-WSW e NW-SE, indiciam uma ampla circulação da água na região. A Bacia do Rovuma na fronteira norte e o Lago Niassa à oeste, situado ao longo do vale do rift este africano, podem ser as grandes feições provedoras do recurso hídrico ao aquífero regional da região ocidental da província do Niassa. A produtividade dos aquíferos das áreas resistivas em Mavago poderá estar relacionada com a possibilidade de uma circulação regional profunda associada a ocorrência frequente dos sistemas interconectados de fracturas e falhas regionais. As elevadas resistividades da sub-região montanhosa poderia reflectir um rególito de espessura limitada e um sistema de fracturas e falhas profundas alimentando zonas mais localizadas em profundidades moderadas a rasas, que ao serem interceptadas por furos, alimentam-nos verticalmente a partir dos fluxos subterrâneos profundos. Nas áreas resistivas, recomenda-se estudos integrados que envolvam o sensoriamento remoto e imageamento geofísico que busquem alvos de perfuração mais profundos, especialmente para os SAA cuja demanda é elevada e a captação é através de bombas submersíveis.

Palavras-chave: Eletroressistividade, água subterrânea, complexo de base cristalino, análise qualitativa e quantitativa.

ABSTRACT

Studies aimed at siting drilling points for the most diverse purposes can lead to counterproductive results, sometimes due to the researcher's inexperience, sometimes due to the difficulties imposed by the hydrogeological complexity of the study area. The Crystalline Basement Complex is one of those geological contexts that offer greater inaccuracies. The district of Mavago, located in the province of Niassa in northern Mozambique, lies on the Precambrian Crystalline Complex, with productive boreholes in areas characterized by excessively high resistivities, challenging current scientific knowledge on the matter. This work proposed the integration of topographic, geological-structural, geoelectrical-geological analysis and their correlation with the spatial distribution of productive boreholes, to explain the phenomenon. The results show that a general trend of water flow is oriented SW-NE. In the study area, a series of secondary structures oriented NE-SW, ENE-WSW and NW-SE indicate a broad circulation of groundwater in the region. The Rovuma Basins on the northern border and the Niassa Lake to the west, located along the east African rift valley, might be the major source of groundwater resources for the regional aquifer in the western region of the Niassa province. The productivity of aquifers in resistive areas may be related to the possibility of a deep regional circulation associated with the frequent occurrence of interconnected systems of regional fractures and faults. The high resistivities of the mountainous sub-region in Mavago, could be related to the possible occurrence of a shallow overburden and deep fracture and faults systems feeding vertically areas located at moderate to shallow depths, which, when intercepted by boreholes, feed them through deeper groundwater flows. In resistive areas, integrated studies involving remote sensing and geophysical imaging that seek deeper drilling targets are recommended, especially for Piped Water Schemes, whose demand is higher and the supply is through submersible pumps.

Keywords: Electroresistivity, groundwater, crystalline basement complex, qualitative and quantitative analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Localização geográfica e divisão administrativa de Moçambique	16
Figura 2 Esboço do Mapa Geomorfológico de Moçambique (modificado de Bondirev, 1983). I. Picos e cristas- 1. Origem intrusiva-tectónica; 2: origem intrusiva tectónica e erosiva-denudativa; 3: origem erosiva-denudativa. II. Planaltos de lavas; 4: Planaltos de lavas. III: Peneplanícies de embasamento de 5: origem extrusiva-denudativa; 6: origem extrusiva-denudativa e acumulativa. IV: Áreas de acumulação de 7. Superfícies niveladas; 8: depressões erosivo desudativas e acumulativas; 9: planícies acumulativas; 10: depressões acumulativas; 11: encostas recentes, vales e cursos de rios (LACHELT, 2006, pag.19).....	17
Figura 3 Condições climáticas - a) Zonas climáticas: 1. Clima tropical húmido; 2. Clima seco de savana; 3. Clima tropical de altitude; 4. Clima montanhoso; b) Temperatura média anual; e c) Precipitação média anual (LACHELT, 2006).....	19
Figura 4 Rede hidrográfica do distrito de Mavago.....	20
Figura 5 Localização geográfica do distrito de Mavago, com locais pesquisados.....	23
Figura 6 Características geomorfológicas do distrito de Mavago, mostrando a distribuição das sub-regiões pantanosa, planáltica e montanhosa.....	24
Figura 7 <i>Inserlbergs</i> caracterizando a Sub-região Montanhosa	25
Figura 8 Poços tradicionais escavados manualmente, não revestidos, aproveitados para o abastecimento público	25
Figura 9 Sub-região planáltica com ocorrência de nascentes que a população explora para consumo doméstico	26
Figura 10 Tendência para o alinhamento das SEVs, espelhando o padrão de assentamento das comunidades que situam-se ao longo das principais vias de acesso	27
Figura 11 Províncias Tectónicas da África Austral (modificado de Tankard et al., 1982 apud Lachelt, 2004)	28
Figura 12 Complexos que atravessam a área de estudo	29
Figura 13 Principais unidades geológicas do distrito de Mavago	31
Figura 14 Mapa tectono-estratigráfico regional da SADC ilustrando a localização das regiões dos Cratões Arqueanos em volta de faixas móveis Proterozóicas e recobertas por sequências de camadas Fanerozóicas: KC = Cratão de Kaapvaal, ZC = Cratão do Zimbabwe, TC = Cratão da Tanzânia, BB = Bloco de Bangweulu, CC = Componentes do Cratão de Congo, R = Cinturão de Rehoboth, L = Cinturão do Limpopo, KS = Cinturão de Kheis, M = Cinturão Magondi, S = Cinturão Sinclair, N = Província Metamórfica de Namaqua, NB = Província de Natal, IB = Cinturão Irumide, KB = Cinturão Kibaride, MB= Cinturão de Moçambique, D = Cinturão Damara, K = Cinturão Kaoko, G = Cinturão Gariep, SB = Cinturão Saldanha, EAO = Orogenia da África Oriental, LA = Arco de Lufilian, Z = Cinturão de Zambeze, WCB= Cinturão de Congo Ocidental, 1 = Extensão dos Cratões de Kaapvaal e Zimbabwe, 2 = Extesão do Cratão de Kaapvaal-Limpopo-Zimbabwe, 3 = Extesão do Cratão Calahari, 4 = Extensão austral do crat do Congo (modificado de Hanson, 2003).....	32
Figura 15 Carta Hidrogeológica de Moçambique a escala 1:1.000.000, mostrando as 7 Províncias Hidrogeológicas (FERRO e BOUMAN, 1987)	34
Figura 16 Principais Unidade Hidrogeológicas Regionais.....	36
Figura 17 Sistemas de armazenamento e transmissão da água subterrânea em meio de porosidade dupla.....	39
Figura 18 Condições favoráveis e desfavoráveis de sistemas de fracturas para água subterrânea: espaçamento, interconexão e orientação (LEITE, 2023).	42
Figura 19 Parâmetros usados na definição da Resistividade (Kearey et. al., 2002).....	43
Figura 20 Fluxo de corrente (linhas contínuas) entre os eletrodos A e B e superfícies equipotenciais (linhas pontilhadas, ortogonais às linhas de corrente) em um semi-espaco homogéneo e queda de tensão. O potencial V é medido entre os eletrodos M e N, posicionados (neste caso) em um arranjo de WENNER (MILSOM & ERICKSEN, 2011).....	44
Figura 21 Morfologia das curvas de Campo (Braga, 2008).....	48
Figura 22 Fluxograma mostrando o Procedimento Metodológico da Aquisição de Dados.....	50
Figura 23 Principais equipamentos usados para o levantamento de dados no campo (da esquerda a	

direita: Resistivímetro Terrameter SAS 300C da ABEM, Bobinas de corrente, bússola geológica e GPSmap 60C).....	53
Figura 24 Pesquisa em curso: PRH na imagem a esquerda e SEV na imagem a direita.....	53
Figura 25 Área alvo de pesquisa (rectângulo branco), PRHs planificados (linhas vermelhas) e PRHs executados (linhas verdes), SEVs propostas (bolinhas brancas), SEVs efectuadas (triângulos amarelos), furos de 2018 (negativos - bolas vermelhas e positivo-bola azul).....	56
Figura 26 Distribuição geográfica das SEVs	57
Figura 27 Lineamentos mapeados na área de estudo	58
Figura 28 Diagrama de rosetas mostrando orientações preferenciais dos lineamentos do distrito de Mavago, sendo de NW-SE e NE-SW em (a) e N-S, NE-SW e NNW-SSE, em (b).....	58
Figura 29 Cruzamento de dados topográficos, espessura do rególito e profundidade do substrato.....	59
Figura 30 Modelo Geoeléctrico-Geológico do ponto 6 em Mangupenge, inferido a partir da respectiva curva teórica.....	63
Figura 31 Distribuição espacial dos furos existentes, das zonas resistivas e tipologia morfológica.....	65
Figura 32 Curvas tipo KH e QH representativas do perfil geológico de Nsawise	66
Figura 33 Curvas tipo H e A representativas do perfil geológico de Nsawise.....	66
Figura 34 Poço tradicional raso em Nsawise	67
Figura 35 Curvas tipo HKH e H representativas do perfil geológico de Lucimbese	68
Figura 36 <i>Inselberg</i> rodeado de vegetação com alguns blocos decolados e rolados para sua base	68
Figura 37 Distribuição Espacial dos Furos Positivos e Negativos da campanha de 2023 (com indicação de furos positivos e negativos em cada região).....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Resistividades de algumas rochas e minerais (Musset & Khan, 2009)	45
Tabela 2 Lista de comunidades beneficiárias do projecto de abastecimento de água através de furos dispersos no distrito de Mavago e o número de furos por comunidade	51
Tabela 3 Primeiro Grupo-Alvo: Sistema de Abastecimento de Água para a Vila	51
Tabela 4 Grupo-Alvo 2: Furos Dispersos em 12 Comunidades do Distrito de Mavago	52
Tabela 5 Relação entre o número de tentativas e furos positivos/negativos	71

LISTA DE ABREVIATURAS

Amsl – Acima do Nível da Água do Mar
ASNANI – Projecto de “Água e Saneamento para Nampula e Niassa”
°C - Graus Celcius
DNA – Direcção Nacional de Águas
E – Este
ET₀ – Evapotranspiração Potencial
FD – Furos Despersos
GM – Governo de Moçambique
INE - Instituto Nacional de Estatística
JICA – Agência Japonesa para Cooperação Internacional
Km – Quilómetros
Km² – Quilómetros Quadrados
m - metros
Mt. – Monte
NE – Nordeste
NW - Noroeste
ODS – Objectivos de Desenvolvimento Sustentável
PEDDM – Plano Estratégico de Desenvolvimento do Distrito de Mavago
PIB – Produto Interno Bruto
PO – Princípio de Oferta
PP – Princípio de Procura
PRH – Perfilagem de Resistividade Horizontal
PRONASAR – Programa Nacional de Abastecimento de Água e Saneamento Rural
SAA – Sistema de Abastecimento de Água
SDPI – Serviço Distrital de Planificação e Infraestruturas
SEV – Sondagem Eléctrica Vertical
UTM - Universal Transverse Mercator
USGS – United State Geological Society
W - Oeste
WE Consult – Water and Environmental Consultants

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	14
1.1	Contextualização.....	14
1.2	Objectivos.....	15
1.2.1	<i>Objectivo geral</i>	15
1.2.2	<i>Objectivos específicos</i>	15
2.	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	16
2.1	Características gerais de Moçambique.....	16
2.1.1	<i>Localização Geográfica</i>	16
2.1.2	<i>Relevo e Fisiografia</i>	16
2.1.3	<i>Hidrografia e Clima</i>	19
2.1.4	<i>Economia e Infraestruturas</i>	21
2.3	Quadro geológico-estrutural e geotectónico regional.....	28
2.3.1	<i>O Complexo de Base de África</i>	28
2.4	Quadro hidrogeológico regional.....	32
2.5	Histórico de projectos de perfuração na área de estudo.....	36
3.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	39
3.1	Sistemas de armazenamento e transmissão da água subterrânea em maciços cristalinos.....	39
3.2	Electrorresistividade (ER) aplicada à caracterização hidrogeológica de maciços cristalinos.....	42
3.3	Modelo Geoelectrico-Geológico.....	49
4.	AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	50
4.1	Procedimento Metodológico da Aquisição de Dados.....	50
4.2	Planificação.....	51
4.2	Extracção de Lineamentos.....	52
4.3	Perfilagem de Resistividade Horizontal (PRH).....	52
4.4	Sondagens Eléctricas Verticais (SEV).....	54

5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
5.2	Distribuição dos Pontos de Amostragem para Furos Dispersos	57
5.3	Integração de modelos geoeletricos 2D e 1D.....	59
5.4	Inferição de modelos geofísicos-geológicos	61
5.5	Integração dos modelos qualitativo-quantitativos com dados hidrogeológicos.....	63
5.6	Análise comparativa dos dois postos administrativos.....	66
5.7	Resultados da campanha de perfuração de 2023.....	70
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	73
	REFERÊNCIAS	77

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

1.1 Contextualização

A importância económica e social da água subterrânea para as comunidades indígenas rurais em Moçambique, já é reconhecida desde a década 50 do Século XX, quando FREITAS (1959) afirmou a conveniência imediata de notar-se a bem conhecida importância que, em toda a parte, têm as águas subterrâneas.

O INE (2017) registou que a população moçambicana é essencialmente rural, perfazendo 66.6%, que de entre muitas outras dificuldades, é caracterizada por imensas restrições no acesso à água potável, com cerca de 51.7% da população sem acesso à água segura.

A Política de Águas vigente em Moçambique busca não só satisfazer as necessidades básicas das populações mais pobres, mas também, segundo Correia (2017) valorizá-la como um bem social, ambiental e económico. Tendo em vista estas metas, enquadradas nos Objectivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS 6), a Estratégia Nacional de Recursos Hídricos (DNA, 2007), na sua componente de águas subterrâneas enaltece a importância da pesquisa para o dimensionamento do manancial hídrico subterrâneo e sua exploração sustentável, visando alcançar 70% de cobertura até 2025 e o acesso universal e equitativo da população à água até 2030.

Em resposta ao desafio imposto por estas metas, o Governo de Moçambique definiu, estrategicamente, a exploração de águas subterrâneas como a forma mais rápida de expansão de serviços de provimento de água segura às populações rurais, através de Sistemas de Abastecimento de Água (SAA) em grandes aglomerados (vilas e cidades) e furos dispersos equipados com bombas manuais em pequenos aglomerados populacionais rurais.

Entretanto, os projectos de abastecimento de água implementados desde os anos 80 no país registam significativos e recorrentes insucessos, quer por insuficiência de caudal, invariavelmente associados às complexidades hidrogeológicas dos terrenos cristalinos do Complexo de Base (pre-câmbrico) que representam 57% do território nacional, quer por elevado grau de salinidade, nas zonas costeiras.

A Agência Japonesa para a Cooperação Internacional (JICA) está a apoiar, técnica e financeiramente, o Programa Nacional de Abastecimento de Água e Saneamento Rural (PRONASAR), em vigor desde 2009, através da implementação do Projecto de Construção de Infraestruturas de Abastecimento de Água na Província do Niassa, que abrange os distritos de Mavago, Muembe, Majune e Mandimba, que beneficiam, cada um, de um (01) SAA e vinte e

cinco (25) Furos Dispersos. Trata-se de um financiamento no valor de 2,076 bilhões de yens (18.86 bilhões de dólares) de um projecto a ser implementado em 30 meses.

Tendo em conta que os 4 distritos abrangidos pelo projecto fazem parte dos distritos que jazem sobre unidades do Complexo Cristalino de Base, que têm registrado as mais baixas taxas de sucesso de perfuração, demandam abordagens holísticas, tecnologias e técnicas modernas e sofisticadas de aquisição e interpretação de dados para uma inferência mais precisa dos mananciais e alocação dos pontos mais favoráveis à captação da água subterrânea.

A escolha do distrito de Mavago resulta do facto de terem sido achados furos produtivos em locais que num estudo anterior, em 2007, levado a cabo no âmbito do projecto ASNANI (2003-2008), terem sido, então, considerados de baixo potencial hidrogeológico e, por conseguinte, não terem sido recomendados para a perfuração.

Da revisão dos relatórios da WE CONSULT (2007), o proponente notou que as recomendações foram baseadas apenas nos valores absolutos das resistividades registadas nos Perfis de Resistividade Horizontais (PRH) e nas Sondagens Eléctricas Verticais (SEV). KEAREY *et. al.* (2002) postula que, “em muitos métodos de prospecção geofísica são as variações locais, relativamente a alguns valores de limiar, que são de interesse primário” e GANDOLFO (2012) enuncia que “são especificamente as anomalias, melhor do que os valores absolutos medidos, que interessam a investigação geofísica”.

A construção de um Modelo Geoeléctrico-Geológico e sua interpretação embasados nos postulados de KEAREY *et. al.* (2002) e GANDOLFO (2012) podem tornar mais assertiva a selecção dos alvos de captação da água subterrânea em terrenos cristalinos.

1.2 Objectivos

1.2.1 Objectivo geral

Este estudo objectiva a avaliação do potencial hidrogeológico do distrito de Mavago, Moçambique, por meio da análise integrada de modelos geoeléctrico-geológicos gerados a partir da análise qualitativa e quantitativa dos modelos geoeléctricos 1D e 2D.

1.2.2 Objectivos específicos

- Analisar o tipo morfológico dominante das curvas das SEVs, buscando inferir a espessura do rególito e ocorrência de discontinuidades no basamento;
- Avaliar a produtividade das fontes existentes nas zonas mais resistivas; e
- Correlacionar a distribuição espacial dos furos produtivos com as zonas resistivas e tipologia morfológica das SEVs.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Deste estudo algumas relações e influências das condições estruturais e topográficas nas condições de recarga ao longo do distrito ficaram evidentes, bem como as condições de armazenamento no rególito e embasamento fracturado. Ferro e Bauman (1987) indicam que as estruturas secundárias na área de estudo são orientadas de NE-SW, ENE-WSW e NW-SE, o que pode providenciar uma ampla circulação da água subterrânea na região que foi profundamente afectada pelo tectonismo e metamorfismo, tendo ocasionado o aparecimento de várias zonas de fraqueza que favorecem o fluxo de água. Sendo M'sawise relacionado com uma estrutura de colapso por gravidade (Ferro e Bauman, 1978) explica-se que esteja numa zona topograficamente mais baixa e seja alimentado por sistemas de fracturas e falhas interconectadas com outros sistemas mais distantes, como os da Bacia do Rovuma (a norte, a norte), com que o distrito faz fronteira, e Maniamba (a sul, a jusante), onde se encontra o Lago Niassa, o terceiro maior do continente africano. O Lago Niassa está localizado no Vale do Rift, com 580 quilômetros de comprimento e uma largura máxima de 75 quilômetros. O Lago Niassa é uma enorme massa de água com uma área superficial de 29.600 quilômetros quadrados e profundidade que pode chegar até 700 metros (<https://www.dw.com/pt-002/lago-niassa/t-36499389>).

Portanto, os aquíferos do distrito de Mavago encontram-se numa posição bastante privilegiada em termos de localização, pois pode ser recarregados a partir de uma área bastante ampla, com bacia do Rovuma ao norte e bacia de Maniamba (à sul).

Um zoneamento da topografia, espessura do rególito, profundidade do embasamento permitiu estabelecer sua relação com a morfologia típica e resistividades das SEVs das diferentes regiões. Assim, a sub-região montanhosa (Nkalapa, Nsacalange e Ligogo) é a mais resistiva, com rególito pouco espesso, profundidade da rocha geralmente rasa e topograficamente mais elevadas, variando de 2000 a 900 m de altitude. A sub-região planáltica (Mataka e Mbuio), variando de resistiva a condutiva, apresenta rególito com espessura moderada e basamento com profundidade também moderada. As suas altitudes variam de 900 – 700 m. Por sua vez, a sub-região pantanosa (M'sawise) é condutiva, com espessura do rególito elevado, com profundidade de basamento moderada a elevada, topografia baixa, com elevado potencial hidrogeológico, comparativamente as outras sub-regiões.

Dados disponíveis no SDPI de Mavago não permitem avaliar a produtividade das fontes existentes nas zonas mais resistivas, que era um dos objectivos deste estudo, porque o banco de dados não fornece dados quantitativos (caudais) dos furos existentes. Não obstante,

resultados dos furos feitos em 2023, indicam haver correlação entre zonas resistivas e a taxa de sucesso da perfuração.

A sub-região montanhosa apresentou a mais baixa taxa de sucesso, com 14 tentativas feitas, e somente 35.71% em Nkalapa 7.14% em Nsakalange e 7.14% em Ligogo tiveram sucesso. A sub-região pantanosa, apresenta a mais alta taxa de sucesso, com 100% das 14 tentativas feitas positivas. A sub-região planáltica situou-se entre as duas, onde Mbuio teve 0% e Mataka com 14.29% de furos positivos.

Os dados geológicos, tectono-estruturais, topográficos e hidrogeológicos, tornaram difícil a análise dos resultados por limitados e indisponíveis localmente. Por indisponibilidade de tempo não foi possível um levantamento estrutural que pudesse suprir essas deficiências. Cartas temáticas só estão disponíveis na capital do país, Maputo, e são de carácter regional (escala 1:250.000 a 1:1.000.000). Não obstante, é possível inferir conclusões, como as que foram indicadas no primeiro parágrafo das conclusões.

Na coleta de dados geoelectricos também foram enfrentadas dificuldades, principalmente devido a topografia, que se caracteriza por terrenos com inclinação muito acentuada, condicionando a movimentação, por vezes presença de água nos rios ou podendo mesmo afectar a qualidade dos resultados (BRAGA, 2016). Outras dificuldades estão relacionadas com a disposição das infraestruturas, cemitérios, florestas densas e afloramentos ao longo das linhas de PRH/SEV. Durante a perfuração em 2023, mesmo depois de ser concluído o projecto de abertura dos furos, ainda não era possível obter os dados dos furos. Mesmos depois destes terem sido disponibilizados vieram sem coordenadas geográficas, tornando-os inúteis para as análises adicionais necessárias. Foi necessário mobilizar recursos adicionais e, contando com a boa colaboração do Técnico do SDPI, foi possível fazer levantamento de todas as coordenadas, incluindo as dos furos negativos. Embora o relatório do SDPI não apresente dados de caudais, até o relatório oficial da JICA, foi possível correlacionar as zonas resistivas com a taxa de sucesso da perfuração. Estamos cientes que a baixa taxa de sucesso pode não reflectir toda a verdade, uma vez que muitos furos foram feitos em locais deslocados dos pontos marcados pela prospecção geofísica de 2021. A disponibilização destes dados, embora não possa avaliar o grau de produtividade dos furos nas zonas resistivas, que era um dos objectivos do projecto, permitiu tirar conclusões importantes sobre a potencialidade das zonas resistivas e condutivas.

A análise integrada dos dados geofísicos disponíveis, resultantes dos estudos de 2021 e 2007, corroboram perfeitamente com o que é teoricamente esperado da tipologia morfológica das curvas de SEVs num perfil de meteorização em zonas de embasamento cristalino. Para

levantamentos de 2021, mais de 40% das 79 SEVs são do Tipo H e 34%, do tipo KH, num total de 12 comunidades do distrito de Mavago. Nas pesquisa de 2007, que incidiram sobre 9 comunidades, tendo sido efectuadas 31 SEVs, as estatísticas apontam para 48% e 42%, respectivamente. Litologicamente, as curvas de Tipo H representam um perfil com 4 horizontes, graduaamente crescente, em termos do tamanho de particulas em direcção ao embasamento. As curvas do tipo KH e HKH, por sua vez, indicam alternância entre partículas grossas e finas, em direcção ao embasamento. No geral, a rocha cristalina de base apresenta fractuamentos e/ou falhamentos.

Por falta de dados referentes a caudais e qualidade de água no Banco de Dados do distrito de Mavago, não foi possível fazer a análise quantitativa da produtividade dos furos do distrito. Os dados de 2023 também não acrescentaram valor a esse quesito. Porém, foi feita uma análise qualitativa com os dados de 2021, tendo em conta a distribuição dos furos produtivos no distrito. Pelo menos 35% dos furos existentes estão em zonas resistivas a altamente resistivas, 23% em zonas altamente condutoras e os restantes 42% em zonas condutoras. Com adição dos furos de 2023 e a sua sobreposição com as SEVs, deu informações bastante úteis para compreensão do sistema hidrogeológico do distrito de Mavago. O modelo conceitual poderia ser descrito com tendo no topo um rególito pouco espesso nas zonas altamente resistivas e muito espesso nas zonas altamente condutivas, sendo o embasamento altamente fracturado, mas com bastante interconectividade dos sistemas de falhas e fraturas, podendo permitir ampla circulação na área. Esta deve ser a premissa que determina a ocorrência de furos produtivos em zonas altamente resistivas. Um local que circula pouca água com a rocha granito ou gnaiss próximo à superfície, terá resistividade elevada, mas se o furo captar um pequeno aquífero interconectado com outro maior, este poderá ser a fonte de alimentação do aquífero menor e do furo nele existente.

As áreas montanhosas tendem a ser resistivas a altamente resistivas enquanto as planálticas e pantanosa tendem a ser condutoras a altamente condutoras. A espessura do rególito tende a ser limitada enquanto a profundidade do embasamento tende a ser maior, graças a zona de alteração muito espessa, nas áreas montanhosas, com superfície freática profunda enquanto nas áreas planálticas e pantanosas, o rególito tende a ser espesso e a profundidade do basamento moderada com superfície freáticas rasas, possibilitando a captação da água subterrânea por poços rasos e providenciando maior disponibilidade hídrica à população local.

As comunidades de Nsawise, Lipembo e zona pantanosa de Mataca (Mavago-Sede), dispõem de mais água que ocorrem em aquíferos granulares contínuos, rasos em rególito resultante de meteorização residual de rochas de filiação granítica do embasamento cristalino.

Em face destas conclusões a primeira recomendação vai para o distrito que precisa incluir a captação e armazenamento de dados dos furos tais como caudal, Q (m^3/h), Conduvidade Eléctrica, CE ($\mu S/cm$), parâmetros físicos, químicos, microbiológicos e organolépticos, conforme recomenda o Regulamento Nacional sobre a Qualidade da Água (MISAU, 2004), bem como profundidades, níveis hidrostáticos e hidrodinâmicos. Estes dados permitem não só estudos mais completos sobre a produtividade dos aquíferos, mas também para a boa gestão do recurso hídrico. É indispensável que todos os furos, positivos ou negativos sejam devidamente georreferenciados e descritos. Para furos declarados negativos precisa acrescentar-se a informação se foram secos ou tiveram baixo caudal, com indicação onde é possível do caudal estimado.

Os próximos projectos devem seguir uma abordagem mais holística que inclua não apenas o estudo de campo, mas um extensivo trabalho de gabinete, permitindo tempo necessário aos consultores para a inclusão do sensoriamento remoto e interpretação aerogeofísica, que possam dar a focalização dos alvos mais profundos que provavelmente serão mais produtivos em áreas montanhosas, onde a taxa de sucesso se tem revelado mais baixa.

É necessários que os planificadores dimensionem correctamente o tempo entre o estudo geofísico e o início da perfuração. Dois anos passaram entre a conclusão do estudo geofísico e o início da perfuração. Isso levou a que se perdessem os marcos, tendo como resultados a incorrecta alocação dos furos, terminando, obviamente, com uma taxa de sucesso excessivamente baixa. Este resultado pode ser erróneo, uma vez que o GPS pode ter erro até 3 metros e deslocar 3 metros alocação de um furo em zona do basamento cristalino, dificilmente pode se lograr sucesso, a não ser que vá na orientação da lineação portadora da água.

REFERÊNCIAS

- AFONSO, R. S.; MARQUES, J.M. & FERRARA, M. A. Evolução geológica de Moçambique, Instituto de Investigação Científica Tropical (Lisboa), Direcção Nacional de Geologia (Maputo) – Lisboa. 1998
- BJORN, A. e BJORKSTROM, T. *Geophysical Investigation in Nampula Province, Mozambique*. Thesis work for Master of Science 30 ECTS, Engineering Geology, Lund University, Minor Field Study. 2014
- BORGES, W. R. *Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicação no planeamento urbano e meio ambiente: estudo sobre o sítio controlado do IAGUSP*. 250p. Tese de Doutorado em geofísica - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, USP, São Paulo. 2007
- BRAGA, A. C. O. *Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: Uma abordagem metodológica e prática*. 2006. 121 p. Tese (Livre - Docência) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 2006
- BRAGA, A. C. O. *Métodos Geoeléctricos em Hidrogeologia*. Geofísica Aplicada. Oficinas de Textos. 2016
- BRICALLI, L. L. Padrões de Lineamentos e Fraturamento Neotectônico no Estado do Espírito Santo (Sudeste do Brasil). Tese (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2011
- CILEK, V. Industrial Minerals of Mozambique. Ebook:
file:///X:/TK/TK40/TK406/TK4064/Veikko/Ind%20Min%20Moz/Ebook-version/index.htm
(1 of 5)31.7.2008 9:47:52. 1989
- COELHO, J. O. M. *Identificação e Caracterização ee Zonas e Captura e Concentração ee Águas Subterrâneas a Partir de Produtos de Sensoriamento Remoto*. Dissertação de Mestrado. Campus de Rio Claro. Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista. 2010
- CORREIA, A. Moçambique e o Sector de Água – Desenvolvimentos no Quadro Institucional do Sector da Água em Moçambique. Pontes e Parcerias nos Países de Língua Portuguesa. Figueira da Foz. 24 de Outubro de 2017
- COSTA, A.F. *Emprego do método da eletrorresistividade na caracterização da lixeira de Porto Velho – RO assentada em meio fraturado*. 130p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 2008
- D.N.A. *Estratégia Nacional de Gestão de Recursos Hídrico*. Aprovado na 22ª Sessão do Conselho de Ministros de 21 de Agosto de 2007. Conselho de Ministro, República de Moçambique. <https://faolex.fao.org/docs/pdf/moz181147.pdf>. 2007

DE PAULA, T. L. F. Comportamento Hidráulico de Aquíferos Sedimentares e Metassedimentares de Dupla Porosidade da Região do Alto Paraguai, MT. Área de Concentração: Hidrogeologia e Meio Ambiente. Dissertação de Mestrado. 2015

EBONG, D.E., ABONG, A. A., ULEM E.B. e EBONG, L.A. *Geoelectrical Resistivity and Geological Characterization of Hydrostructures for Groundwater Appraisal in the Obutu Plateau, Southeastern Nigeria. Natural Resources Research, Vol. 30, No. 3, June 2021 (© 2021).* <http://doi.org/10.1007/s11053-021-09818-4>. 2021

FERRO, B.P.A e BOUMAN, D. *Notícia Explicativa da Carta Hidrogeológica de Moçambique, Escala 1:1.000.000. Projecto da Carta Hidrogeológica de Moçambique com Apoio do UNICEF. Contribuição para a “Década Internacional de Abastecimento de Água Potável e Adopção de Medidas Sanitárias (1981-1990)”.* Direcção Nacional de Águas (D.N.A.). Ministério de Construção e Águas. República de Moçambique. 1987

FREITAS, A.J. *A Geologia e o desenvolvimento económico e social de Moçambique.* Imprensa Nacional de Moçambique. Lourenço Marques. 1959

GRANDOLFO, O.C.B. *Métodos Geofísicos Aplicados à Engenharias e Geotecnia.* Palestra Apresentada na UNICAMP, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitectura e Urbanismo. Comunicação Técnica N° 171299. Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). Maio, 2012

GRANTHAM, G.H.; MARQUES, J.M.; WILSON, M.G.C.; MANHIÇA, V. & HARTZER, F.J. *Explanation Of the Geological Map of Mozambique, Scale 1:1 000 000.* Mineral Resources Management Capacity Building Project. Nordic Development Fund (NDF). World Bank. Direcção Nacional de Geologia. Ministério dos Recursos Minerais e Energia. República de Moçambique. 2011

GREENBAUM, D. *Structural Influences on the Occurrence of Groundwater in SE Zimbabwe.* British Geological Survey, Keyworth, Nottingham, NG12 5gg, UK. Geological Society Special Publication No. 66 . p. 77-86. 1992

HAZELL, J. R. T., CRATCHLEY, P. J. & JONES, C. R. C. *The Hydrogeology of Crystalline Aquifers in Northern Nigeria and Geophysical Techniques used in their Exploration.* Geological Society Special Publication No. 66 . p. 155-182. 1992

INE. Estudos Temáticos, Censo 2017, População 2023. Instituto Nacional de Estatística (INE). 2023.07.25 <https://www.ine.gov.mz/>. 25.07.2023

JAT. Projecto de Construção de Infraestruturas de Abastecimento de Água na Província do Niassa. DNA. PRONASAR. Japan Techno Co. Ltd. 2022

MILSOM, J. e ERIKSEN, A. *Field Geophysics.* The Geological Field Guide Series. Fourth Edition. John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-74984-5. 2011

KEAREY P, BROOKS, M. e HILL, I. *An Introduction to Geophysical Exploration*. Blackwell Science Ltd. 3rd Ed. 2002

KEY, R.M. *An Introduction to the Crystalline Basement of Africa*. Highlands and Islands Research Group, British Geological Survey, Murchison House, Edinburgh, EH9 3LA, UK. Geological Society Special Publication No. 66 . p. 29-58. 1992

KIRSCH, R. *Groundwater Geophysics – A Tool for Hydrogeology*. 2nd Edition. Springer. 2009

KRUSERMAN, G.P. E RIDDER, N.A. *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data*. 2nd Ed. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands. 1994

LACHELT, S. *Geology and Mineral Resources of Mozambique*. Mineral Resources Management Capacity Building Project financed by the WORLD BANK Credit no. 3486. Direcção Nacional de Geologia. Ministério de Recursos Minerais e Energia. República de Moçambique. 2004

LEITE, C.E.S. *Tipos de Aquíferos Parte II. Aquíferos Descontínuos* CESOL HP Hidrogeologia. <http://www.geocities.com/cesol1999/TipodeAquiferoParteII.htm>. Consultada em 28/07/2023. Mantida por Carlos Eduardo Sobreira Leite - Geólogo / Hidrogeólogo (M.Sc.). 2023

MACDONALD. A., DAVIES, R. C. e CHILTON, J. *Developing Groundwater. A Guide for Rural Water Supply*. Natural Environment Research Council. British Geological Society; Department for International Development (DFID). NERC, 2005

MOPH . *Projecto Integrado de Abastecimento de Água e Saneamento às Províncias de Nampula e Niassa (ASNANI)*. Diploma Ministerial n^o 217/2002. MOPH, República de Moçambique. 2002

MUSSETT, A. E. & KHAN, M. A. *Looking into the Earth - An Introduction to Geological Geophysics*. Cambridge University Press. 2000

NORCONSULT. *Explanatory Notes - Mineral Resources Management Capacity Building Project*. Republic Of Mozambique. Component 2: Geological Infrastructure Development Project. Geological Mapping – Lot . Report No. B6.f. 2007

PARASNIS, D. S. *Principles of Applied Geophysics*. Fourth Edition. London New York. Chapman and Hall. 1986

REGINATO, P.A.R.; STRIEDER, A.J. *Condicionantes Geológicas dos Aquíferos Fraturados da Formação Serra Geral e sua Relação com a Localização de Poços Tubulares*. XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. 2006

SANTOS, A. R.; PARADELLA, W. R., VENEZIANI, P.; MORAIS, M.C. Radar aplicado ao

mapeamento geológico e prospecção mineral: aplicações. São José dos Campos: INPE/ADIMB, 103p. 2000.

SARTORIO, F.; BERTOLO, R. A.; PINO, D. S.; SARAIVA, F. A. *Caracterização estrutural em top-down de aquíferos fraturados: exemplo em Barra Mansa, Rio de Janeiro*. Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas (CEPAS/USP), São Paulo, SP. Revista Águas Subterrâneas. ABAS. 2021

SILVA, R. W. *Aplicação do método da electrorresistividade na investigação e mapeamento da contaminação por cemitérios - o exemplo do cemitério da Vila de Rezende, Iracicaba/SP*. Rio Claro. 2008

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. 1990. *Applied Geophysics*. 2nd Edition. Cambridge University Press. 770p

WE CONSULT. *Pesquisa Hidrogeológica para a Construção de Furos Mecânicos de Água no Distrito de Mavago*. Projecto 2007/03. HidroÁfrica, Maputo, Moçambique. 2007

WRIGHT, E. P. e BURGESS, W. G. *The hydrogeology of Crystalline Basement Aquifers in Africa*. Geological Society Special Publication No. 66. 1992