



FACULDADE DE CIÊNCIAS
Departamento de Matemática e Informática

Trabalho de Licenciatura em
Ciências de Informação Geográfica

**Estudo da Qualidade da Água do Rio Umbelúzi para o Consumo
Doméstico com Recurso as Técnicas de Detecção Remota e
Sistemas de Informação Geográfica**

Caso de estudo: Distrito de Boane

Autor: Basílio Reginaldo Quibe

Maputo, Setembro de 2025



UNIVERSIDADE
EDUARDO
MONDLANE

FACULDADE DE CIÊNCIAS
Departamento de Matemática e Informática

Trabalho de Licenciatura em
Ciências de Informação Geográfica

**Estudo da Qualidade da Água do Rio Umbelúzi para Consumo
Doméstico com Recurso as Técnicas de Detecção Remota e Sistemas
de Informação Geográfica**

Autor: Basílio Reginaldo Quibe

Supervisora: Mestre Sandra Domingos Sambo, UEM

Maputo, Setembro de 2025

Dedicatória

Aos meus pais, em especial a minha mãe Regina Massinga, minha fonte de luz, sabedoria, amor, bondade, meu bem mais precioso.

Aos meus irmãos, Felisberto Quibe, Olmira Quibe, a minha noiva Deolinda Nhassengo e a todos que acreditaram em mim.

Declaração de Honra

Eu, **Basílio Reginaldo Quibe**, declaro por minha honra que o presente Trabalho de Licenciatura é resultado da minha investigação e que o processo foi concebido para ser submetido apenas para a obtenção do grau de Licenciado em Ciências de Informação Geográfica, na Faculdade de Ciências da Universidade Eduardo Mondlane.

Maputo, Setembro de 2025

(Basílio Reginaldo Quibe)

Agradecimentos

Em Primeiro lugar quero agradecer a Deus, pelo dom da vida, saúde, por todas dádivas concedidas, por ter me capacitado, sustentado e me permitido chegar a este momento.

A Universidade Eduardo Mondlane, ao corpo docente do curso de Ciências de Informação Geográfica pelos ensinamentos e pela abertura de uma nova etapa da minha vida.

Quero deixar o meu agradecimento a minha supervisora, Mestre Sandra Sambo, que desde o início da minha monografia esteve presente e com muita paciência e sabedoria me orientou para obtenção dos resultados esperados. Agradeço pela experiência extraordinária e por me proporcionar oportunidade de crescimento pessoal.

A minha família, em particular a minha mãe Regina Massinga, ao meu pai Reginaldo Quibe, aos meus irmãos Felisberto Quibe “Manito”, Olmira Quibe, Harina Quibe, Hélio Quibe, aos meus tios Nindo Massinga pela ajuda incondicional na minha trajectória, Telma Massinga, Isaura Quibe, Sônia Novunga, aos meus primos Ricardo Quibe, Reinaldo Quibe, José Novela, aos meus padrinhos Yolando Bila e Sônia Bila, muito obrigado.

Um agradecimento especial ao meu mentor Engenheiro Valente Machavele por ter acreditado em mim, pela direcção, motivação, sabedoria incondicional e por nunca ter desistido de mim.

Aos meus colegas e amigos do curso, Jubílio Mause, José Chauque, Sebastião Chambal, Cândido Timbe, Fortunato Guirruço, muito obrigado pela amizade, companheirismo, edificação mental e a mais importante irmandade.

Aos meus amigos, José Chavane “Boneco”, Amilcar Ndava “Kito”, Elton Ndava “Ilton”, Aurelio Muchanga, Wilson José “Guga”, Helder Teixeira “Daroch”, Cristina Amélia e Vera Manjate, o meu muito obrigado.

Expresso minha sincera gratidão pelo apoio, directo ou indirecto de todos aqueles que tiveram um contributo na minha trajectória.

KHANIMAMBO!

Resumo

O presente trabalho tem como objectivo avaliar a qualidade da água do rio Umbelúzi, localizado no distrito de Boane, província de Maputo, com ênfase no seu uso para consumo doméstico. A metodologia baseou-se na aplicação integrada de técnicas de Detecção Remota (DR) e Sistemas de Informação Geográfica (SIG), utilizando imagens multiespectrais do satélite Sentinel-2, processadas na plataforma *Google Earth Engine* (GEE). Foram analisados dois parâmetros ópticos de qualidade da água, a Turbidez e Sólidos Totais Dissolvidos (TDS), durante duas épocas distintas: época seca (maio a setembro) e época chuvosa (outubro a dezembro). As imagens foram submetidas a filtros de nuvens, seleção de bandas espectrais, e posterior aplicação de modelos de Coeficiente Determinação e Spearman. A validação foi realizada com base em dados de campo previamente colectados por Machava (2020), nos quatro pontos estratégicos ao longo do rio. O Coeficiente Determinação (R^2) obtida indicou boa relação estatística entre os dados estimados por satélite e os dados reais de campo, com destaque para a turbidez que teve R^2 igual a 0,96 época seca e 0,98 época chuvosa. E o TDS o R^2 obteve valores baixos 0,4 época seca e 0,7 época chuvosa, indicando baixa sensibilidade espectral, independentemente da estação. Para complementar a análise de correlação, foi aplicada a Correlação de Spearman (ρ), uma técnica estatística não-paramétrica ideal para dados que não seguem distribuição normal. Este teste permitiu avaliar a força e direção da associação entre os valores observados e os estimados. Os resultados confirmaram forte correlação positiva e negativa para ambos os parâmetros em todas as épocas, reforçando a confiabilidade do modelo. Os resultados demonstraram a viabilidade técnica e econômica da utilização da (DR) como ferramenta complementar ao monitoramento tradicional, com a vantagem de oferecer alta frequência temporal, ampla cobertura espacial e baixo custo operacional. Por fim, o estudo recomenda o fortalecimento do uso de tecnologias geoespaciais para o planeamento ambiental, e a formulação de políticas públicas sustentáveis voltadas para a gestão integrada da bacia hidrográfica do Umbelúzi.

Palavras-chave: Qualidade da água, DR, SIG e GEE.

Abreviaturas

MAE - Ministério da Administração Estatal

SIG - Sistemas de Informações Geográficas

DR - Detecção Remota

GEE - Google Earth Engine

SAR - *Synthetic Aperture Satellite*

ESA - Agência Espacial Europeia

MSI - *Sensor Multispectral Imager*

MISAU - Ministério da Saúde de Moçambique

SASS - *South African Score System*

INE - Instituto Nacional de Estatística

NTU - Unidade Nefelométrica de Turbidez

TDS - Sólidos Totais Dissolvidos

ISDN - Índice de Sólidos Dissolvidos Normalizado

OMS - Organização Mundial da Saúde

Índice

Dedicatória.....	i
Declaração de Honra.....	ii
Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	iv
Índice.....	vi
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tabelas.....	x
Introdução.....	1
1.1 Contextualização.....	1
1.2 Definição do problema.....	2
1.3 Justificativa.....	3
1.4 Relevância do Estudo.....	3
1.5 Objectivos.....	4
Objectivo Geral.....	4
Objectivo Específicos.....	4
Área de Estudo.....	5
2.1 Localização Geográfica do Distrito de Boane.....	5
2.1.2 Clima e Hidrografia.....	6
2.1.2 Precipitação.....	7
2.1.3 Vegetação.....	7
2.1.4 Geologia e Geomorfologia.....	7
2.1.5 Uso da terra.....	8
3.1 Qualidade da Água.....	9
3.2 Parâmetros Físicos-químicos e Microbiológicos.....	11
3.2.1 Parâmetros físicos-químicos.....	11
3.2.2 Parâmetros Microbiológicos.....	16

3.3 Espectro Electromagnético	17
3.4 Detecção Remota.....	18
3.4.1 Componentes da Detecção Remota.....	18
3.4.2 Comportamento Espectral da Água.....	19
3.4.3 Detecção Remota e a Gestão dos Recursos Hídricos	19
3.5 Constelação Sentinel.....	19
3.6 Sistemas de Informação Geográficas.....	21
3.6.1 Áreas de aplicação dos Sistemas de Informação Geográfica.....	21
3.7 <i>Google Earth Engine</i> (GEE).....	22
3.7.1 Impactos do Uso de GEE e DR no Estudo da Qualidade de Água.....	23
Material e Métodos	25
4.1 Material.....	25
4.2 Métodos.....	25
4.2.1 Colecta de Dados	25
4.3 Fluxograma Metodológico	27
4.3.1 Processamento Digital das Imagens.....	27
4.3.2 Seleção de Imagens de Satélite.....	28
4.3.3 Cálculo da Turbidez.....	28
4.3.4 Sólidos Totais Dissolvidos (TDS).....	29
4.3.5 Extração de Valores nos Pontos de Colecta	30
4.3.6 Validação dos Dados	30
4.3.6.1 Coeficiente de Determinação (R^2)	30
4.3.6.2 Correlação de Spearman.....	31
4.4 Classificação Temática.....	32
Resultados e Discussão	34
5.1 Correlação de Spearman.....	36
5.2 Coeficiente de Determinação (R^2).....	38
5.3 Turbidez da Água.....	40

5.4 Sólidos Totais Dissolvidos	41
Conclusões e Recomendações	43
6.1 Conclusão.....	43
6.2 Recomendações.....	44
Referências Bibliográficas	45
Apêndices.....	49
Apêndices 1: Mapa da turbidez da época seca e chuvosa com intervalos de variação	49
Apêndices 2: Mapa de TDS da época seca e chuvosa com intervalos de variação	49
Anexos.....	50
Anexo 1: Processo de Aquisição de Dados de Turbidez e TDS no GEE	50
Anexo 2: Imagens ilustrativas dos pontos de amostragem (Machava, 2020).....	51

Lista de Figuras

Figura 1: Localização Geográfica do Distrito de Boane	5
Figura 2: Espectro das ondas eletromagnéticas segundo seu comprimento de onda (Madeira, 2010)	17
Figura 3: Sistemas de aquisição de imagens (Fernandes, 2018).....	18
Figura 4: Comportamento espectral da água (Florenzano, 2007).....	19
Figura 5: Localização de pontos colecta no rio Umbelúzi no distrito de Boane.....	26
Figura 6: Fluxograma metodológico	27
Figura 7: Regressão linear da turbidez para época seca e chuvosa	38
Figura 8: Regressão linear dos sólidos totais dissolvidos para época seca e chuvosa	39
Figura 9: Mapa de variação da turbidez da época seca e chuvosa	40
Figura 10: Mapa de variação dos Sólidos Totais Dissolvidos da época seca e chuvosa.....	41

Lista de Tabelas

Tabela 1: Caracterização do Satélite Sentinel-2A e 2B utilizadas em análises Bezerra et al. (2019).....	20
Tabela 2: Descrição dos dados usados.....	25
Tabela 3: Descrição dos softwares e plataformas computacionais utilizados.....	25
Tabela 4: Tabela de variação de intervalos de turbidez e TDS	32
Tabela 5: Valores dos parâmetros de campo e estimados da época seca e chuvosa.....	35
Tabela 6: Matriz de Spearman da correlação para época seca.....	36
Tabela 7: Matriz de Spearman da correlação para época chuvosa.....	37

1.1 Contextualização

A água é fundamental para o desenvolvimento sustentável dos vários países, pelo que, a falta de água ou água sem qualidade diminuem a qualidade de vida das populações. Calcula-se cerca de 1000 milhões de pessoas não têm acesso a água comprovadamente potável e 2400 milhões não dispõem de saneamento básico no mundo (Adriano e Dalama, 2022).

O acesso a água potável e ao saneamento seguro continua a ser um dos maiores desafios em África. Aplicam-se esforços para que mais pessoas tenham acesso a água potável. Embora seja encorajado, o seu progresso continua lento principalmente nas zonas rurais (Adriano e Dalama, 2022).

Moçambique é um país em desenvolvimento e continua com problemas críticos de disponibilidade de água para o consumo humano e saneamento básico, e o índice de doenças e mortes, sobretudo em crianças em idade inferior a 5 anos devido má qualidade da água, continua muito elevado (Rodrigues et al., 2020). Apesar do esforço do governo para minimizar as doenças de veiculação hídrica, anualmente registam-se casos deste tipo de doenças principalmente em época húmida (Mangujo, 2020).

A utilização da água pela sociedade humana visa a atender as necessidades pessoais, económicas (agrícolas e industriais) e sociais. A qualidade da água é um aspecto indispensável quando se trata dos seus principais usos, especialmente para fins de abastecimento humano (De Brito et al., 2022).

Nesse contexto, a qualidade da água pode ser definida como as características biológicas, químicas e físicas da água a serem mantidas para atender sua múltipla utilização (Greb et al., 2018). Frequentemente, a qualidade é medida por uma série de parâmetros, a partir de colectas em campo. Entretanto, as colectas de dados *in situ* são capazes de representar apenas estimativas pontuais da qualidade da água no tempo e no espaço. Tal condição torna a obtenção de variações espaciais e temporais dos índices de qualidade em grandes corpos hídricos praticamente impossíveis, além de representar um processo extremamente caro (De Brito et al., 2022).

A força motriz dos estudos e escassez e a baixa qualidade dos recursos hídricos vêm aumentando devido de diversos factores, como a poluição e contaminação das águas, o crescimento da demanda em algumas localizações em função de aglomerados urbanos e o desenvolvimento industrial e agrícola (Mangujo, 2020).

Actualmente, o país entrou em stress hídrico, que afecta muitas comunidades em certas regiões do país. Na região sul, o rio Umbelúzi é a principal fonte de abastecimento da água às Cidades de Maputo, Matola, Vila de Boane e arredores.

Esta situação é agravada pelas mudanças no ciclo hidrológico, previstas em todos os modelos climáticos, que afectam o país de forma particular e a região da África Austral de forma geral, em função das mudanças nos padrões da precipitação (Genito Maúre et al., 2018), que tem vindo a afectar significativamente a disponibilidade e distribuição temporal da vazão do rio Umbelúzi

Segundo Duarte (2009), a modificação climática ou aumento da variabilidade climática pode alterar o ciclo da água e o valor do escoamento superficial dos rios, causando implicações importantes para sistemas existentes dos recursos hídricos como também para o planeamento e gestão desses recursos.

Um dos factores visíveis que afectam a qualidade e quantidade da água do rio Umbelúzi é o aumento assinalável da população, havendo previsões de que a população da província de Maputo, venha duplicar nos próximos anos em quatro milhões de habitantes para 2035 (Hake, 2016). Este aumento da população irá de certa forma exercer uma grande pressão pela demanda por água para o consumo humano, desenvolvimento de actividades sociais e económicas (agrícola, criação de gado entre outras), bem como na deterioração da sua qualidade.

Em Moçambique, estudos de avaliação de qualidade de água em diferentes rios têm sido efectuados, usando métodos tradicionais (químicos, físicos e microbiológicos) (Albino, 2012; Cossa, 2015).

O presente estudo surge na necessidade de se avaliar a qualidade da água do rio Umbelúzi, utilizando os parâmetros de qualidade da água, de forma a constituir uma ferramenta de avaliação dos corpos de água, às modificações das condições ambientais originais e disponibilizar subsídios que auxiliem na monitoria e classificação da qualidade da água superficial em Moçambique.

1.2 Definição do problema

Os impactos das actividades humanas no ciclo hidrológico e na qualidade das águas de um determinado rio ou de uma bacia hidrográfica decorrem de um conjunto de actividades humanas, resultado das utilizações múltiplas da água (Tundisi, 2006). O aumento da população que se verifica nos últimos tempos no distrito de Boane e arredores, tem vindo a influenciar de certa forma a conservação e a qualidade da água do rio Umbelúzi. Maior parte desta população, com excepção de alguma parte que vive na autarquia da Vila de Boane, consome água retirada directamente do rio Umbelúzi sem nenhum tipo de tratamento. O monitoramento tradicional da qualidade da água é baseado em colectas *in situ*, que são dispendiosas e limitadas espacial e temporalmente. A problemática central reside, portanto, na falta de um monitoramento contínuo e acessível para a avaliação precisa dos impactos ambientais, prejudicando a gestão dos recursos hídricos e a segurança do abastecimento de água potável.

1.3 Justificativa

O rio Umbelúzi é a principal fonte de abastecimento de água às Cidades de Maputo, Matola, Vila de Boane e Marracuene. A rápida urbanização que caracteriza toda a região da província de Maputo, o crescimento industrial e económico, a demanda pela água para o consumo humano, o desmatamento e outros usos consumptivos, concorrem para a deterioração da qualidade da água do rio Umbelúzi. Esta situação é agravada pela poluição devido ao despejo de efluentes líquidos sem tratamento, lançamento de resíduos sólidos e industriais no corpo de água, causadas pelas actividades humanas, com maior destaque para actividades agrícolas que são desenvolvidas no baixo curso do rio Umbelúzi, o pastoreio de gado, a crescente actividade industrial de exploração de minérios (Extração de pedras para construção civil).

A crescente degradação da qualidade da água no rio Umbelúzi representa um risco significativo para a população que depende desse recurso para consumo doméstico e para actividades económicas. Além disso, a disponibilidade de dados confiáveis sobre a qualidade da água é essencial para a formulação de políticas públicas voltadas à gestão e conservação dos recursos hídricos.

A utilização de técnicas de Detecção Remota permite obter uma análise abrangente e de baixo custo, complementando os métodos tradicionais de monitoramento. Assim, este estudo se justifica pela necessidade de aprimorar as metodologias de monitoramento da qualidade da água no rio Umbelúzi, contribuindo para um planeamento mais sustentável do uso dos recursos hídricos

1.4 Relevância do Estudo

O estudo é relevante porque contribui para o campo da ciência ambiental, oferecendo um método ou complementando métodos existentes para avaliar a qualidade da água. A combinação de Detecção Remota e Sistemas de Informação Geográfica (SIG) proporciona uma forma eficiente e precisa de monitorar a qualidade da água em grandes áreas, como o rio Umbelúzi, superando as limitações de colectas de dados em campo, que são muitas vezes caras e restritas a pontos específicos. A adoção dessas técnicas avançadas melhora o entendimento sobre os padrões de qualidade da água ao longo do tempo e espaço, além de fornecer ferramentas para pesquisadores monitorarem de forma contínua e acessível os recursos hídricos.

A pesquisa tem um impacto directo nas comunidades que vivem às margens do rio Umbelúzi, pois fornece informações cruciais sobre a qualidade da água para consumo humano. Como o estudo revela, muitas dessas comunidades dependem do rio para atender às suas necessidades básicas de água, o que torna o monitoramento da qualidade da água fundamental para prevenir doenças e garantir a segurança hídrica.

Do ponto de vista ambiental, o estudo é vital para preservação dos recursos hídricos e proteção da biodiversidade na bacia hidrográfica do Umbelúzi. Ele fornece informações importantes sobre como actividades antrópicas, como a agricultura e o descarte de resíduos, podem afectar negativamente a qualidade da água.

1.5 Objectivos

Objectivo Geral

Aplicar técnicas de Detecção Remota (DR) e Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para avaliar a qualidade da água do rio Umbelúzi, verificando sua adequação para consumo doméstico.

Objectivo Específicos

- Identificar os parâmetros da qualidade da água medidos em campo que podem ser estimados por meio de imagens de satélite, considerando as épocas seca e chuvosa;
- Estimar os parâmetros de qualidade da água a partir de imagens de satélite, processadas no *Google Earth Engine* (GEE), durante as épocas chuvosa e seca;
- Validar os dados estimados por Detecção Remota através da comparação com medições de campo;
- Analisar os parâmetros da qualidade da água estimados pela imagem de satélite nas épocas seca e chuvosa.

Área de Estudo

2.1 Localização Geográfica do Distrito de Boane

O distrito de Boane está localizado na região Sul de Moçambique, a Sudoeste da província de Maputo, a 30 km da capital do país (Maputo). Sendo limitado pelos paralelos de latitudes $25^{\circ} 46'12''$ S no extremo Norte e $26^{\circ} 46'12''$ S no extremo Sul e pelos meridianos de longitude $32^{\circ} 10'55''$ E no extremo Oeste e $32^{\circ} 29'53''$ E no extremo Este. Faz fronteira a Norte com distrito de Moamba, a Oeste e Sudoeste com o distrito de Namaacha, a Sul e a Sudeste com o distrito de Matutuine e a Este com o município da Matola e o distrito municipal da Katembe (Governo da Província de Maputo, 2016). A superfície do distrito de Boane é de aproximadamente 778,905 Km². O distrito está dividido em dois postos administrativos, (Boane e Matola-Rio), compostos por 4 localidades. Tem uma população estimada em cerca de 244.384 habitantes (INE, 2020) e uma densidade populacional de 298 hab/Km².

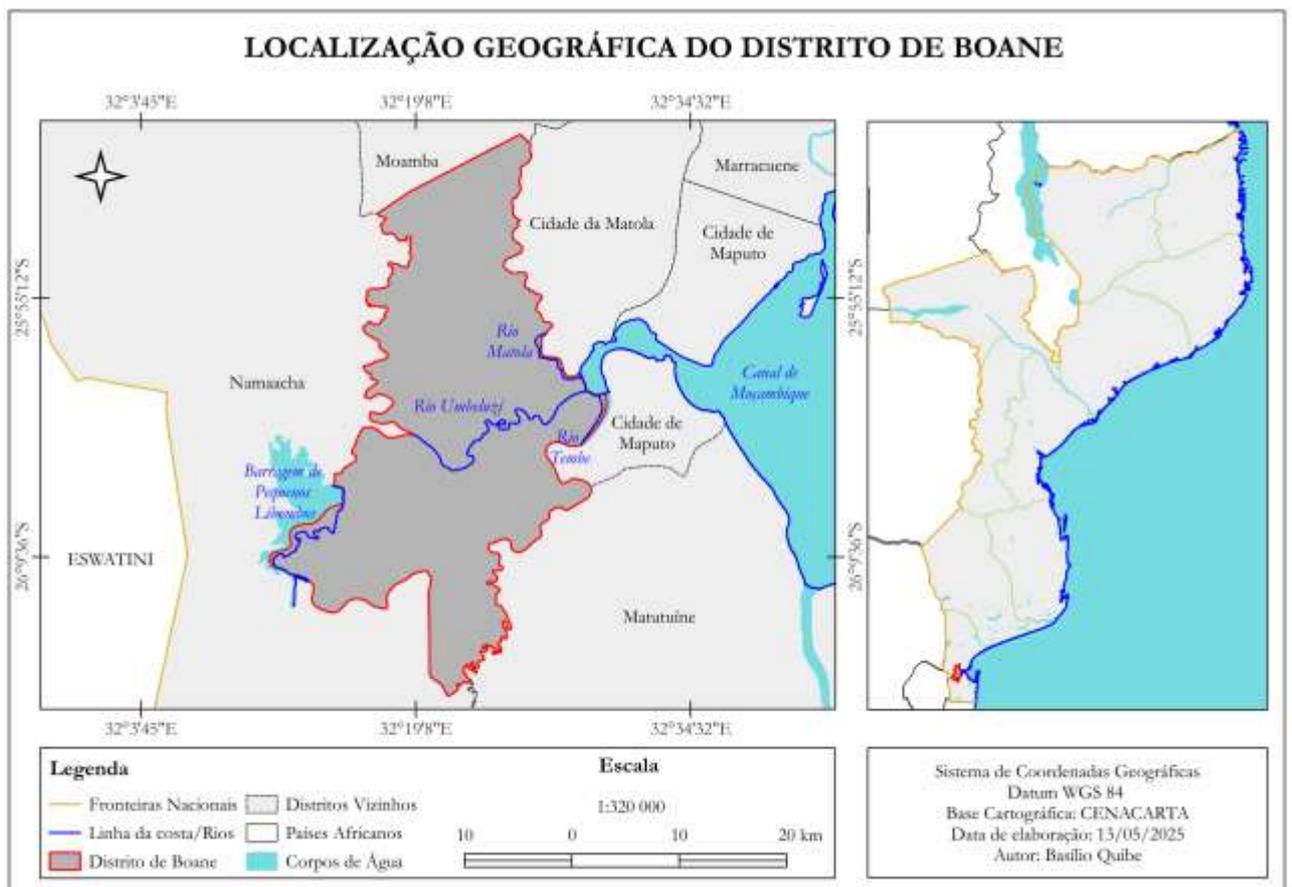


Figura 1: Localização Geográfica do Distrito de Boane

2.1.2 Clima e Hidrografia

A região de Boane encontra-se sob a acção dos ventos alísios, e o seu clima é condicionado por um regime anticiclónico e de depressões das regiões intertropicais e sofre ainda a influência da corrente marítima quente do Oceano Índico (Hilário, 1996).

O clima da região é sub-húmido e com deficiência de chuva na estação fria, caracterizado por alternância entre as condições secas, induzidas pela alta pressão sub-continental e a as incursões de ventos húmidos do oceano Índico. Vagas de frio podem trazer tempestades violentas e chuvas torrenciais de curta duração (MAE, 2005).

A temperatura média anual é de 23.7°C verificando-se que os meses mais frios são os de Junho e Julho e os mais quentes são Janeiro e Fevereiro. A amplitude térmica anual é de 8.8°C.

De acordo com o MAE (2005) a maior bacia hidrográfica que encontramos no distrito de Boane é a bacia hidrográfica de Umbelúzi, que desempenha um papel preponderante no abastecimento de água potável para as cidades de Maputo, Matola e Boane.

A bacia hidrográfica do rio Umbelúzi fica localizada no extremo Sul da província de Maputo, onde está inserido o seu rio principal, que nasce no reino do Essuatíni (antigo reino da Suazilândia), perto da fronteira ocidental com a África do Sul. Entra para Moçambique através de uma garganta cortada na cordilheira dos Pequenos Libombos, no distrito da Namaacha (Muchangos, 1999).

O rio Umbelúzi flui na direção Este e desemboca no Oceano Índico através do estuário do Espírito Santo, no Sul de Maputo, onde também tem a sua foz, os rios Matola e Tembe.

Segundo Droogers (2014), a bacia hidrográfica total do rio Umbelúzi é de cerca de 5400 km^2 ,. Sendo que cerca de 42% da área está em Moçambique, isso corresponde a cerca de 2240 km^2 , 56% no reino de Essuatíni e apenas 2% na África do Sul. A bacia do rio Umbelúzi tem dois grandes afluentes, o Umbelúzi Branco na Suazilândia e o Movene em Moçambique, que se juntam ao rio principal.

Os principais afluentes do rio Umbelúzi em Moçambique são os rios Calichane e Movene, respectivamente a montante e a jusante da barragem dos Pequenos Libombos. O rio Umbelúzi tem um escoamento médio de cerca de 490x106 m^3 na foz e de 360x106 m^3 com um regime permanente. A precipitação média anual é de 736 mm. O rio tem duas obras hidráulicas de vulto, nomeadamente a barragem de Mnjoli na Suazilândia e a barragem dos Pequenos Libombos em Moçambique (Droogers, 2014).

2.1.2 Precipitação

O distrito de Boane apresenta uma pluviosidade média anual em torno de 752 mm, variando entre os valores médios de 563.6 mm para o período húmido e os 43.6 mm no período seco. O período húmido estende-se de Novembro a Março e o período seco de Abril a Outubro. A humidade relativa média é de 80.5%, variando de um valor máximo 86% em Julho a um valor mínimo de 73.5% em Novembro (MAE, 2005).

2.1.3 Vegetação

A localização de Moçambique na região florística Sudano-Zambeziaca, condiciona, em conjugação com as condições climáticas o desenvolvimento de infinitas variedades de associações vegetais hidrófilas, mesófilas e xerófilas de floresta e de savana arbóreas e arbustivas (Muchangos, 1999).

A bacia de Umbelúzi, está integrada no designado Mosaico Regional de Tongaland-Pondoland segundo a classificação florística de White e do Centro de Endemismo de Maputaland segundo (Van Wyk e Smith 1996, citado por Diniz et al, 2012). É na generalidade um território de terras baixas atingindo apenas as maiores altitudes nos Montes Libombos cobertos por formações herbáceas e arbustivas e com manchas de floresta aberta indiferenciada nas regiões mais elevadas. O tipo de vegetação é variável e difícil de caracterizar, com manchas florestais relíquias, savanas secundárias, matagais e balcedos. O estrato superior é em regra semi-caducifólio constituído por espécies de diferentes divisões corológicas (Diniz et al., 2012).

2.1.4 Geologia e Geomorfologia

A geologia de Moçambique é caracterizada por rochas cristalinas do complexo de base do pré-cambriano, supergrupo Karoo (rochas ígneas vulcânicas do jurássico) grupo sedimentar post karoo e aluviões (Muchangos, 1999). Na região sul do país onde se localiza a Bacia de Umbelúzi, caracteriza-se por rochas sedimentares do período quarternário e aluvião (DNGRH, 2018).

A formação do karoo é constituída por sedimentos de origem continental e ígneos que se depositaram em bacias controladas por falhas (Macia, 2009). Esta estrutura de Karoo, estende-se ao longo de toda a cadeia dos libombos, a partir da região de Kwanzulu Natal até ao Vale de Limpopo, com uma estreita faixa de 25 km de rochas vulcânicas, com cerca de 450 km de extensão (Macia, 2009). De acordo com a mesma fonte, a escarpa dos Libombos é formada por riólitos, andesitos, e agrupamento basáltico. Ao longo dos afluentes dos rios, apresenta formações do cretáceo, compostos maioritariamente por rochas sedimentares acumulados por cima de lavas do karoo.

2.1.5 Uso da terra

O uso intensivo da terra e a sobre-exploração das florestas naturais tem vindo a causar grande degradação do solo e desflorestação ao longo do país. O uso da terra é considerado como qualquer tipo de intervenção humana, permanente ou cíclica num pedaço de terra (Beernaert, 1991). O padrão do uso da terra é aquele que indica a aptidão e o potencial para certos usos, e resume-se na ocupação de terras para prática agrícola, exploração florestal, uso para a pastagem e caça (Macia, 2009). Examinando todos os usos da terra de forma integrada permite reduzir os conflitos ao mínimo, fazer as alternâncias mais eficientes e integrar o desenvolvimento social e económico à protecção e melhoria do meio ambiente, contribuindo assim para atingir os objectivos do desenvolvimento humano e ambiental sustentável (ONU, 1992).

Em Moçambique, a terra é administrada pelo Estado e todo o tipo de uso é regulado pela Lei de Terras (1997) e o Regulamento da Lei de Terras (1998). O Estado concessionou vários hectares de terra para diferentes usos ao longo do Baixo Umbelúzi. Esta região, apresenta um potencial muito rico para a prática de agricultura e oferece condições óptimas para o fomento pecuário. Várias empresas do ramo agropecuário produzem uma gama variada de produtos agrícolas com destaque para a cultura de banana e citrinos.

O cultivo de milho, batata-doce e hortícolas é realizada pelos pequenos produtores, alguns organizados em associações de camponeses, por outro lado existe muita produção do sector familiar para a subsistência. Com o aumento da população que caracteriza a província de Maputo, na bacia de Umbelúzi observa-se também muita proliferação de construções habitacionais nas planícies de inundação, abertura de vias de acesso, e instalação de empresas do ramo mineiro de extração de pedras (riólitos) para construção. Todos estes usos de terra, concorrem de certa forma para a degradação dos recursos hídricos, colocando assim, em risco o ecossistema aquático e as comunidades que deles dependem.

3.1 Qualidade da Água

A água é um recurso natural indispensável ao desenvolvimento dos seres vivos na terra, isto é, a qualidade de vida dos seres vivos depende da água bem como da sua qualidade. Conceitualmente, a qualidade da água refere-se às características de uma fonte de água que influencia em adequadas condições para um uso específico, ou seja, a boa qualidade depende das necessidades do utente (Ayers e Westcot, 1985).

A qualidade da água está intimamente ligada às suas características físicas, químicas e biológicas e sua condição é função dos diferentes usos à que se destina. Logo a qualidade da água não está, estritamente, relacionada a seu grau de pureza, as características podem ser influenciadas por diversos factores, como a geologia, cobertura vegetal, clima, topografia e, também, ao uso do solo (Name et al., 2021).

O crescimento populacional, a urbanização, a migração e industrialização, juntamente com o aumento da produção e do consumo, têm gerado crescentes demandas sobre os recursos hídricos (Name et al., 2021).

Segundo Pádua et al., (2009), durante séculos a qualidade da água era definida por seus aspectos estéticos (cor, sabor, cheiro). Considerava-se água pura a limpa, de bom sabor e sem odor. Mais tarde, reconheceu-se que apenas esta avaliação não era suficiente para definir qualidade da água, pois uma água limpa não quer dizer descontaminada.

Hoje, sabe-se que a qualidade da água é resultante de fenómenos naturais e da acção antrópica. O escoamento superficial e infiltração no solo, modifica suas características, incorporando impurezas na sua composição.

Sperling (2005), argumenta que as actividades antropogénicas, originárias principalmente de cargas pontuais domésticas e industriais e de cargas difusas de origem urbana e rural, também determinam as substâncias presentes na água.

Segundo Miranda et al., (2015), verificam-se diversos usos dos recursos hídricos que são demandados pelas diferentes actividades antrópicas e económicas, dentre elas podem-se citar o abastecimento público, a irrigação, a navegação, a pesca, a geração de energia, entre outros. As modificações que

ocorrem nas características morfológicas da bacia hidrográfica, e que de alguma forma alteram o equilíbrio e a dinâmica dos corpos de água, estão associadas à poluição existente no território.

Os efeitos das actividades humanas na qualidade da água são generalizadas e variadas no grau em que perturbam o ecossistema e ou restringem o uso da água. A poluição da água pelas fezes humanas por exemplo, é atribuída apenas a uma fonte, mas as razões para este tipo de poluição, seus impactos na qualidade da água e as medidas correctivas ou preventivas necessárias são variadas (WHO, 2017). Doenças de veiculação hídrica, continuam tendo um peso significativo para a saúde pública entre os grupos vulneráveis e desfavorecidos em todo o mundo, especialmente nos países em vias de desenvolvimento como Moçambique, onde mulheres e crianças são as principais vítimas (DNGRH, 2018).

No estudo dos indicadores de estado de saúde em Moçambique realizado pelo INE (2017), indica que maior parte das doenças como diarreias, malnutrição, malária e doenças tropicais negligenciadas é atribuído à indisponibilidade de água potável, saneamento inadequado ou higiene insuficiente.

E de acordo com a MISAU (2014) estas, poderiam ser prevenidas através da melhoria da disponibilidade de água potável, saneamento, higiene e gestão dos recursos hídricos. Outro factor a ter em conta, são as alterações climáticas, que actualmente, são consideradas uma das mais sérias ameaças ambientais a nível global, com forte impacto nos ecossistemas, na saúde humana e nas actividades económicas. Os modelos climáticos actuais projectam um aumento em frequência e intensidade de eventos climáticos extremos como cheias severas, secas e ondas de calor (Maúre et al, 2018).

Por esta razão, fixar os parâmetros de qualidade da água destinada ao consumo humano e as modalidades de realização do seu controlo, é muito essencial para 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 à disponibilização ao consumidor (MISAU, 2004).

Para a caracterização da água são utilizados diversos parâmetros e índices de qualidade de água, que representam seu estado frente às suas características físicas, químicas e biológicas. Os valores destes parâmetros são indicadores da qualidade da água e o grau de poluição é determinado de acordo com padrões ou níveis máximos permitidos para cada parâmetro estabelecidos por legislação (Santos, 2008).

Por meio do monitoramento, faz-se possível subsidiar medidas de controle, de recuperação, de preservação e de conservação do meio ambiente aquático. A importância do monitoramento é crucial para avaliação da vida útil dos ecossistemas aquáticos, em especial daqueles que são usados para o fornecimento de água potável para centros urbanos (Esteves, 2011).

3.2 Parâmetros Físicos-químicos e Microbiológicos

A qualidade da água depende das características do ambiente (natural e antrópico) em que se origina, circula e é armazenada. A avaliação da qualidade da água é feita a partir de medidas realizadas em amostras coletadas nos diferentes corpos de água (Batrick, 2005). Essas medidas permitem quantificar as propriedades físicas, químicas e biológicas do corpo de água num determinado instante e num determinado local. Como a qualidade de água varia ao longo do tempo e do espaço existem diferentes tipos de medidas ou indicadores de qualidade de água em função da sua utilização (consumo humano, irrigação, recreação, produção de energia, entre outros) (Evelyn Moraes, 2010).

As características físicas referem-se aos sólidos como, cor, odor, turbidez e temperatura. As características químicas referem-se às substâncias dissolvidas que podem causar alterações nos parâmetros pH, nitrogênio, fósforo, oxigênio dissolvido, matéria orgânica e inorgânica. E finalmente, as características biológicas tratam dos organismos presentes na coluna de água, sendo analisados pela microbióloga (Glória et al., 2017).

A monitoria da saúde dos rios usando parâmetros físico-química da água é a abordagem tradicional para controlar a poluição e gerir a qualidade da água. Este processo serve como ferramenta de medir e analisar as concentrações de poluentes, determinar o seu destino e transporte, bem como a sua persistência no ambiente aquático (Odume, 2014).

3.2.1 Parâmetros físicos-químicos

- **Turbidez**

A turbidez é uma medida fotométrica, em que se analisa a matéria em suspensão e sua capacidade de interferir no fluxo de energia luminosa, ou seja, a turbidez representa o grau de interferência à passagem da luz na água, ocasionando uma aparência turva (Sincero, 2003).

De acordo com Branco et al., (1991) a redução da turbidez na água ocorre pela presença de sólidos em suspensão, como as partículas de solo (areia, poeira e argila) e matéria orgânica (plâncton, bactérias, algas). Enquanto Barcellos et al., (2006) descrevem que alguns minerais presentes nos solos, como o ferro e manganês, conferem um aumento da coloração e turbidez à água. Além disso, segundo a CETESB (2008), o acréscimo da turbidez nas águas pode ainda ser causado pelo lançamento de efluentes industriais e domésticos e por esgotos, que geram um impacto ainda maior em relação à qualidade do corpo hídrico.

Desse modo, altas concentrações de turbidez podem influenciar nas comunidades aquáticas, pois limita a penetração de raios solares e reduz a reposição do oxigênio, como também afeta diversos usos da água, como o doméstico, industrial e recreacional (CETESB, 2008).

- **Temperatura**

A temperatura é uma variável que exerce influência directa na velocidade das reacções químicas e biológicas que ocorrem no sistema aquático, nos períodos de seca, onde as temperaturas são maiores, a dinâmica dessas transformações tende a ser mais acelerada (Esteves, 2011). Em corpos de água superficiais, a temperatura sofre influência de factores como: clima, latitude, altitude cobertura vegetal, estação do ano, circulação do ar, vazão e profundidade do corpo hídrico (Mutsumura, 2015), outro factor importante é que a temperatura água do rio, aumenta quando a altitude diminui na medida em que o rio vai drenando suas águas no oceano (Johansson e Gustafsson, 2006). E as águas naturais apresentam variações de temperatura sazonais e diurnas, bem como estratificação vertical (Garcia, 2013). A alteração da temperatura da água pode ser causada por fontes naturais (principalmente energia solar) ou antropogénicas (despejos industriais). De ponto de vista ambiental, a temperatura exerce uma influência primordial sobre os organismos vivos aquáticos, em especial nos peixes, por constituir elementos terminais na cadeia trófica em ecossistemas de água doce (Benilde Mendes et al., 2004).

- **Condutividade eléctrica**

A condutividade eléctrica (CE) é a capacidade de água conduzir corrente eléctrica (Piratoba et al.,2017). Essa capacidade depende basicamente da presença de íons, da concentração total, mobilidade, valência, concentrações relativas e medidas de temperatura (Hermes et al., 2014), e representa uma medida indirecta da concentração de poluentes. Por outro lado, Viera (2015), indica que a condutividade também fornece uma boa indicação das modificações na composição de uma água, especialmente na sua concentração mineral, mas não fornece nenhuma indicação das quantidades relativas dos vários componentes. Para a FNS (2014), as águas naturais apresentam teores de condutividade na faixa de 10 a 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, em ambientes poluídos por esgotos domésticos ou industriais os valores podem chegar a 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Esteves (2011) considera que nas regiões tropicais, a condutividade está mais relacionada com as características geoquímicas e com as condições climáticas (estação de seca e de chuva) da região onde se localizam. E esta (CE), muda com a sazonalidade, sendo menor no período chuvoso por causa do aumento da diluição dos íons, não obstante o lançamento de efluentes industriais poderem elevar os valores da condutividade eléctrica independentemente da sazonalidade.

- **Sólidos Totais Dissolvidos(TDS)**

Variedade de fontes, natureza e a dimensão das partículas sólidas em suspensão fornece apenas uma indicação da extensão da poluição em um determinado recurso hídrico (Qureshimatva et al., 2015). Os sólidos Totais Dissolvidos referem-se à matéria suspensa e dissolvida na água, são parâmetros muito

úteis que descrevem os constituintes químicos da água e podem ser considerados como tendo uma relação edáfica que contribuem na produtividade dentro do corpo da água (Qureshimatva et al., 2015).

Os TDS incluem todos os sais e componentes não iônicos e actuam na modificação da salinidade e conseqüentemente na condutividade eléctrica da água, que pode indicar indirectamente a presença de poluição ou desequilíbrio no corpo hídrico (Abreu et al., 2015).

Os processos de intemperismo geram produtos que são encontrados nos corpos da água na forma iônica, que são os principais constituintes dos TDS. Este parâmetro é utilizado no controlo de poluição de corpos de água natural com drenagens e efluentes industriais, para avaliar a eficiência nas estações de tratamentos de águas residuais (Pirotaba et al., 2016). A quantidade de sólidos presentes num corpo de água está relacionada à geologia, uso do solo, precipitação e evaporação e podem diferir entre os rios que compõem a mesma bacia hidrográfica (Garcia, 2013).

- **Potencial Hidrogeniónico (pH)**

O Potencial Hidrogeniónico (pH) é uma variável abiótica importante nos ecossistemas aquáticos de difícil interpretação pela quantidade de factores que o podem afectar (Piratoba et al., 2017). Segundo Kale (2016), o pH é definido como o logaritmo negativo da concentração de íons de hidrogénio ($\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$) de uma solução e é, portanto, uma medida que determina se o líquido é ácido ou alcalino.

A escala do pH (derivada da constante da ionização da água). Este parâmetro varia de 0 (muito ácido) a 14 (muito alcalino) (EPA, 2001). O pH da água é importante para as comunidades bióticas, pois a maioria das espécies de plantas e animais pode sobreviver em uma faixa estreita de pH de uma condição levemente ácida a ligeiramente alcalina (Goher, 2000). O pH da água determina a solubilidade (quantidade que pode ser dissolvido na água) e disponibilidade biológica (quantidade que podem ser utilizados pela vida aquática) de produtos químicos constituintes como nutrientes (fósforo, nitrogénio e carbono) e metais pesados (chumbo, cobre e cádmio) (Kale, 2016).

- **Oxigénio Dissolvido (DO)**

O oxigénio dissolvido (OD) é um dos parâmetros mais significativos usados para determinar a qualidade de um ambiente aquático. O DO descreve a concentração de oxigénio molecular na água e depende da temperatura da água e da demanda biológica do sistema (Cheng et al., 2000). OD é fornecido para a água através de vários métodos como a difusão directa de oxigénio a partir da atmosfera, vento, ondas de ar e fotossíntese. O OD é usado na decomposição aeróbia da matéria orgânica, na respiração do organismo aquático e na oxidação química do mineral. Como o oxigénio dissolvido é usado por muitos organismos na água, tende a mudar de forma rápida (WHO, 2017).

As variações nos teores de OD estão associadas aos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem nos corpos da água. A temperatura é um dos parâmetros que influencia directamente a quantidade de OD na água, quanto mais frio a água for, mais oxigênio pode ser contido no corpo da água (Cheng et al., 2000), uma vez que baixas temperaturas facilitam a dissolução dos gases (Garcia, 2013).

- **Nitratos**

O nitrato é um composto de nitrogénio que ocorre naturalmente em concentrações moderadas, em muitos ambientes naturais (Khumar, 2010). Os nitratos (NO_3^-) geralmente ocorre em baixos teores nas águas superficiais, mas pode atingir altas concentrações em águas subterrâneas (Freitas et al., 2001).

O nitrato pode alcançar águas superficiais e subterrâneas em consequência da actividade agrícola (incluindo aplicação excessiva de fertilizantes e adubos nitrogenados inorgânicos), das águas residuais eliminação e da oxidação de resíduos nitrogenados em produtos humanos e da excreta animal, incluindo os tanques sépticos (Kale, 2016).

A concentrações de nitrato de água superficial pode mudar rapidamente devido ao escoamento superficial do fertilizante, captação por fitoplâncton e desnitrificação por bactérias. Níveis naturais de nitrato em águas superficiais normalmente não excedem 50 mg/L. Níveis elevados de concentração de nitrato condicionam a proliferação de algas na superfície das águas e pode causar problemas de saúde humana (Kumar, 2012).

- **Nitritos**

O nitrito (NO_2^-) é uma forma química do nitrogênio normalmente encontrada em pequenas quantidades nas águas superficiais e subterrâneas (Bastos, 2007, Kindlein, 2010, Fonseca, 2017). Os nitritos (são produto da oxidação da amónia (NH_3^-) ou da redução dos nitratos. Na água, em condições de oxidação normais, a conversão dos nitritos em nitratos é quase imediata. Qualquer acumulação de nitritos reflecte a existência de processos inibitórios da formação dos nitratos. A suas concentrações é, em regra, relativamente reduzida raramente excedendo, nas águas superficiais valores de 1mg/L (Metcafil e Eddy, 1998). Devido a sua instabilidade na presença do oxigênio, o nitrito ocorre como uma forma intermediária (WHO, 1997). A presença do íon nitrito indica a ocorrência de processos biológicos activos influenciados por poluição orgânica (Bastos, 2007), resultado da decomposição biológica devido à acção de microrganismos sobre nitrogénio amoniacal (Garcia, 2013). Valores de nitritos acima de 1 mg/L são totalmente tóxicos, podem representar um impedimento para o desenvolvimento da vida aquática (Fonseca, 2017).

- **Fósforo Total**

O fósforo é um elemento químico que serve de indicador antes de sua descarga para os vários recursos hídricos, podendo se apresentado na forma de orto fosfatos (PO_4^{3-} - HPO_4^{2-} - H_2PO_4^-) polis fosfatos e fosfatos orgânicos e inorgânicos (Fernandes, 2015). O fósforo na forma elementar é um elemento extremamente tóxico e sujeito a bioacumulação. Formas orto são produzidas pelos processos naturais encontrados em sedimentos, águas naturais e esgoto (Vanessa, 2012). Formas polis fosfatos são usadas para tratamento de águas em caldeiras e em detergentes. os fosfatos orgânicos são de grande importância na natureza, e sua ocorrência resulta muitas vezes de pesticidas orgânicos contendo fosfatos (Ydi, 2000).

O fósforo é o nutriente mais importante para o crescimento de plantas, embora esteja em pouca disponibilidade em rio tropicais (FNS, 2014), como é o caso do rio Umbelúzi. Quando é descarregado em excesso nos cursos de águas, favorece crescimento demográfico e descontrolado de fitoplâncton e algas (boom das algas) levando à eutrofização do meio aquático (Ydi, 2000).

O fósforo constitui, para a maioria das águas, um nutriente limitante na determinação de produtividade biológica, devido as suas ligações com carbono em material orgânico (Vanessa, 2012). Compostos de fósforo solúveis são usualmente presentes em águas naturais como orto fosfato e várias formas de fosfato orgânicos em várias concentrações, entretanto, a maior quantidade de fósforo é absorvido como material particulado em águas ambientais (Halliwell et al., 1996, citado por Santos, 2008).

- **Amoníaco**

O amoníaco é resultante da decomposição da matéria orgânica presente na água; todavia, altos índices são normalmente indicadores de poluição de origem doméstica ou industrial (Loan et al., 2013).

A retirada de cobertura vegetal nativa e lançamento de efluentes domésticos e industriais sem tratamento prévio contribui para a presença de altas concentrações de amónia em águas superficiais e pode contribuir para a eutrofização (proliferação maciça de algas), resultando na diminuição do oxigênio dissolvido na água e na conseqüente devastação da vida aquática (Jeong et al., 2013).

- **Dureza Total**

A dureza total da água não é um componente específico, mas sim, uma mistura variável e complexa de cátions e aniões (Qureshimatva et al., 2015). A dureza é a concentração de cátions multimetálicos em solução. Os cátions frequentemente associados à dureza são cálcio e magnésio (Ca^{2+} , Mg^{2+}), e em menor escala ferro (Fe^{2+}), manganês (Mn^{2+}), estrôncio (Sr^{2+}) e alumínio (Al^{3+}) (Pirotaba et al., 2016). A dureza é influenciada pela geologia da bacia de drenagem e por actividades antrópicas. As

principais fontes de dureza são a dissolução de minerais contendo cálcio e magnésio, exemplificando, as rochas calcárias e os despejos industriais (Sperling, 2007).

Em corpos da água de reduzida dureza, a biota é mais sensível à presença de substâncias tóxicas, já que a toxicidade é inversamente proporcional ao grau de dureza da água (FNS, 2014). Para água de abastecimento para o consumo humano, estabelece o limite de 500 mg/L CaCO₃ (MISAU, 2004).

3.2.2 Parâmetros Microbiológicos

- **Coliformes totais**

Os coliformes totais (CT) compreendem bactérias fecais e não fecais, que podem se originar do solo ou do material vegetal. Na qualidade da água, os CT indicam a presença de peptógenos na água (Gloria et al., 2017). As fontes de bactérias podem ser os intestinos do sistema digestivo para humanos ou animais de sangue quente (Gloria et al., 2017). A possibilidade de contrair infecções a partir de água contaminada depende do número de patógenos na água contaminada (Gloria et al., 2017).

Em águas superficiais, o valor limite recomendável na concentração de TC deve ser inferior a 1000 UFC / 100 ml. Porém, por questões de saúde, recomenda-se que a água para o consumo humano deve estar livre de coliformes como forma de minimizar o risco de contrair doenças de veiculação hídrica (Nkambule, 2016).

O coliforme total na água do rio pode ser usado como um indicador do total de bactérias ou organismos patogênicos que podem ser encontrados na água. A alta contagem total de coliformes na água do rio deve-se ao escoamento da captação, descarga de esgoto e falta de saneamento (Nkambule, 2016).

- ***Escherichia coli***

A *Escherichia coli* - bactéria do grupo coliforme que fermenta a lactose e manitol, com produção de ácido e gás a $44,5 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ em 24 horas, produz indol a partir do triptofano, oxidase negativa, não hidrolisa a ureia e apresenta actividade das enzimas β galactosidase e β glucoronidase, sendo considerado o mais específico indicador de contaminação fecal recente e de eventual presença de organismos patogênicos (FDS, 2014). A bactéria *E.coli*, serve como um excelente indicador de poluição fecal na água, pois pode viver mais tempo do que outras bactérias ou organismos causadores de doenças (Gloria et al., 2017). No entanto, sua existência não justifica essencialmente a existência ou presença de organismos causadores de doenças de veiculação hídrica, mas como indicador de um possível risco à saúde (Gloria et al., 2017).

As estações de tratamento águas residuais defeituosas, fossas sépticas, vazamento de tubos de esgoto, defecação a céu aberto e escoamento de águas pluviais são consideradas as maiores fontes de *E. coli* na

água do rio (Nkambule, 2016). A análise da água para *E. coli* é importante para avaliar a poluição microbiana na água.

significa que a água não é própria para o consumo humano sem tratamento, podendo causar doenças de veiculação hídrica, como diarreia, cólera, entre outras doenças. A WHO (2017), recomenda que a *E. coli*, deve estar ausente na água para o consumo humano.

3.3 Espectro Electromagnético

Segundo Kiefer e Chipman (2015), o espectro electromagnético é o intervalo completo de comprimentos de onda da radiação electromagnética, que se estende desde as ondas de rádio, de maior comprimento de onda, até os raios gama, de menor comprimento de onda, sendo as faixas específicas dentro desse espectro utilizadas para captar informações sobre as características da superfície terrestre.

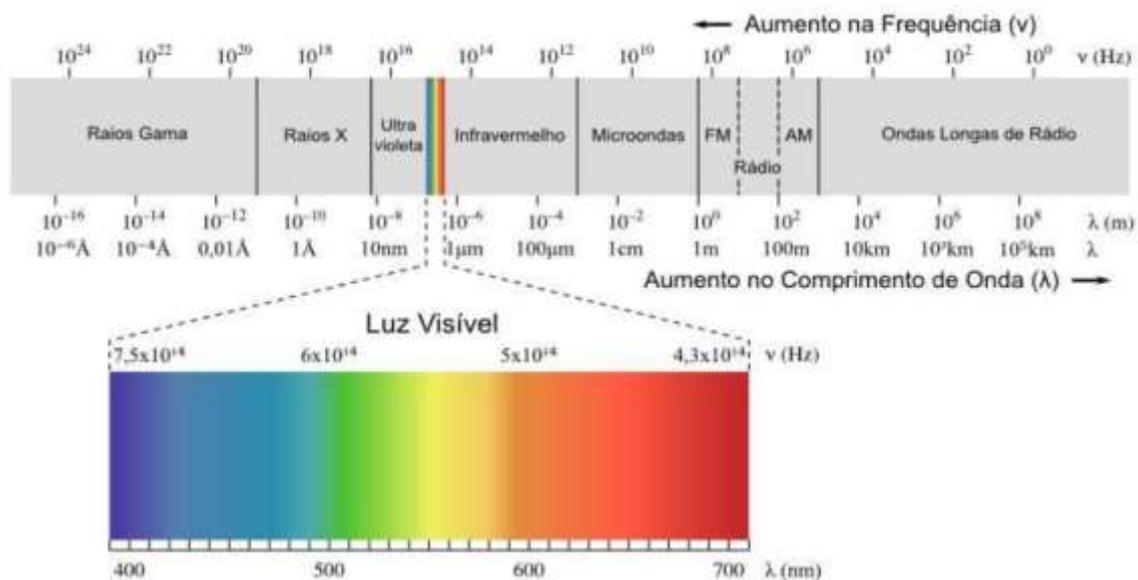


Figura 2: Espectro das ondas eletromagnéticas segundo seu comprimento de onda (Madeira, 2010)

A luz visível é apenas uma das muitas formas de radiação electromagnética existentes e as ondas de rádio, o calor, os raios ultravioletas e os raio-X são outras formas bastante comuns. Em Detecção Remota, é comum caracterizar as ondas electromagnéticas pelo seu comprimento de onda, em micrómetros (μm , 10^{-6} m) ou em nanómetros (nm, 10^{-9} m), consoante a posição que ocupam no espectro electromagnético, ficando desta forma definidas as diferentes regiões do mesmo. Embora por convenção lhes sejam associadas determinadas denominações (ultravioleta, visível, infravermelho, micro-ondas), não existem divisões exactas entre umas e outras. Os sensores para Detecção Remota existentes a bordo de satélites são capazes de detectar e registar radiações das regiões não visíveis do espectro electromagnético, desde o ultravioleta às micro-ondas (Arbelo, 2012).

3.4 Detecção Remota

A radiação emitida pelo sol, em diversos comprimentos de onda, interage com a superfície da terra. As análises da Detecção Remota consistem na captação da radiação reflectida ou emitida pelos alvos na superfície terrestre por um sensor em órbita. Essa radiação é traduzida posteriormente em informação que pode ser utilizada na análise e identificação de diferentes alvos na superfície terrestre de acordo com os comprimentos de onda (Moraes, 2002).

Diferentes sensores possuem propriedades diferentes em relação as características de suas resoluções. Três tipos de resoluções são importantes para a decisão de qual sensor utilizar para aquisição de imagens: resolução espacial, resolução espectral e resolução temporal.

A resolução espacial diz respeito ao quanto um pixel da imagem representa uma área em metros da superfície terrestre. A resolução espectral especifica quais comprimentos de onda do espectro electromagnético captados pelo sensor. A resolução temporal é o tempo que um satélite-sensor leva para passar sobre a mesma área na superfície terrestre (Moraes, 2002).

Devido a água pura possuir um comportamento espectral de alta absorção da radiação electromagnética, estudos envolvendo recursos hídricos utilizam as propriedades opticamente activas presentes na água para identificar e determinar alterações. São propriedades opticamente activas aquelas que alteram as propriedades de reflexão natural da água (Toniolo, 2016).

3.4.1 Componentes da Detecção Remota

Segundo Arbelo (2012), a aquisição de informação é feita através do registo da energia reflectida ou emitida (sob a forma de radiação electromagnética) pelo objecto a detectar. Os dados brutos assim obtidos são depois processados e analisados para extrair informação de interesse sobre o objecto a detectar. Isto é exemplificado pelos sistemas de aquisição de imagens, onde estão envolvidos os seguintes elementos:

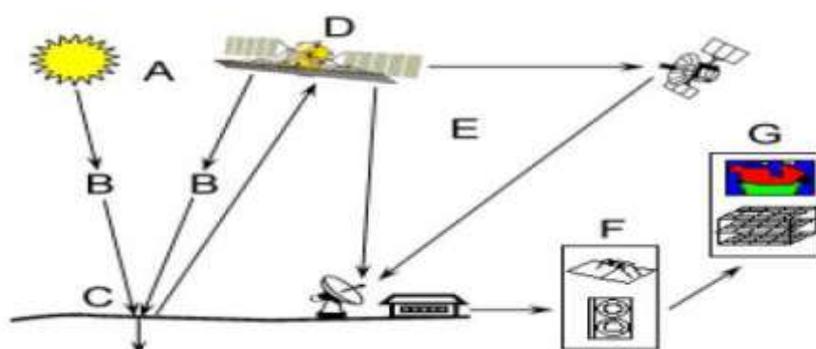


Figura 3: Sistemas de aquisição de imagens (Fernandes, 2018)

3.4.2 Comportamento Espectral da Água

Na figura, observa-se que no infravermelho próximo e o infravermelho médio são os melhores comprimentos de onda para discriminar corpos de água, visto que, nessas regiões do espectro electromagnético os corpos de água aparecem muito escuros, até pretos, devido a absorção praticamente total do fluxo radiante incidente, principalmente se a água for limpa e profunda, ou seja, sem a presença de sólidos dissolvidos ou até mesmo matéria orgânica (Florenzano, 2007).

Uma área inundada por um rio ou bacia é facilmente identificada em imagens de satélites com sensores na banda do infravermelho próximo (entre 0.76 e 0.90 micrômetros), em que os corpos de água absorvem a maior parte da radiação.

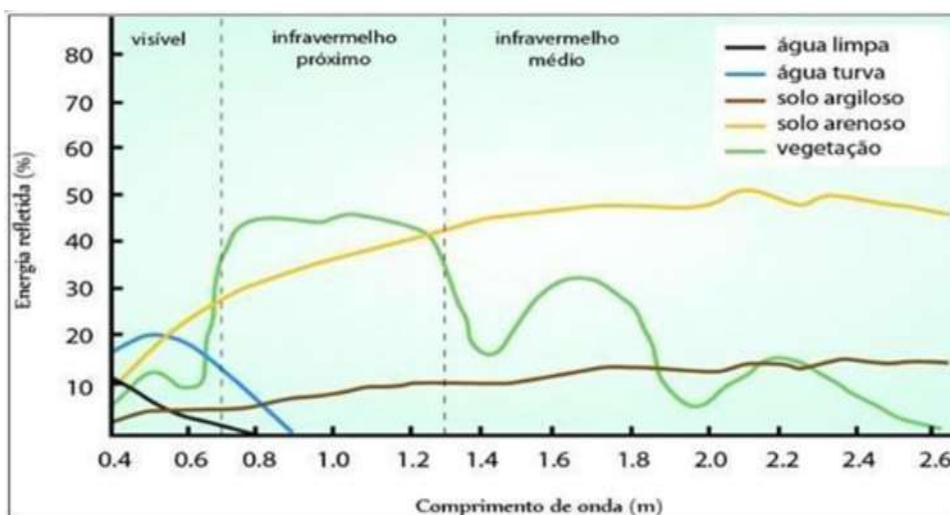


Figura 4: Comportamento espectral da água (Florenzano, 2007)

3.4.3 Detecção Remota e a Gestão dos Recursos Hídricos

Atualmente existem dados disponibilizados gratuitamente em várias resoluções espaciais, radiométricas, temporais e espectrais possibilitando assim, que diversas metodologias sejam capazes de compreender e monitorar o meio ambiente.

A Detecção Remota de recursos hídricos possui variações de acordo como as formas naturais que a água pode assumir (Novo et al., 2019). Diferentes técnicas devem ser implementadas para o estudo de rios, lagos e bacias. Cada recurso hídrico tem sua dinâmica própria, e apresenta variações no tempo de subsidência da água, nas variações do nível de turbidez, e nos tamanhos e profundidades que alteram a resposta obtida pelo sensor (kumar et al., 2013).

3.5 Constelação Sentinel

A Agência Espacial Europeia (ESA) colocou em órbita a constelação Sentinel, dando início a uma série de possibilidades. Com isso, a disponibilidade do *Sensor Multispectral Imager* (MSI), abriu novas e

inúmeras possibilidades para a utilização de dados orbitais. O primeiro da série Sentinel foi posto em órbita em 2014, com o nome de Sentinel 1A, com um desempenho significativo que continua até hoje. Desde a série landsat em 1984, experiências em processamento de imagens satélites e, especialmente para interpretação das informações multiespectrais sobre aspectos agrícolas, florestais, oceanográficos e geológicos, e em 2014 a série Sentinel trouxe consigo melhor resolução espacial e imagens já pré-processadas (Eraso, 2016). As órbitas dos satélites Sentinel 1A e 1B foram estabelecidas de modo a passarem sobre uma mesma região a cada 12 dias. O *sensor Synthetic Aperture Satellite* (SAR) dos satélites Sentinel 1A e 1B registraram imagens até hoje (ESA, 2020).

O Sentinel 2A lançado em junho de 2015 faz parte da segunda geração dos sistemas passivos de alta resolução, continuada a série pelo Sentinel 2B em 2017. O Sentinel 2B foi lançado em março de 2017, também com os sensores SAR e MSI, o sensor MSI foi desenhado para operar no modo “*Push-broom*” e ter alta resolução espacial (10m) com 13 bandas espectrais (variando de 442nm até 2.202nm).

O conjunto de satélite Sentinel 2 (constelação 2A e 2B), encontram-se a uma altura de 705 km e velocidade equivalente a 7,7 km/s no solo e tem como objectivo monitorar a variabilidade nas condições da superfície da terra, e sua ampla largura de faixa (290 km). Desloca-se do Norte para o Sul em órbita sincronizada com o sol, polar e heliossíncrona, que garante condições semelhantes de iluminação ao longo do ano na área imageada. A mesma área é imageada a cada 5 dias. A inclinação da órbita é 98,62 ° e o Tempo Solar Local Médio (MLST) no nó descendente é 10:30 (am). Este valor de MLST foi escolhido como um compromisso entre um nível adequado de iluminação solar e a minimização de potencial cobertura de nuvens. Cada órbita gasta 100,6 minutos. A tabela 1 apresenta as principais características e bandas do Sentinel 2 (ESA, 2020).

Tabela 1: Caracterização do Satélite Sentinel-2A e 2B utilizadas em análises Bezerra et al. (2019)

Resolução	Número Bandas	Nome Banda	Comprimento Onda central (nm)
10 m	B2	Blue (Azul)	490
	B3	Green (Verde)	560
	B4	Red (Vermelho)	665
	B8	NIR (Infravermelho Próximo)	842
20m	B5	Red Edge 1	705
	B6	Red Edge 2	740

	B7	Red Edge 3	783
	B8a	Red Edge 4	865
	B11	SWIR 1	1610
	B12	SWIR 2	2190
60m	B1	Aerossol	443
	B9	Water Vapor	940
	B10	Cirrus	1375

3.6 Sistemas de Informação Geográficas

Os SIG's são ferramentas computacionais que permitem realizar análises complexas ao integrar dados georreferenciados (Câmara et al., 2005). Com base no tratamento e na análise de um banco de dados geográficos, são produzidas informações geográficas. Em ambiente SIG, os dados são estruturados em planos de informação, que são referenciadas a um sistema de coordenadas terrestres. Para que ocorra a correcta sobreposição entre os planos de informações, é necessário que possuem projeção cartográfica, sistema de coordenadas e que tenha sido gerada em escalas próximas.

O SIG apresenta várias funcionalidades que são necessárias para o trabalho com variáveis e elementos espacialmente localizados, com capacidades variadas que permitem acções como:

- Leitura, edição, armazenamento e, em termos gerais, a gestão de dados espaciais;
- A análise dos dados, isto pode ser através de consultas simples ou de elaboração de modelos complexos e deve permitir a consulta de um dado específico, bem como a totalidade do componente temático;
- Geração de resultados como mapas, gráficos, índices.

3.6.1 Áreas de aplicação dos Sistemas de Informação Geográfica

Segundo Oliveira (1997), os Sistemas de Informações Geográficas podem ser utilizados em muitas aplicações: planeamento e gestão urbana e regional, meio ambiente, infra-estrutura, agricultura, segurança, transportes, educação e marketing. Na mesma linha, o autor apresenta uma relação das diversas áreas de aplicação do SIG, divididas em cinco grupos principais:

- **Uso da Terra** – planeamento agro-pecuário, armazenamento e escoamento da produção agrícola, classificação de solos, gestão de bacias hidrográficas, planeamento de barragens, cadastro de propriedade rurais, levantamento topográfico e mapeamento do uso da terra.

- **Ocupação Humana** – redes de infra-estruturas, planeamento e supervisão de limpeza urbana, cadastro territorial urbano, mapeamento eleitoral, rede hospital, rede de ensino, controle epidemiológico, rota de veículos, planeamento urbano, sistema de informações turísticas, controle de tráfego aéreo, sistemas de cartografia náutica e serviços de atendimento de emergência.
- **Uso de Recursos Naturais** – controle da exploração vegetal e mineral, classificação de poços petrolíferos, planeamento de gasodutos e oleodutos, distribuição de energia elétrica, identificação de mananciais, gestão costeira e marítima.
- **Meio Ambiente** – controle de queimadas, estudos de modificações climáticas, gestão florestal, acompanhamento de emissão e acção de poluentes.
- **Actividades Económicas** – planeamento de marketing, pesquisa socioeconómica, distribuição de produtos e serviços bem como transporte de matérias-primas.

3.7 *Google Earth Engine (GEE)*

O *Google Earth Engine* (GEE) é uma plataforma de computação em nuvem desenvolvida pelo Google para processar grandes quantidades de dados geoespaciais. Lançado em 2010, o GEE é amplamente utilizado para monitoramento ambiental, pesquisa científica e tomada de decisão baseada em dados espaciais.

A capacidade do GEE de processar grandes volumes de dados geoespaciais com rapidez e precisão revolucionou o monitoramento ambiental. Ele permite a geração de informações detalhadas sobre a dinâmica de ecossistemas, oferecendo suporte essencial à gestão de recursos hídricos, ao planejamento territorial e à análise de impactos climáticos. Segundo Gorelick et al., (2017), o GEE transforma a análise de grandes conjuntos de dados geoespaciais ao permitir o processamento em escala global com um ambiente de programação acessível.

No contexto do monitoramento da qualidade da água, especialmente no estudo do rio Umbelúzi, o GEE se mostra uma ferramenta fundamental. A integração de dados de Detecção Remota com os dados de campo permite a geração de produtos como mapas de turbidez e TDS que ajudam a compreender as dinâmicas hidrológicas em épocas chuvosas e secas. Essa abordagem não apenas a qualidade de água amplia a precisão da análise, mas também viabiliza o monitoramento contínuo e de baixo custo.

A plataforma GEE oferece diversas coleções de imagens de satélite, incluindo sensores como Landsat, Sentinel e MODIS. Para uma seleção adequada, são considerados critérios como:

- **Intervalo Temporal:** Definição do período de interesse para capturar variações sazonais ou mudanças ambientais (Robello et al., 2020);
- **Cobertura de Nuvens:** Uso de filtros que removem imagens com alta interferência atmosférica (Roy et al., 2016);
- **Resolução Espacial:** Escolha da melhor resolução dependendo da aplicação, como monitoramento hídrico ou mapeamento do uso do solo (Xu et al., 2021);
- **Índices Espectrais:** Seleção de imagens que permitem a extração de índices para estudos ambientais (Dube et al., 2021).

3.7.1 Impactos do Uso de GEE e DR no Estudo da Qualidade de Água

O uso do *Google Earth Engine* (GEE) para monitoramento da qualidade da água traz diversos impactos positivos e negativos.

- **Impactos Positivos:**

Acesso a grandes volumes de dados: O GEE e DR permitem trabalhar com séries temporais de imagens de satélite (como Landsat, Sentinel-2 e MODIS) sem a necessidade de armazenamento local ou processamento pesado.

Automatização e reprodutibilidade: Os scripts no GEE podem automatizar o pré-processamento, cálculo de índices e geração de produtos finais, facilitando a repetição do processo em diferentes períodos ou regiões.

Monitoramento em larga escala: Você pode avaliar a qualidade da água em grandes áreas, isso complementa os dados do Rio Umbelúzi, por exemplo, criando uma visão mais abrangente.

Baixo custo: O GEE e DR são gratuitos para uso acadêmico e oferecem poder computacional robusto, evitando a necessidade de investimentos em hardware ou licenças de software SIG.

- **Impactos negativos**

Resolução Espacial Limitada: Muitos sensores disponíveis (como Landsat ou Sentinel-2) têm resolução de 10 a 30 metros, o que pode dificultar o monitoramento em rios estreitos, canais secundários ou pontos de colecta muito pequenos.

Influência de Cobertura de Nuvens: A presença de nuvens e sombras em imagens ópticas afecta a qualidade da análise da água, principalmente em áreas tropicais e em épocas chuvosas. Mesmo com técnicas de correção, a precisão pode ser reduzida.

Limitações temporais dos dados: Algumas séries de dados têm intervalos temporais longos entre imagens livres de nuvens, o que prejudica o monitoramento contínuo e detalhado em tempo real da qualidade da água.

Resolução espacial e espectral: As imagens de satélite nem sempre oferecem a resolução adequada para corpos de água estreitos ou turvos.

Validação com dados de campo: A acurácia dos produtos gerados depende muito da qualidade e representatividade dos dados de campo.

4.1 Material

Para a realização deste estudo, foram integrados dados geoespaciais, imagens de satélite e informações obtidas em campo, a fim de analisar os parâmetros de turbidez e sólidos totais dissolvidos (TDS) no rio Umbelúzi. Os dados utilizados abrangem produtos vectoriais, matriciais e tabulares, organizados conforme o formato, o modelo de dados e a fonte de origem.

Tabela 2: Descrição dos dados usados

Dados	Formato	Modelo de Dados	Fonte
Divisão Administrativa	Shapefile	Vectorial	CENACARTA
Dados de Campo	-----	Tabular	Machava, (2020)
Turbidez	GeoTiff	Matricial	ESA
Sólidos Totais Dissolvidos			

Para o desenvolvimento do presente trabalho, foram utilizados diversos softwares e plataformas computacionais, cada um com uma finalidade específica relacionada à análise, processamento de dados, elaboração de mapas e organização dos resultados. A tabela abaixo apresenta os principais programas e suas respectivas versões, bem como as funções desempenhadas por cada um ao longo da pesquisa.

Tabela 3: Descrição dos softwares e plataformas computacionais utilizados

Programas e sua Versão	Função
Word 2019	Redação do trabalho
Excel 2019	Criação de tabelas, organização de dados e cálculos estatísticos
Draw.io 13.9.9	Elaboração de fluxogramas e esquemas metodológicos
Jamovi 2.6.44	Geração da matriz de correlação e testes estatísticos
QGIS 3.18.3 (Bialoweiza)	Elaboração de mapas temáticos e validação espacial dos resultados
Google Earth Engine	Processamento de imagens Sentinel-2 e extração de parâmetros ópticos da água

4.2 Métodos

A metodologia de trabalho é bastante importante porque influencia na qualidade do resultado final. No entanto, o tratamento de dados de entrada influi na confiabilidade da informação que se pretende obter.

4.2.1 Colecta de Dados

Este trabalho utilizou dados de campo publicados por Sérgio Luís Machava, onde realizou o trabalho de pesquisa no ano de 2020 com a perspectiva de avaliar a qualidade da água do rio Umbelúzi para o

consumo humano. Durante a campanha de campo organizada pelo referido pesquisador, a colecta de amostras de água, foi realizada em duas épocas climáticas distintas (chuvosa e seca). Na época chuvosa a colecta ocorreu de Outubro á Dezembro de 2017 e no mês de Outubro de 2018. Na época seca a colecta decorreu de Maio á Setembro de 2018. A colecta foi efectuada ao longo do rio Umbelúzi em quatro pontos previamente identificados.

O primeiro (01) ponto está localizado ao montante da Barragem de Pequenos Libombos dentro das instalações da empresa de Citrinos designado (Block C), o segundo (02) ponto está localizado à jusante da mesma barragem e é designado por (Estação Hidrométrica E-289), o terceiro (03) ponto está localizada na ponte de Mafuiane, e por fim o quarto (04) ponto situa-se na ponte de Boane, na Vila de Boane.

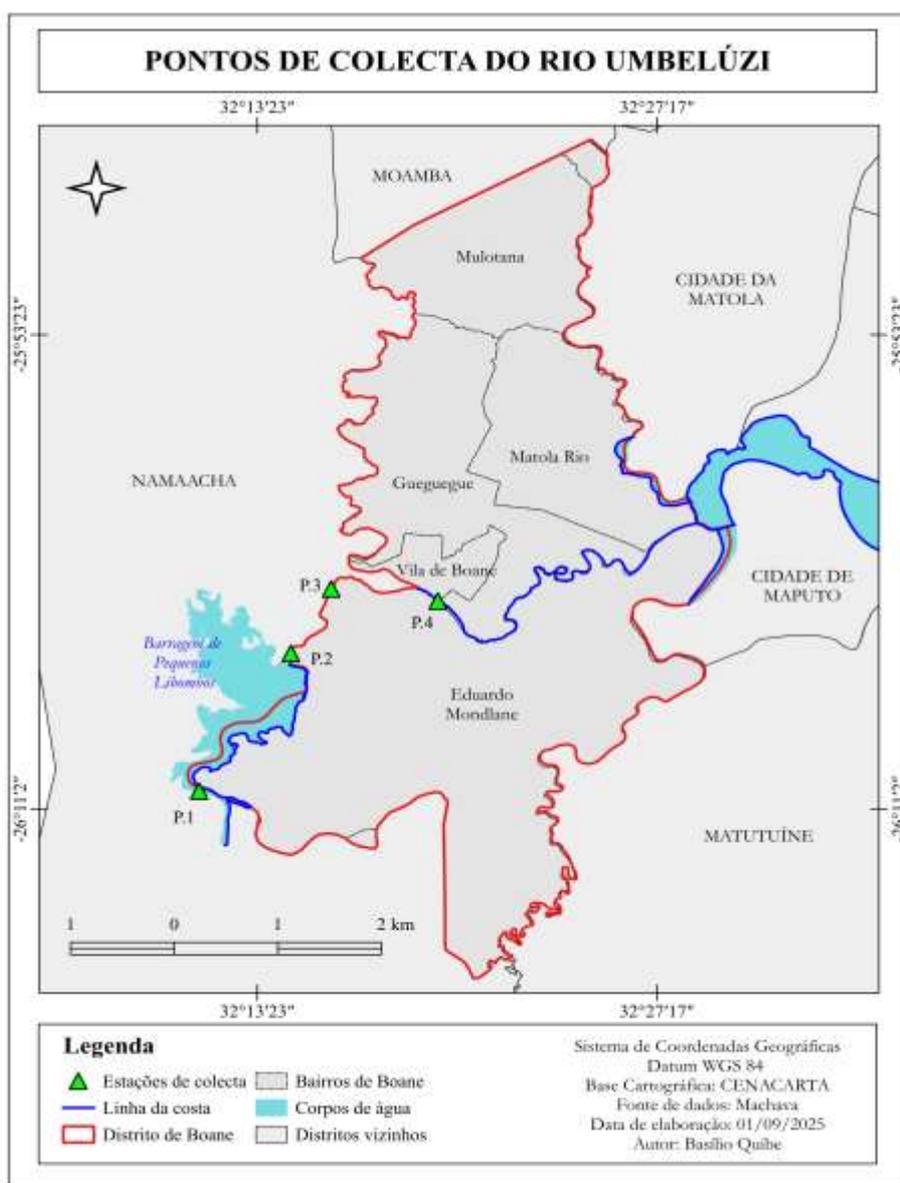


Figura 5: Localização de pontos colecta no rio Umbelúzi no distrito de Boane

Ao todo, na pesquisa de Machava (2020), realizou 14 campanhas de colecta de amostras, constituindo 40 amostras, sendo 20 amostras realizadas na época seca e 20 na época chuvosa. Para a seleção dos pontos de amostragens o pesquisador baseou-se nos aspectos fundamentais como acessibilidade, profundidade e segurança do local para a realização da colecta de amostras de água.

Para a colecta de dados com base na imagem de satélite foram usadas as mesmas datas do pesquisador Machava.

4.3 Fluxograma Metodológico

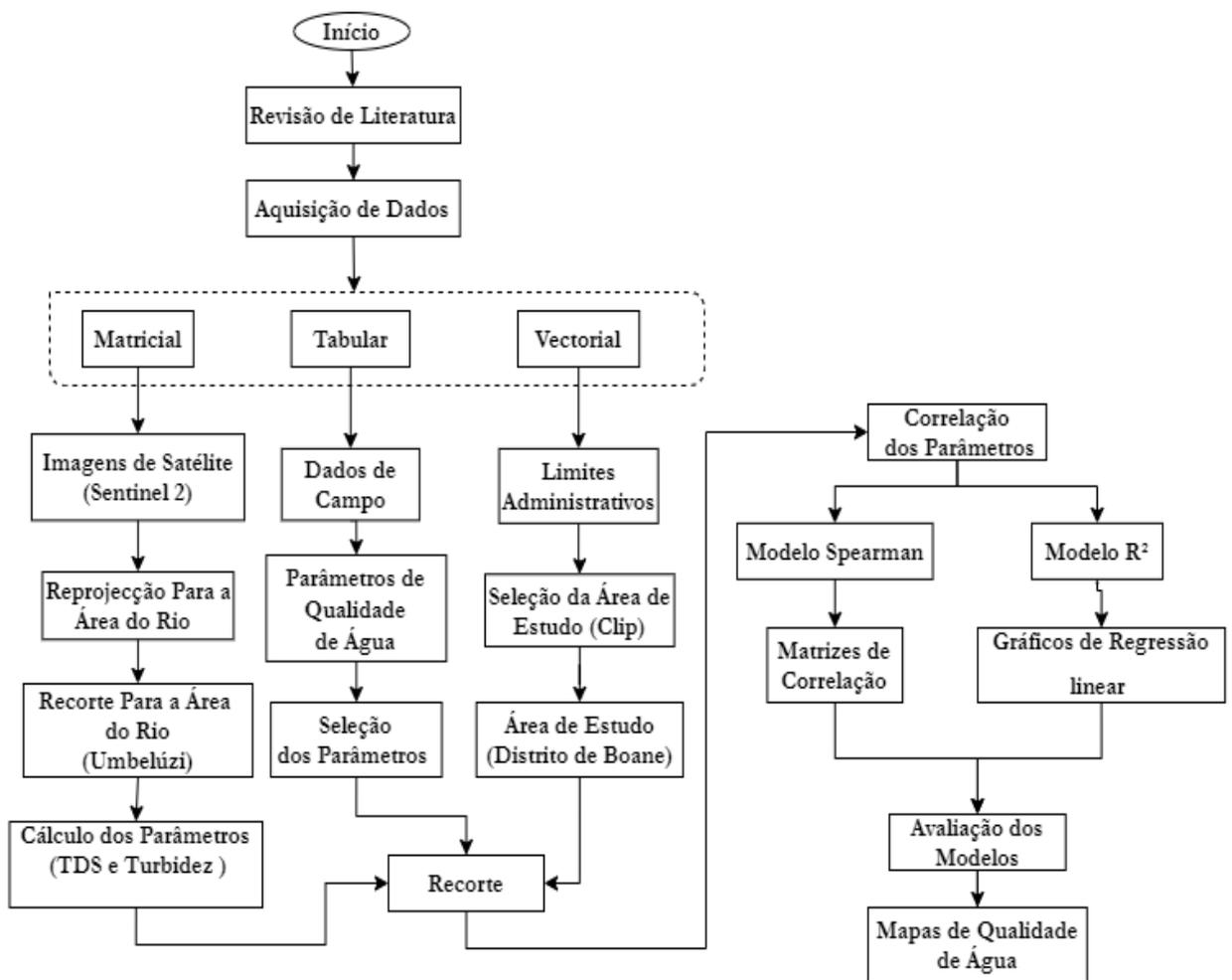


Figura 6: Fluxograma metodológico

4.3.1 Processamento Digital das Imagens

As imagens do satélite Sentinel-2, utilizadas nas análises da presente pesquisa foram adquiridas gratuitamente a partir do *Google Earth Engine* (GEE). No sentido de se buscar uma correlação dos dados colectados em campo por Machava (2020), com os dados de satélite. Foram utilizadas imagens referentes a época seca e chuvosa das datas referidas no trabalho pelo pesquisador.

O processamento digital de imagens consiste na manipulação de imagens digitais, objectivando melhorar o poder de visualização dos alvos, sendo necessária a correção de distorções, degradações e ruídos introduzidos nas imagens durante o processo. As imagens produzidas por sensores remotos apresentam distorções geométricas, possuindo relativa precisão cartográfica quanto ao posicionamento de objectos superficiais e fenómenos apresentados.

Para este presente trabalho o processo de obtenção das imagens e processamento dos parâmetros foi feito através da plataforma (GEE). Esta plataforma digital permite fazer captação, processamento e validação de dados por menos tempo.

4.3.2 Seleção de Imagens de Satélite

A seleção de imagens de satélite é um passo fundamental no processamento e análise de dados geoespaciais. No contexto do (GEE), essa seleção ocorre de forma automatizada e eficiente, permitindo a escolha de imagens com base em critérios como intervalo temporal, cobertura de nuvens, resolução espacial e bandas espectrais disponíveis (Gorellck et al., 2017).

No GEE, a função *filterBounds()* permite restringir as imagens a uma área de interesse específica. A *filterDate()* seleciona um intervalo temporal, enquanto *filterMetadata()* possibilita filtragem por metadados como cobertura de nuvens (Gorellck et al., 2017). Além disso, a composição de imagens por mediana ou percentil reduz a interferência de factores externos, melhorando a qualidade dos dados (Mutanga e Adugna, 2022).

4.3.3 Cálculo da Turbidez

A turbidez da água é um importante indicador da qualidade hídrica, reflectindo a presença de partículas suspensas, sólidos e matéria orgânica dissolvida. A Detecção Remota tem sido amplamente utilizada para estimar a turbidez em corpos de água, e o *Google Earth Engine* (GEE) se destaca como uma plataforma poderosa para essa análise devido ao seu acesso a grandes volumes de dados de satélite e ferramentas avançadas de processamento (Gorellck et al., 2017).

Estudos como o de Gholizadeh et al. (2016), apontam que os sensores ópticos, como o Sentinel-2, apresentam alta sensibilidade à concentração de turbidez. De maneira semelhante, Novo et al., (2013), destacam que a turbidez é um dos parâmetros mais sensíveis a Detecção Remota em águas continentais, devido à sua interferência directa na reflectância da coluna de água.

O cálculo da turbidez por meio de imagens de satélite baseia-se na relação entre os valores de reflectância de certas bandas espectrais e a concentração de material particulado na água (Olson et al.,

2020). Especificamente, sensores como o Sentinel-2 são amplamente empregados devido à sua capacidade de captar as propriedades ópticas da água (Dube et al., 2021).

$$\text{Turbidez} = A * \frac{B3}{B2} + B \quad (1)$$

Onde:

- B3: Banda verde;
- B2: banda azul;
- A e B: são coeficientes baseados na calibração com dados de campo.

A análise de turbidez no GEE tem sido aplicada em diversos contextos ambientais, como monitoramento da qualidade da água em bacias e rios (Dube et al., 2021).

4.3.4 Sólidos Totais Dissolvidos (TDS)

Os Sólidos Totais Dissolvidos (TDS) representam a quantidade de partículas dissolvidas na água e são um parâmetro essencial para avaliar a qualidade da água em rios, lagos e bacias. A Detecção Remota, aliada ao GEE), tem se mostrado uma ferramenta eficiente para a estimativa de TDS devido à sua capacidade de processar grandes volumes de dados de satélites (Gorellck et al., 2017).

A estimativa de Sólidos Totais Dissolvidos (TDS) por meio de imagens de satélite baseia-se na capacidade dos sensores remotos em detectar e medir a refletância da superfície da água em diferentes bandas espectrais. Essa reflectância varia de acordo com a quantidade e tipo de partículas dissolvidas na coluna de água, incluindo argilas, sólidos, matéria orgânica e inorgânica.

Os Sólidos Totais Dissolvidos (TDS) podem ser estimados com base no Índice de Sólidos Dissolvidos Normalizado (ISDN):

$$\text{ISDN} = \frac{(B3 + B4)}{(B3 - B4)} \quad (2)$$

$$\text{TDS} = C * \text{ISDN} + D \quad (3)$$

Onde:

- B3: Banda verde;
- B4: Infravermelho próximo;
- C e D: são coeficientes ajustados.

4.3.5 Extração de Valores nos Pontos de Colecta

A extração de valores espectrais em pontos de colecta é um procedimento essencial para a validação de dados de Detecção Remota com medições *in situ*. No GEE, esse processo permite obter informações de variáveis ambientais, como Turbidez e TDS, directamente de imagens de satélite (Gorellck et al., 2017).

A extração de valores espectrais em pontos específicos segue uma abordagem sistemática, que inclui:

Definição dos pontos de colecta: Importação de coordenadas dos pontos de interesse, podendo ser carregadas via shapefile, GeoJSON ou digitadas manualmente no script do GEE.

- **Seleção da coleção de imagens:** Escolha de dados satelitais, como Sentinel-2, filtrando por data e cobertura de nuvens (*filterBounds()*, *filterDate()*, *filterMetadata()*).
- **Correção atmosférica e pré-processamento:** Aplicação de métodos de correção, como *Surface Reflectance (SR)*, para garantir maior precisão nos valores extraídos (Mutanga e Aduagna, 2022).
- **Extração dos valores:** Utilização da função *sampleRegions()* para colectar os valores espectrais nos pontos de colecta. Essa função retorna as bandas espectrais correspondentes aos locais de amostragem definidos.
- **Exportação dos dados:** Os valores extraídos foram exportados para análise estatística utilizando *Export.table.toDrive()* ou *Export.table.toAsset()* (Zandonadi et al., 2022).

4.3.6 Validação dos Dados

A análise estatística dos dados de qualidade da água obtidos por Detecção Remota (Sentinel-2) e os dados obtidos em campo, foram fundamentais para avaliar a viabilidade da utilização de imagens orbitais como ferramenta de monitoramento. Dentre os modelos estatísticos aplicados, a correlação de Spearman foi seleccionada por sua robustez frente a dados não lineares e não normalizados, comuns em estudos ambientais (Zar, 2005).

Para validar os dados estimados por Detecção Remota em relação aos dados colectados em campo, foram utilizadas métricas estatísticas que avaliam a correlação, o erro e a eficiência do modelo. As métricas aplicadas neste estudo foram Coeficiente de Determinação (R^2) e a correlação de Spearman.

4.3.6.1 Coeficiente de Determinação (R^2)

O Coeficiente de Determinação (R^2) é uma medida estatística que avalia a proporção da variabilidade de uma variável dependente que pode ser explicada por uma ou mais variáveis independentes em um

modelo de regressão. É um valor entre 0 e 1, onde 1 indica que o modelo explica completamente os dados, enquanto 0 indica que o modelo não tem capacidade de explicar a variabilidade observada.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (V. \text{observados} - V. \text{Estimados})^2}{\sum (V. \text{Observados} - \text{Média})^2} \quad (4)$$

O R^2 é amplamente utilizado para avaliar o desempenho de modelos de previsão, como regressão linear ou modelos de séries temporais. Contudo, ele tem limitações, como a incapacidade de penalizar modelos que super-ajustam os dados.

O coeficiente de determinação é utilizado em várias áreas da modelagem estatística e predição. Uma das referências clássicas sobre o uso de R^2 é o trabalho de Neter et al., (1996), que descrevem amplamente a interpretação e as limitações do R^2 na análise de regressão.

4.3.6.2 Correlação de Spearman

A correlação de Spearman é uma medida estatística não paramétrica que avalia a força e a direcção da relação monótona entre duas variáveis, sem assumir que essa relação seja linear ou que os dados tenham distribuição normal (Zar, 2005). Em estudos ambientais, a correlação de Spearman tem sido usada para identificar associações entre diferentes parâmetros físico-químicos da água, com o objectivo de entender como esses parâmetros interagem entre si e com factores externos como clima, uso do solo e impactos antrópicos.

Segundo Moreira et al., (2020), a variabilidade natural das condições hidrológicas e o impacto de factores externos, como uso e ocupação do solo, tornam os dados de qualidade da água propensos a assimetrias e presença de valores variados, o que justifica a escolha de métodos não paramétricos como Spearman. Esse tipo de correlação é especialmente útil para identificar associações monótonas entre variáveis, sem exigir linearidade exata entre elas.

Por esse motivo, é amplamente empregada em estudos ambientais, especialmente quando os dados apresentam assimetrias, valores diferentes ou distribuições não normais características comuns em dados de qualidade da água. Foi considerado como nível de significância 5 e 1% de probabilidade, uma vez que o coeficiente de correlação de Spearman assume apenas valores entre -1 a 1. Onde: $\rho = 1$ significa uma correlação perfeita entre as duas variáveis, ou seja, se uma aumenta, a outra também aumenta.

$\rho = -1$ significa uma correlação negativa perfeita entre as duas variáveis, ou seja, se uma aumenta, a outra sempre diminui. $\rho = 0$ significa que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra.

Segundo a classificação da magnitude dos coeficientes de correlação de Spearman (Ribeiro et al., 2016), os valores entre 0,10 e 0,29 indicam uma correlação fraca; valores entre 0,30 e 0,49 indicam uma correlação moderada; valores entre 0,50 e 1,0 correlação forte, independentemente de ser negativos ou positivos.

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (5)$$

Onde:

- ρ : Coeficiente de Spearman (varia entre -1 e 1);
- d_i^2 : Diferença entre os postos (ranks) das duas variáveis para cada par de dados;
- n : Número de pares de observações.

4.4 Classificação Temática

A classificação temática dos parâmetros de qualidade da água, como turbidez e TDS, permite a criação de classes ou intervalos que facilitam a interpretação visual (mapas) e a análise estatística. Esta abordagem é especialmente útil em estudos de Detecção Remota e SIG, como o realizado no presente trabalho com dados do *Google Earth Engine* e imagens de satélite (Bezerra et al., 2019).

A decisão de utilizar 5 classes foi motivada por sua adequação a análises espaciais e ambientais, pois permite equilibrar a complexidade e a clareza das representações gráficas e cartográficas. Além disso, intervalos equilibrados possibilitam comparações coerentes entre diferentes imagens e épocas, valorizando a interpretação dos dados para fins de gestão ambiental e monitoramento.

Tabela 4: Tabela de variação de intervalos de turbidez e TDS

Classe	Intervalo Turbidez (NTU)	Intervalo TDS (mg/L)	Nível de Qualidade
1	0 – 5	0 – 300	Baixa
2	5 – 25	300 – 600	Média baixa
3	25 – 50	600 – 900	Média
4	50 – 100	900 – 1200	Média alta
5	100	1200	Alta

Embora os valores de turbidez registados nos pontos de colecta ao longo do Rio Umbelúzi não ultrapassem valores padronizados, optou-se por utilizar uma classificação temática baseada em intervalos padronizados e reconhecidos internacionalmente como os da (OMS). Essa abordagem permite situar os resultados locais dentro de uma escala global de qualidade da água, possibilitando comparações futuras e garantindo maior rigor científico à análise. A adoção de intervalos mais amplos

também garante a aplicabilidade da mesma legenda para outros períodos hidrológicos, promovendo a padronização e reprodutibilidade da metodologia.

A qualidade da água é avaliada com base em diversos parâmetros físicos, químicos e biológicos, que juntos fornecem um panorama da condição do recurso hídrico. Entretanto, no contexto da análise por Detecção Remota, nem todos esses parâmetros podem ser adequadamente detectados ou estimados a partir de imagens de satélite.

Parâmetros como pH, oxigênio dissolvido, temperatura, condutividade elétrica e coliformes fecais são amplamente utilizados em análises laboratoriais e monitoramento de campo, mas não são detectáveis directamente por sensores ópticos orbitais. Isso se deve ao facto de que esses parâmetros não apresentam sinal espectral detectável na superfície da água. Além disso, muitos factores químicos e biológicos afectam a água em níveis moleculares ou microbiológicos que não interagem significativamente com a radiação electromagnética reflectida, o que impossibilita sua observação por meio de imagens multiespectrais convencionais (Melesse et al., 2007).

Sendo assim, no presente trabalho optou-se por restringir a análise remota aos parâmetros de turbidez e TDS, por serem os mais sensíveis e confiáveis quando capturados por Detecção Remota. Outros parâmetros importantes para a qualidade da água, embora considerados na abordagem teórica, foram avaliados exclusivamente com base nos dados de campo.

A separação da análise em duas épocas distintas (seca e chuvosa), possibilitou identificar a influência do regime hidrológico sobre os parâmetros estudados, como a turbidez e TDS. Estudos anteriores também reforçam esse achado, como os de Gholizadeh et al., (2016), que mostraram forte correspondência entre a turbidez *in situ* e os índices espectrais derivados de dados Sentinel-2 em ambientes tropicais.

A avaliação conjunta dos valores de turbidez e TDS, medidos em campo e estimados por imagens de satélite Sentinel-2, permitiu verificar o desempenho dos dados orbitais na estimativa de parâmetros limnológicos em diferentes condições sazonais.

Tabela 5: Valores dos parâmetros de campo e estimados da época seca e chuvosa

Valores dos Parâmetros de Campo e Estimados da Época Seca e Chuvosa								
Pontos	Turbidez (GEE) Chuvosa	Turbidez (Campo) Chuvosa	Turbidez (GEE) Seca	Turbidez (Campo) Seca	TDS (GEE) Chuvosa	TDS (Campo) Chuvosa	TDS (GEE) Seca	TDS (Campo) Seca
P1	11,13	11,46	12,15	13,87	327,38	306,82	204,44	86,48
P2	3,19	2,78	2,18	2,37	290,5	332,05	191,15	88,22
P3	5,09	4,49	4,14	2,9	450,32	477,12	216,74	93,03
P4	1,11	1,8	6,11	4,9	364,26	316,47	204,44	88,06

Na época seca, os valores de turbidez estimados por satélite variaram entre 2,18 NTU e 12,15 NTU, enquanto os valores medidos em campo oscilaram entre 2,37 NTU e 13,87 NTU. Durante a época chuvosa, observou-se um comportamento semelhante, os valores de satélite variaram de 1,11 NTU a 11,13 NTU, e os de campo entre 1,80 NTU e 11,46 NTU.

Quanto à TDS, os resultados foram mais heterogêneos. Na época seca, os valores estimados por satélite oscilaram entre 191,15 mg/L e 216,74 mg/L, enquanto os dados de campo variaram entre 86,48 mg/L e 93,03 mg/L. Na época chuvosa, a situação foi similar: os valores de TDS do Sentinel variaram entre 290,50 mg/L e 450,32 mg/L, e os de campo entre 306,82 mg/L e 477,12 mg/L.

Durante a época chuvosa, observa-se um aumento generalizado da turbidez, com destaque para os pontos P1 (Barragem de Pequenos Libombos) e P3 (Ponte de Mafuiane). Na época seca, o aumento de turbidez verifica-se nos pontos P1 e P4 (Ponte de Boane). Este comportamento reflecte o aumento do escoamento superficial, que transporta partículas sólidas, matéria orgânica e resíduos urbanos para o rio.

No caso do TDS, o comportamento é semelhante. Durante a época chuvosa, os dados indicam concentrações elevadas nas zonas urbanas (P3 e P4), onde o transporte de resíduos e fertilizantes, bem como o escoamento urbano, introduzem solutos dissolvidos no rio. Já na época seca, a redução das chuvas limita este aporte, tornando os valores mais uniformes.

De acordo com as Normas Moçambicanas (NM) e as recomendações da Organização Mundial da Saúde (OMS), a água destinada ao consumo humano deve, idealmente, apresentar turbidez igual a zero (0 NTU). No entanto, é considerado aceitável um valor máximo de até 5 NTU, desde que a água passe por tratamento adequado e não apresente risco à saúde.

Entretanto, para TDS fazendo uma avaliação de todos os pontos estudados, estes valores estão dentro dos limites máximos recomendáveis (MISAU, 2004), que se situam nos 1000mg/L, não havendo, portanto, nenhum ponto acima deste valor.

5.1 Correlação de Spearman

A análise dos dados iniciou-se com a aplicação do coeficiente de correlação de Spearman (ρ), por ser uma medida estatística não paramétrica, ideal para verificar associações monótonas entre variáveis ambientais que não seguem necessariamente um padrão linear (Zar, 2005). Este modelo é recomendado quando se deseja avaliar a existência de uma relação entre duas variáveis sem pressupor a distribuição dos dados ou a proporcionalidade entre elas, como ocorre frequentemente em análises de qualidade da água (Moreira et al., 2020).

A correlação de Spearman foi utilizada para comparar os valores de turbidez e TDS estimados por satélite com os dados obtidos em campo, em duas condições hidrológicas distintas: época seca e época chuvosa.

Tabela 6: Matriz de Spearman da correlação para época seca

	Turbidez_Satélite	TDS_Satélite	Turbidez_Campo	TDS_Campo
Turbidez_Satélite	1,00			
TDS_Satélite	0,51	1,00		
Turbidez_Campo	0,94	0,22	1,00	
TDS_Campo	-0,02	-0,83	-0,34	1,00

- Turbidez_Satélite e TDS_Satélite: 0,51 – correlação positiva moderada;
- Turbidez_Satélite e Turbidez_Campo: 0,94 – correlação positiva forte;
- Turbidez_Satélite e TDS_Campo: -0,02 – correlação negativa fraca;
- TDS_Satélite e TDS_Campo: -0,83 – correlação negativa forte;
- TDS_Satélite e Turbidez_Campo: 0,22 – correlação positiva fraca;
- Turbidez_Campo e TDS_Campo: -0,34 – correlação negativa moderada.

Os resultados obtidos revelaram uma forte correlação de Spearman ($\rho = 0,94$) entre o valor de turbidez estimado por satélite e o medido em campo, na época seca. Esse valor indica que, independentemente das unidades ou escalas envolvidas, os dados apresentam uma ordenação monótona consistente, ou seja, aumentam e diminuem juntos, reforçando a confiabilidade das estimativas por Detecção Remota.

Além disso, observou-se uma correlação moderada positiva ($\rho = 0,51$) entre os valores de turbidez satélite e TDS satélite, o que sugere que ambos os parâmetros reflectem condições semelhantes de

presença de matéria particulada na água. Isso reforça a interconexão física entre turbidez e sólidos dissolvidos.

Por outro lado, a correlação entre TDS estimado por satélite e TDS do campo foi negativa e forte ($\rho = -0,83$), o que aponta para divergência, incluindo possíveis interferências atmosféricas, inadequação espectral ou diferenças metodológicas entre sensores e colecta em campo. Por fim, a correlação quase nula ($\rho = -0,02$) entre turbidez satélite e TDS campo indica que não há relação directa observável entre esses dois parâmetros de fontes diferentes, dada a natureza distinta das variáveis e das metodologias envolvidas.

Tabela 7: Matriz de Spearman da correlação para época chuvosa

	Turbidez_Satélite	TDS_Satélite	Turbidez_Campo	TDS_Campo
Turbidez_Satélite	1,00			
TDS_Satélite	0,51	1,00		
Turbidez_Campo	0,98	0,66	1,00	
TDS_Campo	0,89	0,84	0,96	1,00

Todas as correlações são positivas e variam de moderadas a fortes, isto é, aumentam juntas (quando uma variável aumenta, a outra também tende a aumentar).

- Turbidez_Satélite e TDS_Satélite: 0,51 – correlação positiva moderada;
- Turbidez_Satélite e Turbidez_Campo: 0,98 – correlação positiva forte;
- Turbidez_Satélite e TDS_Campo: 0,89 – correlação positiva forte;
- TDS_Satélite e Turbidez_Campo: 0,66 – correlação positiva moderada;
- TDS_Satélite e TDS_Campo: 0,84 – correlação positiva forte;
- Turbidez_Campo e TDS_Campo: 0,96 – correlação positiva forte.

Os cálculos realizados com a correlação de Spearman indicam que todas as associações entre os dados de turbidez e TDS, tanto estimados por satélite quanto medidos em campo, são estatisticamente significativas, reforçando a robustez dos achados.

A turbidez estimada por satélite apresentou correlação positiva forte com a turbidez do campo ($\rho = 0,98$) e correlação forte com o TDS do campo ($\rho = 0,89$), indicando que o modelo de satélite acompanha bem os valores medidos em campo.

A TDS estimada por satélite também apresentou uma correlação forte com a TDS medida em campo ($\rho = 0,84$) e uma correlação moderada com a turbidez do campo ($\rho = 0,66$), o que reforça a consistência das estimativas de Detecção Remota, embora com força de associação um pouco menor que a turbidez.

A correlação entre turbidez e TDS do campo ($\rho = 0,96$) confirma a interdependência física entre os dois parâmetros e a coerência dos dados de campo. Além disso, a correlação moderada positiva entre turbidez e TDS estimados por satélite ($\rho = 0,51$) sugere que ambos os parâmetros são influenciados por características ambientais similares, como a presença de partículas dissolvidas.

5.2 Coeficiente de Determinação (R^2)

Após a análise de correlação de Spearman, procedeu-se à aplicação de modelos de regressão linear simples com o objectivo de quantificar a dependência estatística entre os valores estimados por satélite Sentinel-2 e os valores obtidos em campo para os parâmetros de turbidez e TDS. A regressão linear foi utilizada como ferramenta para avaliar a capacidade preditiva dos dados orbitais, considerando o coeficiente de determinação (R^2).

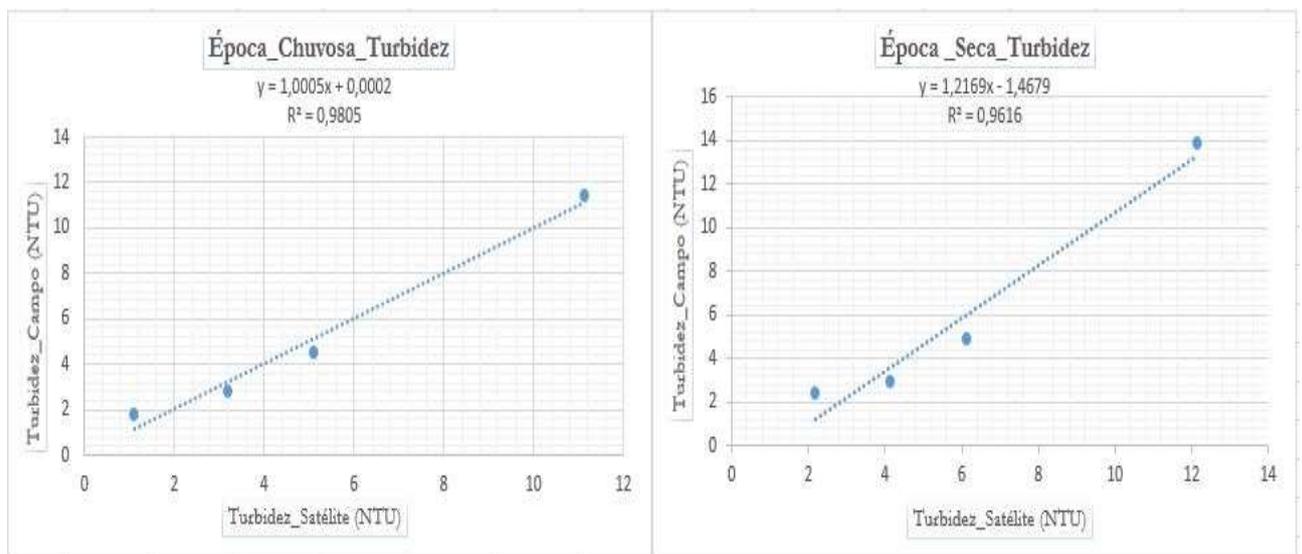


Figura 7: Regressão linear da turbidez para época seca e chuvosa

Para o parâmetro turbidez, a regressão linear simples apresentou resultados em ambas as épocas (seca e chuvosa). O modelo gerado para a época seca teve R^2 de 0,96 e para a época chuvosa, o R^2 foi ainda maior, atingindo 0,98.

Os gráficos de dispersão revelaram um bom alinhamento dos pontos à linha de tendência, com inclinações próximas a 1, indicando ajuste directo e proporcional. Isso valida o uso da regressão linear

como modelo confiável para turbidez, o que já foi documentado por Gholizadeh et al., (2016), que destacam a eficiência dos sensores ópticos.

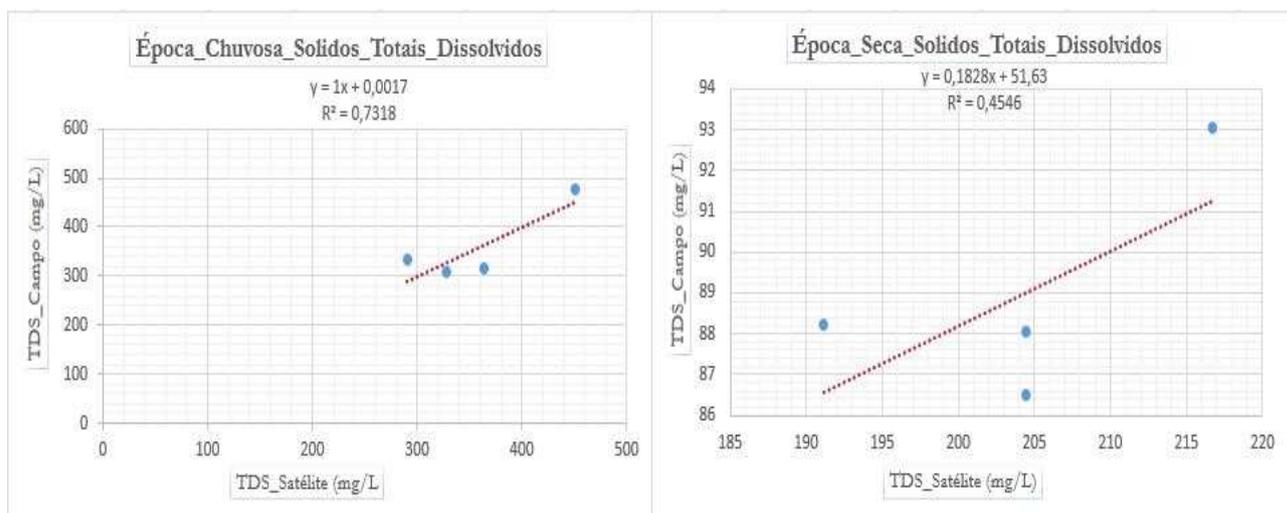


Figura 8: Regressão linear dos sólidos totais dissolvidos para época seca e chuvosa

Em contraste, a aplicação da regressão linear aos dados de TDS resultou em modelos estatisticamente baixos. Na época seca, o R^2 muito baixo de 0,4 e na época chuvosa os valores de R^2 também permaneceram baixos 0,7 indicando que a relação entre TDS do satélite e do campo não segue um padrão linear simples.

Na época seca, os valores de TDS estimados por satélite estiveram significativamente mais elevados do que os valores medidos em campo. Durante este período, a baixa presença de partículas dissolvidas e a transparência da água tornam a resposta espectral das bandas pouco sensível a variações reais. Como o TDS é composto por substâncias muitas vezes invisíveis a olho nu como sais, minerais e compostos orgânicos, a sua concentração real pode não gerar alterações notáveis na reflectância captada pelo satélite. Isso pode levar os modelos a superestimar os valores em tentativas de ajustar pequenas variações espectrais. Por sua vez, na época chuvosa, os valores de TDS mantiveram-se com variações ligeiras, entre os dados de campo com os estimados. Essa estabilidade sugere que o TDS possui baixa sensibilidade espectral, independentemente da estação, dificultando sua estimativa precisa por meio de Detecção Remota. Como se trata de partículas dissolvidas, muitas vezes incolores ou pouco reativas espectralmente, o satélite tem dificuldade em identificar variações significativas na reflectância.

A análise das imagens por Detecção Remota, representando os parâmetros de turbidez e TDS nas épocas seca e chuvosa, permitiu consolidar a avaliação espaço-temporal da qualidade da água no rio Umbelúzi. A abordagem combinada de modelos de Regressão e correlação de Spearman possibilitou

verificar o desempenho dos dados do Sentinel-2 frente aos valores de campo, com maior precisão e detalhamento.

A análise visual das imagens geradas na plataforma *Google Earth Engine*, referentes aos parâmetros de turbidez e sólidos totais dissolvidos (TDS), evidencia uma variação significativa entre as épocas seca e chuvosa ao longo do Rio Umbelúzi.

5.3 Turbidez da Água

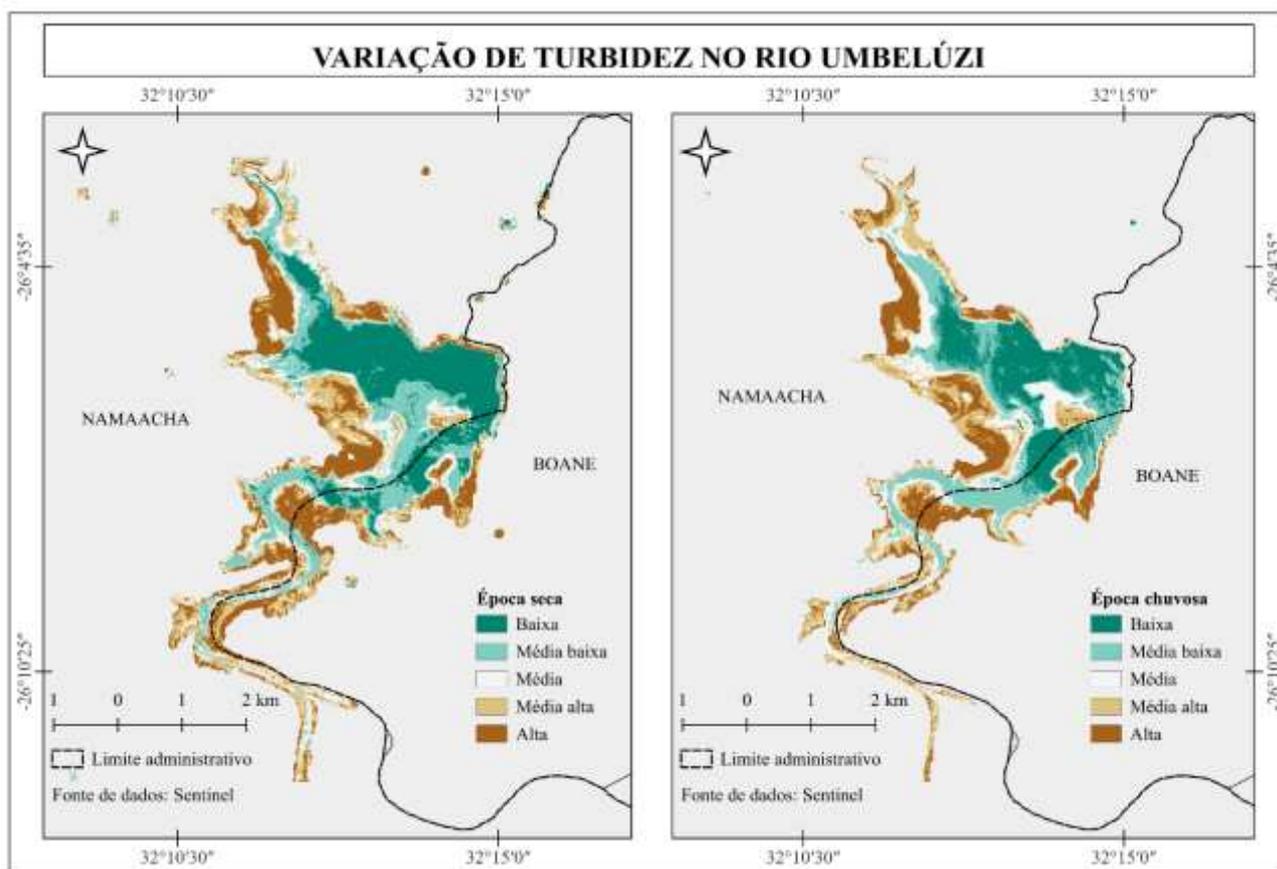


Figura 9: Mapa de variação da turbidez da época seca e chuvosa

Na época seca, a variação da turbidez reduz, predominando classes média baixa e média, especialmente no centro do corpo hídrico. As áreas mais afectadas por turbidez alta concentram-se nas bordas e regiões a jusante. A qualidade da água tende a ser mais estável e menos impactada por partículas em suspensão. A ausência de precipitação reduz substancialmente o transporte de sedimentos, resultando numa menor turbidez.

Durante a época chuvosa, observou-se um aumento significativo das áreas classificadas como média alta e alta turbidez, notável expansão das áreas castanhas (alta turbidez), especialmente nas margens e ao longo do curso inferior do rio. A redução das áreas com turbidez baixa e média baixa indica uma deterioração geral da qualidade da água durante esse período. O padrão visual heterogéneo, com áreas

de elevada concentração, indica uma forte influência dos eventos pluviais e das actividades humanas nas margens do rio.

5.4 Sólidos Totais Dissolvidos

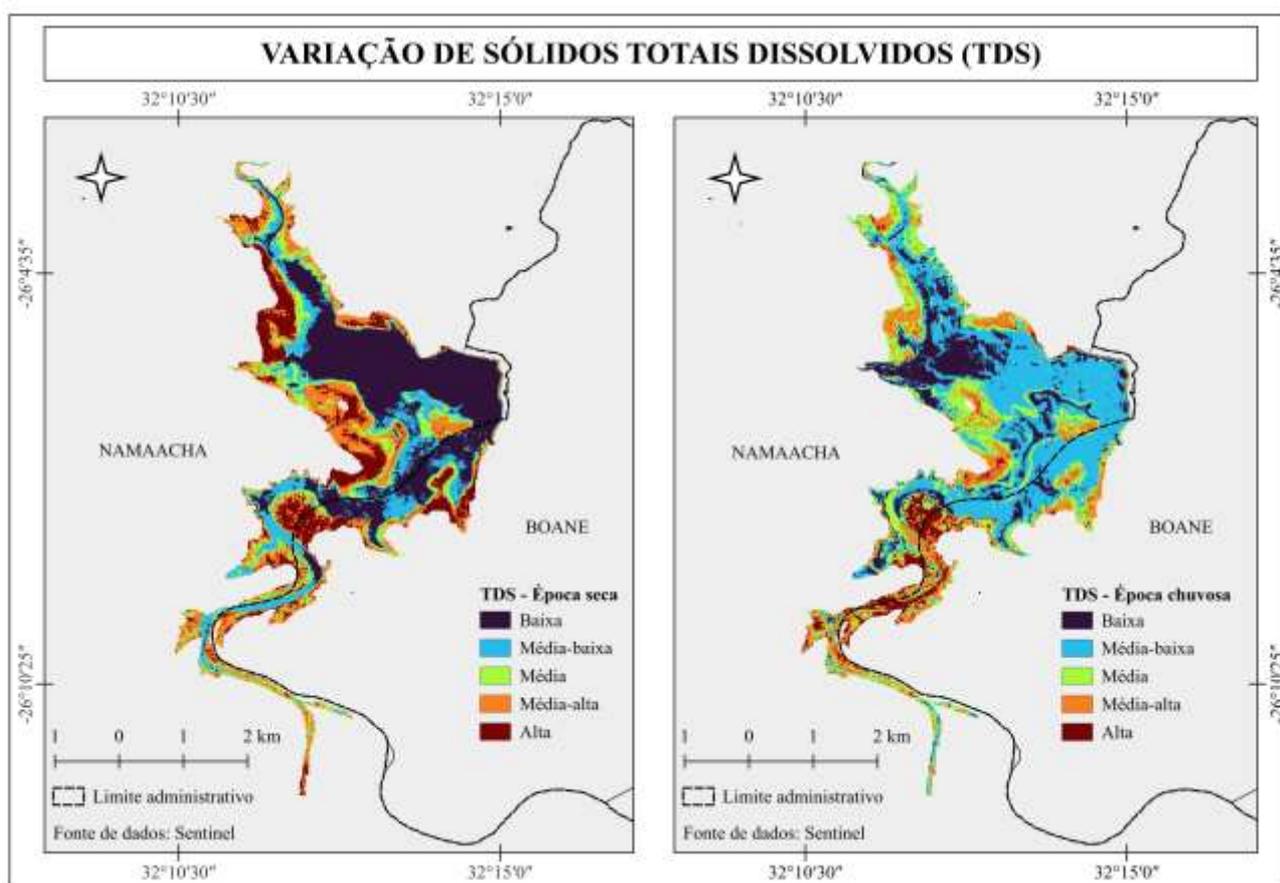


Figura 10: Mapa de variação dos Sólidos Totais Dissolvidos da época seca e chuvosa

Na época seca, a uma extensa área com baixa concentração de TDS, principalmente na região central do espelho de água (roxo escuro). Concentrações média-alta e alta localizam-se principalmente nas margens, extremidades e áreas a jusante e a distribuição é mais definida e centralizada, com menos mistura de classes.

Durante o período chuvoso, verifica-se um aumento visível nas áreas com concentração média e média-alta. As áreas com nível alto (vermelho escuro) tornam-se mais extensas, especialmente a jusante do rio e nas extremidades. A classe baixa reduz significativamente, indicando maior presença de partículas dissolvidas na água durante este período.

A análise das imagens de satélite Sentinel-2, processadas na plataforma *Google Earth Engine* (GEE), evidenciou variações marcantes nos níveis de turbidez e sólidos totais dissolvidos (TDS) entre as

épocas seca e chuvosa no rio Umbelúzi. Estes resultados reflectem tanto a influência das variações sazonais, como a acção antrópica ao longo da bacia hidrográfica.

Durante a época chuvosa, verificou-se um acréscimo significativo da turbidez, sobretudo nas zonas a jusante da barragem dos Pequenos Libombos. Este aumento poderá estar associado ao escoamento superficial mais intenso, que transporta partículas de solo, resíduos agrícolas, matéria orgânica e descargas domésticas directamente para o rio. A elevação da turbidez compromete a penetração da luz solar, afectando negativamente a actividade fotossintética e os níveis de oxigénio dissolvido na água, factores essenciais para a sobrevivência de muitas espécies aquáticas.

Relativamente aos TDS, os dados obtidos apontam para uma tendência de maiores concentrações na época chuvosa, em resultado da evaporação mais intensa e da menor diluição, que favorecem o acúmulo de sais dissolvidos. A concentração excessiva de TDS pode alterar o sabor da água, reduzir a sua aptidão para o consumo humano e limitar o seu uso para irrigação, especialmente em culturas sensíveis à salinidade. A elevação dos TDS também influencia a condutividade eléctrica da água, funcionando como indicador indirecto da presença de poluentes, quer de origem agrícola (fertilizantes), quer industrial ou doméstica.

A presença simultânea de altos níveis de turbidez e TDS pode ter consequências ecológicas relevantes, como a alteração da estrutura dos habitats aquáticos, o aumento da matéria orgânica e nutrientes disponíveis e a potencial aceleração de processos de eutrofização. Estes efeitos afectam directamente a biodiversidade aquática e a capacidade do rio em sustentar os seus processos ecológicos naturais.

Estes resultados reforçam a importância do acompanhamento sistemático da qualidade da água na bacia do Umbelúzi, não apenas para fins ambientais, mas também para garantir o bem-estar das populações que dela dependem. A utilização combinada de técnicas de Detecção Remota e Sistemas de Informação Geográfica (SIG), mostra-se como uma abordagem eficaz para a monitorização em larga escala e com elevada frequência temporal, permitindo identificar padrões, áreas críticas e apoiar decisões de gestão mais sustentáveis.

6.1 Conclusão

O presente estudo atingiu seu objectivo ao avaliar a qualidade da água do rio Umbelúzi a partir da integração entre dados de Detecção Remota e informações obtidas em campo, considerando os parâmetros de turbidez e TDS. A investigação foi conduzida com rigor científico e metodológico, abrangendo as épocas seca e chuvosa, o que permitiu observar a variabilidade dos parâmetros avaliados.

A aplicação de modelos estatísticos, como Coeficiente de Determinação (R^2) e a correlação de Spearman, revelou-se eficaz para captar os padrões de variação entre os dados de campo e de satélite. A turbidez e TDS apresentaram um bom desempenho espectral e forte correlação entre os dados, tornando-se o parâmetro confiável para monitoramento por imagem.

A análise dos dados da água do rio Umbelúzi demonstram que não é própria para o consumo doméstico directo, sem tratamento prévio. Em alguns pontos analisados, nos períodos chuvosos e seco, os dados de campo bem como de Detecção Remota ultrapassaram os limites legais, representando um risco sanitário considerável. Essas condições elevam a possibilidade de doenças de veiculação hídrica, como gastroenterites, hepatites e parasitoses, afectando especialmente as populações próximas ao rio.

E isso é reforçado pelo pesquisador Machava (2020), que classificou a água do rio Umbelúzi como sendo de má qualidade. E que não estava em condições permissíveis para o consumo humano sem passar por processos de tratamento. Para o pesquisador, estes resultados indicam que a degradação da qualidade da água na bacia de Umbelúzi, para além dos factores naturais, as actividades antrópicas influenciam sobremaneira para a degradação da qualidade da água em todos os pontos analisados e em ambos períodos climáticos, demonstrando assim, que a hipótese de que tanto no período seco, como no período chuvoso, a qualidade de água não é considerada óptima para o consumo humano.

A realização de mais estudos usando a Detecção Remota e SIG em outros cursos de água é muito importante para o desenvolvimento de uma ferramenta mais robusta com vista ao monitoramento permanente da qualidade dos recursos hídricos a nível nacional e garantir a saúde e o bem das comunidades bem como a preservação do ambiente aquático e envolvente.

6.2 Recomendações

- Planejar colectas em períodos de transição (início/fim da estação) para refinar curvas de calibragem espectral e melhorar previsões satélites;
- Implementar programas de saneamento básico e sistemas de tratamento de esgoto nas comunidades próximas ao rio;
- Ampliar campanhas de monitoramento contínuo, com uso de imagens multiespectrais e validação em campo, principalmente em épocas de transição;
- Adotar modelos estatísticos diferenciados por parâmetro, garantindo maior precisão nas estimativas;
- Integrar os resultados com políticas públicas, oferecendo aos gestores indicadores claros, mapas interpretáveis e alertas para riscos sanitários.

Referências Bibliográficas

- Adriano, D. J. de A., & Dalama, S. F. (2022). *Qualidade da água para o consumo humano: Um estudo no bairro Tchavola-Lubango*.
- Albino, A. (2012). *Avaliação da qualidade da água em Moçambique*.
- Arbelo, M. (2012). *Fundamentos da aquisição de imagens em sensoriamento remoto*. Revista Técnica de Geociências, 3(1), 55–61.
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). *A qualidade da água para a agricultura. Organização para Alimentação e Agricultura das Nações Unidas*.
- Bandeira, L. P., Menezes, S. M., Matias, F. L., Bráz, S. A., & Silva, D. E. (2017). *Estudo físico-químico de uma água do poço artesiano no município de Campina Grande*. Fortaleza.
- Barcellos, M. C., Rocha, M., & Rodrigues, L. S. (2006). *Avaliação da qualidade da água e percepção higiênico-sanitária na área rural de Lavras, MG*. Cadernos de Saúde Pública, 22(9), 1967–1978.
- Bernaert, F. (1991). *The use of land and soil suitability for agriculture: A perspective*. FAO.
- Benilde Mendes, C., et al. (2004). *Estudo sobre qualidade da água em Moçambique*.
- Bezerra, J. F., Silva, J. R., & Nascimento, E. C. (2019). *Caracterização dos satélites Sentinel-2A e 2B*. Revista Brasileira de Geografia Física, 12(2), 326–342.
- Câmara, G., Medeiros, J. S., & Felgueiras, C. A. (1998). *Geoprocessamento para projetos ambientais: Introdução à ciência da geoinformação* (2ª ed.). INPE.
- CETESB. (2008). *Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e sedimentos*. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo.
- Cheng, R., et al. (2000). *Dissolved oxygen in natural water systems*. Water Environment Research, 72(1), 5–22.
- Cossa, J. (2015). *Avaliação de parâmetros de qualidade de água em sistemas fluviais*.
- De Brito, H. C., Vasconcelos, R. S., Rufino, I. A. A., & De Brito, Y. M. A. (2022). *Uso de sensoriamento remoto para monitoramento de parâmetros de qualidade de água no Rio Doce*. Caminhos de Geografia, 23(90), 108–119.
- Diniz, C., et al. (2012). *Estudo da vegetação e uso da terra na Bacia do Umbelúzi*. Maputo.
- DNGRH. (2018). *Direção Nacional de Gestão de Recursos Hídricos: Relatórios de qualidade de água*.
- Droogers, P. (2014). *Climate change and hydrological modeling: A review*.
- Duarte, M. (2009). *Mudanças climáticas e gestão de recursos hídricos*.

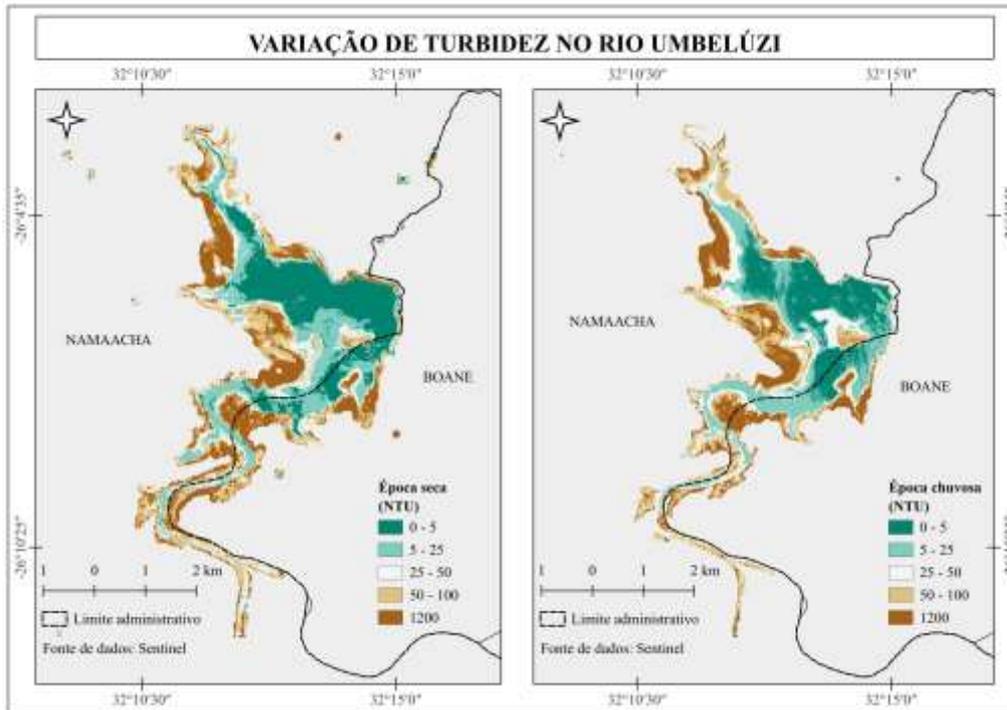
- Dube, T., Mutanga, O., & Seutloali, K. (2021). *Remote sensing of water quality in reservoirs using Google Earth Engine*. *Journal of Hydrology*, 600, 126685.
- El-Asmar, H. M., Hereher, M. E., & El Kafrawy, S. B. (2013). *Surface area change detection of the Burullus Lagoon, Egypt, using water indices*. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 16, 119–123.
- EPA. (2001). *Guidance for water quality-based decisions: The TMDL process*.
- Esteves, F. A. (2011). *Fundamentos de limnologia* (3ª ed.). Interciência.
- Fernandes, M. (2015). *Avaliação da qualidade da água do Rio Umbelúzi*.
- Fernandes, S. (2018). *Modelos hidrológicos aplicados a bacias hidrográficas*.
- Florenzano, T. G. (2007). *Iniciação em sensoriamento remoto*.
- FNS. (2014). *Fundação Nacional de Saúde. Manual de vigilância da qualidade da água para consumo humano*.
- Fonseca, J. (2017). *Teores de nitrito e qualidade da água em ambientes fluviais urbanos*. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 22(4), 68–76.
- Garcia, A. M. (2013). *Dinâmica de nutrientes e poluição em águas doces*. *Ciência Ambiental*, 8(2), 123–132.
- Genito Maúre, M., et al. (2018). *Análise da qualidade da água em Moçambique*.
- Gholizadeh, M. H., Melesse, A. M., & Reddi, L. (2016). *A comprehensive review on water quality parameters estimation using remote sensing techniques*. *Sensors*, 16(8), 1298.
- Goher, M. (2000). *Water quality assessment using chemical and biological indicators*.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). *Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone*. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27.
- Greb, S. R., et al. (2018). *Water quality monitoring using remote sensing*. *Water Research*, 143, 62–72.
- Hake, M. (2016). *Efeitos da urbanização sobre os recursos hídricos no sul de Moçambique*.
- Hamel, P., et al. (2020). *Mapping deforestation patterns using Google Earth Engine*. *Forest Ecology and Management*, 472, 118217.
- Hilário, R. (1996). *Climatologia e hidrologia do sul de Moçambique*.
- INE. (2017). *Indicadores de saúde e acesso a água potável em Moçambique*.
- Jeong, T. Y., et al. (2013). *Ammonia pollution and aquatic ecosystems*. *Environmental Pollution*, 176, 135–144.
- Johansson, M., & Gustafsson, L. (2006). *Water quality in agricultural watersheds*.
- Kale, J. (2016). *Nitrato em águas superficiais: Impactos e limites*. *Revista Água e Ambiente*, 4(1), 59–65.

- Khumar, P. (2010). *O nitrato como poluente emergente*. *Journal of Environmental Chemistry*, 12(3), 45–49.
- Kiefer, R., & Chipman, J. (2015). *Remote sensing and image interpretation*. Wiley.
- Lei de Terras (1997) e Regulamento da Lei de Terras (1998). *Legislação moçambicana*.
- Liu, W. T. H. (2007). *Aplicações de sensoriamento remoto*. Campo Grande, UNIDERP.
- Macia, M. (2009). *Estudo do uso da terra na bacia do Umbelúzi*.
- Machava, S. L. (2020). *Avaliação da qualidade da água do Rio Umbelúzi com dados de campo*. Relatório.
- Mangujo, N. S. (2020). *Gestão da qualidade de água para o consumo humano*. Dissertação de mestrado.
- MISAU. (2004). *Plano estratégico para gestão da qualidade da água em Moçambique*.
- Moraes, M. C. B. (2002). *Aplicações do espectro eletromagnético no sensoriamento remoto*. *Revista Brasileira de Geografia*, 59(1), 89–98.
- Muchangos, L. (1999). *Geologia e geomorfologia de Moçambique*.
- Mutanga, O., & Adugna, T. (2022). *Remote sensing of water quality using Google Earth Engine: An overview*. *Water*, 14(10), 1635.
- Name, C., et al. (2021). *Análise de indicadores de saúde e qualidade de vida*.
- Neter, J., Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., & Wasserman, W. (1996). *Applied linear statistical models* (4ª ed.). McGraw-Hill.
- Nkambule, N. (2016). *Indicadores microbiológicos na água: um estudo no rio Umbelúzi*. *Water Science Reports*, 11(2), 44–50.
- Odume, O. (2014). *Water quality monitoring in river catchments*. *Water Research*.
- ONU. (1992). *United Nations Conference on Environment and Development*.
- Oliveira, C. A. S. (1997). *Sistemas de Informações Geográficas: Conceitos e fundamentos*. *Revista Brasileira de Cartografia*, 49(2), 1–17.
- Olson, J. R., et al. (2020). *Using remote sensing reflectance to estimate turbidity*. *Journal of Hydrology*, 584, 124708.
- Palmer, S. C. J., Hunter, P. D., & Tyler, A. N. (2015). *The application of remote sensing to limnology*. *International Journal of Remote Sensing*, 36(21), 5431–5468.
- Pádua, V. L. R., et al. (2009). *Remoção de micro-organismos emergentes no tratamento de água*. *ABES Publicações Técnicas*.
- Pimenta, F. M., Figueiredo, D. M., & Lopes, W. A. (2014). *A correlação de Spearman: uso em estudos ambientais*. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, 32, 45–54.

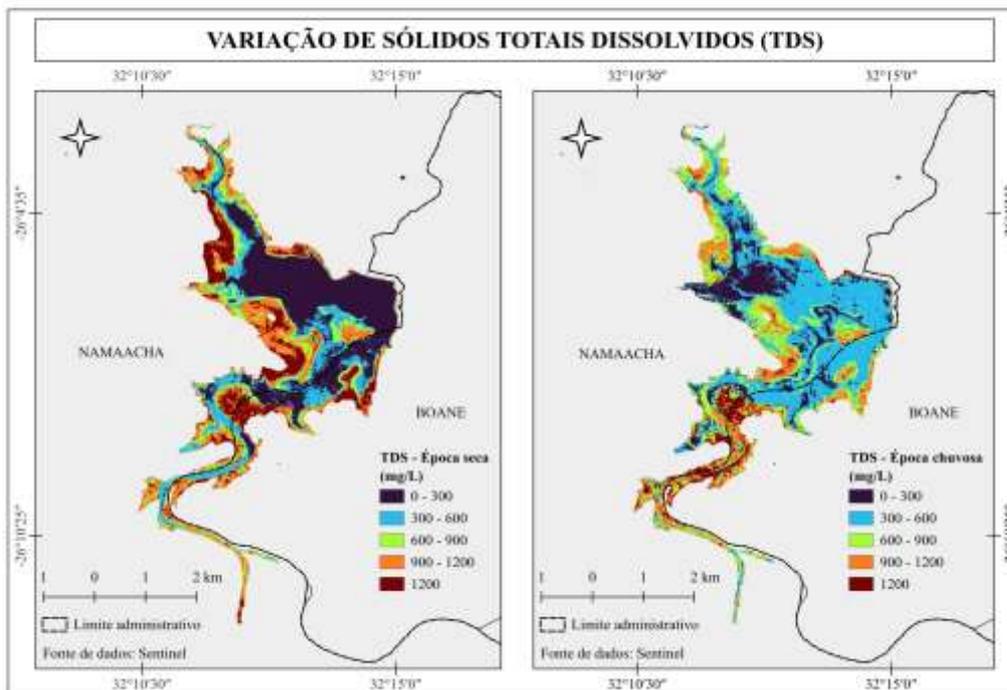
- Pirotaba, A., et al. (2016). *Parâmetros de qualidade da água em rios brasileiros*.
- Pirotaba, A., et al. (2017). *Qualidade da água superficial na bacia do rio Umbelúzi*.
- Qureshimatva, U., et al. (2015). *Water hardness and its environmental implications*. *International Journal of Hydrology Science*, 9(3), 102–108.
- Robello, A., et al. (2020). *Temporal analysis of land cover changes using Google Earth Engine*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 453.
- Rodrigues, V., et al. (2020). *Qualidade da água e doenças de veiculação hídrica*.
- Roy, D. P., et al. (2016). *Characterization of Landsat-8 and Sentinel-2 cloud cover assessment*. *Remote Sensing of Environment*, 192, 270–284.
- Santos, J. A. (2008). *Fósforo em águas naturais*. *Revista Brasileira de Recursos Naturais*, 6(1), 33–41.
- Sincero, A. P., & Sincero, G. A. (2003). *Physical-chemical treatment of water and wastewater*. IWA Publishing.
- Sperling, M. V. (2005). *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. UFMG.
- Toniolo, G. R. (2016). *Identificação de constituintes opticamente ativos na água do Lago Guaíba*.
- Tundisi, J. G. (2006). *Ecossistemas de águas interiores: Funcionamento e gestão*. FAPESP.
- Vanessa, F. L. (2012). *Fósforo como nutriente limitante em águas interiores*. *Ciência Limnológica*, 10(2), 45–52.
- Van Wyk, A. E., & Smith, G. F. (1996). *Regions of floristic endemism in southern Africa*.
- Viera, F. (2015). *Parâmetros de qualidade da água em áreas tropicais*.
- Wetzel, R. G. (2001). *Limnology: Lake and river ecosystems* (3rd ed.). Academic Press.
- WHO. (2017). *Guidelines for drinking-water quality* (4th ed.). Geneva: World Health Organization.
- Xu, H., et al. (2021). *The role of high-resolution satellite imagery in land use classification*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 171, 202–217.
- Ydi, K. (2000). *Water quality management and monitoring techniques*.
- Zandonadi, G. R., Maranhão, A. V., & Silva, D. B. (2022). *Técnicas de extração de dados no Google Earth Engine*. *Revista Brasileira de Cartografia*, 74(1), 25–37.
- Zar, J. H. (2005). *Biostatistical analysis* (5^a ed.).

Apêndices

Apêndices 1: Mapa da turbidez da época seca e chuvosa com intervalos de variação



Apêndices 2: Mapa de TDS da época seca e chuvosa com intervalos de variação



Anexos

Anexo 1: Processo de Aquisição de Dados de Turbidez e TDS no GEE

```
// [ ] Definir área de interesse (Rio Umbelúzi)
var roi = ee.Geometry.Polygon([
  [[32.10, -26.20], [32.10, -25.80], [32.35, -25.80], [32.35, -26.20]]
]);

// Filtrar imagens Sentinel-2 para época chuvosa (Out-Dez/2017 e Out/2018)
var imagens_chuvosa = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2')
  .filterBounds(pontos)
  .filterDate('2017-10-01', '2017-12-31')
  .merge(ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2')
    .filterBounds(pontos)
    .filterDate('2018-10-01', '2018-10-31'))
  .filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 20)) // Filtra imagens com menos de 20% de
  .median();

// Filtrar imagens Sentinel-2 para época seca (Mai-Set/2018)
var imagens_seca = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2')
  .filterBounds(pontos)
  .filterDate('2018-05-01', '2018-09-30')
  .filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 20))
  .median();

var turbidez_chuvosa = imagens_chuvosa.expression(
  '7.5 * (B3 / B2) + 0.5', {
    'B3': imagens_chuvosa.select('B3'),
    'B2': imagens_chuvosa.select('B2')
  }).rename('Turbidez_Chuvosa');

var turbidez_seca = imagens_seca.expression(
  '7.5 * (B3 / B2) + 0.5', {
    'B3': imagens_seca.select('B3'),
    'B2': imagens_seca.select('B2')
  }).rename('Turbidez_Seca');

function calcularNDSI(image) {
  var ndsi = image.normalizedDifference(['B3', 'B4']).rename('NDSI');
  return image.addBands(ndsi);
}

var imagens_chuvosa = calcularNDSI(imagens_chuvosa);
var imagens_seca = calcularNDSI(imagens_seca);

var sst_chuvosa = imagens_chuvosa.expression(
  '-200 * NDSI + 50', {
    'NDSI': imagens_chuvosa.select('NDSI')
  }).rename('SST_Chuvosa');

var sst_seca = imagens_seca.expression(
  '-200 * NDSI + 50', {
    'NDSI': imagens_seca.select('NDSI')
  }).rename('SST_Seca');
```

```
var resultado_chuvosa = turbidez_chuvosa.addBands(sst_chuvosa).sampleRegions({
  collection: pontos,
  scale: 10,
  geometries: true
});

var resultado_seca = turbidez_seca.addBands(sst_seca).sampleRegions({
  collection: pontos,
  scale: 10,
  geometries: true
});

print("Resultados - Época Chuvosa:", resultado_chuvosa);
print("Resultados - Época Seca:", resultado_seca);
```

Anexo 2: Imagens ilustrativas dos pontos de amostragem (Machava, 2020)

