

## Potencial Risco de Contaminação do Sistema Aquífero Dunas – Barreiras por Atividades Antrópicas em Área de Manancial no Nordeste Brasileiro

### *Potential Risk of Contamination of the Dunas – Barreiras Aquifer System by Anthropogenic Activities in a Source Area in Northeastern Brazil*

Allison Vicente Silva Bezerra<sup>1</sup>; Vera Lúcia Lopes de Castro<sup>2</sup>; José Augusto Di Lollo<sup>3</sup>; Reinaldo Lorandi<sup>4</sup>; Carlos Wilmer Costa<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Natal/RN, Brasil. Email: allisonvbezerra@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0529-1137>

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Escola de Ciências e Tecnologia, Natal/RN, Brasil. Email: veracastro@ect.ufrn.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2224-5749>

<sup>3</sup> Universidade Estadual Paulista - Júlio de Mesquita Filho (UNESP), Departamento de Engenharia Civil, Ilha Solteira/SP, Brasil. Email: jose.lollo@unesp.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6703-5377>

<sup>4</sup> Universidade Federal de São Carlos (UFSCAR), Departamento de Engenharia Civil, São Carlos/SP, Brasil. Email: lorandir@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0026-7269>

<sup>5</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Natal/RN, Brasil. Email: carloswilmercosta@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3148-0030>

**Resumo:** O sistema Aquífero Dunas-Barreiras está localizado na região NE do Brasil, próximo ao litoral oriental do Rio Grande do Norte, e nele, encontra-se o Sistema Lacustre do Bonfim. Tal aquífero é utilizado para o abastecimento de cerca de 300.000 pessoas, é caracterizado como livre e é composto por um sistema único, embora as dunas e a Formação Barreiras possuam características específicas. A partir de uma Análise Multicritério, envolvendo álgebra de mapas e Combinação Linear Ponderada de atributos do meio físico, biótico e antrópico, em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), o presente trabalho se propõe a identificar, em escala 1:100.000, áreas com maiores potenciais riscos de contaminação das águas subterrâneas na área abrangida pelo Sistema Bonfim. Os resultados apontam que 46,14% do manancial apresentou potenciais de contaminação Médio, Forte e Muito Forte. Por outro lado, áreas com potencial Desprezível abrangeram 39,73% representadas por áreas seminaturais, sem a presença de atividades antrópicas. A espacialização do potencial risco à contaminação das águas subterrâneas desse manancial visa auxiliar tomadas de decisão, pública e privada, contribuindo para o planejamento territorial dos municípios de São José de Mipibu e Nísia Floresta, apresentando áreas em que uso antrópico deveria ser retardado, priorizando a conservação.

**Palavras-chave:** Contaminação de Águas Subterrâneas; Uso e cobertura da terra; Atividades antrópicas; Modelagem Ambiental; SIG; Análise multicritério.

**Abstract:** The Dunas-Barreiras Aquifer system is located in the NE region of Brazil, near the eastern coast of Rio Grande do Norte, and in it, one finds the Bonfim Lake System. Such aquifer is used for the supply of about 300,000 people, is characterized as free and is composed of a single system, although the dunes and the Barreiras Formation have specific characteristics. From a Multicriterion Analysis, involving maps algebra and Weighted Linear Combination of physical, biotic and anthropic attributes, in Geographic Information Systems (GIS) environment, the present work proposes to identify, in 1:100.000 scale, areas with higher potential risks of groundwater contamination in the area covered by the Bonfim System. The results point that 46.14% of the spring presented contamination potentials Medium, Strong and Very Strong. On the other hand, areas with despicable potential covered 39.73% represented by semi-natural areas, without the presence of anthropic activities. The spatialization of the potential risk of contamination of the underground water of this spring aims to help in the decision making, public and private, contributing for the territorial planning of the municipalities of São José de Mipibu and Nísia Floresta, presenting areas in which the anthropic use should be delayed, prioritizing the conservation.

**Keywords:** Groundwater Contamination; Land use and land cover; Anthropic activities; Environmental modeling; GIS; Multicriteria analysis.

Recebido: 27/02/2023; Aceito: 24/05/2023; Publicado: 19/07/2023.

## 1. Introdução

As águas subterrâneas representam 99% de toda água líquida e doce do planeta Terra, fornecendo metade do volume captado para uso doméstico da população global, cuja estimativa é de 7.8 bilhões de habitantes (WWAP, 2022). Além disso, as águas subterrâneas têm importância fundamental na segurança hídrica e alimentar e podem ser afetadas por mudanças no ciclo hidrológico decorrentes de alterações do padrão climático (IPCC, 2021).

Em escala global, em regiões de escassez, como em zonas de clima árido e semiárido, a água subterrânea é a principal fonte responsável pelo abastecimento de água doce (GLEESON, 2020). Nestas regiões, principalmente as localizadas em países em desenvolvimento, as águas subterrâneas desempenham um papel estratégico para o progresso econômico e social, pois, além do abastecimento, despontam-se como insumo primordial para o progresso das atividades humanas (WWAP, 2022) e para a implementação do desenvolvimento sustentável, bem como (para o fornecimento de) água por longos períodos, mesmo durante um período de seca intensa (CHENINI; ZGHIBI; KOUZANA, 2015; PARKINSON; HUNT, 2020; BUSICO *et al.*, 2020). No entanto, as sazonalidades, relacionadas às taxas de ciclo natural e que são agravadas por usos intensos e mudanças climáticas, têm influenciado cada vez mais a disponibilidade deste recurso para satisfazer as exigências regionais (IPCC, 2021).

A necessidade de aumentar a exploração das águas subterrâneas para atender a demanda crescente (COSTA *et al.*, 2015; BONSOR *et al.*, 2018; VANN *et al.*, 2020) tem aumentado a preocupação com relação à qualidade deste recurso (RAZANDI *et al.*, 2015; FILIPPIS *et al.*, 2020). Sucessivas evidências apontam para a degradação das reservas subterrâneas ocasionada pela crescente poluição ambiental oriunda de atividades antrópicas, colocando em risco a quantidade e a qualidade deste recurso (RAZANDI *et al.*, 2015).

Mundialmente, atividades antropogênicas têm alterado drasticamente as condições naturais de cobertura do solo, reduzindo a área natural e aumentando a área de cobertura impermeável, principalmente na forma de áreas urbanizadas e industrializadas, trazendo consequências ambientais negativas (TUNDISI *et al.*, 2008; DELINOM *et al.*, 2009; ZHAO *et al.*, 2015; MARTÍNEZ *et al.*, 2014; ZHAI *et al.*, 2021). Estas áreas, quando ocupadas sem adoção de critérios técnicos e de infraestrutura sanitária, acabam sendo marcadas pela presença de fossas sépticas e negras, fugas da rede de esgotamento sanitário, inserção de efluentes em galerias de águas pluviais, infiltração de efluentes industriais em solo, vazamentos de postos de serviços e lixões (SÃO PAULO, 2019). Consequentemente, poluentes como nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), cloreto ( $\text{Cl}^-$ ), sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) e patógenos, entre outros, são liberados podendo atingir a zona saturada, contribuindo para o declínio da qualidade das reservas subterrâneas (DEVIC; DJORDJEVIC; SAKAN 2014; DANIELA *et al.*, 2017, MARIJÉ *et al.*, 2017).

Em áreas rurais, as fontes de contaminação são principalmente oriundas da grande quantidade de agroquímicos utilizados na agropecuária, logo o uso indiscriminado de nitrogênio fertilizado surgiu como fonte difusa de poluentes em todo mundo (FARJAD *et al.*, 2012; RUFINO *et al.* 2019; MACHATE *et al.*, 2021). Tanto em áreas urbanizadas como em rurais, as concentrações de nitrato e sulfato têm sido um indicador de contaminação na água subterrânea (POWELL *et al.*, 2003; DEVIC; DJORDJEVIC; SAKAN, 2014; CETESB, 2018; VIGLIOTTI; BUSICO; RUBERTI, 2020). Na área de estudo, Castro *et al.* (2014) verificaram um avanço da área urbanizada do município de Nísia Floresta sobre o Sistema Bonfim (SB), mais precisamente sobre a área circunvizinha aos poços da primeira bateria da Adutora Monsenhor Expedito. Inclusive, um desses poços atingiu, à época, a concentração de Nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) de 9,21 mg/L, sendo próximo ao limite máximo permitido para o consumo humano de 10 mg/L (BRASIL, 2017).

A necessidade de proteção dos recursos hídricos subterrâneos aliado ao planejamento do uso do solo têm levado ao mapeamento das áreas que representam um maior potencial de contaminação das águas subterrâneas (MARANGON, *et al.*, 2017; COSTA, *et al.*, 2019). Tais zoneamentos são importantes instrumentos de subsídio às tomadas de decisões visando ao planejamento territorial e hídrico (COSTA, *et al.*, 2015; PIGA, *et al.*, 2017; COSTA, *et al.*, 2020).

Diferentes abordagens têm sido propostas para mapear a vulnerabilidade das águas subterrâneas, tais como: modelos estatísticos que expressam a vulnerabilidade em termos de impactos das atividades humanas (WANG *et al.*, 2010; MALAKOOTIAN; NOZARI, 2020; MACHATE, *et al.*, 2021), impactos da agricultura (VIRGLIOTTI; BUSICO; RUBERTI, 2020), simulações com modelagem numérica e estatística (LA TORRE *et al.*, 2020; SUN *et al.*, 2020) e técnicas de sobreposição em ambiente SIG (RAZANDI, 2015; OROJI, 2019; COSTA, *et al.*, 2020; EASWER *et al.*, 2022). A análise multicritério é uma ferramenta utilizada em grandes áreas de conhecimento, como saúde, engenharia, meio ambiente, gerenciamento de processos, tecnologia, sendo interessante para pequenas e grandes tomadas de decisão favorecendo o cruzamento das informações simultâneas; além de tornar as decisões dos especialistas mais assertivas, essa ferramenta possibilita vários ajustes no modelo a depender da escala de trabalho considerada (JAHAN; EDWARDS, 2013; REN *et al.* 2020). Desse modo, a Análise Multicritério em ambiente SIG, entre as técnicas de sobreposição, mostra-se vantajosa na aquisição e processamento computacional de dados geoambientais na forma de planos de informação

georreferenciados. Os resultados têm se mostrado equilibrados e confiáveis quando aplicados ao potencial de contaminação de aquíferos (PIGA, *et al.*, 2017; COSTA, *et al.*, 2019).

Globalmente, os métodos DRASTIC (ALLER *et al.*, 1987), GOD (FOSTER, 1987), SINTACS (CIVITA, 1994) e COP (VÍAS *et al.*, 2002; 2006) são utilizados na predição de contaminação de aquífero. O DRASTIC é representado por índices que compõem a metodologia, tais quais: Profundidade ao lençol freático (D), Recarga líquida (R), Tipo de aquífero (A), Meio do solo (S), Topografia (T), Impacto da zona vadosa (I) e Condutividade hidráulica (C) (ALLER *et al.*, 1987). Os índices são classificados baseados na sobreposição de fatores, a partir de uma combinação linear, levando em consideração as características hidrogeológicas, entretanto essa configuração demonstra a sensibilidade intrínseca do sistema, não levando em consideração as características exógenas a ele (SAIDI; BOURI; DHIA, 2009; RAMA *et al.*, 2022;). A metodologia GOD tem como objetivo avaliar a vulnerabilidade de aquífero. Esse modelo tem características de utilizar a combinação de apenas três variáveis: Tipo de Aquífero (G); Litologia e Grau de Consolidação da Zona Vadosa ou Camadas Confinantes(O) e Profundidade do nível d'água ou da base confinante do aquífero (D) (FOSTER, 1987; FOSTER; HIRATA, 1988). Dessa maneira, o GOD apresenta algumas deficiências a partir das atividades que não intrínsecas dos sistemas, apresentando diretamente a vulnerabilidade mais próxima das condições naturais, não levando em consideração variáveis antrópicas (GOMES; MENDONÇA; CAVALCANTE, 2018; PEIXOTO; CAVALCANTE, 2022).

Na área estudada, as águas subterrâneas abastecem cerca de 300.000 pessoas e sua qualidade e quantidade estão ligadas diretamente com uso e cobertura da terra. Diante disso, o presente trabalho visa avaliar a vulnerabilidade intrínseca e extrínseca, gerando o potencial risco de contaminação do Sistema Aquífero Dunas/Barreiras, por meio de uma abordagem multicritério no Sistema Bonfim (SB).

## 2. Área de Estudo

O Sistema Bonfim (SB) está localizado no litoral oriental do estado do Rio Grande do Norte (RN), 25 km ao sul de Natal, a capital do estado, abrangendo parte dos municípios de Nísia Floresta e de São José do Mipibu (Figura 1). O SB está posicionado nas bacias hidrográficas dos rios Trairi e Potengi, em área de escoamento difuso sobre terreno sedimentar da Formação Barreiras e campos dunares, compreendendo uma área de 72,19 km<sup>2</sup>. O SB destaca-se pelo seu elevado potencial hídrico e por compreender um dos sistemas adutores mais relevantes do estado do Rio Grande do Norte, no que se refere à captação de águas subterrâneas e superficiais. O sistema adutor Monsenhor Expedito é responsável por captar, aproximadamente, 1750 m<sup>3</sup>/h e pelo abastecimento de 285 a 300 mil habitantes em 30 sedes municipais e 240 comunidades rurais (ASSEMBLEIA RN, 2021).

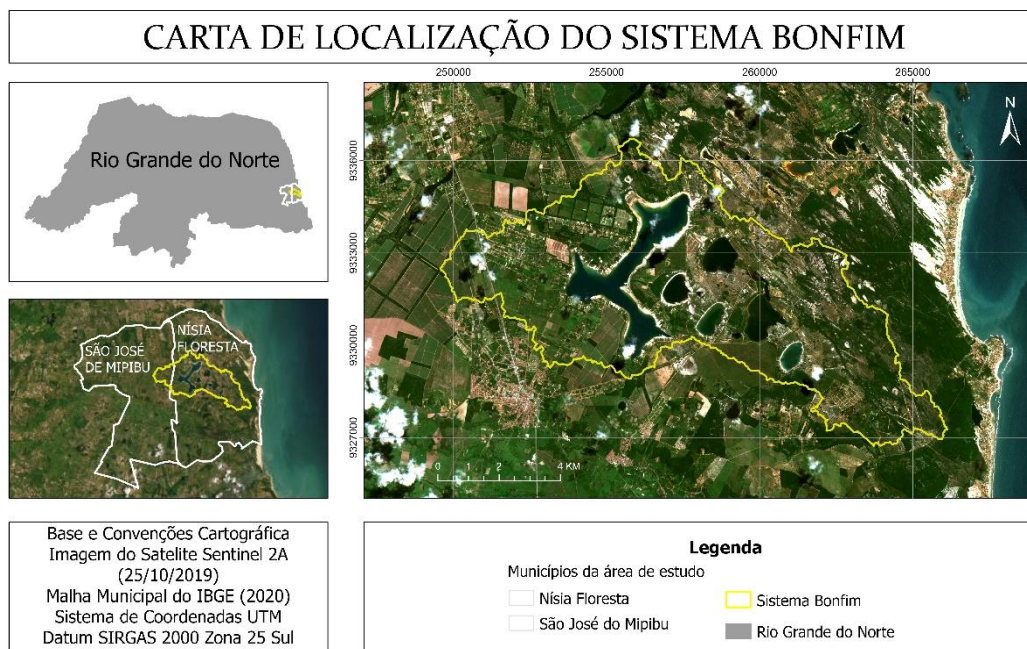


Figura. 1 – Localização da área de estudo.

Fonte: Autor (2022).

## 2.1 Clima

O Rio Grande do Norte tem sua posição geográfica no leste setentrional. O RN sofre influência direta de dois Sistemas de Correntes Perturbadas: a norte e a leste. No inverno, o estado pode ser atingido por algumas repercussões de Frentes Frias quando estas conseguem sobrepor as latitudes mais baixas, ocasionando chuvas frontais e pós-frontais ao longo do litoral, enquanto o sertão do estado fica sob atuação da Alta Tropical do Atlântico Sul, com tempo estável (NIMER, 1979). Segundo Feitosa & Melo (1997), o SB está situado na região dos vales úmidos do RN e essas características justificam uma pluviometria (média anual de 1.721mm entre 1984 e 2019) (MELO; FIGUEIREDO, 1990; CASTRO *et. al.*, 2014).

## 2.2 Unidades litológicas e Hidrogeologia

Além da importância paisagística, ambiental e turística, o SB também possui importância social e econômica, tanto para a região que está inserida quanto para todo RN, servindo como manancial para a adutora Monsenhor Expedito, a qual possui 315 km de extensão. O sistema adutor foi projetado no início dos anos 90 para aduzir 1.627,2 m<sup>3</sup>/h, a partir da captação de água na Lagoa do Bonfim e por meio de sete poços profundos circunvizinhos à lagoa. No entanto, vislumbrando maior vazão, foram realizados novos estudos complementares, a exemplo dos estudos realizados pela SEMARH (2008), com intuito de definir novas condições de explorações para abastecimento humano; assim foram instalados mais doze poços tubulares profundos, em 2011, no riacho Boa Cica, à jusante das lagoas, dos quais são captados mais 750 m<sup>3</sup>/h.

Esse potencial hídrico pode ser relacionado com a caracterização litohidrológica do SB, no qual são encontradas quatro unidades geológicas, todas do período Quaternário, a saber: Depósitos eólicos continentais recentes (Q2ec), Depósitos eólicos litorâneos vegetados (Q2elv), Depósitos arenosos e areno-argilosos (Q2da) e Depósitos marinhos e continentais antigos (Q1mc). Em comum, são coberturas inconsolidadas compostas por sedimentos que variam entre arenosos e areno-argilosos com granulometria variando de areia fina a muito grossa, por vezes, com fração conglomerática (CPRM, 2014) (Figura 2).

Em consonância, a hidrogeologia é composta por um sistema único, o aquífero Dunas-Barreiras, no qual cada um deles tem suas características específicas. O aquífero Dunas é constituído por depósitos eólicos inconsolidados formados por sedimentos arenosos finos a médios e, por vezes, silto-argilosos (CPRM, 2012; CPRM, 2014). Apesar de esses sedimentos servirem como condutores da água infiltrada para o Dunas/Barreiras, possuem pequena espessura saturada, fazendo com que a produtividade geralmente seja muito baixa, com vazão de captação  $1 \leq Q \text{ (m}^3/\text{h)} < 10$ . Caracteriza-se como um aquífero tipicamente livre com elevada porosidade e condutividade hidráulica ( $K \text{ (m/s)} \cong 10^{-4}$ ), sendo que os poços apresentam profundidade média de 5 m (SERHID, 1998<sup>a</sup>; CPRM, 2014; ALVES, 2020). O aquífero Barreiras é constituído por sedimentos areno-argilosos a silto-argilosos não consolidados a semiconsolidados, localmente com frações conglomeradas. De origem continental, apresenta espessura média da ordem de 80 m. Localiza-se em toda porção central, noroeste e sudeste, possui caráter livre com condutividade hidráulica ( $10^{-4} \leq K \text{ (m/s)} < 10^{-2}$ ) e elevada potencialidade hídrica ( $50 \leq Q \text{ m}^3/\text{h} < 100$ ). Corroborando os mencionados valores de condutividade hidráulica, quando determinou que, nas proximidades da linha de costa, a condutividade hidráulica (K) é da ordem de  $10^{-4}$  m/s.



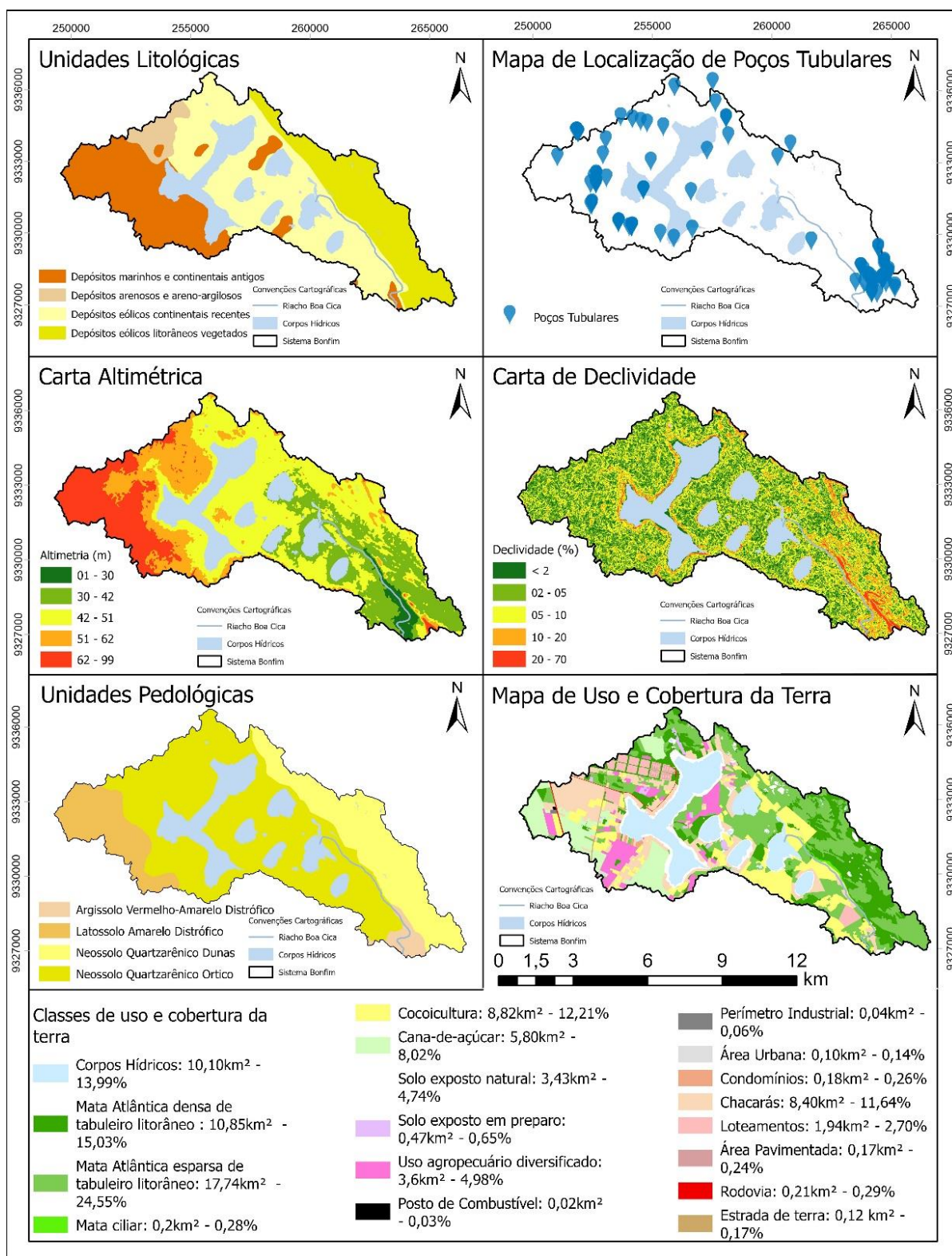


Figura 2 – Informações espaciais utilizadas nos estudos.  
Fonte: Autor (2022).

### 2.3 Relevo

O SB é dividido em dois domínios geomorfológicos: os tabuleiros costeiros, localizados a oeste, apresentando um relevo plano derivado de rochas sedimentares, e as planícies eólicas, que se caracterizam por ondulações e baixa altitude, no qual o processo de erosão é superado pela sedimentação (PEREIRA *et al.*, 2003; IBGE, 2009). Em linhas gerais, quase toda área de estudo apresenta baixas declividades, favorecendo a infiltração, com valores variando entre 2% e 20%.

### 2.4 Unidades pedológicas

A região constitui-se predominantemente por Neossolos Quartzarênicos Órtico (RQo), correspondendo a 50,89% da área total (36,74 km<sup>2</sup>). Compreendendo principalmente a região central do SB, é composto por areias quartzosas distróficas e baixos teores de argilas, menor que 15%, originadas da Formação Barreiras (RADAMBRASIL, 1981; EMBRAPA, 2006). Os neossolos, devido a sua textura arenosa, apresentam maiores taxas de percolação da água no solo, de modo a potencializar a infiltração da água precipitada nessas áreas. (SUDENE, 1971; EMBRAPA, 2006).

A leste predomina o Neossolo Quartzarênico dunas (Dn), composto por areias quartzosas marinhas distróficas, ocupando 21,32% da área total do SB (15,39 km<sup>2</sup>). As características físicas desse grupo correspondem a solos não consolidados, também provenientes da Formação Barreiras, agregando baixos teores de argilas, possuindo alto poder drenante e com maiores profundidades (RADAMBRASIL, 1981; EMBRAPA, 2006).

O Latossolo Amarelo Distrófico (LAd) originário da Formação Barreiras localiza-se a oeste do SB, com 11,45% da área total (8,27 km<sup>2</sup>). Esse solo tem um perfil mais profundo, sendo mais intemperizado que os neossolos Quartzarênicos, possuindo uma permeabilidade moderada a alta (SUDENE, 1971; RADAMBRASIL, 1981; EMBRAPA, 2006).

O Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVAd) ocupa menor área do SB, localizado a sul/sudeste, é não hidromórfico, predominantemente argiloso, profundo e moderadamente drenante, corresponde a 2,33% da área total (1,69 km<sup>2</sup>) (SUDENE, 1971; RADAMBRASIL, 1981; EMBRAPA, 2006).

### 2.5 Uso e Cobertura da terra

As maiores proporções foram mapeadas como Matas Atlânticas Densa e Esparsa de Tabuleiro Litorâneo, Mata Ciliar e Corpos Hídricos com 38,99 km<sup>2</sup> (54%). Na sequência, são encontrados os usos agropecuários, ocupando 30,61 km<sup>2</sup> (43%). Os outros usos foram classificados como atividades antrópicas, envolvendo áreas industriais, condomínios, postos de combustíveis, estradas de terra, rodovias e outros com 2,8 km<sup>2</sup> (3%).

## 3. Metodologia

A figura 3 apresenta um fluxograma que expõe de maneira sintética a metodologia empregada no trabalho.

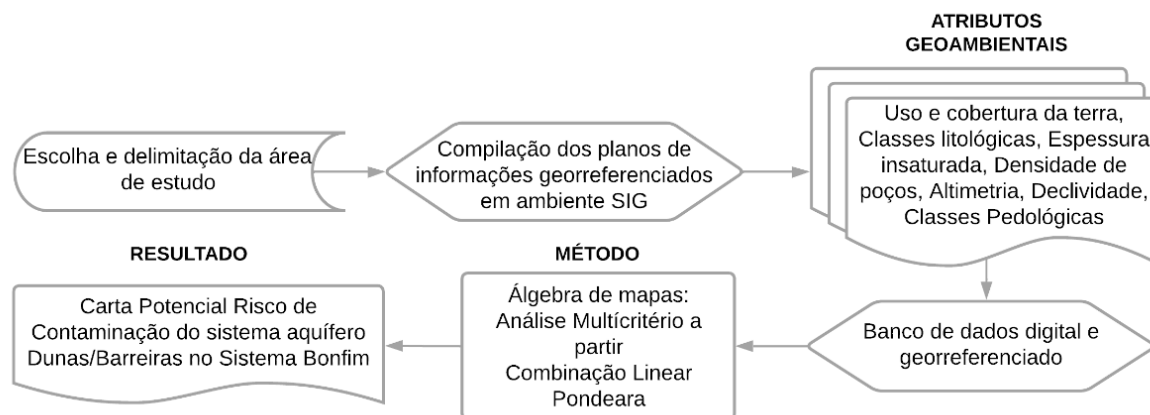


Figura 3 – Fluxograma da metodologia empregada no trabalho.

Fonte: Autor (2022).

Para montagem do banco de dados geográficos digital e georreferenciado, foram utilizados dados matriciais primários, como imagens de satélites e secundários (vetoriais), como mapa geológico, geomorfológico, pedológico, uso e cobertura da terra e o Modelo Digital de Elevação (MDE). Os planos de informações foram georreferenciados no Fuso 25S, e foi adotado o referencial geodésico SIRGAS2000 e sistema de projeção UTM. Os dados foram manipulados e integrados no *software* ArcGIS 10.5 e ArcGIS Pro (Tabela 1).

Tabela 1 – Informações Geográficas utilizadas para montagem do banco de dados

Planos de informação	Descrição	Fonte	Resolução espacial/Escala
Uso e cobertura da terra	Classes de uso	Satélite Sentinel 2A (ESA, 2019), Paiva <i>et al.</i> 2021	10 x 10 m
Modelo Digital de Elevação (MDE)	Hipsometria/Declividade	ALOS – PALSAR JAXA/METI (2011)	12,5 x 12,5 m
Unidades Pedológicas	Tipos de solo	IBGE (2017)	1:250.000*
Hidrogeologia	Densidade de Poços Zona insaturada	SERHID (1999), Pereira (2000), SEMARH (2012)	-
Unidades litológicas	Formação Geológica	Folhas geológicas SB-25-V-C-V: CPRM (2012) e SB.25-Y-A-II E III: CPRM (2014)	1:100.000

\*Embora impresso em escala 1:1.000.000, tais mapeamentos foram realizados com o nível de detalhamento 1:250.000.

Fonte: Autor (2022).

O mapa de cobertura e uso da terra foi elaborado a partir das imagens do satélite Sentinel-2A, adquiridas no dia 25/10/2019, sensor MSI (*Multispectral Instrument*), utilizadas por Lobo de Paiva *et al.* (2022). A partir das composições coloridas RGB (4,3,2 e 8,4,3), o autor realizou a interpretação visual e vetorização em tela dos objetos na superfície terrestre.

Para geração dos mapas de espessura insaturada e densidade de poços tubulares, foram utilizados dados de SERHID (1999), PEREIRA (2000) e SEMARH (2012), tendo sido realizada a espacialização de 122 poços tubulares, incluindo poços produtores e poços de monitoração. A interpolação dos dados dos níveis das águas subterrâneas para elaboração do mapa de espessura insaturada foi realizada a partir da ferramenta *Inverse Distance Weighted* (IDW) (MITAS, MITASOVA; 1999). Para o mapa de densidade de poços, foi utilizado o cálculo da quantidade de recorrência de poços por unidades de raio de influência ponderando-se pela distância, constituindo o índice de Kernel (OLIVEIRA, OLIVEIRA; 2017).

### 3.1 Álgebra de mapas e análise multicritério em ambiente SIG

A álgebra de mapas consiste em uma associação *pixel a pixel* de cada local de um mapa (EASTMAN, 2003; TOMLIN, 1990). Para que a álgebra seja executada, todos os planos de informação devem estar georreferenciados e com mesmo tamanho de *pixel* (TOMLIN, 1990; MALCZEWSKI, 2004), neste caso, utilizou-se 26,5 x 26,5 metros tomando como referência a escala de trabalho adotada (1:100.000). Os planos de informações vetoriais foram transformados para o formato matricial (*raster*) reclassificando-os para atribuição dos pesos, pesos esses definidos por uma análise multicritério.

De acordo com Valente, Petean e Vettorazzi (2017), a partir da incorporação de informações geoespaciais sobre os meios físico, biótico e antrópico, a avaliação multicritério em ambiente SIG tem sido eficiente para definir áreas prioritárias como subsídio ao planejamento territorial. Dessa forma, a metodologia utilizada para identificar áreas que apresentam maiores potenciais de contaminação das águas subterrâneas foi fundamentada na análise multicritério. De acordo com Costa *et al.* (2019) e Valente (2005), o julgamento dos pesos pode ser realizado utilizando uma escala numérica de referência por meio de revisão bibliográfica, consulta a especialistas e/ou baseado em experiências já desenvolvidas na área de interesse.

O uso do solo incide diretamente em um maior ou menor risco à contaminação das águas subterrâneas. De acordo com Nanni *et al.* (2005), o risco é causado não pelas características intrínsecas do aquífero, mas por características específicas, como a existência de atividades poluentes, fator dinâmico, que pode ser controlado. Portanto, foi elaborado um

escalonamento nos valores a partir da antropização do uso do solo, de modo que, para as áreas que ainda conservam as vegetações seminaturais (Mata Atlântica Densa/Esparsa de Tabuleiro de Litorâneo), o valor da ponderação foi considerado como desprezível, tendo em vista que o impacto da presença da vegetação é positivo. No tocante às áreas de usos agropecuários diversificados, rodovias, postos de combustíveis, áreas urbanas, dentre outros usos que refletem impactos negativos, foram atribuídas ponderações conforme o impacto negativo das atividades desenvolvidas, bem como produtos químicos utilizados (Tabela 2).

Quanto às características geológicas, a vulnerabilidade está diretamente relacionada com o tipo das unidades litológicas, sendo escalonados os arenitos, siltitos e argilitos. Neste caso, as unidades geológicas sedimentares mais arenosas, a exemplo dos depósitos eólicos continentais recentes e depósitos eólicos litorâneos vegetados, possuem maiores vulnerabilidades intrínsecas. Em contrapartida, os depósitos areno-argilosos e depósitos marinhos e continentais antigos apresentam características mais argilosas, possuindo uma capacidade de reter mais a lixiviação em seu meio. Portanto, foram atribuídos pesos mais elevados a depósitos sedimentares com menor capacidade de atenuação de poluentes.

A espessura insaturada está diretamente relacionada com a profundidade do nível da água subterrânea. Logo, quanto menor a espessura da zona insaturada do terreno, mais elevada será a vulnerabilidade intrínseca do sistema aquífero.

O fato de ter sido considerada a densidade de poços tubulares justifica-se pelo motivo de que alguns poços poderão estar fora dos padrões construtivos, o que implica materiais geológicos sedimentares porosos e permeáveis conectados com outras fontes de poluição, como fossas sépticas e esgotos. Vale ressaltar que, segundo o Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS) (2019), apenas 0,63% da população do município de São José do Mipibu e 4,76% da população de Nísia Floresta foram contempladas com rede coletora de esgoto.

O relevo foi representado pela hipsometria, desse modo, classes hipsométricas com menores altitudes foram consideradas com maiores potenciais de contaminação, pois representam locais de maior acumulação e infiltração do escoamento superficial.

O grau de inclinação do relevo está relacionado com a maior ou menor velocidade do escoamento superficial, favorecendo com que a água escoe pela superfície ou infiltre, respectivamente. Dessa forma, em declividades mais acentuadas, onde prepondera maior escoamento superficial, foram facultados os menores pesos. Por outro lado, regiões planas, com declives que variam entre 0 a 2% ou até 5%, que favorecem diretamente a infiltração da água no terreno, receberam maiores pesos de maiores valorações.

As propriedades dos solos e sedimentos interferem no retardamento e na percolação de poluentes para as unidades aquíferas. Este comportamento pode ser condicionado pela granulometria e pela condutividade hidráulica. Essas propriedades intrínsecas definem como as soluções potencialmente contaminantes podem alcançar a zona saturada. Assim, os pesos foram estabelecidos com base nos atributos de textura e permeabilidade dos solos, onde a textura arenosa representa os maiores potenciais de contaminação.

Segundo Costa *et al.* (2019), a análise multicritério deve ser realizada por uma equipe multidisciplinar de especialistas, a qual atribuirá pesos e restrições a cada atributo avaliado. Após a hierarquização de cada atributo avaliado, executou-se a Combinação Linear Ponderada (CLP) (VOOGD, 1983). A execução da soma ponderada foi realizada a partir dos planos de informação: cobertura e uso do solo, classes litológicas, espessura insaturada, densidade de poços, hipsometria, declividade e pedologia. Os atributos foram comparados individualmente, em escala gradual considerando uma variação de 0 até 5, de acordo com as peculiaridades de cada atributo quanto à vulnerabilidade intrínseca ou vulnerabilidade específica. Nessa perspectiva, foram definidas as seguintes ponderações: Desprezível = 0, Muito Baixo = 1, Baixo = 2, Médio = 3, Forte = 4 e Muito Forte = 5, conforme pode ser visto na Tabela 2.



Tabela 2 – Pesos atribuídos aos planos de informação para realização da álgebra de mapas.

<b>Ponderação</b>	<b>Classes de cobertura e uso da terra</b>	<b>Peso do atributo (entre 0 e 1)</b>
Desprezível (0)	Mata Atlântica Densa de Tabuleiro Litorâneo	(0,20)
Muito Baixo (1)	Esparça de Tabuleiro Litorâneo	
Baixo (2)	Mata ciliar, Corpo Hídrico	
Médio (3)	Solo exposto natural	
Forte (4)	Estrada de Terra, Loteamentos	
Muito Forte (5)	Uso agropecuário diversificado, Solo exposto em preparo, Côcoicultura	
	<b>Unidades litológicas</b>	
Baixo (2)	Depósitos marinhos e continentais antigos	(0,20)
Médio (3)	Depósitos arenosos e areno-argilosos	
Forte (4)	Depósitos eólicos litorâneos vegetados	
Muito Forte (5)	Depósitos eólicos continentais recentes	
	<b>Classes de espessura insaturada (m)</b>	
Muito Baixo (1)	42,05 – 33,89	(0,20)
Baixo (2)	33,89 – 25,72	
Médio (3)	25,72 – 17,56	
Forte (4)	17,56 – 09,39	
Muito Forte (5)	09,39 – 01,23	
	<b>Classe de densidade de poços (Qnt/raio)</b>	
Muito Baixo (1)	0,001 – 1,201	(0,13)
Baixo (2)	1,202 – 2,405	
Médio (3)	2,406 – 3,607	
Forte (4)	3,608 – 4,810	
Muito Forte (5)	4,811 – 6,012	
	<b>Classes de hipsometria (m)</b>	
Muito Baixo (1)	99 – 80	(0,06)
Baixo (2)	80 – 60	
Médio (3)	60 – 40	
Forte (4)	40 – 20	
Muito Forte (5)	20 – 1	
	<b>Classes de declividade (%)</b>	
Muito Baixo (1)	> 20	(0,06)
Baixo (2)	10 – 20	
Médio (3)	5 – 10	
Forte (4)	2 – 5	
Muito Forte (5)	< 2	
	<b>Unidades pedológicas</b>	
Baixo (2)	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico	(0,15)
Médio (3)	Latossolo Amarelo Distrófico	
Forte (4)	Neossolo Quartzarênico Ortico	
Muito Forte (5)	Neossolo Quartzarênico Dunas	

Fonte: Autor (2022).

## 4. Resultados e discussão

### 4.1 Espessura Insaturada e Densidade de Poços

Na Figura 4, são apresentados os mapas que retratam a espessura insaturada do sistema aquífero Dunas-Barreiras e da densidade de poços. A espessura insaturada, como sendo a distância entre a superfície do solo e o topo da zona saturada, foi verificada por meio das medições das profundidades dos níveis estáticos das águas subterrâneas oriundas de poços tubulares e piezômetros obtidas em SERHID (1999), PEREIRA (2000) e SEMARH (2012). A densidade de poços é entendida como a taxa de recorrência dos poços tubulares encontrados por raio de influência.

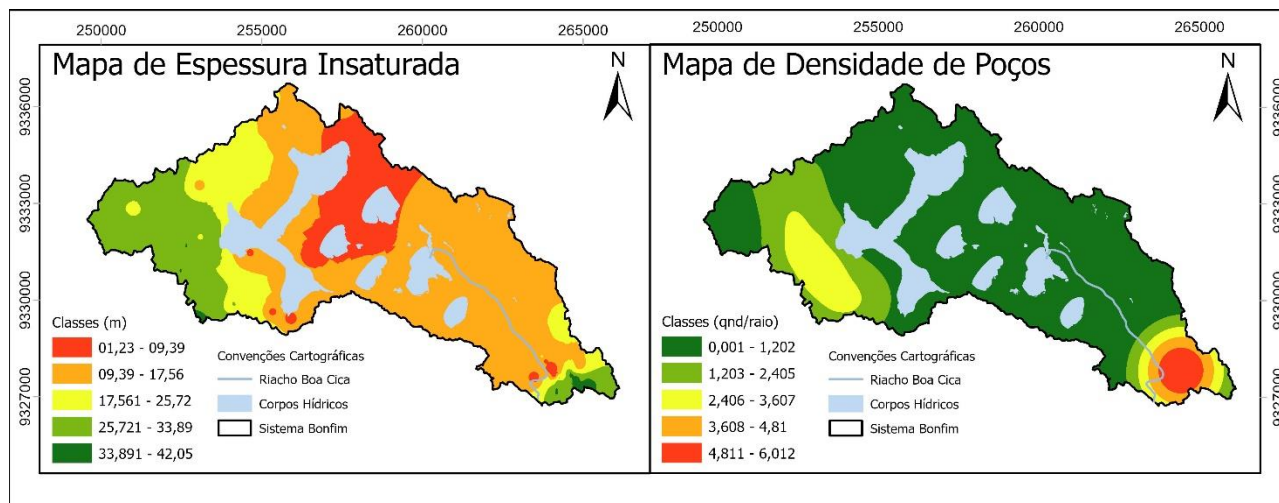


Figura 4a – Espessura Insaturada, Figura 4b – Densidade de Poços do Sistema Bonfim.

Fonte: Autor (2022).

Manoel Filho e Castro (2002) destacam a infiltração como sendo um dos fatores influenciadores das relevantes espessuras saturadas favorecendo a recarga do aquífero e a renovação das águas subterrâneas. Essa condição associada à facilidade de captação das águas subterrâneas e a excelente qualidade na sua condição natural têm viabilizado a capacidade de provimento hídrico para diversos setores do estado, especialmente para o abastecimento. Porém, faz-se necessária uma atenção especial para a densidade de poços na região tendo em vista a sustentabilidade do aquífero quanto aos seus aspectos quantitativos e qualitativos.

### 4.2 Potencial Risco de Contaminação

A partir dos cruzamentos dos planos de informações georreferenciados e ponderados (Uso e cobertura da terra, classes litológicas, espessura insaturada, densidade dos poços, altimetria, declividades e classes pedológicas), foi possível reconhecer as áreas com maiores ou menores potenciais risco de contaminação, conforme apresentado na Carta de Potencial Risco de Contaminação do Sistema Bonfim (Figura 5).

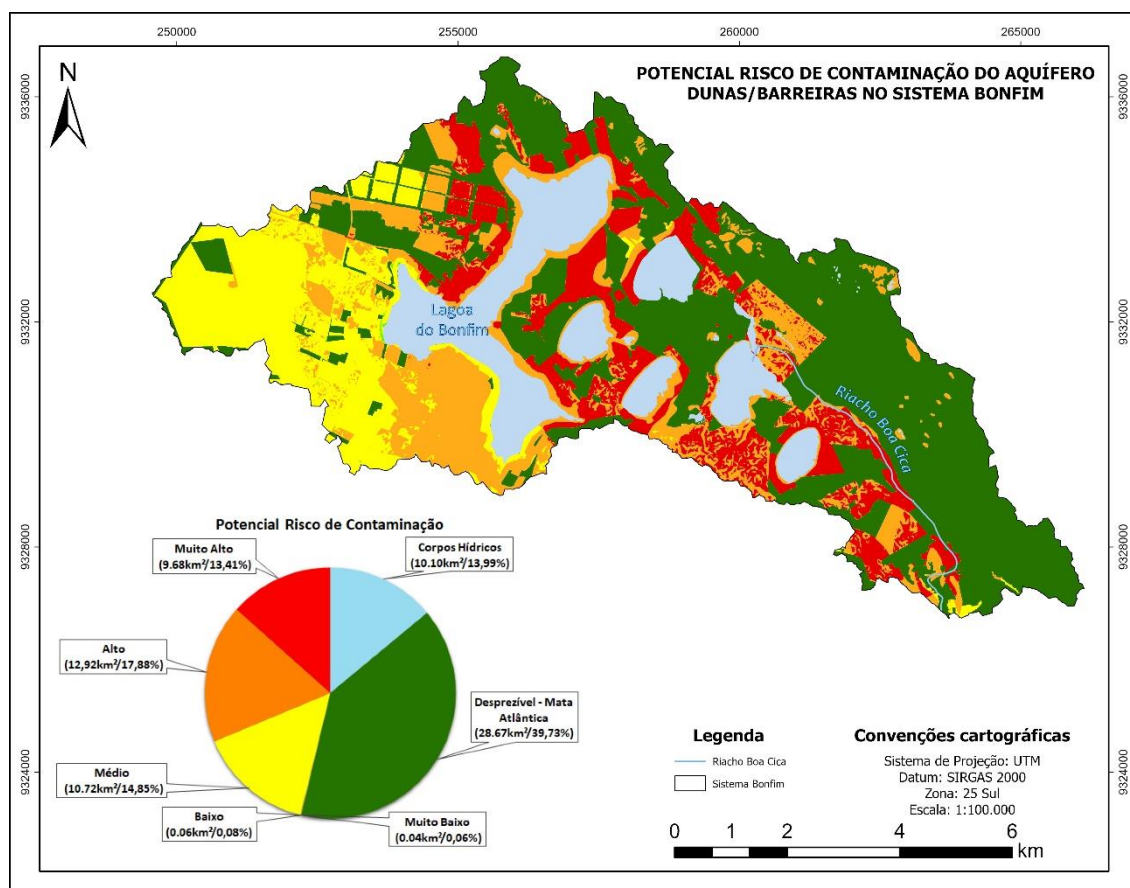


Figura 5 – Carta do Potencial Risco de Contaminação do Sistema Bonfim.

Fonte: Autor (2022).

Os maiores potenciais riscos de contaminação das águas subterrâneas estão representados pelas classes denominadas muito alto, alto e médio, que totalizam em termos de área territorial 33,32 km<sup>2</sup>. Os potenciais riscos classificados como desprezíveis abrangem uma área de 28,67 km<sup>2</sup> (39,73%), que estão associadas às áreas de mata e do espelho d'água, onde não há atividade antrópica mapeada.

O potencial risco Muito Alto envolve uma área de 9,68 km<sup>2</sup> (13,41 %) abrangendo as porções noroeste, central e sudeste do SB. As litologias se apresentam nessa porção como depósitos eólicos continentais recentes e depósitos eólicos litorâneos vegetados possuindo elevada porosidade e condutividade hidráulica ( $K \text{ (m/s)} \cong 10^{-4}$ ) (ALVES, 2020). Geologicamente, são representados por areias finas a médias, bem arredondadas e selecionadas. Essa textura arenosa deu origem aos neossolos quartzarênicos órtico (<15% de argila) de alta permeabilidade (entre  $10^{-3}$  e  $10^{-1}$  cm/s), onde predomina espessura insaturada variando de 1,23 a 17,56 metros. Nessas regiões os usos agrícolas, como cultivos de cana-de-açúcar e cocoicultura e a presença de chácaras, com o uso de fossas sépticas, constituem as principais fontes de contaminação.

O potencial risco classificado como alto envolveu a maior área territorial, com predominância a oeste da Lagoa do Bonfim e em regiões de transição de mata atlântica para áreas com atividades antrópicas, e compreende 12,92 km<sup>2</sup> ou 17,88%. A porção Oeste do SB apresentou, em sua maioria, o potencial risco de contaminação Médio envolvendo uma área de 10,72 km<sup>2</sup> equivalente a 14,85 % da área analisada. Contribuem para este potencial risco a presença de postos de combustíveis, instalações industriais, cultivo de cana-de-açúcar e de cocoicultura, uso agropecuário diversificado e a presença de chácaras. No caso específico da presença de chácaras, essas contam com a disposição de efluentes domésticos, através de fossas e tanques sépticas.

A classe de Potencial risco de contaminação Médio se apresenta predominantemente na porção oeste do SB, correspondendo às atividades antrópicas como áreas industriais, áreas pavimentadas, chácaras, loteamentos, cultivo de cana-de-açúcar e cocoicultura, solo exposto em preparo, e o uso agropecuário diversificado. Considerando os atributos avaliados, essa classe de potencial está associada à presença de sedimentos com matriz areno-argilosa, do tipo de solo

(Latosolo Amarelo Distrófico com textura areno-argilosa e com coeficiente de permeabilidade entre  $10^{-6}$  e  $10^{-4}$  cm/s), além da expressiva espessura da camada insaturada (entre 33,89 e 42,05 m) em grande parte da área e da baixa densidade de poços (<4 por km<sup>2</sup>). No entanto, deve-se estar atento ao baixo grau de inclinação do relevo, onde predominam as declividades abaixo de 10%, que consequentemente favorecem as maiores taxas de infiltração de água, como também a infiltração de possíveis contaminantes derivados das atividades humanas e da lixiviação do próprio terreno.

As regiões do SB que apresentaram o potencial risco Muito Baixo e Baixo foram quase irrisórias, desse modo, esteve presente em apenas 0,10 km<sup>2</sup>, envolvendo 0,12%. As áreas classificadas como potencial risco de contaminação muito baixo e baixo estão associadas às áreas descobertas, que se manifestam de maneira natural em regiões interdunares, nas margens das lagoas do sistema e em zonas de transição das matas atlânticas densa/esparsa de tabuleiro litorâneo e pequenas áreas com uso agropecuário diversificado. Fisicamente, essas áreas estão posicionadas em cotas de altimétricas mais elevadas (entre 61 e 80 m), onde predomina o latossolo amarelo de textura areno-argilosa (entre 15 e 35% de argila), com coeficiente de permeabilidade entre  $10^{-6}$  e  $10^{-4}$  cm/s, sobreposto aos arenitos intercalados com siltitos e argilitos da Formação Barreiras. A espessura insaturada encontra-se, em sua maioria, na faixa de 17,56 m a 42,05 e a área possui média densidade de poços (<4 por km<sup>2</sup>).

O potencial risco classificado como Desprezível representa as áreas de Mata Atlântica Esparsa e Densa de Tabuleiro Litorâneo, predominantemente; essa região se mantém como áreas seminaturais, sem a presença de atividades antrópicas e os corpos hídricos.

Conforme o mapa de uso e cobertura da terra (Figura 2) e a carta do potencial risco de contaminação do Sistema Bonfim (Figura 5), verifica-se que os impactos no sistema hídrico, superficial ou subterrâneo, estão relacionados principalmente à presença de muitas residências, que têm como principal dispositivo de coleta dos efluentes o tanque séptico, e às áreas de cultivos agrícolas. A outra situação que merece destaque, mesmo constituindo um percentual baixo de uso e ocupação do solo, são os postos de combustíveis.

Quanto aos impactos oriundos da presença de fossas sépticas, estas compreendem uma das mais deflagradas fontes de poluição das águas subterrâneas, visto que potencializam as concentrações de nitrato, que pode ser mobilizado das camadas superiores do solo para a água e representa o estágio final da oxidação de matéria orgânica (APOITIA, 2003; FEITOSA *et al.*, 2008). Assim, sendo o íon nitrato um contaminante persistente, especialmente em ambientes oxidantes, como as águas subterrâneas, onde se encontra fortemente estabilizado e de difícil diluição ou remoção, pelos processos simples de tratamento de água, é um indicador que necessita ser monitorado, principalmente nos poços tubulares da rede de abastecimento público. Castro *et al.* (2014) verificaram concentrações de nitrato próximos do limite máximo permitido, que é de 10 mg/L, conforme estabelecido na Portaria de Consolidação Nº 5, de 28 de setembro de 2017. A ocorrência destas concentrações foram principalmente no poço PT 07, localizado a sudoeste da área de estudo, onde apresentam mais moradias.

A outra fonte de contaminação das águas por nitrato são as áreas de cultivo agrícola, que, dependendo do manejo, poderão causar efeitos drásticos. Nesse caso, existe na área a prática da monocultura, relacionada ao cultivo da cana de açúcar e da cocoicultura, de modo que a prática da monocultura leva a um desequilíbrio nutricional da planta do solo e, logo, o número de pragas e de doenças aumenta com o passar dos anos (ALTIERI; PONTI; NICHOLLS, 2012; RAMJEGATHESH *et al.*, 2012). Diante da situação, torna-se fundamental a aplicação de agrotóxicos, adubos e fertilizantes para que não haja perda do produto/produtividade.

Os pesticidas aparecem como uma maneira eficaz e econômica para melhorar o rendimento, do ponto de vista produtivo, mas, em contrapartida, podem trazer consequências graves ao meio ambiente, contaminando diretamente e indiretamente o ar, a água, o solo e o ecossistema geral, causando sérios riscos à saúde dos seres vivos (RIMAL *et al.*, 2019). Uma das medidas de alternativas para o controle de pragas e doenças na cocoicultura é pelo método convencional da pulverização/microaspersão ou por fertirrigação, podendo ser executada de forma mecânica ou manual com dose de agrotóxicos e fertilizantes já diluídos em água (LAMICHHANE *et al.*, 2016). Dessa forma, essa cultura acaba se tornando uma fonte de poluição difusa, a qual apresenta compostos nocivos, como captana, clorotalonil, carbendazim, lafenurum, entre outros compostos inorgânicos, além de compostos orgânicos utilizados para aumentar a fertilidade do solo (BRITO *et al.*, 2002). Consequentemente, toda essa carga de compostos orgânicos e inorgânicos que são dispersadas/inseridas de diversas formas em terrenos arenosos de culturas de coco aumenta diretamente o potencial risco de contaminação das águas subterrâneas, podendo gerar danos irreparáveis ao manancial caso esses poluentes consigam ser lixiviados por todo perfil pedológico no SB.

Em relação ao cultivo da cana-de-açúcar, o seu subproduto - a vinhaça - apresenta concentrações de potássio, cálcio, magnésio, enxofre e micronutrientes, sendo reutilizado como fertilizante para o próprio cultivo, no entanto, tem poder poluente até cem vezes maior que o esgoto doméstico (SILVA *et al.* 2007). Dessa maneira, o cultivo da cana em solos

arenosos de alta permeabilidade e menor espessura insaturada (1,23 a 9,39 metros) favorece diretamente a lixiviação desses contaminantes para a reserva hídrica subterrânea.

Em relação às fontes de contaminação compreendidas pelos postos de combustíveis, estas poderão potencializar os riscos de contaminação caso estejam em desconformidade com as normas vigentes. Durante muito tempo, os postos de gasolina usaram tanques de ferro enterrados no solo. Ao longo dos anos, esses reservatórios se tornaram susceptíveis à corrosão, ocasionando vazamentos e consequentes contaminações do solo e das águas subterrâneas (COSTA et al. 2019). Atualmente os postos de gasolina estão subordinados à regulamentação própria com relação às normas de segurança e ambientais, no entanto, a atividade ainda manuseia contaminantes como: Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xilenos Totais (BTEX) e Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPA's). Esses compostos têm características físicas mais densas que a água, apresentam baixa solubilidade e são altamente tóxicos e persistentes em superfície, podendo causar danos irremediáveis ao aquífero (TEIXEIRA et al., 2009). Desta forma, apesar de pequena, a área que contempla os postos de combustíveis pode representar um potencial risco de contaminação devido às substâncias inorgânicas derivadas do petróleo caso não se cumpram as diretrizes mínimas para áreas de armazenamento e abastecimento de combustíveis.

Considerando o atual mapeamento de uso e ocupação do solo e a carta do potencial risco de contaminação do Sistema Bonfim, juntamente com as características naturais e a própria vulnerabilidade intrínseca do Sistema Aquífero Dunas/Barreiras no Complexo lacustre Bonfim, faz-se necessário destacar alguns pontos relacionados à recarga e ao escoamento superficial.

De acordo com Manoel Filho e Castro (2002), a região lacustre do Bonfim se desenvolve sobre um tabuleiro de idade terciária com extensiva cobertura de areias eólicas, homogêneas e inconsolidadas e com elevada capacidade de infiltração, sendo assim, responsável pela ausência de uma rede de drenagem superficial e, possivelmente, pela formação de lagoas sobre estes sedimentos de tabuleiro. A predominância na área é de um sistema aquífero do tipo livre, apresentando localmente setores semiconfinados, logo essa predominância do aquífero livre possibilita uma situação de interação com as lagoas da região. Os autores ainda destacam que, em uma situação em que a intensidade das chuvas seja superior à capacidade de infiltração do solo, esse comportamento pode gerar recarga de intensidade máxima e "run-off", situação que pode ocasionar o escoamento para depressões interiores em pontos isolados, criando bacias de infiltração a partir das quais se formam domos de água subterrânea. Manoel Filho e Castro (2002) complementam a interpretação desse comportamento destacando que, se o nível freático é pouco profundo, as bacias podem alcançá-lo rapidamente e originar lagoas permanentes, conectadas com as águas subterrâneas. Caso contrário, as bacias formam lagoas temporárias com água suspensa, que desaparece depois de concluído o processo de percolação profunda até o nível freático. Esse mesmo estudo considerou o escoamento superficial desprezível para o balanço hídrico, elaborado pelo método de Thornthwaite (Thornthwaite & Matter 1957), que indicou uma estimativa de recarga média de 485,0 mm/ano.

Diante do exposto, percebe-se que, da mesma forma que existe uma favorabilidade para o aquífero ser recarregado com as águas das precipitações, também existe o favorecimento de uma alimentação do sistema hídrico subterrâneo a partir destas águas com concentrações de poluentes relacionados às fontes de contaminações discutidas e consequente risco potencial de contaminação.

#### **4. Considerações finais**

Uma grande parcela do SB, retratando 46,14% da área, apresentou níveis consideráveis de potencial risco de contaminação das águas subterrâneas (Médio, Forte e Muito Forte), apenas 0,14 % da área apresentou potencial Muito Baixo e Baixo. Por outro lado, 39,73% da área apresentou potencial de contaminação desprezível, pois é coberta por Mata Atlântica Densa/Esparça de Tabuleiro Litorâneo que se mantém como áreas seminaturais, sem a presença de atividades antrópicas, não oferecendo grandes riscos à contaminação das águas subterrâneas e 13,99% ocupada por corpos hídricos superficiais.

As fontes potenciais riscos de contaminação estão relacionadas à presença de intervenções antrópicas, como posto de combustível, rodovia, áreas industriais, áreas pavimentadas, condomínios, chácaras, loteamentos, áreas de cultivo de cana-de-açúcar, solo exposto em preparo e áreas com o cultivo de cocoicultura. Além delas, existe um processo de expansão urbana caracterizado pela presença de chácaras e condomínios, que possuem predominantemente sistemas de saneamento individualizado, sendo cruciais para elevar o nível potencial risco de contaminação das águas subterrâneas. O posto de combustível tem seus possíveis contaminantes ligados a hidrocarbonetos, derivados de petróleo, que facilmente extrapolam a capacidade suporte do sistema elevando o potencial risco de contaminação por compostos inorgânicos. Tão pouco diferente, as rodovias, além de impermeabilizarem grandes áreas e afetarem toda região inserida, seja o meio físico, seja o biótico, carregam uma grande carga de metais e metais pesados. Essa descarga, pela baixa capacidade de degradação desses metais, eleva o risco de contaminação. A atividade da cocoicultura está relacionada com uso de pesticidas, fungicidas e

herbicidas. A cultura da cana-de-açúcar compreende o uso da fertirrigação com vinhaça, que são ricos em potássio, cálcio, magnésio, enxofre e micronutrientes. Nesse tipo de atividade, o uso de agroquímicos é comum e representa grande potencial risco de contaminação dos aquíferos.

Nesse contexto, destacam-se os sete poços da primeira bateria de captação da Adutora Monsenhor Expedito, que estão localizados em áreas com potenciais Médio a Forte, podendo comprometer o padrão de potabilidade destas águas, utilizadas por cerca de 300 mil pessoas que usufruem dessa água diariamente.

A nível estadual/nacional, a Política Nacional de Meio Ambiente, Lei n 6.938, de 31 de agosto de 1981, tem em seus instrumentos o Zoneamento e Licenciamento Ambiental. Dessa forma, este trabalho serve como parâmetro e instrumento para o gerenciamento do uso da terra a ser utilizado por órgãos ambientais, como o Instituto de Desenvolvimento Sustentável (IDEMA/RN) e IBAMA. Com relação às águas superficiais e subterrâneas, o RN dispõe de uma Política Estadual de Recursos Hídricos, instituída pela Lei Estadual n° 6908, de 01 de julho de 1996, a qual trouxe, no Art. 2° do Capítulo I, a outorga do direito de uso da água como um instrumento de essencial para a gestão dos recursos hídricos. Em consonância, o decreto n° 13.283 de 22 de março de 1997 trata da regulamentação da outorga do direito de uso dos recursos hídricos e do licenciamento de obras de oferta hídrica previstas na lei n° 6908/96. O órgão responsável pelas outorgas das águas subterrâneas é o Instituto de Gestão das Águas (IGARN).

Para o setor privado, uma visão integrada entre as atividades antrópicas e os meios físico/biótico favorece a compreensão das implicações que os empreendimentos poderão causar considerando a atual situação de risco potencial de contaminação de algumas áreas no SB, ou, até mesmo, compreender o nível de implicação que poderão enfrentar em um licenciamento ambiental ou em uma outorga do direito de uso da água, nessa região.

## Referências

- ALLER, L et al. DRASTIC: a standardized system 542 for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological settings. *US Environmental Protection Agency*, Ada, Oklahoma, 641.
- ALTIERI, M. A.; PONTI, L.; NICHOLLS, C. I. Soil Fertility, Biodiversity and Pest Management. *Biodiversity And Insect Pests*, [s.l.], p. 72-84, 15 maio 2012. John Wiley & Sons, Ltd. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/9781118231838.ch5>.
- ALVES, R. S. *O papel de falhas como condutos hidráulicos a partir da análise de modelos numéricos e geolétricos - o exemplo do aquífero Barreiras-RN*. 2020. 144 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós Autora: Orientador: Tese N° 62/PPGG outubro de 2020 Natal, Brasil. Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, 2020.
- APOITIA, L. F. M. *Caracterização preliminar do quimismo das águas subterrâneas em Cuiabá - MT*. 2003. 130 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.
- ASSEMBLEIA RN, TV. *Audiência Pública sobre a revitalização da Lagoa do Bonfim*. Youtube, 16 de nov 2021. Disponível em: <[https://www.youtube.com/watch?v=TJSrZ9S22j4&ab\\_channel=TVAssembleiaRN](https://www.youtube.com/watch?v=TJSrZ9S22j4&ab_channel=TVAssembleiaRN)>. Acesso em: 25 de mai 2022
- BONSOR, H. *et al. Seasonal and Decadal Groundwater Changes in African Sedimentary Aquifers Estimated Using GRACE Products and LSMs*. *Remote Sensing*, [S.L.], v. 10, n. 6, p. 904, 8 jun. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs10060904>.
- BRASIL. (2017). Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. Portaria de consolidação n.º 5, de 28 de setembro de 2017. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. Anexo XX - *Do controle e da vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de Potabilidade*. Diário Oficial da União, Brasília, DF. 825p.
- BRITO, N. M. *et al. Determination of pesticide residues in coconut water by liquid extraction and gas chromatography with electron-capture plus thermionic specific detection and solid-phase extraction and high performance liquid chromatography with ultraviolet detection*. *Journal Of Chromatography A*, [s. l], v. 1, n. 957, p. 201-209, mar. 2002. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(02\)00351-5](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(02)00351-5)



- BUSICO, G. *et al.* A novel hybrid method of specific vulnerability to anthropogenic pollution using multivariate statistical and regression analyses. *Water Research*, [S.L.], v. 171, p. 115386, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2019.115386>.
- CASTRO, V. L. L. *et al.* Comportamento do nitrato em poços tubulares no entorno da Lagoa do Bonfim – Nísia Floresta/RN. *Águas Subterrâneas*, [S.L.], p.1-13, 2014. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28315/18>
- CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Poluição das águas subterrâneas. São Paulo: SP*, 2018. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguassubterraneas/informacoesbasicas/poluicao-das-aguassubterraneas/#:~:text=As%20principais%20fontes%20potenciais%20de,atividades%20industriais%2C%20como%20ind%20C3%BAstrias%20qu%20C3%ADmicas%2C>
- CHENINI, I.; ZGHIBI, A.; KOUZANA, L. *Hydrogeological investigations and groundwater vulnerability assessment and mapping for groundwater resource protection and management: state of the art and a case study*. *Journal Of African Earth Sciences*, [S.L.], v. 109, p. 11-26, set. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.05.008>.
- Civita, M. *The Maps of Groundwater Vulnerability to Pollution: Theory and Practice*. Quaderni di Tecniche di Protezione Ambientale, Pitagora., 1994.
- COSTA, C. W. *et al.* Combinação de atributos naturais e antrópicos na definição do potencial de contaminação de aquíferos, sudeste do Brasil. *Sociedade & Natureza*, [S.L.], v. 32, p. 657-673, 11 set. 2020. EDUFU - Editora da Universidade Federal de Uberlândia. <http://dx.doi.org/10.14393/sn-v32-2020-56221>
- COSTA, C. W. *et al.* Potencial de Contaminação de Aquíferos por Atividades Antrópicas da Bacia do Ribeirão do Meio - Município de Leme - SP. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 20, p. 218-225, 2015. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v20n1.p218-225>
- COSTA, C. W. *et al.* Potential for aquifer contamination of anthropogenic activity in the recharge area of the Guarani Aquifer System, southeast of Brazil. *Groundwater For Sustainable Development*, [S.L.], v. 8, p. 10-23, abr. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gsd.2018.08.007>.
- CPRM – Serviço Geológico Do Brasil. Carta Geológica Folha SB.25-V-C-V. Natal. 2012. Escala 1:1.000.000.
- CPRM – Serviço Geológico Do Brasil. Carta Geológica Folha SB.25-Y-A-II E III. Natal. 2014. Escala 1:1.000.000.
- CPRM, Serviço Geológico Do Brasil. Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Norte. Ministério de Minas e Energia – Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Brasília, 2006. Escala 1:500.000.
- DANIELA, D. *et al.* Nitrate trends in groundwater of the Campania region (Southern Italy). *Environmental Science And Pollution Research*, [S.L.], v. 26, n. 3, p. 2120-2131, 14 dez. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-017-0978-y>.
- DELINOM, R. M. *et al.* The contribution of human activities to subsurface environment degradation in Greater Jakarta Area, Indonesia. *Science Of The Total Environment*, [S.L.], v. 407, n. 9, p. 3129-3141, abr. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.10.003>.
- DEVIC, G.; DJORDJEVIC, D.; SAKAN, S. *Natural and anthropogenic factors affecting the groundwater quality in Serbia*. *Science of the Total Environment*, [s. l.], v. 468-469, p. 933-942, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.09.011>.
- EASTMAN, J.R. *Decision Support: Decision Strategy Analysis*. Clark university (Ed.). IDRISI Andes Guide to GIS and Image Processing. Worcester: Clark Labs, 2006.
- EASWER, Vishal *et al.* Vulnerability mapping of the Paravanar sub-basin aquifer (Tamil Nadu, India) in SINTACS model for efficient land use planning. *Environmental Research*, [S.L.], v. 204, mar. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2021>.

- EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 2. ed. Brasília, DF. 2006. 286 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/338818>.
- FARJAD, B. *et al.* *Groundwater intrinsic vulnerability and risk mapping*. Proceedings Of The Institution Of Civil Engineers - Water Management, [s.l.], v. 165, n. 8, p. 441-450, set. 2012. Thomas Telford Ltd. DOI: <http://dx.doi.org/10.1680/wama.10.00018>.
- FEITOSA E. C.; MELO J.G. *Relatório Diagnóstico dos dados e Informações disponíveis*. Plano Estadual de Recursos Hídricos. Natal, 1997. Secretaria Estadual de Recursos Hídricos/Hidroservice engenharia Ltda.
- FEITOSA, F.A.C *et al.* Serviço Geológico Do Brasil - CPRM. *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008. 812 p.
- FILIPPIS, G. de *et al.* *Water Quality Assessment: a quali-quantitative method for evaluation of environmental pressures potentially impacting on groundwater, developed under the m.i.n.o.re. project*. International Journal Of Environmental Research And Public Health, [S.L.], v. 17, n. 6, p. 1835, 12 mar. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph17061835>.
- FOSTER, S.; HIRATA, R. *Determinacion del riesgo de contaminacion de aguas subterraneas, una metodologia basada em datos existents*. Lima: Centro Panamericano de Ingenieria Sanitária y Ciências del Ambiente-Cepis, 1991. 81 p.
- FOSTER, S.; VENTURA, M.; HIRATA, R. *Poluição das águas subterrâneas: um documento executivo da situação da América Latina e Caribe com relação ao abastecimento de água potável*. São Paulo: Instituto Geológico, 1993. 55 p.
- GLEESON, Tom. *Global Groundwater Sustainability*. Groundwater, [S.L.], v. 58, n. 4, p. 484-485, 11 mar. 2020. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/gwat.12991>.
- GOMES, M. C. R.; MENDONÇA, L. A. R.; CAVALCANTE, I. N. *Mapping of Vulnerability and Risk of Groundwater Pollution in the Eastern Portion of the Araripe Sedimentary Basin, Ceará, Brasil*. Anuário do Instituto de Geociências - Ufrj, [S.L.], v. 41, n. 3, p. 252-259, 4 dez. 2018. Instituto de Geociências - UFRJ. [http://dx.doi.org/10.11137/2018\\_3\\_252\\_259](http://dx.doi.org/10.11137/2018_3_252_259).
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Manual Técnico de Geomorfologia*. 2 ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2009. 175p
- IPCC AR6 (Intergovernmental Panel on Climate Change). DOUVILLE, H., K. RAGHAVAN, J. RENWICK, R.P. ALLAN, P.A. ARIAS, M. BARLOW, R. CERESO-MOTA, A. CHERCHI, T.Y. GAN, J. GERGIS, D. JIANG, A. KHAN, W. POKAM MBA, D. ROSENFELD, J. TIERNEY, O. ZOLINA, 2021: *Water Cycle Changes*. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 2021, p. 1055–1210.
- JAHAN, A. EDWARDS, K.L. *Multi-criteria Decision-Making for Materials Selection*. Ali Jahan, Kevin L. Edwards. Butterworth-Heinemann. 31-41 p.2013. ISBN 9780080993867. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099386-7.00003-9>.
- KUMAR, R. de *et al.* Strong hydroclimatic controls on vulnerability to subsurface nitrate contamination across Europe. Nature Communications, [S.L.], v. 11, n. 1, dez. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19955-8>
- LA TORRE, G. L. *et al.* Assessment and Monitoring of Fish Quality from a Coastal Ecosystem under High Anthropic Pressure: a case study in southern italy. International Journal Of Environmental Research And Public Health, [S.L.], v. 17, n. 9, p. 3285, 8 maio 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph17093285>.
- LAMICHHANE, J. R. *et al.* *Toward a Reduced Reliance on Conventional Pesticides in European Agriculture*. Plant Disease, [s.l.], v. 100, n. 1, p. 10-24, jan. 2016. <http://dx.doi.org/10.1094/pdis-05-15-0574-fe>.

- LOBO DE PAIVA, A. M. *et al.* *Fragilidade Ambiental aplicada em área de manancial no Nordeste brasileiro*. Revista de Geociências do Nordeste, [S. l.], v. 8, n. 1, p. 128–147, 2022. <http://dx.doi.org/10.21680/2447-3359.2022v8n1ID24368>.
- MACHATE, D. J. *et al.* *High Concentration of Heavy Metal and Metalloid Levels in Edible Campomanesia adamantium Pulp from Anthropic Areas*. International Journal Of Environmental Research And Public Health, [S.L.], v. 18, n. 11, p. 5503, 21 maio 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph18115503>.
- MALAKOOTIAN, M.; NOZARI, M. *GIS-based DRASTIC and composite DRASTIC indices for assessing groundwater vulnerability in the Baghin aquifer, Kerman, Iran*. Natural Hazards And Earth System Sciences, [S.L.], v. 20, n. 8, p. 2351-2363, 26 ago. 2020. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-20-2351-2020>.
- MALCZEWSKI, J. *GIS-based land-use suitability analysis: A critical overview*. Progress in Planning, v. 62, n. 1, p. 3-65, 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.progress.2003.09.002>
- MANOEL FILHO, J.; CASTRO, V. L. L. *Avaliação e Exploração do aquífero Dunas-Barreiras na região do sistema lacustre do Bonfim-RN*. In: XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Florianópolis, 2002.
- MARANGON, F. *et al.* *Land use and groundwater resources potential vulnerability to contamination*. Agriculture & Forestry, v. 63, p. 211-222, 2017. <http://dx.doi.org/10.17707/AgricultForest.63.1.25>
- MARIJÍĆ, V. F. *et al.* *Influence of technological and municipal wastewaters on vulnerable karst riverine system, Krka River in Croatia*. Environmental Science And Pollution Research, [S.L.], v. 25, n. 5, p. 4715-4727, 2 dez. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-017-0789-1>.
- MARTÍNEZ, D. *et al.* *Distribution and origin of nitrate in groundwater in an urban and suburban aquifer in Mar del Plata, Argentina*. Environmental Earth Sciences, [S.L.], v. 72, n. 6, p. 1877-1886, 13 fev. 2014. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-014-3096-x>.
- MELO, J. G.; FIGUEREDO, E. M. *Comportamento hidráulico e vulnerabilidade do sistema aquífero Dunas/Barreiras à poluição na área de Natal (RN)*. Revistas Águas Subterrâneas, São Paulo, v. 13, n. 1, p. 1-12, 9 dez. 1990. DOI: <https://doi.org/10.14295/ras.v13i1.11298>.
- MITAS, L. MITASOVA, H. *Spatial Interpolation. Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications*, [S.L.], GeoInformation International, Wiley, 481-492, 1999.
- NANNI, A. S. *et al.* *Vulnerabilidade natural e risco de contaminação do aquífero Serra Geral pela suinocultura na região das missões - RS*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 16., 2005, João Pessoa. Anais... [S.l.: s.n.], 2005. Disponível em: <[www.dpi.inpe.br/spring/portugues/arquivos\\_publicacoes/xvi\\_sbrh.pdf](http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/arquivos_publicacoes/xvi_sbrh.pdf)>.
- NIMER, E. *Um modelo metodológico de Classificação de Climats*. Revista Brasileira de Geografia. Vol 41, n. 4, p. 59-89. Rio de Janeiro, 1979.
- OLIVEIRA, U. C.; OLIVEIRA, P. S. *Mapas de Kernel como Subsídio à Gestão Ambiental: Análise dos Focos de Calor na Bacia Hidrográfica do Rio Acaraú, Ceará, nos Anos 2010 a 2015*. Espaço Aberto, PPGG - UFRJ, Rio de Janeiro, V. 7, N.1, p. 87-99, 2017 87. ISSN 2237-3071.
- OROJI, B. *Groundwater vulnerability assessment with using GIS in Hamadan–Bahar plain, Iran*. Applied Water Science, [S.L.], v. 9, n. 8, p. 1-13, 25 out. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s13201-019-1082-x>.
- PARKINSON, S.; HUNT, J. *Economic Potential for Rainfed Agrivoltaics in Groundwater-Stressed Regions*. Environmental Science & Technology Letters, [S.L.], v. 7, n. 7, p. 525-531, 1 jun. 2020. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/acs.estlett.0c00349>.
- PEIXOTO, F. S.; CAVALCANTE, I. N. *Vulnerabilidade aquífera e risco de contaminação da água subterrânea em meio urbano*. Geologia USP. Série Científica, [S. l.], v. 19, n. 2, p. 29-40, 2019. DOI: 10.11606/issn.2316-9095.v19-142384. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/guspssc/article/view/142384>.

- PEREIRA, R. *Caracterização Hidrológica do Sistema Lacustre Bonfim – RN*. 2000. 212p. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ.
- PEREIRA, R. *et al.* *Avaliação do impacto da captação d'água na Lagoa Do Bonfim, RN - Brasil*. *Águas Subterrâneas*, [S.L.], v. 16, n. 1, p.75-84, 9 dez. 2002. DOI:<http://dx.doi.org/10.14295/ras.v16i1.1301>.
- PEREIRA, R. *et al.* *Caracterização Hidrogeoquímica Do Sistema Lacustre Bonfim, Rio Grande Do Norte – Brasil*. *Águas Subterrâneas*, [s.l.], p.1-15, 2000. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23915>.
- PEREIRA, R. *et al.* *Estado da Arte da Bacia Hidrogeológica do Sistema Lacustre Bonfim-RN, Nordeste do Brasil*. *Águas Subterrâneas*, [S.L.], v. 17, n. 1, p.41-47, 9 dez. 2003. DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v17i1.1311>.
- PIGA, F. G *et al.* *Multi-criteria potential groundwater contamination and human activities: Araras watershed, Brazil*. *Revista brasileira de recursos hídricos*, v. 22, p. e56, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.0217170052>.
- POWELL, K. L. *et al.* *Microbial contamination of two urban sandstone aquifers in the UK*. *Water Research*, [S. l.], v. 37, n. 2, p. 339–352, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00280-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00280-4).
- RADAMBRASIL. Secretaria Geral. Ministério das Minas e Energia. *Projeto RADAMBRASIL: Folhas SB.24/25 Jaguaribe/Natal; geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra (Levantamento de Recursos Naturais)*. Rio de Janeiro, 1981. 745 p. 23 v.
- RAMJEGATHESH, R. *et al.* *Root (wilt) disease of coconut palms in South Asia – an overview*. *Archives Of Phytopathology And Plant Protection*, [s.l.], v. 45, n. 20, p. 2485-2493, dez. 2012. Informa UK Limited. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/03235408.2012.729772>
- RAZANDI, Y. *et al.* *Application of analytical hierarchy process, frequency ratio, and certainty factor models for groundwater potential mapping using GIS*. *Earth Science Informatics*, [S.L.], v. 8, n. 4, p. 867-883, 26 abr. 2015. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12145-015-0220-8>.
- REN, J. *et al.* *Multi-criteria Decision-Making for Materials Selection*. *Waste-to-Energy*, Academic Press. 153-176 p. 2020. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816394-8.00006-9>.
- RIMAL, B. *et al.* *Effects of land use and land cover change on ecosystem services in the Koshi River Basin, Eastern Nepal*. *Ecosystem Services*, [S.L.], v. 38, p. 100963, ago. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.100963>.
- RUFINO, F *et al.* *Evaluating the suitability of urban groundwater resources for drinking water and irrigation purposes*. *Environmental Monitoring and Assessment*, [S.L.], v. 191, n. 12, 25 nov. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-019-7978-y>
- São Paulo. Conselho Estadual de Recursos Hídricos, Câmara Técnica de Águas Subterrâneas. *Nitrato nas águas subterrâneas: desafios frente ao panorama atual / São Paulo*. Conselho Estadual de Recursos Hídricos, Câmara Técnica de Águas Subterrâneas; Claudia Varnier (coord.). - São Paulo: SIMA / IG, 2019. 128p.
- SEMARH, Secretaria de Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos; IDEMA, Instituto De Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente do Rio Grande Do Norte. *Perfil do seu município: Nísia Floresta*. Natal, 2008. 35 p. Disponível em: <http://adcon.rn.gov.br/ACERVO/idema/DOC/DOC00000000013946.PDF>.
- SERHID, Secretaria Estadual de Recursos Hídricos. *Política Estadual de Recursos Hídricos*, Estado do Rio Grande do Norte. Natal, 1998a.
- \_\_\_\_\_, Secretaria Estadual de Recursos Hídricos. *Pesquisa Hidrogeologica do Complexo Lagunar do Bonfim*. Estado do Rio Grande do Norte. Natal, 1998b.
- \_\_\_\_\_, Secretaria Estadual de Recursos Hídricos. *Monitoramento da primeira bateria de poços da Adutora Monsenhor Expedito*. Estado do Rio Grande do Norte. Natal, 1999.

- \_\_\_\_\_, Secretaria Estadual de Recursos Hídricos. *Estudo de Identificação, Avaliação de Alternativas de Captação e Elaboração de Projeto Básico para a Captação das Águas da Adutora Monsenhor Expedito*. Estado do Rio Grande do Norte. Natal, 2002.
- \_\_\_\_\_, Secretaria Estadual de Recursos Hídricos. *Quantificação da Oferta Hídrica da Lagoa do Bonfim*. Estado do Rio Grande do Norte. Natal, 2004.
- SHARMA, A *et al.* *Corrigendum to "Organochlorine pesticide, endosulfan induced cellular and organismal response in Drosophila melanogaster"*. Journal Of Hazardous Materials, [S.L.], v. 379, p. 120907, nov. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120907>.
- SILVA, M. M. N. *et al.* *A crise hídrica no estado do Rio Grande do Norte*. In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, 2016, Foz do Iguaçu, Pr. Anais. Foz do Iguaçu: Brasil, 2016. p. 1-4.
- SNIS, Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento. *Mapa de indicadores de Esgoto*. Disponível em: <[http://appsnis.mdr.gov.br/indicadores/web/agua\\_esgoto/mapa-esgoto](http://appsnis.mdr.gov.br/indicadores/web/agua_esgoto/mapa-esgoto)>.
- SUDENE, Superintendência para o desenvolvimento do Nordeste; DNPEA, Divisão de Pesquisa Pedológica. *Levantamento Exploratório: reconhecimento de solos do estado do Rio Grande do Norte*. Recife: DNPEA/SUDENE, 1971. 536p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/publicacao/330796/levantamentoexploratorio-reconhecimento-de-solos-do-estado-do-rio-grande-do-norte>. Acesso em: 24 fevereiro 2021.
- SUN, Y. *et al.* *Response of a Coastal Groundwater System to Natural and Anthropogenic Factors: case study on east coast of laizhou bay, china*. International Journal Of Environmental Research And Public Health, [S.L.], v. 17, n. 14, p. 5204, 18 jul. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph17145204>.
- TANG, Z. *et al.* *Forecasting land use change and environmental impact at a watershed scale*. Journal of Environmental Management, v. 76, n. 1, p. 35-45, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.01.006>.
- TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T. R.; TOLEDO, M. C. M.; TAIOLI, F. (org.). *Decifrando a Terra*. 2. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2009. 526 p
- TOMLIN, D. *Geographic information systems and Cartographic Modeling*. Prentice Hall, New York, 1990
- TUCCI, C. E. M. *Gestão integrada das águas urbanas*. Revista de Gestão de Águas da América Latina - REGA, v. 5, n. 2, p. 71–81, 2008.
- TUNDISI, J. G. *et al.* *Conservação e uso sustentável de recursos hídricos*. In: BARBOSA, F.A. *Ângulos da água: desafios da integração*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2008. p. 83-157.
- FOSTER, S. *Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability, Pollution Risk and Protection Strategy*: International Conference, 1987, Noordwijk Aan Zee, the Netherlands Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants. Netherlands Organization for Applied Scientific Research, The Hague, 69-86.
- VALENTE, R. O. A. *Definição de áreas prioritárias para conservação e preservação florestal por meio da abordagem multicriterial em ambiente SIG*. 2005. 137 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005. Disponível em: Acesso em: 02 fevereiro 2021
- VALENTE, R. O. A.; PETEAN, F. C. S.; VETTORAZZI, C. A. *Multicriteria Decision Analysis for Prioritizing Areas for Forest Restoration*. Cerne, v. 23, n. 1, p. 53 60, 2017. <https://doi.org/10.1590/01047760201723012258>
- VANN, S. *et al.* *Delineation of Seawater Intrusion Using Geo-Electrical Survey in a Coastal Aquifer of Kamala Beach, Phuket, Thailand*. Water, [S.L.], v. 12, n. 2, p. 506, 12 fev. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w12020506>.
- VÍAS, J. M. *et al.* *Preliminary proposal of a method for contamination vulnerability mapping in carbonate aquifers*. Em, Karst and Environment, Hydrogeology Journal, v.14, n.6, 75 83,2002.,

- 
- VÍAS, J. M. *et al.* *Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method.* Application in two pilot sites in Southern Spain.
- VIGLIOTTI, M.; BUSICO, G.; RUBERTI, D. *Assessment of the Vulnerability to Agricultural Nitrate in Two Highly Diversified Environmental Settings.* *Environments*, [S.L.], v. 7, n. 10, p. 80, 29 set. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/environments7100080>.
- VOOGD, H. *Multicriteria evaluation for urban and regional planning.* Londres: Pion, 1983.
- WANG, J. Z. *et al.* *Disturbing degree of mankind activities to groundwater in the Hutuo River Valley area.* *Bull Soil Water Conserv*, v. 30, n. 2, p. 65-69, 2010.
- WWAP (UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME/UN-WATER). *The United Nations World Water Development Report 2022: Groundwater Making the invisible visible.* Paris, UNESCO. 2022.
- ZHAI, H. *et al.* *Understanding Spatio-Temporal Patterns of Land Use/Land Cover Change under Urbanization in Wuhan, China, 2000–2019.* *Remote Sensing*, [S.L.], v. 13, n. 16, p. 3331, 23 ago. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs13163331>.
- ZHAO, S. *et al.* *Spatial and Temporal Dimensions of Urban Expansion in China.* *Environmental Science & Technology*, [S.L.], v. 49, n. 16, p. 9600-9609, 3 ago. 2015. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/acs.est.5b00065>.