

UFRRJ

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM E
EVOLUÇÃO GEOLÓGICA**

DISSERTAÇÃO

**Vulnerabilidade de aquíferos em Unidades Hidrológicas de Planejamento
(UHP): estudo de caso Rio Guandu-Mirim e Bacias Litorâneas, RJ**

Rafael Bittencourt Kiffer

2024



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM E EVOLUÇÃO
GEOLÓGICA

**Vulnerabilidade de aquíferos em Unidades Hidrológicas de Planejamento
(UHP): estudo de caso Rio Guandu-Mirim e Bacias Litorâneas, RJ**

RAFAEL BITTENCOURT KIFFER

Sob a Orientação da Professora

Helena Saraiva Koenow Pinheiro

e Co-orientação do Msc

Cássio de Almeida Pires

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre**, no Curso de Pós-Graduação em Modelagem e Evolução Geológica, Área de Concentração em Modelagem de Processos Geológicos e Geodinâmicos.

Seropédica, RJ

Junho de 2024

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

B46v

Bittencourt Kiffer, Rafael , 1981-
Vulnerabilidade de aquíferos em Unidades
Hidrológicas de Planejamento (UHP): estudo de caso Rio
Guandu-Mirim e Bacias Litorâneas, RJ / Rafael
Bittencourt Kiffer. - Nova Iguaçu, 2024.
49 f.: il.

Orientadora: Helena Saraiva Koenow Pinheiro.
Coorientador: Cássio de Almeida Pires .
Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro, Modelagem e Evolução
Geológica, 2024.

1. Método GOD. 2. Gestão de Recursos Hídricos. 3.
Lineamentos estruturais. 4. SIG. I. Saraiva Koenow
Pinheiro, Helena , 1985-, orient. II. de Almeida
Pires , Cássio , 1989-, coorient. III Universidade
Federal Rural do Rio de Janeiro. Modelagem e Evolução
Geológica. IV. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM E EVOLUÇÃO GEOLÓGICA

RAFAEL BITTENCOURT KIFFER

Dissertação/Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências, no Curso de Pós-Graduação em Modelagem e Evolução Geológica, área de Concentração em Modelagem de Processos Geológicos e Geodinâmicos.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM E EVOLUÇÃO
GEOLÓGICA

RAFAEL BITTENCOURT KIFFER

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Geociências, no Curso de Pós-Graduação em Modelagem e Evolução Geológica, área de Concentração em Modelagem de Processos Geológicos e Geodinâmicos.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 29/02/2024



Helena Saraiva Koenow Pinheiro. Dr. Departamento de Solos/UFRRJ
(Orientador)

Documento assinado digitalmente
HELENA SARAIVA KOENOW PINHEIRO
Data: 27/03/2024 10:59:38-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>



Olga Venimar de Oliveira Gomes. Dra. DeptCMA/ITR/UFRRJ
(Membro Interno; mas externo ao PPGMEG)

Documento assinado digitalmente
OLGA VENIMAR DE OLIVEIRA GOMES
Data: 26/03/2024 10:59:27-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>



Mateus Marques Bueno. Dr. IFSULDEMINAS
(Membro Externo)

Documento assinado digitalmente
MATEUS MARQUES BUENO
Data: 25/03/2024 09:08:25-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Dedico este trabalho a todos os mestres, profissionais, pesquisadores e demais pessoas que trabalham para em prol de gestão do meio ambiente.

“O rio atinge seus objetivos, porque aprendeu a contornar obstáculos” (autor desconhecido)

“Façamos da interrupção um caminho novo.

*Da queda um passo de dança,
do medo uma escada,
do sonho uma ponte, da procura um encontro!”*

(Fernando Sabino)

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) através do projeto “Caracterização de vulnerabilidade de aquíferos em Unidades Hidrológicas de Planejamento (UHP): estudo de caso Rio Guandu-Mirim e Bacias Litorâneas, município do Rio de Janeiro – RJ, processo E-26/010.001794/2019”.

Depois de muitos percalços, de muitas pedras no caminho...chego ao fim desta etapa.

Agradeço imensamente a meus pais, minha irmã e minha esposa pelo apoio incondicional, que acreditaram no propósito das atividades acadêmicas e compreenderam o quanto era importante a dedicação e conclusão desta etapa. Sem esse apoio não conseguiria alcançar esta etapa.

Agradeço a Dra. Helena Saraiva Koenow Pinheiro e ao Msc. Cássio de Almeida Pires pela orientação, paciência, persistência, incentivo e puxões de orelha, principalmente em momentos de dificuldades. Sem essa estrutura não teria conseguido atingir este objetivo. Agradeço também pela oportunidade de terem me proporcionado a participação em um projeto na área da Hidrogeologia, que considero como a que mais admiro e aprecio trabalhar no âmbito da profissão como Geólogo.

Agradeço a Dra. Olga Venimar de Oliveira Gomes e ao Dr. Alexis Rosa Nummer pela contribuição ao longo do desenvolvimento do trabalho e pela participação na banca de avaliação.

Agradeço também ao Dr Mateus Marques Bueno pela participação na banca de avaliação.

Agradeço também ao PPGMEG, seus representantes e demais docentes, sem vocês e sem o cessante trabalho, não seria possível para mim estar aqui concluindo essa tão almejada etapa.

A todos, minha gratidão!

RESUMO

Kiffer, R. B. **Vulnerabilidade de aquíferos em Unidades Hidrológicas de Planejamento (UHP): estudo de caso Rio Guandu-Mirim e Bacias Litorâneas, RJ.** 2024. 40 p. Dissertação (Mestrado Programa Pós Graduação em Modelagem e Evolução Geológica) Instituto de Geociências, Departamento de Geociências, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica , RJ, 2024.

Resumo: Estudos de vulnerabilidade de aquíferos têm sido desenvolvidos com o intuito de identificar áreas mais suscetíveis à contaminação, servindo também como ferramenta para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. A área de estudo corresponde às Unidades Hidrológicas de Planejamento (UHPs) Guandu-Mirim e Bacias Litorâneas, inseridas na Região Hidrográfica II do estado do Rio de Janeiro e tem como objetivo o mapeamento da vulnerabilidade de contaminação de aquífero, dos tipos sedimentar e fraturado, com suporte de Sistema de Informações Geográficas (SIG's). A partir da triagem de dados referentes a um total de 618 poços disponibilizados pelo Instituto Estadual do Ambiente (INEA), 99 foram selecionados para a análise do nível estático por estarem localizados dentro da área de estudo, além de mapas temáticos de pedologia, geologia e densidade de lineamentos que combinados através de álgebra de mapas permitiram a aplicação do método conhecido como G.O.D. (*Groundwater occurrence; Overall aquifer class; Depth to groundwater*) para a estimativa da vulnerabilidade do aquífero sedimentar e fraturado. Os lineamentos traçados no Modelo Digital de Elevação demonstram uma direção preferencial NE-SW e, subordinadamente, nas direções NW-SE e E-W. A vulnerabilidade na área de estudo tem caráter baixo de uma forma geral, compreendendo 84,86% da área total, enquanto que a classificada como média, 7,6% e, insignificante 7,53%. As técnicas utilizadas se mostraram úteis e inovadora em termos de estudos para a análise da vulnerabilidade na região, que por sua vez traz informações estratégicas para a gestão dos recursos hídricos nas UHPs, em questão.

Palavras-chave: Método GOD, Gestão de Recursos Hídricos, Lineamentos estruturais, SIG.

ABSTRACT

Kiffer, R. B. **Vulnerabilidade de aquíferos em Unidades Hidrológicas de Planejamento (UHP): estudo de caso Rio Guandu-Mirim e Bacias Litorâneas, RJ.** 2024. 40 p. Dissertação (Mestrado Programa Pós Graduação em Modelagem e Evolução Geológica) Instituto de Geociências, Departamento de Geociências, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica , RJ, 2024.

Aquifer vulnerability studies have been developed with the aim of identifying most susceptible to contamination areas, also serving as a tool for managing ground water resources. The study area corresponds to the Hydrological Planning Units (UHPs) Guandu-Mirim and Coastal Basins, located in II Hydrographic Region of the state of Rio de Janeiro and aims to map the vulnerability of aquifer contamination, considering the sedimentary and fractured types, through the integration of data from 99 wells, thematic maps and Geographic Information Systems (GIS). From the screening of data referring to a total of 618 wells, 99 were selected for generation of graphics: static level, pedology, geology, lineaments as well as for the application of the GOD method of aquifer vulnerability. The lineaments drawn in the Digital Elevation Model demonstrate a preferential NE-SW direction and, subordinately, in the NW-SE and E-W directions. The vulnerability in the study area is classified mainly as low level, covering 84.86% of the total area, while the average level is 7.6% and the insignificant level corresponds to 7.53%. The techniques used proved to be useful and innovative in terms of studies for analyzing vulnerability in the region, which in turn bring strategic information regarding the management of water resources in the UHPs.

Keywords: Vulnerability, GOD Method, Management, Lineaments, GIS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo Hidrológico e suas etapas.	13
Figura 2. Classificação de aquíferos quanto a porosidade.	15
Figura 3. Classificação de aquíferos quanto a superfície limítrofe	15
Figura 4. Mapa de Localização da Área de Estudo.	21
Figura 5. Mapa Geológico da Área de Estudo.	23
Figura 6. Hidrogeologia da área de estudo.	24
Figura 7. Classes de solos da área de estudo.	26
Figura 8. Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação.	28
Figura 9. Fluxograma de atividades para obtenção do mapa de vulnerabilidade de aquíferos.	29
Figura 10. Comparação entre os mapas de nível estático (a) e reclassificado (b), para os poços da área de estudo.	35
Figura 11. Comparação entre os mapas geológico vetorial e reclassificado.	35
Figura 12. Comparação entre os mapas pedológico vetorial (a) e reclassificado (b).	36
Figura 13 - Mapa de lineamentos traçados sobre MDE com relevo sombreado(a) e mapa de densidade de lineamentos reclassificado (b).	36
Figura 14. Relação Classes de Vulnerabilidade (Método GOD adaptado).	37
Figura 15. Mapa de vulnerabilidade da área de estudo (método GOD adaptado).	38
Figura 16. Relação Classes de Vulnerabilidade (Método GOD sem adaptações).	39
Figura 17. Mapa de vulnerabilidade da área de estudo (método GOD sem adaptações).	40
Figura 18. Mapa de vulnerabilidade DRASTIC (Carvalho e Francisco, 2020).	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Métodos de avaliação de vulnerabilidade.....	17
Tabela 2. Índices de vulnerabilidade para as classes de solos dominantes nas unidades de mapeamento.	30
Tabela 3. Índices de vulnerabilidade para as classes geológicas.....	30
Tabela 4. Índices de vulnerabilidade para os níveis estáticos dos poços.....	31
Tabela 5. Classes de Vulnerabilidade considerando a densidade e a escala de peso do descritor lineamento.	31
Tabela 6. Comparação entre tipos de aquíferos e níveis estáticos máximos e mínimos.	33
Tabela 7. Comparação entre trabalhos realizados com referência a avaliação do nível estático.....	34
Tabela 8 - Comparação entre a relações percentual/classe de vulnerabilidade aplicadas aos métodos GOD adaptado e sem adaptações.	40

Sumário

1 INTRODUÇÃO	10
2 REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1 Ciclo Hidrológico.....	13
2.2 Definição e classificação de aquíferos	14
2.3 Vulnerabilidade de aquíferos	16
3. CONTEXTUALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	20
3.1. Localização e Clima da Área de Estudo.....	20
3.2 Geologia	21
3.3 Hidrogeologia.....	24
3.4 Pedologia.....	25
4 MATERIAL E MÉTODOS	27
4.1 Aquisição de dados.....	27
4.2 Procedimento da modelagem de vulnerabilidade de aquíferos	27
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
5.1 Análise e triagem dos dados de poços tubulares	33
6. CONCLUSÕES.....	42
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural essencial à vida no planeta, sendo o insumo básico para as atividades econômicas. A demanda hídrica global é fortemente influenciada pelo crescimento da população, pela urbanização, pelas políticas de segurança alimentar e energética, e pelos processos macroeconômicos, tais como a globalização do comércio, as mudanças na alimentação humana e o aumento do consumo. Em 2050, prevê-se um aumento da demanda hídrica mundial de 55%, principalmente devido à crescente demanda do setor industrial, dos sistemas de geração de energia termoeleétrica e dos usuários domésticos, sendo que nas últimas décadas, o consumo de água cresceu duas vezes mais do que a população (ONU, 2015). Sabe-se que a água é encontrada na natureza em quantidades aleatórias no tempo e no espaço, sendo também extremamente vulnerável à deterioração qualitativa (Linhares, 2018).

Dentre as reservas de disponibilidade hídrica para consumo humano, destacam-se as águas subterrâneas, além da abundância, essa reserva possui vantagens em relação às águas superficiais, tais como: relativa estabilidade físico-química e sua exploração não necessita de grandes investimentos (Feitosa *et al.*, 2008). Entretanto a ocupação desordenada, atividades antrópicas, despejos inadequados e os elementos característicos do meio ambiente, especialmente do solo, fazem com que as águas subterrâneas sejam cada vez mais propensas à poluição, fatores estes que colocam em risco a disponibilidade de água doce (Rebouças; Braga; Tundisi, 2002).

Em países como México, Austrália, Arábia, região noroeste da Índia e Paquistão, e planície norte da China, nas últimas décadas, a demanda de irrigação gerou uma grande expansão/mudança no consumo das águas superficiais para águas subterrâneas (Peña-Arancibia *et al.*, 2016).

Sabe-se que alguns países como Dinamarca, Malta, Arábia Saudita, entre outros, são abastecidos integralmente por águas subterrâneas. Na Tunísia, corresponde a 95%, nos Países Baixos, na Alemanha e Marrocos é de aproximadamente 75%, e na maioria dos países europeus como Áustria, Bélgica, Hungria, Romênia e Suíça, o consumo de água subterrânea excede 70% do consumo total de água (ONU, 2022).

A água subterrânea apesar de ser pouco apreciada pela população, corresponde a mais de 35% do abastecimento da população brasileira (Hirata *et al.*, 2019). Estima-se que existam em operação no estado do Rio de Janeiro mais de quatro mil poços tubulares profundos (INEA, 2024).

As águas subterrâneas são extremamente importantes, pois são responsáveis pelas parcelas referentes ao escoamento de base dos cursos d'água, assegurando o fluxo de água nos rios em épocas de estiagem e, assim, desempenha a função ecológica de diluição de esgoto e de efluentes, transporte de sedimentos e manutenção dos ecossistemas (Hirata; Fernandes; Bertolo, 2016) além de constituírem uma reserva estratégica. Nas últimas décadas a utilização das águas subterrâneas foi crescente em todo o estado do Rio de Janeiro, quer pela facilidade na captação, pois localmente pode apresentar vantagens em relação aos mananciais de superfície, quer pelos custos operacionais, quer pela inexistência ou ineficiência do fornecimento convencional de água pelas concessionárias (COPPETEC,2014).

Devido à deterioração dos aquíferos, Custodio e Llamas (1996) apontam que ao contrário da contaminação das águas superficiais, que são mais facilmente identificáveis, a contaminação das águas subterrâneas não é visível, além do que, sua exploração é bastante distribuída no espaço, o que dificulta a identificação e a caracterização dos problemas de contaminação. Os mesmos autores ressaltam ainda que as ações protetoras ou a interrupção da atividade contaminante é aplicada somente quando a contaminação se torna perceptível, o que ocorre quando esta já atingiu uma larga extensão.

As experiências nas últimas décadas mostraram que a despoluição de aquíferos não conseguiu, em grande parte dos casos, a completa remoção de todos os contaminantes, e que as fontes de poluição, mesmo que parcialmente removidas, continuam liberando poluentes durante um grande período de tempo (Manoel Filho,2008).

Contudo, nos últimos anos, percebe-se uma crescente preocupação da sociedade com a deterioração dos recursos hídricos subterrâneos, haja vista que é cada vez mais evidente a consciência dos responsáveis pela gestão deste manancial hídrico, principalmente em relação às limitações técnicas, econômicas e de disponibilidade de especialistas para atenuar a deterioração existente, sobretudo em países que estão em fase de desenvolvimento (Linhares,2012).

Com o resultado dessa situação, tem-se observado a disseminação do uso e desenvolvimento de várias técnicas de mapeamento para avaliação da vulnerabilidade natural e de risco a contaminação, como uma ferramenta para a prevenção e proteção das águas subterrâneas (Linhares,2012).

O estudo da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas representa uma identificação das áreas mais vulneráveis, associando pontos potenciais de contaminação gerados pela sociedade, e/ou pelo tipo do ambiente natural ao longo do espaço e tempo, tendo

em vista ações gerenciais que visem à gestão racional dos mananciais subterrâneos, bem como para a gestão, por parte dos órgãos públicos, com relação à implementação de políticas de controle e preservação (Linhares, 2018).

A vulnerabilidade de um aquífero refere-se ao seu grau de proteção natural contra potenciais ameaças de contaminação e depende das características litológicas e hidrogeológicas dos estratos que o separam da fonte de contaminação, dos gradientes hidráulicos que determinam o transporte das substâncias por meio da sequência de estratos no aquífero. A vulnerabilidade é definida como uma propriedade intrínseca do sistema de água subterrânea que depende da sensibilidade desse sistema aos impactos humanos e naturais (Foster *et al.*, 2006; Ribeiro *et al.*, 2017).

Nesse contexto, o método GOD de avaliação de vulnerabilidade de aquíferos, por ser considerado de fácil aplicabilidade de determinação de seus parâmetros (Batista *et al.*, 2017) e simplicidade conceitual (Linhares, 2012) é o mais adequado para ser utilizado em estudos com pouca disponibilidade de dados, além de possuir boa espacialização dos dados em ambiente SIG, Sistema de Informações Geográficas (Batista *et al.*, 2017).

Diante desta perspectiva, este estudo admite a hipótese de que, através da integração de dados de poços, mapas temáticos, da identificação de lineamentos e de suas direções preferenciais, de informações do meio físico, utilizando Sistema de Informações Geográficas (SIGs) é possível a confecção de mapas de vulnerabilidade de aquíferos.

A aplicação de métodos de avaliação de vulnerabilidade na área de estudo é pouco conhecida. Carvalho e Francisco (2020), avaliou através do método DRASTIC e sua adaptação DRASTICA, considerando a influência de atividades antrópicas como fator para a vulnerabilidade do aquífero Guaratiba, localizado em parte da porção central, leste e sudoeste da área de estudo. Dessa forma a aplicação do método GOD e sua adaptação demonstra um caráter pioneiro em termos de pesquisa para área de estudo.

A área de estudo localizada na zona oeste do município do Rio de Janeiro, possui aproximadamente 400,00 km². Em virtude da carência de estudos locais relacionados, devido a importância da utilização da água subterrânea no desenvolvimento social e econômico de muitas atividades no município e visando contribuir com a gestão das águas subterrâneas a respeito da vulnerabilidade de aquíferos, este estudo teve como objetivo o mapeamento da vulnerabilidade à contaminação de aquíferos nas UHPs Guandu- Mirim e Bacias Litorâneas, dos tipos sedimentar e fraturado, através da adaptação do método GOD. Especificamente, este estudo pretende avaliar a influência do parâmetro lineamento como fator diferencial na

identificação de áreas vulneráveis.

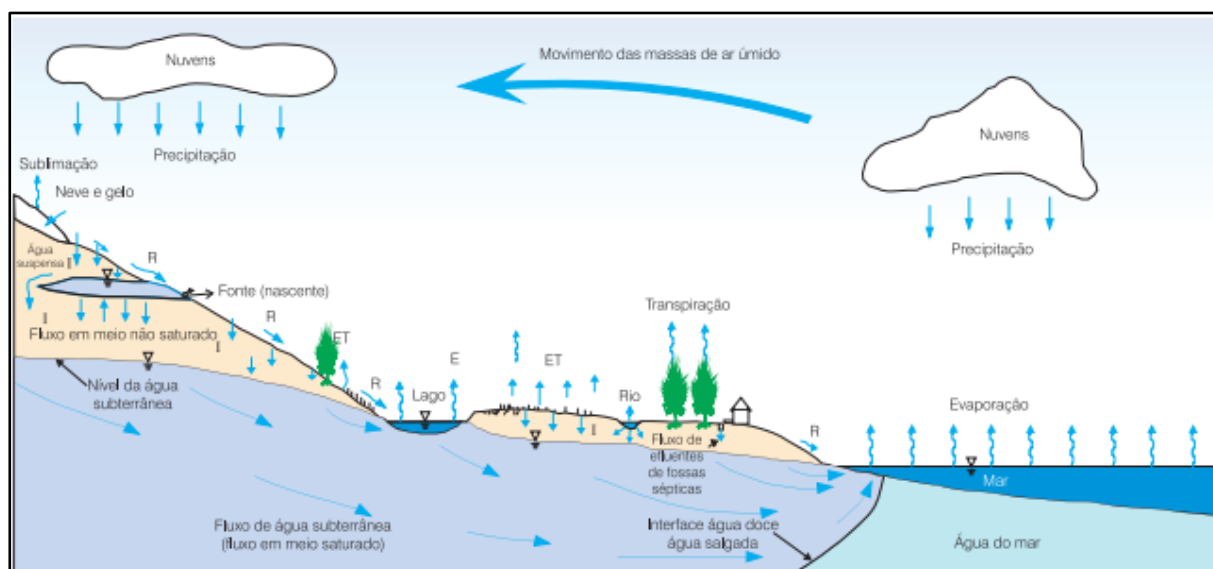
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Ciclo Hidrológico

O surgimento da água no planeta Terra provém de centenas de milhares de anos após o Big Bang, onde prótons e elétrons esfriaram o bastante para organizarem-se em átomos de hidrogênio, hélio, além de outros gases, como de vapor d'água. Entretanto em virtude das elevadas temperaturas da superfície da Terra, cada gota d'água que caísse da atmosfera sobre ela evaporava imediatamente (Teixeira *et al.*, 2009).

O Ciclo Hidrológico tem início a partir do fenômeno da precipitação meteórica que representa a condensação de gotículas a partir do vapor de água presente na atmosfera, dando origem a chuva. Parte da precipitação retorna para a atmosfera por evaporação direta durante seu percurso em direção a superfície terrestre. Uma vez atingido o solo, a depender das características do material de cobertura, parte da água irá infiltrar (I). Quando a capacidade de absorção pela superfície é superada têm-se o início do chamado escoamento superficial (R), onde o excesso de água é impulsionado pela gravidade para zonas mais baixas constituindo a rede de drenagem (Karman, 2003). A Figura 1 ilustra as etapas do Ciclo Hidrológico (Manoel Filho, 2008).

Figura 1. Ciclo Hidrológico e suas etapas.



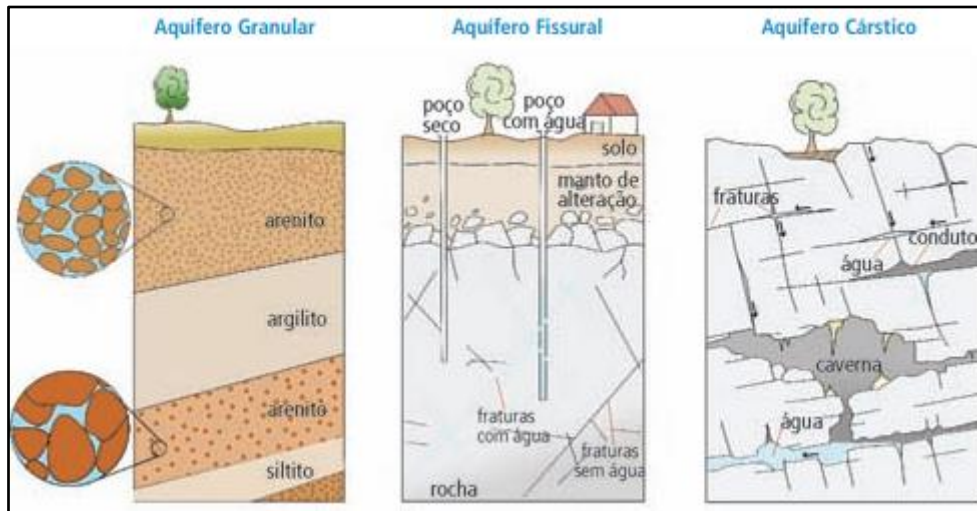
Fonte: adaptado de Bear e Verruijt (1987).

2.2 Definição e classificação de aquíferos

De acordo com o Ciclo Hidrológico parte da precipitação retorna para a atmosfera por evaporação direta durante seu percurso em direção a superfície terrestre podendo uma parte escoar ou evaporar e outra infiltrar-se. Do total infiltrado um percentual fica retido na camada superior do solo e o restante percola em direção a camadas inferiores para alimentar os aquíferos (Cabral, 2008). Denomina-se como aquíferos as unidades rochosas ou de sedimentos, porosas e permeáveis, que armazenam e transmitem volumes significativos de águas subterrâneas passível de ser explorada pela sociedade. Os aquíferos são classificados de acordo com o tipo de porosidade (intergranular, de fraturas e cársticos) e em relação a pressão nas superfícies limítrofes, sendo classificados em livres e confinados (Karmann,2003; Manoel Filho,2008).

Os aquíferos de porosidade granular ocorrem no regolito e em rochas sedimentares clástica com porosidade primária, ou seja, gerada juntamente com o sedimento ou rocha, sendo caracterizada nas rochas sedimentares pelos espaços entre os clastos ou grãos. A maioria dos aquíferos de fraturas forma-se em consequência da deformação tectônica, na qual processos de dobramento e falhamento geram sistemas de fraturas, normalmente seladas, devido a profundidade. Posteriormente sofrem aberturas submilimétricas a milimétricas, permitindo a entrada e fluxo da água, pela expansão das rochas devido ao alívio de carga litostática causado pelo soerguimento regional e erosão das rochas sobrejacentes. O fluxo de água irá se instalar quando as fraturas que compõem o sistema estão interconectadas. Aquíferos de condutos caracterizam-se pela porosidade cárstica, constituído por uma rede de condutos, com diâmetros milimétricos a métricos, gerados pela dissolução de rochas carbonáticas (Karmann,2003). A Figura 2 ilustra os tipos de aquíferos quanto a porosidade (Iritani e Ezaki, 2012).

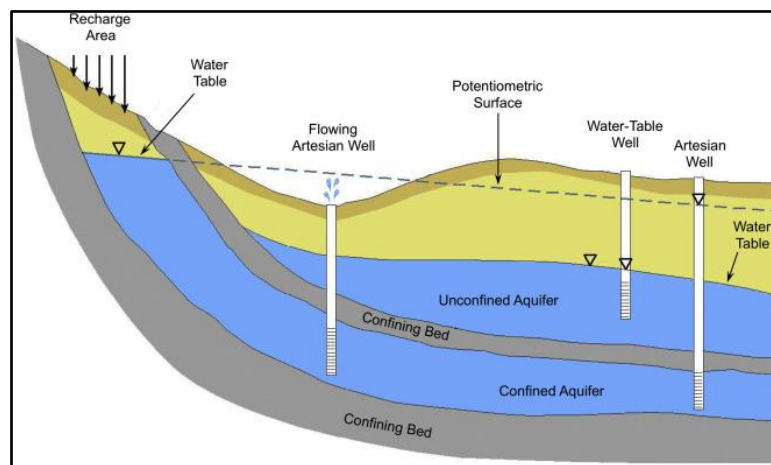
Figura 2. Classificação de aquíferos quanto a porosidade.



Fonte: Iritani; Ezaki, 2012.

Os aquíferos livres são aqueles cujo topo é demarcado pelo nível freático, estando em contato com a atmosfera. Normalmente ocorrem a profundidades de alguns metros a poucas dezenas de metros da superfície, associados ao regolito, sedimentos de coberturas ou rochas. Os aquíferos confinados ocorrem quando um estrato permeável está confinado entre duas unidades pouco permeáveis ou impermeáveis. Representam situações mais profundas, a dezenas, várias centenas ou até milhares de metros de profundidade, onde a água está sob ação da pressão não somente atmosférica, mas também de toda a coluna de água localizada no estrato permeável. A Figura 3 (Chen *et al.*, 2018) ilustra os tipos de aquíferos quanto a pressão nas superfícies limítrofes.

Figura 3. Classificação de aquíferos quanto a superfície limítrofe



Fonte: Chen *et al.*, 2018.

A suscetibilidade à poluição dos aquíferos livres, em relação aos confinados é maior, uma vez que nesses casos, não existem camadas confinantes superiores que constituam uma barreira natural de contenção da percolação de poluentes pelo solo.

2.3 Vulnerabilidade de aquíferos

Estudos de caráter hidrogeológico que buscam a avaliação da quantificação e da qualidade dos recursos hídricos subterrâneos são de grande relevância diante da crescente demanda por recursos hídricos. A exploração cada vez maior dos recursos hídricos subterrâneos, também justificada pela degradação recorrente dos recursos hídricos superficiais, incorre na redução da disponibilidade de água doce, para suprir as necessidades de consumo (Lima *et al.*, 2009) e no comprometimento da qualidade da água por contaminantes biológicos, químicos e inorgânicos ligados ao desenvolvimento econômico (Gomes *et al.*, 2021). Deste modo, é necessário garantir a manutenção e qualidade dos mesmos através de políticas públicas ou planos que sirvam como ferramentas para sua gestão (Magrini, 2001; Ferreira e Pinheiro, 2008; Gomes *et al.*, 2021).

O termo vulnerabilidade remonta a década de 1960, sendo escolhido com a finalidade de sensibilizar a população de que independente da água subterrânea ser associada a pureza, ela está passível de sofrer poluição e/ou contaminação por agentes externos (Murat, 2000). Os primeiros estudos para cartografar a susceptibilidade dos aquíferos se basearam na sobreposição de informações de nível estático de poços, informações estratigráficas e fontes potenciais de poluição, para definir estratégias de conservação das águas subterrâneas na França (Albinet e Margat, 1970). O mesmo autor considera, para isso, três princípios básicos: a) Entrada de poluentes no sistema - introdução de fluidos por meio da parte superficial do solo, quando o aquífero é livre; b) A propagação - dependente das condições de movimento das águas subterrâneas, refletidas pelo grau de permeabilidade do meio aquífero, propriedades hidrodinâmicas de condutividade hidráulica e transmissividade, esses são parâmetros que permitem mensurar essa condição; c) Persistência do poluente - interrupção da fonte poluente e persistência deste no aquífero por dezenas e até centenas de anos, mesmo que cessada a fonte contaminante (Peixoto *et al.*, 2020).

Posteriormente, em meados 80 acabou sendo objeto de pesquisa pela EPA (Agência de Proteção Ambiental dos EUA), através do DRASTIC (Aller *et al.*, 1987), pela Organização Mundial de Saúde (OMS) e pela Organização Pan-Americana da Saúde (OPAS) através do

GOD (Foster; Hirata; Andreo, 2013).

No Brasil, a pesquisa de Taltasse (1972), é considerada pioneira em relação à cartografia de vulnerabilidade, o qual criou um mapa para o município de Campinas/SP, identificado às unidades litoestratigráfica mais sensíveis a um evento qualquer de contaminação (Chrispim, 2016).

Guiguer e Khonke (2002), Linhares (2012) e Peixoto *et al.* (2020) citam que existem diversas metodologias para se determinar a vulnerabilidade de aquíferos. Na Tabela 1 são apresentados os diversos métodos de avaliação de vulnerabilidade de aquíferos (Peixoto *et al.*, 2020).

Tabela 1. Métodos de avaliação de vulnerabilidade.

Referência	Nome do método	Variáveis utilizadas	Aplicações
Le Grand (1964)	<i>Surface impoundment Assessment</i>	Profundidade da zona subsaturada; Recarga; Qualidade da água; Periculosidade do material	Avaliação da água subterrânea para o uso
Hargerty (1973)	<i>Site Ranking System</i>	Solo; condutividade hidráulica; sorção; tamponamento químico; hidrodinâmica; população	Análise de disposição de produtos químicos
Taltasse (1972)	Sem nome	Geologia (litologia; estrutura)	Vulnerabilidade aquífera
Philips et al. (1977)	<i>Waste-soil Interaction Matrix</i>	Efeitos na saúde; característica do produto químico; Comportamento do produto; Capacidade de atenuação do solo; Hidrogeologia; Características do local	Análise de disposição de resíduos sólidos e líquidos e novas indústrias; Vulnerabilidade específica
Kulfs (1980)	<i>Site Ranking Methodology</i>	População; Uso da água; Uso local; Degradação ambiental; Contaminação; Profundidade do nível d'água; Pluviometria; Permeabilidade; Característica do resíduo	Análise de disposição de resíduos sólidos e líquidos e novas indústrias; Vulnerabilidade específica
Silva et al. (1980)	Tpe	Velocidade da água subterrânea; Porcentagem de argila; Atividade potencialmente contaminante; Exploração dos aquíferos	Áreas de perigo à contaminação
Duarte (1980)	Mapa de vulnerabilidade	Litologia; Área de recarga e descarga	Vulnerabilidade geral
Caldwell et al. (1981)	<i>Hazard Ranking System</i>	Migração-característica do meio e resíduo; Quantidade de produto; População próxima; Explosão e fogo; Contato direto	Áreas prioritárias para limpeza do aquífero
Le Grand (1983)	<i>Landfill Site Ranking (Método Le Grand-Brown)</i>	Distância aterro e poços produtores; Profundidade do nível d'água; Gradiente do aquífero; Permeabilidade; Capacidade de atenuação	Avaliação de aterros sanitários novos e em operação; Vulnerabilidade específica
Haertle (1983)	(sem nome)	Composição do solo; Espessura da camada não-saturada.	Vulnerabilidade de aquíferos não-confinados
Rao et al. (1985)	<i>Pesticide Index</i>	Característica físico-química do pesticida; Clima; Perfil do solo; Cultura	Avaliação de pesticidas, uso normal; Vulnerabilidade específica
Aller (1987)	DRASTIC	Profundidade da zona subsaturada; recarga; meio aquífero; topografia; impacto da zona vadosa; condutividade hidráulica	Vulnerabilidade aquífera

Carter <i>et al.</i> (1987)	<i>Groundwater Vulnerability Map for Nitrate</i>	Tipo de solo; Características hidráulicas; Litologia	Avaliação do potencial de lixiviação de nitrato; Vulnerabilidade à contaminante específico
Marcolongo & Pretto (1987)	(sem nome)	Condutividade hidráulica da zona não saturada; Profundidade da água subterrânea; Umidade do solo; Recarga real.	Vulnerabilidade geral, baseado na teoria do fluxo-pistão
Foster & Hirata (1988)	GOD	Tipo de aquífero; litologia da zona vadosa; profundidade da zona subsaturada	Vulnerabilidade aquífera
Civita <i>et al.</i> , (1990)	SINTACS	Profundidade da água subterrânea; tipo de solo; infiltração; aquífero; litologia da zona subsaturada; condutividade; topografia	Vulnerabilidade aquífera
Adams & Foster (1992)	Sem nome	Característica litológica; permeabilidade; profundidade da zona subsaturada	Vulnerabilidade aquífera
Foster & Hirata (1993)	Saneamento <i>in situ</i>	Tipo de aquífero; Litologia da zona vadosa; profundidade da zona subsaturada; qualidade da água.	Vulnerabilidade aquífera e risco quanto ao saneamento básico
Van Stempvoot <i>et al.</i> , (1993)	AVI	Profundidade da zona subsaturada; espessura da camada sedimentar; condutividade hidráulica	Vulnerabilidade aquífera
Auge (1997)	EKv	Espessura da zona subsaturada; e permeabilidade da zona subsaturada	Vulnerabilidade aquífera
Doerfliger <i>et al.</i> , (1990)	EPIK	Cobertura protetora; condições de infiltração; desenvolvimento da rede do ambiente cárstico e recarga.	Vulnerabilidade aquífera em meios cársticos
Auge (2004)	AUGE	Potencial Hidráulico; Transmissividade vertical	Vulnerabilidade em aquíferos semiconfinados
Chachadi; Lobo-Ferreira (2005)	GALDIT	Tipo de aquífero; condutividade hidráulica do aquífero; peso da água subterrânea sobre a água do mar; Distância para a costa; impacto existente da intrusão salina; espessura do aquífero mapeado.	Vulnerabilidade de aquíferos costeiros quanto a intrusão salina.
Boi-Roura <i>et al.</i> , (2013)	<i>Regression Model Assessment of nitrate</i>	Nitrogênio disponível para incorporação em água subterrânea; Tipo de aquífero; presença de solos bem drenados; percentual de terras irrigadas; indicador de presença de processo de desnitrificação	Vulnerabilidade aquífera geral quanto a contaminação por nitrato proveniente de uso fertilizantes agrícolas
Makonto; Dippenaar, (2014)	<i>Recharge, Depth to water table, Soil type; Slope - RDSS</i>	Recarga; profundidade da zona subsaturada; tipo de solo; condutividade hidráulica vertical da zona saturada.	Vulnerabilidade Aquífera
Lubianetzky <i>et al.</i> , (2015)	<i>Vulnerability assessment method</i>	Pluviosidade; topografia; Rochas fraturadas (transmissividade - $T/[m^2/dia]$); meio poroso c (yrs).	Vulnerabilidade de aquíferos fissurais ou fraturados.
Morais (2016)	GATNEK	Granulometria; Ambiente hidrogeológico; transmissividade; nível estático; condutividade hidráulica.	Vulnerabilidade de aquíferos intersticiais

Fonte: (adaptado de Peixoto *et al.*, 2020).

As metodologias DRASTIC e GOD destacam-se por serem amplamente difundidas (Guiguer e Khonke, 2002) e por existir diversos modelos desenvolvidos a partir de adaptações

(Jang e Chen, 2015; Kazakis et al., 2015) ou a partir de modelos híbridos (Chen *et al.*, 2014; Antonakos e Lambrakis, 2007). A metodologia DRASTIC, desenvolvida pela agência ambiental norte-americana EPA e que considera sete fatores hidrogeológicos: profundidade do nível d'água, recarga do aquífero, litologia do aquífero, tipo de solo, topografia do local, textura da zona vadosa e condutividade hidráulica do aquífero. A metodologia GOD, considera o tipo de aquífero, a litologia e a profundidade do nível freático.

O método GOD (do inglês *Groundwater confinement* - G, *overlying strata* - O, e *depth to groundwater* - D) desenvolvido por Foster e Hirata (1988) e aperfeiçoado por Foster *et al.* (2006) é o resultado da interação entre três parâmetros: G – grau de confinamento hidráulico da água subterrânea; O – ocorrência de estratos de cobertura e D – profundidade ou distância até o aquífero freático, respectivamente. Trata-se de um método aplicável em estudos de avaliação de vulnerabilidade à contaminação em aquíferos livres rasos (Chrispim, 2016; Mfonka *et al.*, 2018), podendo também ser aplicado em aquíferos fraturados (Borges; Athayde; Reginato, 2017).

O método GOD destaca-se por ser simplificado e adequar-se melhor às escalas pequenas e disponibilidade limitada de dados e demandando uma densidade de informações simplificada, quando se comparado, por exemplo ao método DRASTIC (Guiguer e Khonke, 2002; Reginato e Ahkert, 2013; Maia e Moreira, 2011; Moura, 2014 e Borges; Athayde; Reginato, 2017). Este método permite calcular a facilidade que o terreno tem de sofrer contaminação, e, dessa forma, separar a área de estudo em classes, sendo elas de vulnerabilidade insignificante, baixa e média, podendo, inclusive, auxiliar na tomada de decisões referentes a projetos de gestão pública.

3. CONTEXTUALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1. Localização e Clima da Área de Estudo

A área de estudo corresponde às Unidades Hidrológicas de Planejamento (UHPs) Guandu- Mirim e Bacias Litorâneas com 478,9 km² (COPPETEC,2014), de acordo com PERHI- Guandu (2017), inseridas na Região Hidrográfica II do estado do Rio de Janeiro (Resolução CERHI nº 107 de 22 de maio de 2013) conforme a Figura 4 (GEOINEA,2024). As Unidades Hidrológicas de Planejamento são subdivisões das Regiões Hidrográficas, delimitadas para a determinação das disponibilidades hídricas, demandas de recursos hídricos e balanço hídrico, visando o planejamento sustentável dos recursos hídricos regionais (PERHI- Guandu,2014). As UHP's Guandu-Mirim e Bacias Litorâneas têm importância para o abastecimento de 9 milhões de pessoas e para o funcionamento de grandes indústrias, termoeletricas e hidrelétricas na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (PERHI-2017).

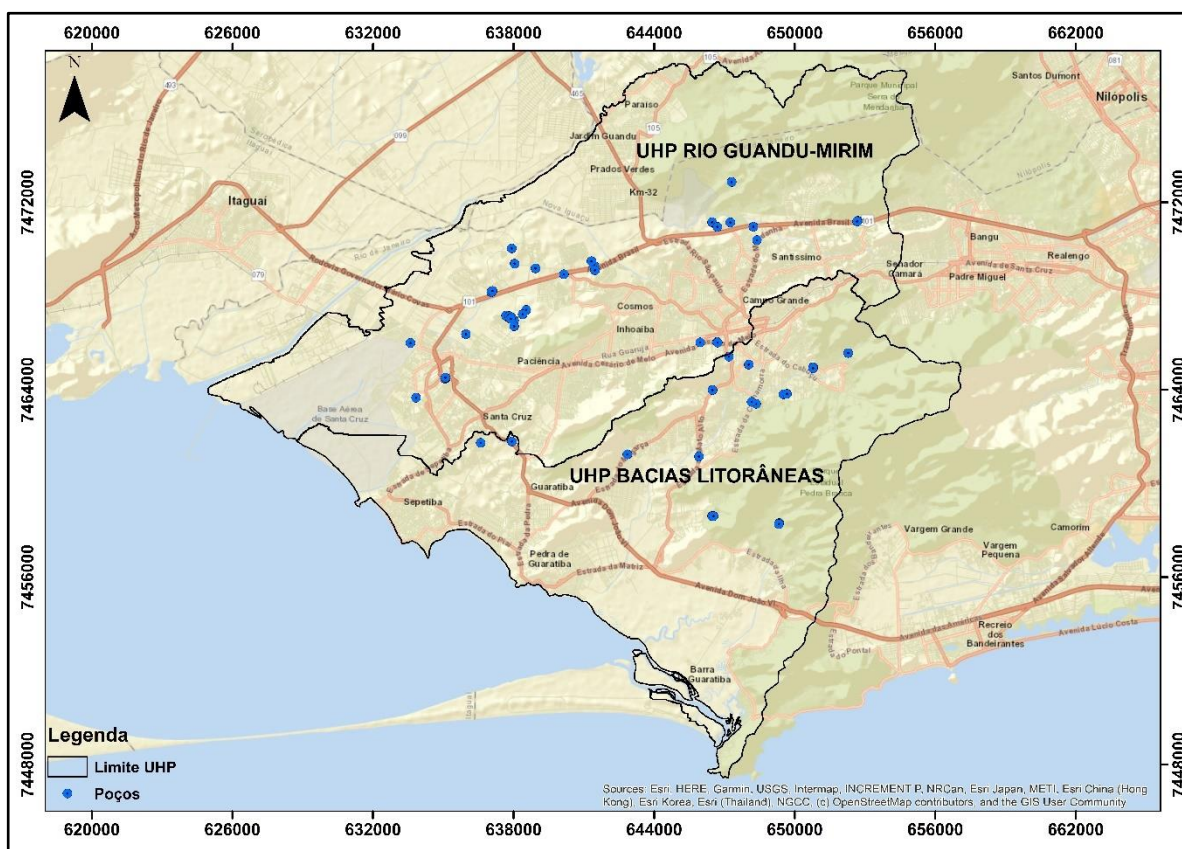
A UHP Guandu Mirim é formada pelas áreas de drenagens localizadas na margem esquerda da bacia do rio Guandu enquanto que a UHP Bacias Litorâneas é formada por uma série de pequenas bacias que drenam diretamente para a Baía de Sepetiba.

Estas UHP's possuem alta taxa de ocupação urbana e de geração de riqueza (PIB), com predomínio de áreas antropizadas urbanizadas, mas com a presença de alguns importantes remanescentes vegetais. Com relação ao uso do solo nas áreas de proteção permanente de cursos de água, a situação é muito preocupante. A carga orgânica lançada dos cursos de água é elevada, acabando por comprometer a qualidade tanto das águas superficiais (rios Guandu-Mirim e Cação-Vermelho), como das subterrâneas. Há elevada geração de resíduos sólidos, embora coletados e dispostos fora da unidade.

A disponibilidade hídrica superficial é relativamente baixa, mas o risco de inundações é elevado. O abastecimento de água da região é fortemente dependente da transposição de água do rio Paraíba do Sul (a partir da barragem de Santa Cecília, no município de Barra do Piraí), operada pela concessionária de energia LIGHT (CBH GUANDU, 2015). Em contrapartida, soma-se a esse cenário a elevada demanda de água é do setor industrial (pólos industriais de Campo Grande, Paciência, Palmares e Santa Cruz). A mineração é uma atividade de destaque nas unidades, com repercussões na qualidade dos recursos hídricos subterrâneos (PERHI- Guandu,2017). Os impactos gerados por essa atividade consistem na elevação do nível freático na região das cavas (Tubbs *et al.*, 2011) e comprometimento da qualidade da água associado a riscos de contaminação, por óleo combustível, das máquinas de escavação ou ainda por resíduos

industriais (Marques, 2006).

Figura 4. Mapa de Localização da Área de Estudo.



Fonte: Portal GEOINEA,2024.

O clima da Região Hidrográfica II é caracterizado como tropical úmido (Af), segundo classificação de Koppen (COPPETEC, 2014), com valores de temperatura média anual entre 20°C a 27°C e elevados índices pluviométricos, com média anual variando de 1000 a 2300 mm.

3.2 Geologia

Na Região Hidrográfica do Guandu, a Província Mantiqueira reúne principalmente rochas ígneas e metamórficas de idade pré-cambriana (Maciço Pedra Branca, Complexo Rio Negro); rochas metassedimentares e metavulcânicas neoproterozoicas (Suíte Rosilha e Grupo São Fidélis); e rochas intrusivas alcalinas de idade mesozóica (unidades Serra do Mendanha e do Marapicu), conforme a Figura 5. Sedimentos cenozoicos coluviais, marinhos e fluviais também comparecem recobrendo as rochas pré-cambrianas (Silva, 2001).

A Região Hidrográfica II, assim como as demais regiões hidrográficas do Estado do Rio

de Janeiro, está inserida na Província Geotectônica Mantiqueira. A Província Mantiqueira (Almeida, 1977; Almeida *et al.*, 1981) representa um sistema orogênico Neoproterozóico que se estende numa faixa de direção NE-SW com mais de 3.000 km de comprimento e largura média de 200 km, paralelo à costa atlântica do sudeste e sul do Brasil, desde a Latitude 15° S até o Uruguai (Heilbron *et al.*, 2004).

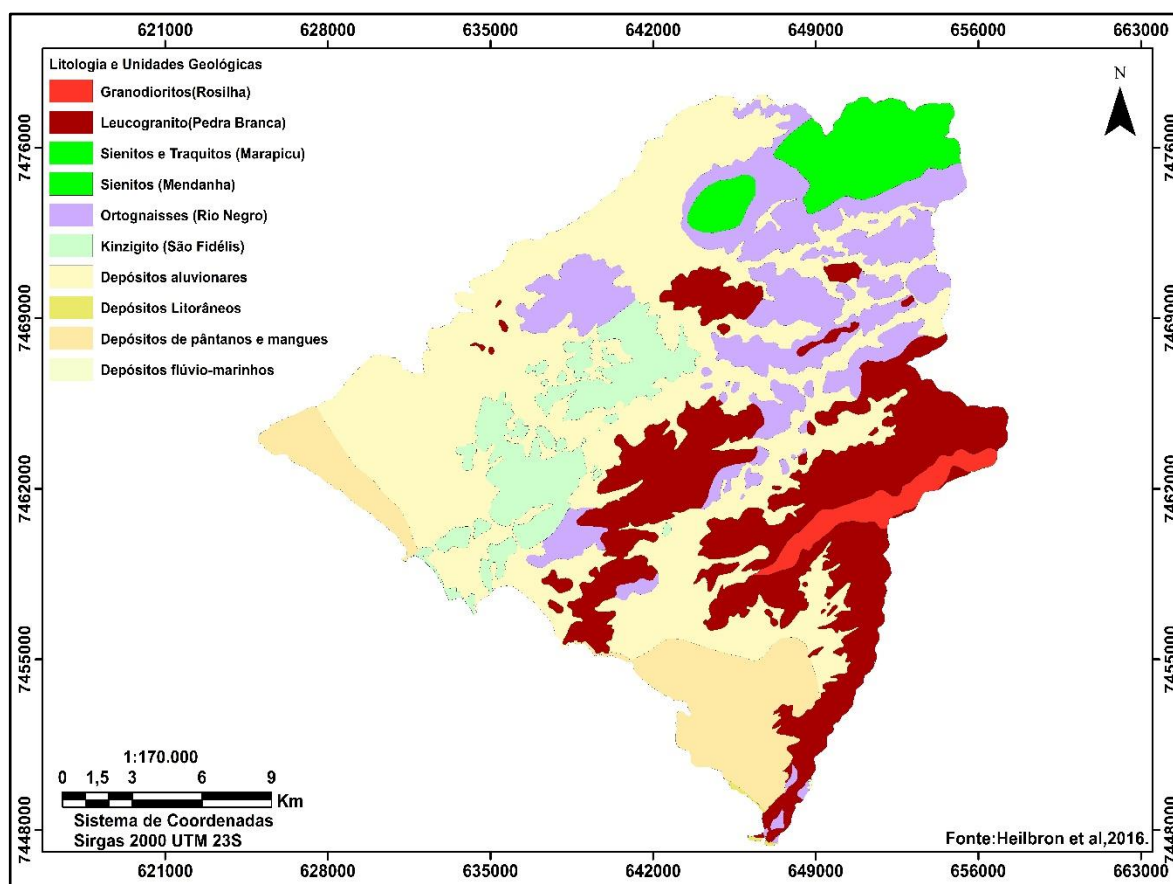
As rochas do Maciço Pedra Branca são caracterizadas por (Hornblenda)-biotita granitóides do tipo-I, de granulação fina a média, textura equigranular a porfirítica localmente com foliação de fluxo magmático preservada. Ocorrem como corpos tabulares, diques, e pequenos batólitos cortando as rochas regionais (Silva, 2001; Porto Júnior; Tesser; Duarte, 2018). As rochas do Complexo Rio Negro são descritas como ortognaisses bandados de granulação grossa.

O Granodiorito Rosilha apresenta expressiva distribuição areal na parte sul do Maciço da Pedra Branca. É uma rocha de cor cinza, textura glomeroporfirítica a porfirítica. Apresenta foliação incipiente marcada pela orientação preferencial da biotita entendida como de origem magmática associada ao seu posicionamento (Valeriano *et al.*, 2012).

As rochas do Grupo São Fidélis são descritas como um conjunto de migmatitos predominantemente bandados com lentes de rochas calcissilicáticas e intercalações de quartzito. Trata-se de um conjunto de gnaisses de origem metassedimentar de predominância metapelítica, caracteristicamente portadores de granada e sillimanita (Valeriano *et al.*, 2012).

Os Complexos Alcalinos do Mendanha e do Marapicu, de idade cretácea, compreende, fundamentalmente, uma suíte de associação predominantemente sienítica insaturada composta por foiaítos, tinguaítos e nefelina sienitos (Ferreira; Angeiras; Araújo, 1965; Helmbold, 1968). Ele é um complexo mineralógica e texturalmente zonado, predominantemente grosso (tipo foiaíto) no centro e traquitóide (e com maior quantidade de feldspato modal, minerais máficos e possivelmente também nefelina) nos bordos (Klein e Montalvano, 1985).

Figura 5. Mapa Geológico da Área de Estudo.



Fonte: Heilbron; Eirado; Almeida, 2016.

Os depósitos colúvio-aluvionares, são representados por cascalhos, areias e lamias resultantes da ação de processos de fluxos gravitacionais e aluviais de transporte de material de alteração das vertentes. O acúmulo de material detrítico originou rampas de colúvio (predomínio de material fino) e depósitos de tálus (predomínio de material grosseiro) junto à base e à meia-encosta dos morros. São materiais que sofreram transporte por gravidade, por movimentos de massa do tipo rastejo ou escorregamentos. Sua morfologia pode ser atribuída em parte à existência de vários pontos de afluxo sedimentar que favorecem a coalescência dos leques, assim como também a efeitos de retrabalhamento e posterior erosão. Encontram-se constituídos por material de espessura, extensão e granulometria variada, que envolve desde argila até blocos de rocha e matações provenientes do embasamento (Silva, 2001).

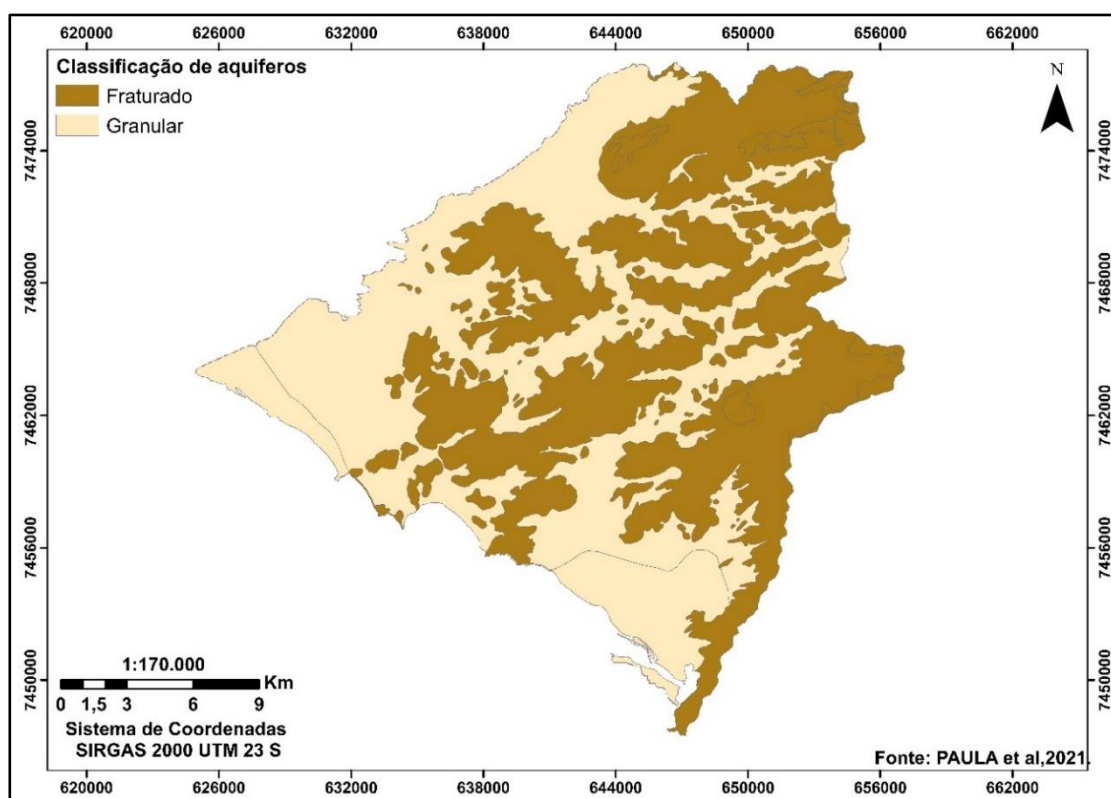
Os depósitos de origem flúvio-marinha correspondem a interdigitações de materiais fluviais e marinhos regressivos holocênicos, em ambientes de planícies de maré e progradação de litoral, em regime estuarino, dando origem aos manguezais. Esses depósitos são constituídos de sedimentos finos, siltico-argilosos ou argilo-silticos, ricos em matéria orgânica (Valeriano *et al.*, 2012).

Os depósitos litorâneos ocorrem em áreas restritas, principalmente ao longo da linha de costa da baixada de Jacarepaguá, ou como depósitos remanescentes, nas proximidades das praias litorâneas. Caracterizam-se por sedimentos constituídos de areia quartzosas resultantes do retrabalhamento pelo vento dos depósitos praias. A principal área de afloramento dos depósitos eólicos compreende campos de dunas fosseis da Barra da Tijuca, a norte e a sul da Lagoa de Marapendi. Estes depósitos são compostos de areias finas a médias quartzosas que se interdigitam a depósitos lagunares, e vêm sendo progressivamente terraplanados e/ou recobertos pela área urbana (Valeriano *et al.*,2012).

3.3 Hidrogeologia

A hidrogeologia da área de estudo está representada pela Figura 6. Na área de estudo ocorrem aquíferos sedimentares ou granulares, caracterizados por depósitos aluvionares, litorâneos e depósitos de pântano e mangue e; fissurais, caracterizados pelo Embasamento Fraturado Diferenciado.

Figura 6. Hidrogeologia da área de estudo.



Fonte: Paula *et al.*,2021.

3.4 Pedologia

Os solos são formados por material orgânico e partículas sólidas de minerais de diversas formas e tamanhos, além de poros ocupados por ar e água. A parte sólida é constituída principalmente por minerais e é analisada do ponto de vista do diâmetro das partículas, dispostas em ordem de tamanho decrescente: areia, silte e argila. Os solos são formados pelas misturas de materiais destas frações e, dependendo da proporção de cada uma delas, é classificado como solo de textura arenosa, siltosa ou argilosa (Collischonn; Dornelles, 2013).

De acordo com Carvalho Filho *et al.*, 2003, os solos presentes na Região Hidrográfica II são do tipo residuais como Argissolos, Planossolos e Latossolos, oriundos do intemperismo de rochas cristalinas; do tipo alóctones como Espodossolos e Gleissolos e do tipo orgânico como os Organossolos.

Os Argissolos possuem propriedades bem heterogêneas e apresentam grande variabilidade na concentração de argila entre seus horizontes, podendo dificultar a infiltração da água nesses solos. Em comparação com os Latossolos, costumam ocupar relevos mais acidentados (Guerra *et al.*, 2014). Apresentam-se espalhados por todo o estado do Rio de Janeiro e correspondem a 33,55% de seu território (Carvalho Filho *et al.*, 2003).

Os Planossolos ocorrem principalmente em algumas baixadas da região litorânea, em geral associados a Gleissolos, em posição ligeiramente mais elevada do que estes, ou ainda em estreitos fundos de vale entremeados a colinas suaves, de baixa amplitude topográfica, onde predominam Argissolos, em geral de caráter abrupto, alguns com características intermediárias com aqueles (planossólicos) (Carvalho Filho *et al.*, 2003).

Os Latossolos são formados a partir de intenso intemperismo do material parental (sedimentos e rochas); as frações de argila normalmente estão nos estágios finais do intemperismo (caulinita e óxidos de ferro e de alumínio). Já as frações de areia são dominadas por materiais resistentes ao intemperismo (Guerra *et al.*, 2014)

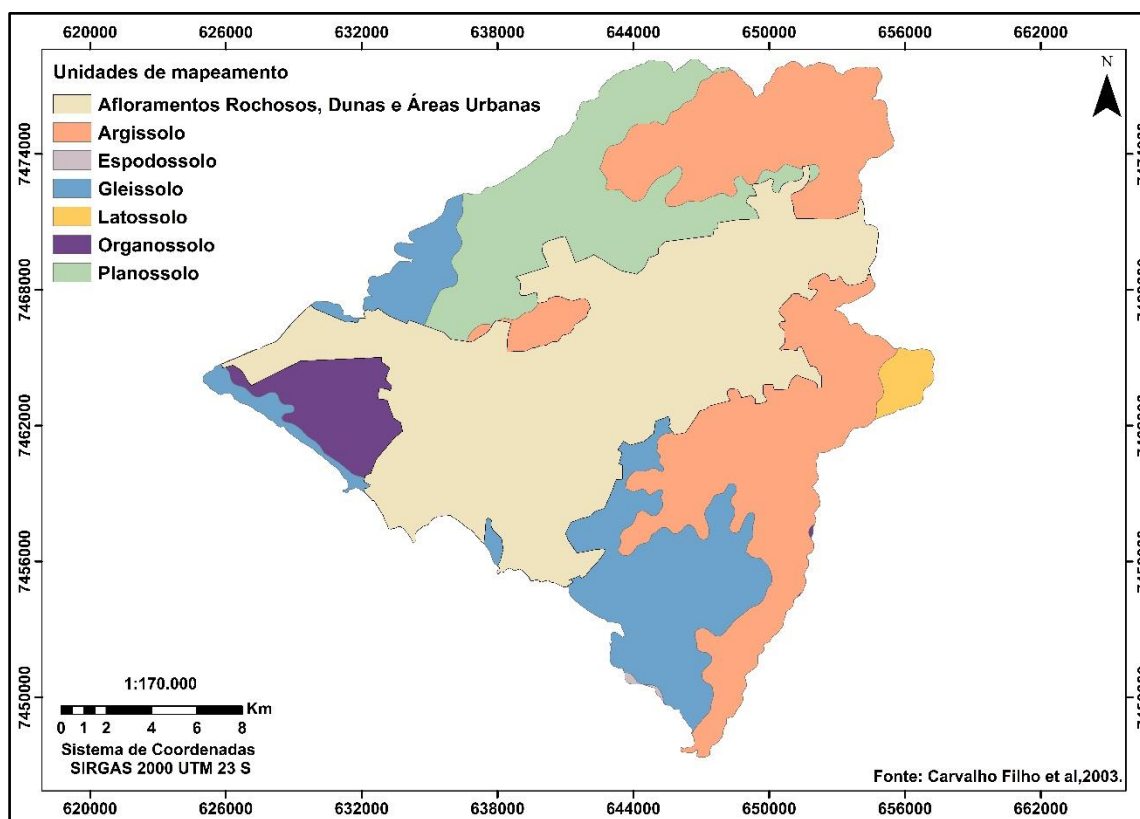
Os Espodossolos são basicamente constituídos por areia, com acumulação de matéria orgânica e óxidos de ferro e alumínio em perfis relativamente mais profundos do solo (Carvalho Filho *et al.*, 2003).

Já em menores proporções, ocupando basicamente as áreas em depressões e o relevo suave dos terrenos, os Gleissolos são frequentemente representados por áreas úmidas, a menos que sejam drenados artificialmente. Normalmente, são representados por sedimentos recentes de rios e drenagens sujeitos a hidromorfismo (mudanças pedogenéticas causadas pela água). Possuem baixo conteúdo de silte e areia e alta porcentagem de argila. São solos relativamente

recentes, pouco evoluídos, em geral originados de sedimentos de idade quaternária, apresentando, portanto, grande variabilidade espacial (Carvalho Filho *et al.*, 2003).

Os Organossolos compreendem solos constituídos por espessa camada de material orgânico, advindo de restos vegetais em grau variável de decomposição. Ocorrem nas áreas próximas ao litoral, muitas vezes em locais deprimidos, barrados pelos cordões arenosos das restingas, sob vegetação de campo tropical hidrófilo de várzea, e em alguns casos em associação com Gleissolos (Carvalho Filho *et al.*, 2003). A Figura 7 ilustra as unidades de mapeamento que ocorrem na área de estudo.

Figura 7. Classes de solos da área de estudo.



Fonte: Carvalho Filho *et al.*, 2003.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Aquisição de dados

Os dados topográficos vetoriais de pontos cotados, curvas de nível, canais de drenagem e limite da área de estudo, foram utilizados para obtenção de um modelo digital de elevação (MDE) e obtidos através do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em parceria com a Secretaria Estadual do Ambiente (SEA), do levantamento cartográfico em escala 1:25.000 para o estado do Rio de Janeiro.

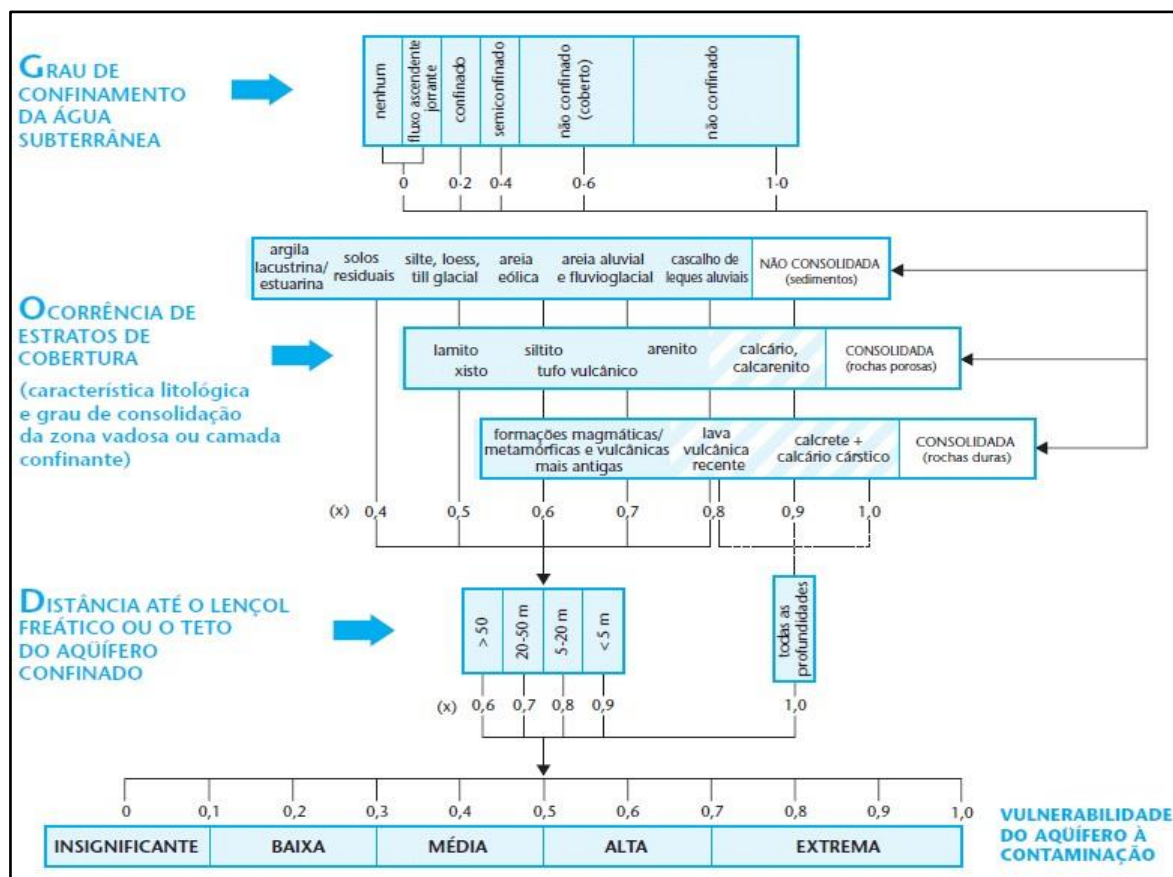
A partir desta base foi gerado MDE com resolução espacial de 10 metros através do interpolador Topo to Raster no programa ArcGIS Desktop v.10.8. Para a correção dos erros de interpolação (depressões espúrias) foi utilizada a ferramenta *fill* no módulo Hydrology (Arc Toolbox). A derivação do MDE para retratar os aspectos geomorfométricos do relevo, e posterior vetorização de lineamentos fotointerpretados, foi realizada pelo modelo de sombreamento da superfície (ferramenta Spatial Analyst Tools – Surface - *Hillshade*) com quatro mapas de iluminação hipotética da superfície, orientados nos azimutes 0°, 45°, 90° e 135°, sem exagero vertical, conforme Jacques, Machado e Nummer (2010) e Teixeira *et al.*(2023). Os lineamentos foram traçados manualmente em escala fixada em 1:100.000 através da ferramenta Editor – *Straight Segment*, sendo utilizada a ferramenta buffer para delimitar a área de influência em 200 metros. De acordo com Barcellos *et al.* (2024), este raio ao redor dos lineamentos está associado à alta produtividade da água, especialmente nas regiões WNW, NW, NNW e ENE. De um total de 618 dados referentes aos poços tubulares (coordenadas UTM, nível estático e profundidade), cedidos através de correio eletrônico pelo Instituto Estadual do Ambiente (INEA) em 2020, somente 99 foram aproveitados por estarem localizados dentro da área de estudo (Figura 4), com a finalidade de avaliar a relação entre a produtividade hídrica e estruturas (Pires; Miranda, 2017; Srivastava; Bhattacharya, 2006; Peterlini; Peccinini; Pinease, 2021), e que posteriormente, foram relacionados aos modelos numéricos de terreno (Carvalho *et al.*, 2015) e a vulnerabilidade dos aquíferos, no presente estudo.

4.2 Procedimento da modelagem de vulnerabilidade de aquíferos

Para Foster *et al.*(2006) a metodologia proposta para se estimar a vulnerabilidade do aquífero à contaminação, segundo o método GOD, corresponde a identificação do tipo de confinamento do aquífero, e atribuição de valores desses parâmetros na escala de 0–1,0; definição dos estratos de cobertura da zona saturada do aquífero relacionado ao grau de consolidação e tipo de litologia correspondendo a uma segunda pontuação, numa escala de 0,4–1,0; e posteriormente a estimativa da profundidade até o lençol freático ou da profundidade do

primeiro nível principal de água subterrânea, com posterior classificação na escala de 0,6–1,0. Este método é melhor representado de forma sucinta e descritiva de acordo com os procedimentos na Figura 8.

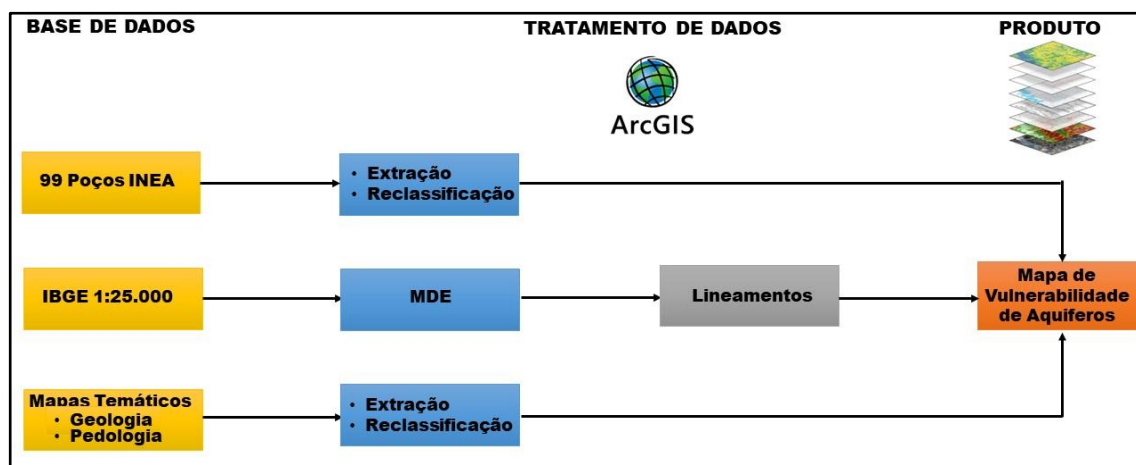
Figura 8. Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação.



Fonte: Foster *et al.*, 2006.

O fluxograma de atividades (Figura 9) apresentado a seguir sintetiza as etapas realizadas no Mapeamento de Vulnerabilidade Hidrogeológica.

Figura 9. Fluxograma de atividades para obtenção do mapa de vulnerabilidade de aquíferos.



O método GOD é aplicado a partir da interação entre três elementos: grau de confinamento (G), ocorrência de estratos de cobertura (O) e distância até o aquífero freático (D). A interação entre estes três parâmetros gera um índice representado por valores de zero a um, indicando classes de vulnerabilidade insignificante (0 a 0,1), baixa (0,1 a 0,3), média (0,3 a 0,5), alta (0,5 a 0,7) ou extrema (0,7 a 1,0). A equação que define o índice de vulnerabilidade é representada da seguinte forma:

$$\text{Índice de Vulnerabilidade GOD} = G_i * O_i * D_i,$$

Onde i = índice de classificação de cada parâmetro. Para o mapeamento da vulnerabilidade pelo método GOD, os índices G, O e D foram multiplicados através da ferramenta *Raster Calculator* do ArcGIS Desktop v.10.8. Em seguida, o valor gerado foi reclassificado respeitando as faixas de vulnerabilidade supracitadas que foram definidas por Foster *et al.* (2006). Os dados geológicos e pedológicos foram utilizados para definir o grau de confinamento do aquífero e a ocorrência de estratos de cobertura, e foram convertidos em arquivo matricial e atribuídos os valores para cada característica, em função das tipologias (litológicas e pedológicas).

Para o parâmetro “G” foi atribuído o valor constante igual a 1, assumindo a condição de aquífero livre. Este tem por característica possuir a zona vadosa pouco espessa e o nível do lençol freático raso. De acordo com Campos (1996), sondagens geomecânicas realizadas em parte da área de estudo, mais precisamente ao longo do Rio Cabuçu, revelaram espessuras de solos variando de 4,00 a 20,00 metros. Devido a estas características, aquíferos classificados como livres apresentam uma maior preocupação quanto à vulnerabilidade, conforme apontado por Ribeiro; Rocha e Garcia (2011).

Em relação à pedologia, para o parâmetro “O” foram atribuídos os seguintes pesos de

acordo com a Tabela 2 e conforme o mapa de solos do município do Rio de Janeiro, em escala 1:250.000 (Carvalho Filho *et al.*, 2003).

Tabela 2. Índices de vulnerabilidade para as classes de solos dominantes nas unidades de mapeamento.

Classe de Solo	Pesos
Argissolo	0,4
Gleissolo	0,7
Latossolo	0,4
Organossolo	0,7
Espodossolo	0,7
Planossolo	0,7
Afloramentos rochosos, dunas e áreas urbanas	1,0

O índice 1,0 foi atribuído a classe áreas urbanas pois nessas áreas possuem maior grau potencial de risco em decorrência da retirada do solo, caracterizado como camada protetora dos recursos hídricos, assim em estudos realizados por Lopes e Scheibe (2015) na Bacia do Rio do Peixe, SC.

Em relação a litologia, e em conformidade ao parâmetro “O” foram atribuídos os seguintes pesos de acordo com a Tabela 3 e conforme o mapa geológico e de recursos minerais do estado do Rio de Janeiro, em escala 1:400.000 (Heilbron; Eirado; Almeida, 2016).

Tabela 3. Índices de vulnerabilidade para as classes geológicas.

Nome	Peso
Sedimentos	0,4
Rocha Consolidada	0,6

Fonte: FOSTER *et al.*, 2006.

Para o parâmetro “D” foi utilizado o mesmo critério estabelecido por Foster *et al.* (2006), na definição dos índices de vulnerabilidade relacionados ao nível estático dos poços da área de estudo de acordo com a Tabela 4. Para este parâmetro foi realizada a interpolação pelo método IDW (*Inverse Distance Weighting*) dos dados vetoriais de nível estático da água subterrânea de cada poço, agrupando os valores em três classes de profundidade do nível estático, de acordo com os critérios do método GOD (Jesus e Santos, 2022).

Tabela 4. Índices de vulnerabilidade para os níveis estáticos dos poços.

Nível estático (m)	Peso
<5	0,9
5-20	0,8
20-50	0,7

Fonte: Jesus e Santos, 2022.

Além dos parâmetros supracitados e tomando como referência o método GOD (Foster *et al.*, 2006) foi realizada adaptação deste por Iop, Reginato e Rosa (2018), sendo consideradas nesta pesquisa a densidade de fraturas ou lineamentos justificando-se uma modificação ao método GOD como um quarto passo capaz de reduzir a pontuação geral em algumas áreas de alta vulnerabilidade. Desta forma foram definidas as classes de lineamentos conforme a Tabela 5.

Tabela 5. Classes de Vulnerabilidade considerando a densidade e a escala de peso do descritor lineamento.

Densidade	Lineamentos/km ²	Peso
Baixa	0,00 a 1,3	0,6
Média	1,3 a 2,0	0,7
Alta	2,0 a 3,0	0,8

Fonte: Iop, Reginato e Rosa, 2018.

A escala da fotointerpretação dos lineamentos é um fator relevante e deve ser escolhida de acordo com o nível de detalhamento desejado. Escalas pequenas não permitem enxergar fraturas que atravessam os poços ou que estejam mais próximas e, por isso, apenas é possível inferir que o poço pode estar na zona de influência do lineamento e que pode estar atravessando com diferentes direções e que não foram identificadas como lineamentos. Isso não acontece em escalas maiores ($\geq 1:25.000$), em que é possível inferir que o poço está interceptando fraturas com mesma direção que o lineamento traçado (Fernandes, 2008). De acordo com Madrucci *et al.*, 2003 em estudos realizados no leste do estado de São Paulo, os maiores valores de produtividade ($> 0,8 \text{ m}^3/\text{h/m}$) se relacionam a poços mais próximos dos lineamentos, entre 100 e 200 m. Isso significa que a área de influência dos lineamentos na produtividade de poços é de até 200 m, considerando-se lineamentos interpretados em escala de trabalho 1:100.000. Além disso, Jacques, Machado e Nummer (2010), através de estudos na borda leste da Bacia do

Paraná, Santa Catarina, afirma esta escala de trabalho ressalta as estruturas NE, de menor extensão sendo, portanto, mais rasas. O mapa de vulnerabilidade foi confeccionado a partir da associação dos quatro mapas referentes aos parâmetros requeridos na metodologia GOD, através de álgebra de mapas, realizada pela ferramenta Raster Calculator. Esta ferramenta integra dois ou mais planos de informações matriciais realizando a multiplicação “pixel a pixel”, gerando um novo plano de informação onde o valor de cada pixel é o resultado desta multiplicação (Medeiros *et al.*, 2011; Jesus e Santos, 2022).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise e triagem dos dados de poços tubulares

Dos 99 poços analisados, 63 estão marcados em aquíferos do tipo fissural, 28 em aquíferos do tipo sedimentar e 8 em aquíferos do tipo misto. Os maiores e menores níveis estáticos registrados, respectivamente, para aquíferos do tipo fissural foram 52,30 e 0,76 metros. Em relação aos aquíferos sedimentares, os maiores e menores níveis estáticos registrados, foram, respectivamente, 37 e 1,63 metros. Por fim, para aquíferos do tipo misto, os valores de máximo e mínimo, foram, respectivamente, 6,33 e 1,84 metros. A Tabela 6 demonstra esta relação. Campos (1996), registrou valores máximos e mínimos de profundidade do nível estático de 5,00 e 0,16 metros, respectivamente, para poços do tipo “cacimba” em parte da área de estudo. De acordo com Iop, Reginato e Rosa (2018) e Sabadini *et al.* (2017), poços com níveis estáticos mais rasos são mais vulneráveis a contaminação por estarem mais próximos à superfície.

Tabela 6. Comparação entre tipos de aquíferos e níveis estáticos máximos e mínimos.

Tipo de aquífero	Nível Estático (m)			
	Máximo	Mínimo	Média	Mediana
Fissural	52,30	0,76	7,90	3,60
Sedimentar	37,00	1,63	4,46	4,41
Misto	6,33	1,84	5,99	5,84

Fonte: elaborado pelo autor.

5.2 Elaboração de mapas de critérios GOD

Nesta etapa foram elaborados os mapas intermediários, correspondentes aos critérios adotados pelo modelo GOD. Estes mapas, criados em arquivos do tipo vetorial (a) e posteriormente convertidos para matrizes, foram reclassificados (b) de acordo com os intervalos de valores propostos para cada parâmetro através da ferramenta Reclassify, no programa ArcGIS Desktop v.10.8.

A Figura 10 mostra a comparação entre os mapas original e reclassificado em formato raster para o nível estático dos poços da área de estudo. Na porção superior desta área onde

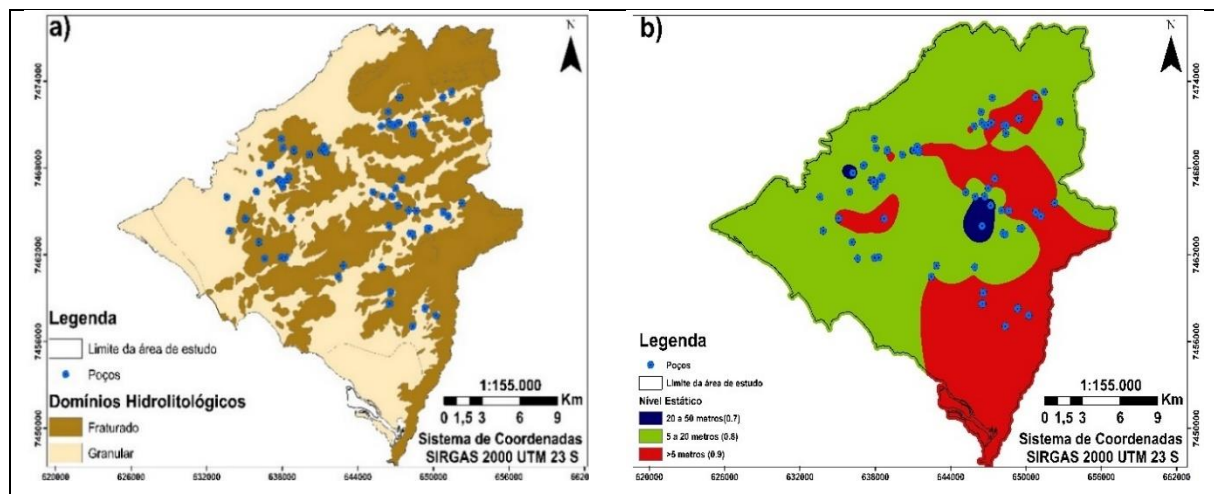
ocorre maior concentração de poços, o nível estático ocorre até 20 metros. Estudos realizados na sub-bacia do rio Siriri, no estado do Sergipe (Ribeiro; Rocha; Garcia, 2011), demonstraram que aquíferos livres, que apresentam pouca profundidade do nível estático, apresentam maior vulnerabilidade a contaminação. De acordo com a Figura 10b os valores mais representativos, 66,48% da área, encontram-se no intervalo de 5 a 20 metros, representados pelo índice 0,8, o que retrata o quão superficial é o aquífero na região estudada. Tal fato também foi observado nos estudos realizados por Jesus e Santos (2022), no mesmo estado, e Araújo *et al.* (2017) em estudos realizados no estado do Ceará. Tal relação é apresentada na Tabela 7. O índice 0,7 corresponde a níveis estáticos variando entre 20 e 50 metros e representa 1,50% da área enquanto o índice 0,9 corresponde a níveis estáticos menores que 5 metros representando 32% da área de estudo para este parâmetro.

Tabela 7. Comparação entre trabalhos realizados com referência a avaliação do nível estático.

Autor/ano	Localidade do estudo	Nº Poços utilizados	Base de dados	Tipo(s) de aquífero(s)	Variação predominante do nível estático (m)
Ribeiro <i>et al.</i> , 2011	Sub-bacia do Rio Siriri, SE	Não informado	SIAGAS /CPRM	sedimentar	5 a 20 metros
Araújo <i>et al.</i> , 2012	Aquiraz, CE	22	SIAGAS /CPRM	sedimentar	5 a 20 metros
Jesus e Santos, 2022	Itabaiana, SE	Não informado	SIAGAS /CPRM	sedimentar e fissural	5 a 20 metros
Kiffer, 2024	RH-II, RJ	99	INEA/RJ	sedimentar e fissural	5 a 20 metros

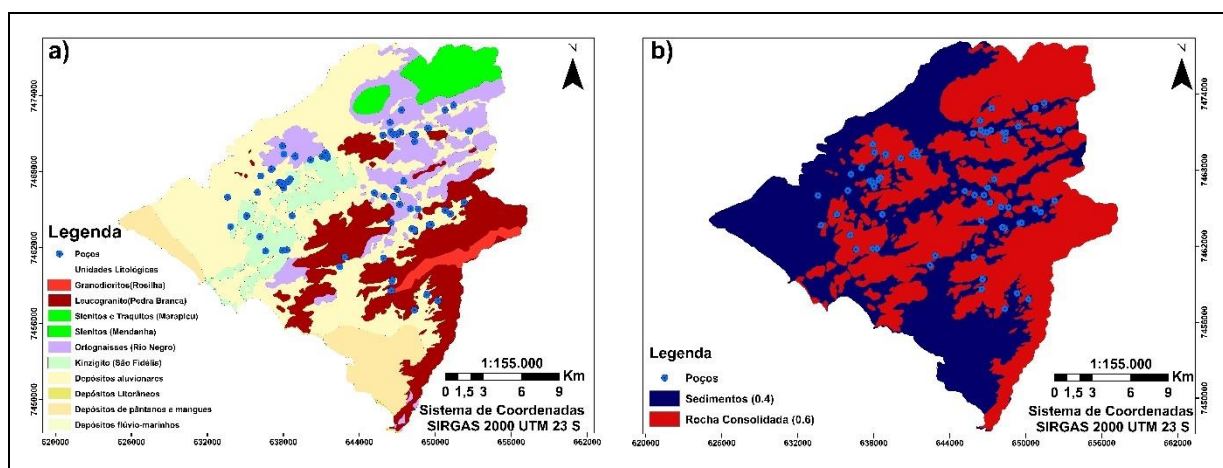
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 10. Comparação entre os mapas de nível estático (a) e reclassificado (b), para os poços da área de estudo.



Com relação à litologia, foram considerados os valores 0,4 e 0,6 (Figura 11b). O valor de 0,4 (49,21% do total da área) está vinculado à presença de sedimentos quaternários e solos residuais, assim como verificado por Jesus *et al.* (2022). Já o valor de 0,6 (50,79% do total da área) está vinculado à presença de rochas consolidadas como observado por Iop, Reginato e Rosa (2018) para rochas vulcânicas, no município de Venâncio Aires, RS.

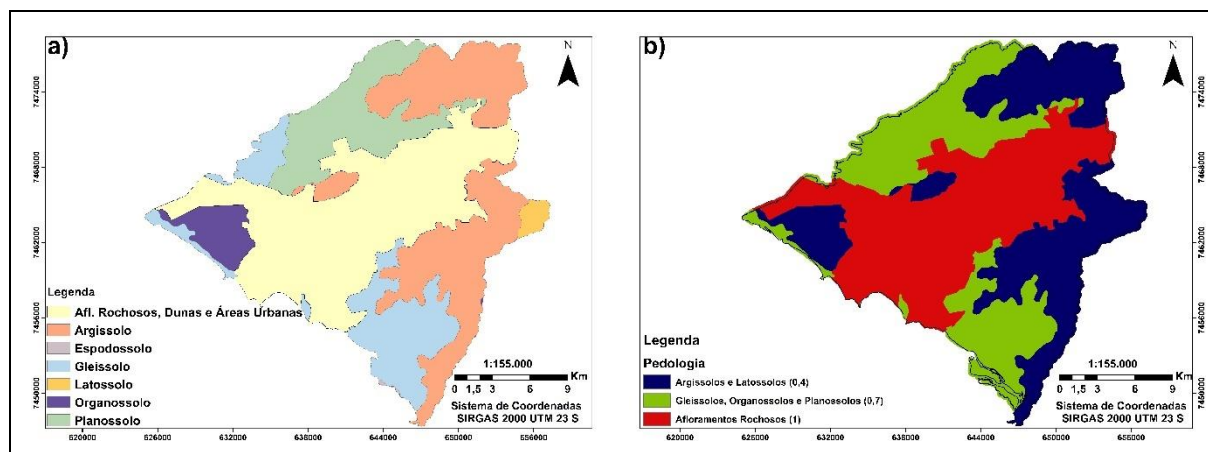
Figura 11. Comparação entre os mapas geológico vetorial e reclassificado.



Com relação à pedologia observa-se que em termos de tamanho, as áreas urbanizadas, representadas pelo peso 1, sobressaem-se sobre as demais classes, conforme a Figura 12, compondo o percentual de 83,77% do total da área. Dentre as unidades de mapeamento apresentadas e de acordo com Lopes *et al.* (2015) as áreas urbanizadas são consideradas mais

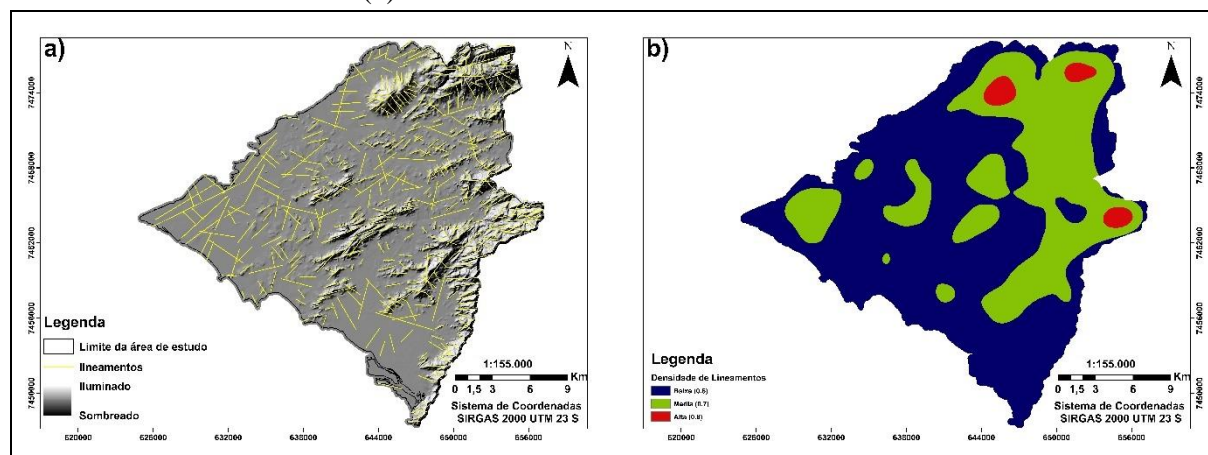
vulneráveis à contaminação, pois são áreas com maior grau potencial de risco em decorrência da retirada do solo, caracterizado como camada protetora dos recursos hídricos.

Figura 12. Comparação entre os mapas pedológico vetorial (a) e reclassificado (b).



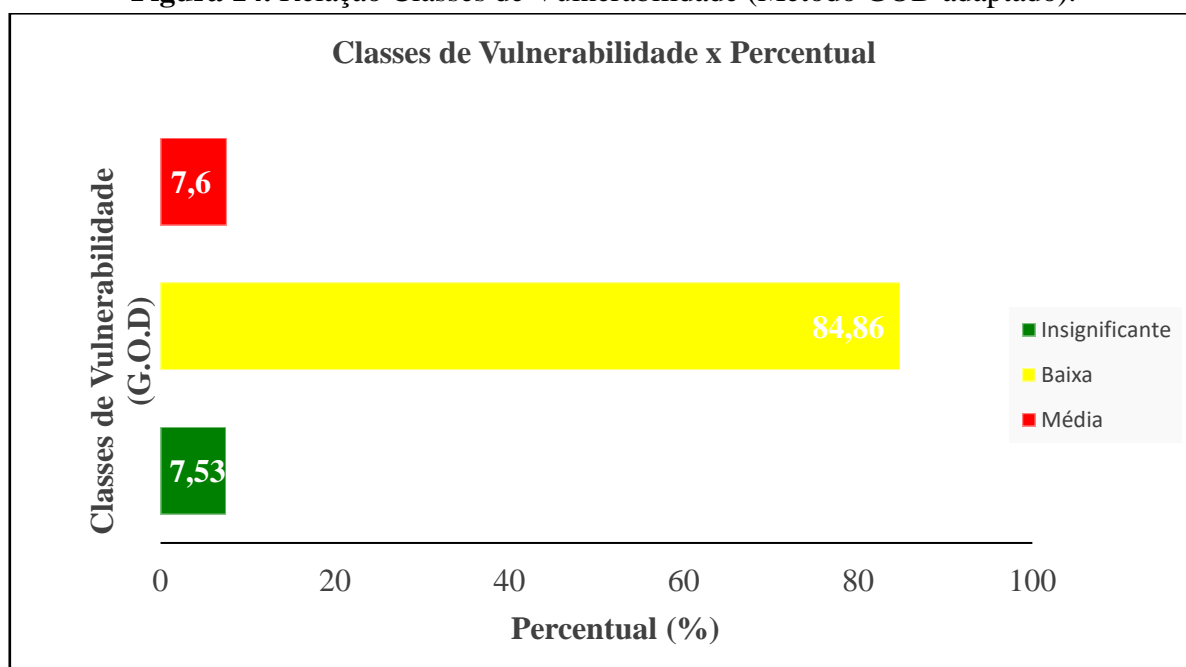
A Figura 13a mostra os lineamentos traçados sobre o MDE com aplicação do relevo sombreado (“Hillshade”) enquanto que a Figura 13b demonstra o mapa de densidade de lineamentos, suas classes e seus índices de vulnerabilidade. É possível observar que na área de estudo há predomínio da classe baixa, ou seja, até 1,3 linhas por km², compreendendo 53,09% do tamanho da área, indicando um índice GOD de vulnerabilidade a contaminação de 0,6 assim como observado por Iop, Reginato e Rosa (2018). Este autor considera que em áreas onde há baixa densidade de lineamentos, há pouco ou ausência de influência na vulnerabilidade dos aquíferos. As classes média e alta compreenderam, respectivamente, 29,04% e 17,85% da área.

Figura 13 - Mapa de lineamentos traçados sobre MDE com relevo sombreado(a) e mapa de densidade de lineamentos reclassificado (b).



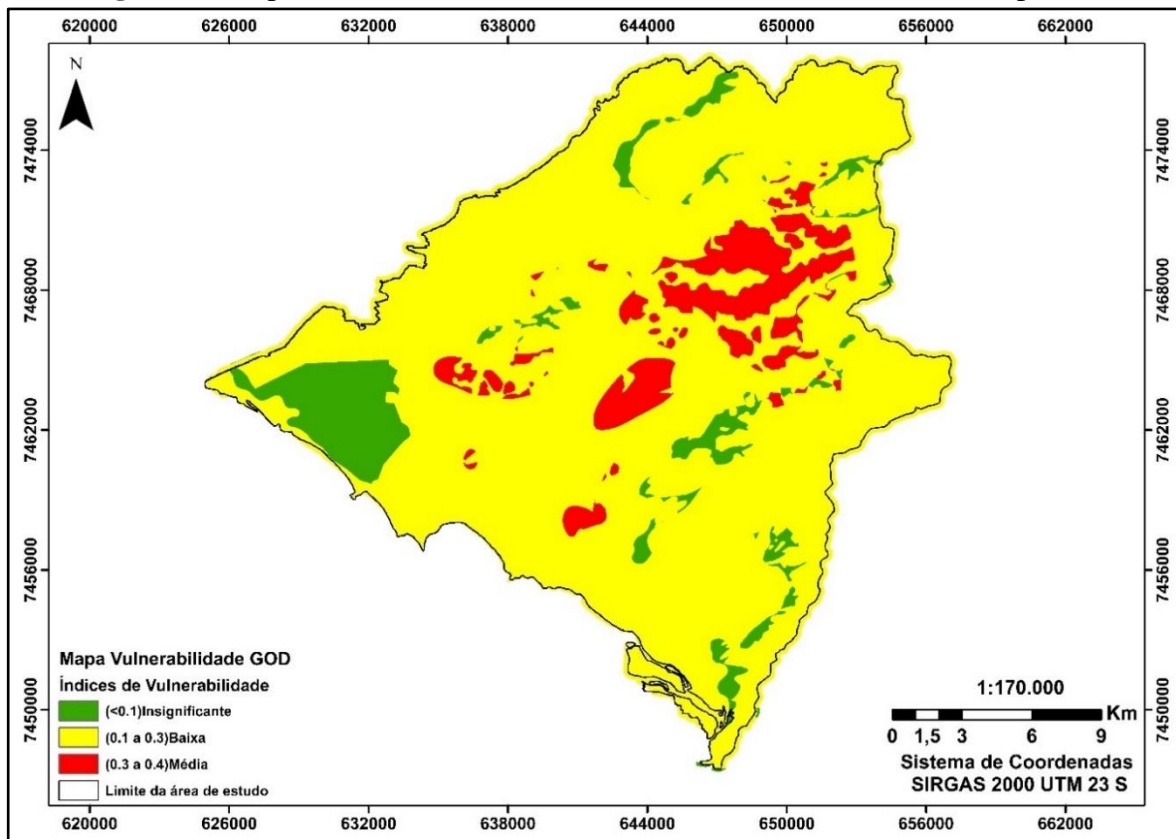
A Figura 14 ilustra a relação entre as Classes de Vulnerabilidade e seus respectivos percentuais quando da aplicação do método GOD adaptado. A vulnerabilidade classificada como insignificante ocorre em 7,53%, enquanto que a classificada como baixa ocorre em 84,86% e, média, 7,6 %, conforme o gráfico presente na Figura 14. A vulnerabilidade média significa que o aquífero é vulnerável a alguns contaminantes, mas somente quando continuamente lançados ou lixiviados. Em comparação a vulnerabilidade alta significa que o aquífero é vulnerável a muitos contaminantes, exceto os que são fortemente adsorvidos ou rapidamente transformados (Foster *et al.*, 2006).

Figura 14. Relação Classes de Vulnerabilidade (Método GOD adaptado).



A Figura 15 demonstra o mapa de vulnerabilidade confeccionado a partir da sobreposição dos quatro mapas referentes aos parâmetros requeridos na metodologia “GOD”, acrescido do mapa de lineamentos. Dessa forma é possível afirmar que as áreas delimitadas como sendo de vulnerabilidade média a contaminação estão localizadas em áreas urbanas que ocupam mais a parte central da área de estudo, assim como apresentado por Lopes e Scheibe (2015).

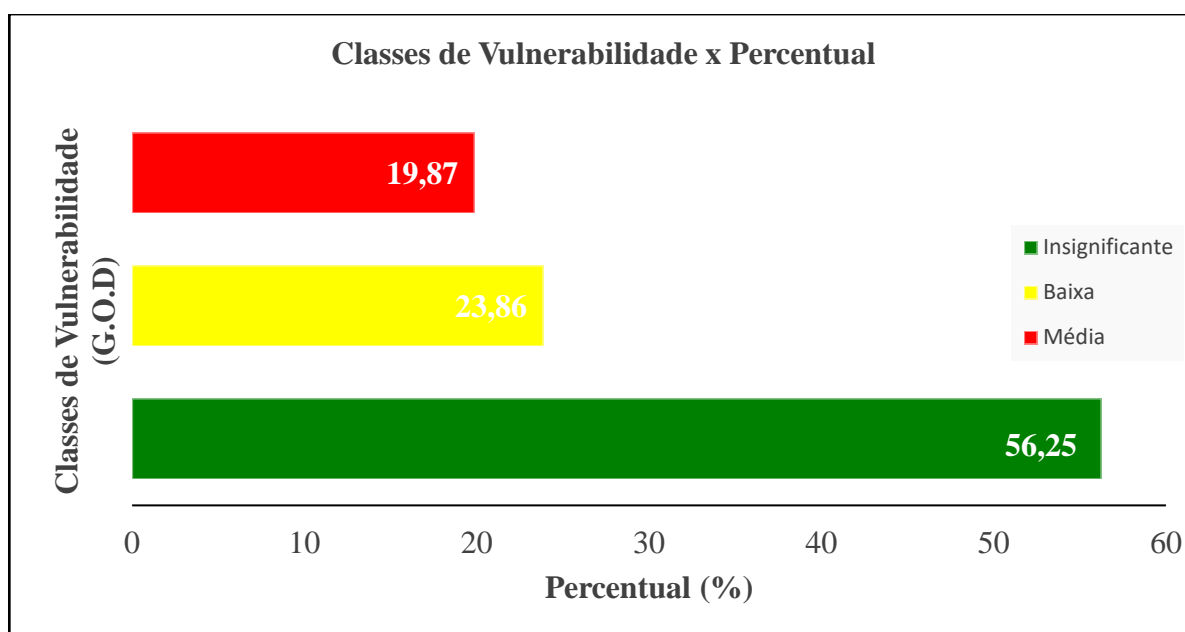
Figura 15. Mapa de vulnerabilidade da área de estudo (método GOD adaptado).



O método GOD demonstrou evidentes vantagens de aplicação, diante, principalmente, da limitada quantidade de dados disponíveis e considerando a escala pequena de trabalho (Gomes *et al*, 2021). Os critérios apresentados foram adequados, representando a realidade da área de estudo, conforme os trabalhos de Lopes e Scheibe (2015), Iop; Reginato e Rosa (2018), Araújo *et al.* (2017) e Jesus e Santos (2022). É importante enfatizar que em escala local este método apresenta resultados satisfatórios, que podem ser empregados no planejamento de políticas públicas e conscientização da população quanto à proteção do aquífero.

A Figura 16 ilustra a relação entre as Classes de Vulnerabilidades e seus respectivos percentuais quando da aplicação do método GOD sem adaptações. A vulnerabilidade classificada como insignificante ocorre em 56,25% enquanto que a classificada como baixa ocorre em 23,86% e, média, 19,87% conforme o gráfico presente na Figura 16.

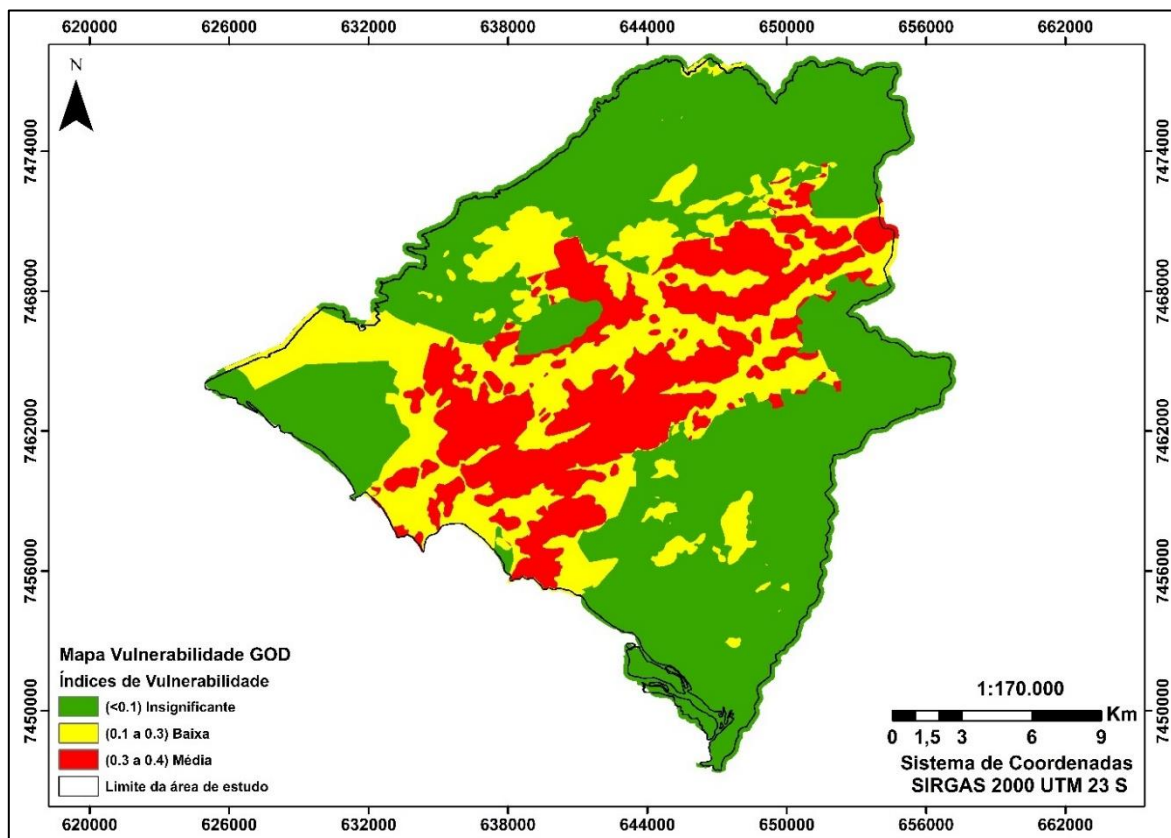
Figura 16.Relação Classes de Vulnerabilidade (Método GOD sem adaptações).



Na Figura 14 a distribuição das classes de vulnerabilidade apresenta, em termos de área, predominância para a classe baixa, devido a ocorrência de lineamentos e rochas fraturadas. Em contrapartida, conforme apresentado na Figura 16, mais de 50% da área de estudo em termos de vulnerabilidade, está classificada como insignificante, sobressaindo sobre as áreas onde a vulnerabilidade está classificada como baixa e média quando da aplicação do método GOD sem adaptações.

A Figura 17 demonstra o mapa de vulnerabilidade confeccionado a partir da sobreposição dos quatro mapas referentes aos parâmetros na metodologia “GOD”, sem inclusão do parâmetro lineamentos. As áreas onde a vulnerabilidade está classificada como baixa e média estão localizadas em áreas urbanas, assim como estudo apresentado por Lopes e Scheibe (2015). Estas ocupam, em grande parte, o centro da área de estudo.

Figura 17. Mapa de vulnerabilidade da área de estudo (método GOD sem adaptações).



Comparando-se os mapas apresentados é possível observar que com a ausência do parâmetro lineamentos ocorrem diferenças em termos de distribuição das classes de vulnerabilidade e seus percentuais. Houve aumento das classes insignificante e média e redução da classe baixa, em termos de percentual de ocupação de área, conforme os dados comparativos da Tabela 8. No entanto, justifica-se a inserção do parâmetro lineamentos devido a ocorrência de rochas fraturadas na área de estudo.

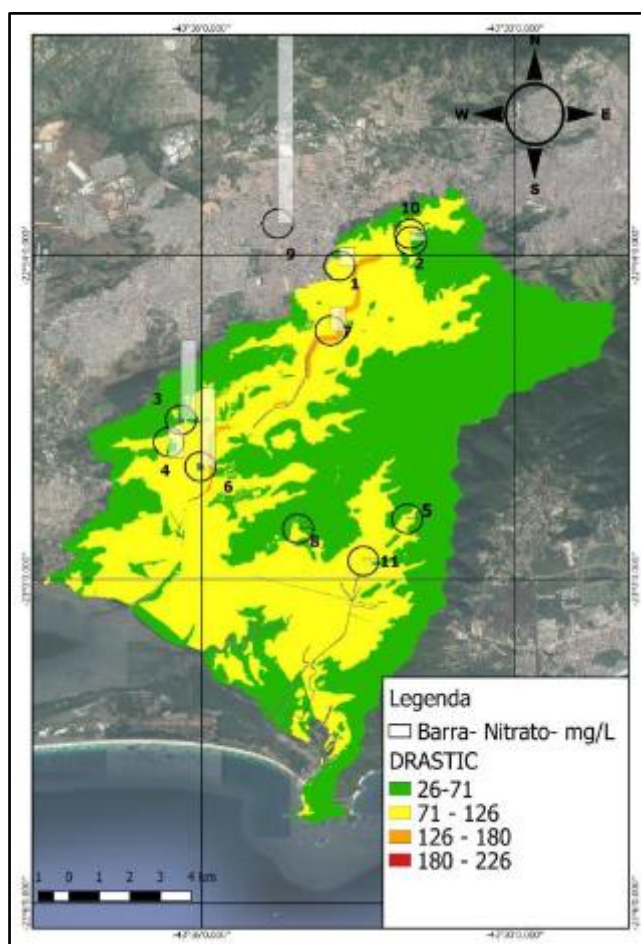
Tabela 8 - Comparação entre a relações percentual/classe de vulnerabilidade aplicadas aos métodos GOD adaptado e sem adaptações.

	Percentual/Classe de Vulnerabilidade		
	Insignificante	Baixa	Média
Método GOD Adaptado	7,53%	84,86%	7,6%
Método GOD sem adaptações	56,25%	23,86%	19,87%

De acordo com Carvalho e Francisco (2020), o mapa DRASTIC gerado revelou três classes de vulnerabilidade para o Aquífero Guaratiba: baixa (53,7%), média (45,5%) e alta (0,8%), com aumento da área da classe de alta (5,4 %) e média (47,1%) vulnerabilidade em detrimento da baixa (47,4%) vulnerabilidade, quando da aplicação do modelo DRASTICA.

Conforme os resultados apresentados pelo método GOD sem adaptações e o modelo DRASTIC aplicado por Carvalho e Francisco (2020), conforme a Figura 18, para porção leste da área de estudo em questão, foi possível identificar que enquanto no método GOD tais áreas foram identificadas como sendo de vulnerabilidade insignificante, no modelo DRASTIC foram identificadas como sendo de vulnerabilidade baixa e média.

Figura 18. Mapa de vulnerabilidade DRASTIC (Carvalho e Francisco, 2020).



Fonte: Carvalho e Francisco, 2020.

6. CONCLUSÕES

O MDE constitui-se como uma importante ferramenta para auxiliar na interpretação da direção dos lineamentos. Os níveis estáticos mínimos e máximos foram, respectivamente, 0,76 e 52,30 metros. Os níveis estáticos com profundidade até 5,0 metros foram encontrados em sua maior parte na porção sudeste e leste da área de estudo, entre 5,0 e 20 metros a distribuição ocorreu nas porções sul, sudoeste, oeste, noroeste e norte e superiores a 50 metros em pequenas porções localizadas no centro e a oeste.

Foi possível observar que há principalmente lineamentos na direção NE-SW e, subordinadamente, nas direções NW-SE e E-W, o que corrobora o *trend* regional observado no estado do Rio de Janeiro.

A utilização do método GOD para a avaliação de vulnerabilidade a contaminação do aquífero na área de estudo, se mostrou uma ferramenta útil para gestão do território e de fácil implementação em SIG. O bom desempenho do método, o baixo custo e a facilidade de obtenção dos dados justificam a sua aplicação em estudos que visam a melhor gestão de recursos hídricos subterrâneos. O uso de SIG também permitiu processar e analisar os dados de forma eficiente, gerando resultados rápidos e atualizáveis, mediante a inserção de novos dados, por exemplo, os lineamentos.

O método GOD sem adaptação aplicado na avaliação do índice de vulnerabilidade natural dos aquíferos foi eficiente, possibilitando a verificação da vulnerabilidade em toda a área de estudo. Observou-se que vulnerabilidade baixa a média compreende a área onde ocorrem tanto sedimentos como rochas consolidadas ao centro, nordeste e sudoeste. Foi observado que houve maior equilíbrio entre a distribuição de classes quando se comparado a aplicação do método GOD adaptado quando da aplicação do método GOD sem a inclusão do parâmetro lineamentos.

Quando da comparação entre os percentuais gerados nos métodos GOD adaptado e o GOD sem adaptação foi possível observar pouca semelhança. De acordo com o trabalho realizado foi possível identificar que o parâmetro lineamentos, utilizado no método GOD adaptado, exerceu influência sobre a definição de classes de vulnerabilidade em comparação à utilização do método GOD sem adaptações, de forma a tornar mais rigorosa a classificação da vulnerabilidade a contaminação. Porém, devido a ocorrência de rochas fraturadas são necessários estudos aprofundados que possam quantificar e qualificar, principalmente em termos de características geométricas, os lineamentos existentes na área de estudo e sua relação com vulnerabilidade a contaminação. Devem ainda, ser testados métodos que utilizem mais

parâmetros na avaliação da vulnerabilidade de aquíferos a contaminação, como o tipo de uso e ocupação do solo na região devido ao crescente demanda pelo uso dos recursos hídricos subterrâneos e por consequência sua deterioração.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBINET, M.; MARGAT, J. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. Bulletin du BRGM (deuxième série), N° 4, p. 13-22, 1970.
- ALLER, L., BENNET, T., LEHR, J.H., PETTY, R.J., HACKETT, G. DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. [Washington, D. C]: **US Environmental Protection Agency**. Ada, Oklahoma. p. 643, 1987. Disponível em: <https://nepis.epa.gov/> . Acesso em 01 de fevereiro de 2024.
- ALMEIDA, F.F.M. O Cráton do São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, v.7, n.4 p.349- 364.1977.
- ALMEIDA F.F.M.; HASUI, Y.; BRITO-NEVES, B.B.; FUCK, R.A. Brazilian Structural Provinces: an introduction. **Earth Science Reviews**. v.17, n.1-2, p.1-29. 1981.
- ANTONAKOS, A. K.; LAMBRAKIS, N. J. Development and testing of three hybrid methods for the assessment of aquifer vulnerability to nitrates, based on the drastic model, an example from NE Korinthia, Greece. **Journal of Hydrology**, [s.l.] v 333, n 2, p. 288-304. fev. 2007.
- ARAÚJO, K. V.; CAVALCANTE, I. N.; OLIVEIRA, R. M.; PEIXOTO, F. S.; LIMA NETO, I. O. Vulnerabilidade natural e perigo de contaminação do Sistema Aquífero Dunas na região norte do Município de Aquiraz, Ceará. **Revista do Instituto Geológico**, v. 38, n. 2, p. 37 – 48, 2017.
- BARCELLOS, J. S. G. **Relação geoespacial entre lineamentos e produtividade hídrica em Unidades Hidrológicas de Planejamento com base em aeromagnetometria e geomorfometria**. 2019. 66 f. Trabalho de Graduação. Área de Concentração: Geologia Ambiental – Geotecnologias. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica..
- BARCELLOS, J.S.G; PIRES, C.A., PINHEIRO, H.S.K, SZAMEITAT, L.S.A; TESSER, L.R; GOMES, O.V.O.; MIRANDA, A.W.A. Geomorphometry and aeromagnetometry as water management tools: A case study in hydrological planning units in southeastern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**. v.133. 2024.
- BATISTA, C.S. P., GESUALDO, G.C, COLLA LEITE, P. C., LASTORIA, G., GABAS,S.G, CAVAZZANA, G. H., CASADEI, J. DE M., & DE AZOIA, T. DE S. (2017). APLICAÇÃO DO MÉTODO GOD PARA AVALIAÇÃO DE VULNERABILIDADE DE AQUÍFERO LIVRE EM BACIA HIDROGRÁFICA. *Águas Subterrâneas*. Recuperado de <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28686>.

BEAR, J. AND VERRUIJT, A. **Modeling of Groundwater Flow and Pollution**. Dordrecht: D.Reidel 1987, 414p. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. 812 p.

BORGES, B. M.; ATHAYDE, G. B.; REGINATO, P.A.R. Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do sistema aquífero Serra Geral no Estado do Paraná – Brasil. **Revista Águas Subterrâneas**. v. 31, n. 4, p. 327-337, 2017.

CABRAL, J.J.S.P. **Ocorrência das águas subterrâneas**. In: FEITOSA, F.A.C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, F.C.; DEMETRIO, J.G.A. Hidrogeologia Conceitos e Aplicações. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. Cap. 2.2. p. 77-91.

CAMPOS, J.C.V. **Estudo hidrogeológico da Bacia do rio Cabuçu - Zona oeste do Município do Rio de Janeiro, RJ**. 1996. 119 p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

CARVALHO, A.M.; FILHO, J.L.A; TERREL, D.; DEHIRA, L. K.; AZEVEDO, A. A. Proposta metodológica para zoneamento de aquíferos fraturados para a avaliação de impactos hidrogeológicos decorrentes da construção de obras lineares. Estudo de caso aplicado ao projeto de túneis. **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental**, v. 5, p. 59-70.2015.

CARVALHO FILHO, A. de; LUMBRERAS. J. F.; WITTERN. K. P.; LEMOS, A. L.; SANTOS, R. D. dos; CALDERANO FILHO. B.; MOTHCI, E. P.; ITURRI LARACH, J. O.; CONCEIÇÃO, M. da; TAVARES. N. P.; SANTOS, H. G. dos; GOMES. J. B. V.; CALDERANO, S. B.; GONÇALVES, A. O.; MARTORANO, L. G.; SANTOS, L. C. de O; BARRETO, W. de O.; CLAESSEN, M. E. C.; PAULA, J. L. de; SOUZA, J. L. R. de; LIMA, T. da C.; ANTONELLO, L. L.; LIMA, P. C. de; OLIVEIRA, R. P. de; AGLIO, M. L. D. Levantamento de reconhecimento de baixa intensidade dos solos do estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Embrapa Solos (Rio de Janeiro, RJ). Escala 1:250.000. (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. 32). 2003.

CARVALHO, G. S. de; FRANCISCO, C. N. Vulnerabilidade à contaminação de aquífero em área urbana – Aquífero Guaratiba, RJ . **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 6, n. 2, p. 186–196, 2020.

CERHI. **Resolução nº 107 de 22 de maio de 2013**. Rio de Janeiro, RJ. 2013. 5p.

CHEN, J.; WILSON, C.R.; FAMIGLIETTI, J.S.; SCANLON, B.R. **Comprehensive Remote Sensing**, v.4, pp.295-314. 2018.

CHRISPIM, Z. M. P. **Análise da vulnerabilidade e caracterização hidrogeoquímica dos aquíferos livres rasos da parte emersa da Bacia Sedimentar de Campos**. 2016. 320 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) -- Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes.

COLLISCHONN, W; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre. Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2013.

COPPETEC. **Elaboração do Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Rio de Janeiro. RT-01 – Estudos Hidrológicos e Vazões Extremas. R3-A – TEMAS TÉCNICOS ESTRATÉGICOS**. 2014. 61p.

CUSTODIO, E.; LLAMAS, M.R. **Contaminación de las Águas Subterráneas**. In: Hidrologia Subterranea. 2 ed. Barcelona: Ediciones Omega, 1996, p. 1905.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. 812 p.

FERNANDES, A. J. Aquíferos fraturados: uma revisão dos condicionantes geológicos e dos métodos de investigação. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 29, n. 1-2, p. 49-72, 2008.

FERREIRA, E.O., ANGEIRAS, A.G. & ARAÚJO, G.G. Roteiro geológico ao maciço do Gericinó. **Avulso do DNPM/DFPM**, v. 38, p.3-41.1965.

FERREIRA, M. I. P.; PINHEIRO, M. R. de C. Instrumentos de gestão. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, [S. l.], v. 2, n. 2, p. 169–222, 2008. DOI: 10.5935/2177-4560.20080014.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D’ELIA, M.; PARIS, M. **Proteção da Qualidade da Água Subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais**. Servmar Ambiental e Engenharia. São Paulo, 2006. 114p.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; ANDREO, B. (2013). The aquifer pollution Vulnerability concept: aid or impediment in promoting groundwater protection? **Hydrogeology Journal**, v.21, pp. 1389 – 1392.2013.

GEOINEA. Portal eletrônico. Disponível em: <https://geoportal.inea.rj.gov.br>. Acesso em 06 de junho de 2024.

GOMES, M. G., DE VARGAS, T., BELLADONA, R., DAL BOSCO, V., DE ARAÚJO, B.; BORTOLIN, T. A. A vulnerabilidade natural de aquíferos fraturados: avaliando os modelos DRASTIC e GOD, Originais e Adaptados. **Geociências**, v. 40 (3)(1980-900X), 735–749. 2021.

GUIGUER, N; KHONKE, M. W. Métodos para determinação da vulnerabilidade de aquíferos. *In: XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, 2002. 13p.

GUERRA, A.J.T., FULLEN, M.A., JORGE, M.C.O. e ALEXANDRE, S.T. Soil erosion and conservation in Brazil. **Anuário do Instituto de Geociências**. UFRJ 37: 81-91, 2014.

HEILBRON, M. **Evolução tectono-metamórfica da seção Bom Jardim de Minas (MG) - Barra do Pirai (RJ): setor central da faixa Ribeira**. 1993. 304 f. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

HEILBRON, M; DUARTE, B. P.; NOGUEIRA, J. R. The Juiz de Fora complex of the Central Ribeira belt, SE Brazil: a segment of Palaeoproterozoic granulitic crust thrust during the Pan-African Orogen. **Gondwana Research**, v.1, p. 373-382, 1998.

HEILBRON, M.; MOHRIAK W. VALERIANO C.M., MILANI E., ALMEIDA J.C.H., TUPINAMBÁ, M. From collision to extension: the roots of the south-eastern continental margin of Brazil. In: Talwani & Mohriak (eds) *Atlantic Rifts and Continental Margins*. **American Geophysical Union, Geophysical Monograph Series**. v.115. p.1-34.2000.

HEILBRON, M., PEDROSA-SOARES, A.C, CAMPOS NETO, M., SILVA, L.C., TROUW, R.A.J., JANASI, V. A Província Mantiqueira. *In: V. Mantesso-Neto, 16 A. Bartorelli, C.D.R. Carneiro, B.B. Brito-Neves (orgs.). Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, Beca, p. 203- 234. 2004.

HEILBRON, M.; VALERIANO C. M.; TASSINARI, C.C.G.; ALMEIDA J.C.H.; TUPINAMBÁ. M; SIGA, O. & TROUW, R.J.A. Correlation of neoproterozoic terranes between the Ribeira Belt, SE Brazil and its African counterpart: comparative tectonic evolution and open questions. **London, Geological Society, Special Publications** , v. 294, p. 211-237. 2007.

HEILBRON, M.; EIRADO, L. G.; ALMEIDA, J. **Mapa geológico e de recursos minerais do estado do Rio de Janeiro**. Belo Horizonte: CPRM, 2016.

HELMBOLD, R. Basic and alkaline intrusions in the State of Guanabara, Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.40 (supl.), p. 183-185.1968.

HIRATA, R.; SUHOGUSOFF, A. V.; MARCELLINI, S. S.; VILLAR, P. C.; MARCELLINI, L. As águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil. 1.ed. São Paulo: Universidade de São Paulo/ Instituto de Geociências.2019. 66p.

INEA (Instituto Estadual do Ambiente). Disponível em: <https://www.inea.rj.gov.br>

IRITANI, M. A.; EZAKI, S. **Caderno As águas subterrâneas do Estado de São Paulo**. 3.ed. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente – SMA. 2012. 106p.

IOP, G.T.C.; REGINATO, P.A.R; ROSA, M.L.C.C. Avaliação da Vulnerabilidade e do Risco Potencial de Contaminação de Água subterrânea no Município de Venâncio Aires – RS. **Águas Subterrâneas** - Seção Estudos de Caso e Notas Técnicas, 2018.

JACQUES, P. D.; MACHADO, R.; NUMMER, A. Lineamentos estruturais na borda leste da Bacia do Paraná em Santa Catarina: análise multiescala com base em imagens LANDSAT e SRTM. **Pesquisas em Geociências**, [S. l.], v. 37, n. 2, p. 117–131, 2010. DOI: 10.22456/1807-9806.22653.

JANG, C.; CHEN, S. Integrating indicator-based geostatistical estimation and aquifer vulnerability of nitrate-N for establishing groundwater protection zones. **Journal of Hydrology**, vol. 523, p. 441-45, 2015.

JESUS, J.B; SANTOS, M,M. Vulnerabilidade das águas subterrâneas no município de Itabaiana, Sergipe, pelo método GOD com o uso de SIG. **Open Science Research**,2022.

KARMANN, I.. **Ciclo da água, água subterrânea e sua ação geológica**. Decifrando a terra. Tradução . São Paulo: Oficina de textos, 2003. p. 113-138.

KAZAKIS, N.; VOUDOURIS, K. S. Groundwater vulnerability and pollution risk assessment of porous aquifers to nitrate: modifying the DRASTIC method using quantitative parameters. **Journal of Hydrology**, vol. 525, p. 13-25, 2015.

KLEIN, V.C., & MONTALVANO, J.L. Hackmanita das rochas alcalinas das Serras do Mendanha e de Madureira, Rio de Janeiro. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**. 57, p. 169-173.1985.

LIMA, L. A.; SILVA JUNIOR, G. C.; MENEZES, J. M.; SEABRA, V.S.Favorabilidade de Aquíferos Fraturados - Bacia Hidrográfica do Rio São Domingos- Estado do Rio de Janeiro. **Anuário do Instituto de Geociências-UFRJ**. v. 32 – 2. p. 51-61.2009.

LIMA, L. A.; SILVA JUNIOR, G. C.; MENEZES, J. M.; COSTA, M. C. O. Uso de sistema de informação geográfica para a determinação da vulnerabilidade à contaminação de aquíferos fraturados: Bacia Hidrográfica do Rio São Domingos – São José de Ubá/RJ. **Águas Subterrâneas**, v. 31, n. 3, p. 181–206, 2017. DOI: 10.14295/ras.v31i3.28661.

LINHARES, F.M. **Vulnerabilidade intrínseca e risco de contaminação do aquífero livre da bacia hidrográfica do Rio Gramame-PB**. 2012. 91 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental. Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia.

LINHARES, S. S. **Avaliação da vulnerabilidade de aquíferos no estado de Sergipe e município de Aracaju**. 2018. 95 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos. Universidade Federal de Sergipe.

LOPES, A.R.B.C; SCHEIBE, L. F. Vulnerabilidade e risco de contaminação das águas do Sistema Aquífero Serra Geral na Bacia do Rio do Peixe/SC. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 30, n. 3, p. 560-570, 2015.

MADRUCCI, V.; ARAÚJO, C. C.; TAIOLI, F. Sensoriamento Remoto, aerogeofísica e geoprocessamento aplicados ao estudo de aquífero fraturado em terreno cristalino, leste do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 33, p. 43-52, 2003.

MAGRINI, A. Política e gestão ambiental: conceitos e instrumentos. **Revista Brasileira de Energia**, Itajubá, v. 8, n. 2, p. 1-8, jun. 2001.

MANOEL FILHO, J. **Ocorrência das águas subterrâneas**. In: FEITOSA, F.A.C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, F.C.; DEMETRIO, J.G.A. Hidrogeologia Conceitos e Aplicações. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. Cap. 2.1. p. 51-75.

MAIA, P.H.P; MOREIRA, M.J. Um novo método para avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, v. 15, n. 2, p. 29-40, 2011.

MARQUES, E.D. **Hidrogeoquímica das cavas de extração de areia na Região do Bairro Piranema – Distrito Areeiro de Seropédica-Itaguaí – RJ**. 2006. 112 p. Dissertação de Mestrado. Instituto de Química, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2006.

MEDEIROS, C. M.; RIBEIRO, M. A. F. M.; RUFINO, I. A. A; BARBOSA, D. L. Mapeamento da vulnerabilidade de parte da Bacia Sedimentar do Baixo Curso do rio Paraíba utilizando o método GOD. In: **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR**,

Curitiba, PR, Brasil, 2011.

MFONKA, Z; NGOUPAYOU, J. R. N, NDJIGUI, P. D., KPOUMIE, A; ZAMOURI, M., NGOUGH, A. N., MONCHEROU, O.F., RAKOTONDRABE, F., RASOLOMANANA, E. H. A GIS-based DRASTIC and GOD models for assessing alterites aquifer of three experiment tal watersheds in Foumban (Western Cameroon). **Groundwater for Sustainable Development**. V.7.p.250-264. 2018.

MOURA, P. **Vulnerabilidade de aquíferos: uso dos métodos DRASTIC e GOD na porção norte do complexo industrial e portuário do Pecém, Estado do Ceará.** Fortaleza. 128 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará. 2014.

MURAT, V. **Étude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères à la pollution application aux aquifères granulaires du Piémont Laurentien.** Thèse du doctorat, Université Du Québec, Québec, 2000.

ONU. **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos.** 2022. Disponível em: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367303_por. Acesso em: 30 de janeiro de 2024.

PAULA, T. L. F.; GALVÃO, M. J.T.G; DINIZ, J. A. O.; FREDDO FILHO, V. J. **Mapa hidrogeológico do estado do Rio de Janeiro.** [S. l.]: CPRM, 2021.

PEIXOTO, F. S.; CAVALCANTE, I. N.; ARAÚJO, K. V.; SILVEIRA, R. N. M. C. Conservação e proteção da água subterrânea: uma revisão de metodologias de mapeamento de aquíferos para o ordenamento territorial. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 21, n. 75, p. 1–14, 2020.

PEÑA-ARANCIBIA, J. L., MAINUDDIN, M., KIRBY, J. M., CHIEW, F. H. S., MCVICAR, T. R., VAZE, J., Assessing irrigated agriculture's surface water and groundwater consumption by combining satellite remote sensing and hydrologic modelling, **Science of The Total Environment**. Australia, v. 542, p. 372-382, 2016.

PERHI-Guandu. **Plano Estratégico de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Guandu, da Guarda e Guandu Mirim.** PROFILL, 2017. Disponível em: <https://www.comiteguandu.org.br/downloads/ARTIGOS%20E%20OUTROS/Apresentacao-PERH-Guandu-05-2017.pdf>.

PETERLINI, G.; PECCININI, J.P.; PINESE, A. C. Proposed method for the evaluation of water productivity in fractured aquifers. **Journal of Hidrology**. v. 602.2021.

PIRES. C.A; A. W.A. MIRANDA. Análise geométrica de lineamentos e suas relações com águas subterrâneas associadas ao aquífero Guaratiba – região de Campo Grande e Guaratiba, RJ. In: **Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Florianópolis, SC. 2017.

PORTO JR, R.; TESSER, L.R.; DUARTE, B.P. A origem do acamamento magmático no granito Pedra Branca, Maciço da Pedra Branca, Rio de Janeiro, Brasil. São Paulo, UNESP, **Geociências**, v. 37, n. 2, p. 237-251, 2018.

REBOUÇAS, A. da C.; BRAGA, B. P. F.; TUNDISI, J. G. Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação. **Escrituras**, v. 2, p. 687-703, 2002.

REGINATO, P. A. R.; AHLERT, S. Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Serra Geral na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul. **Águas Subterrâneas**, v. 27, n. 2, P. 32- 46, 2013.

RIBEIRO, D. M.; ROCHA, W. F.; GARCIA, A. J. V. Vulnerabilidade natural à contaminação dos aquíferos da sub-bacia do rio Siriri, Sergipe. **Águas Subterrâneas**, v. 25, n. 1, p. 91-102, 2011.

RIBEIRO, L.; PINDO, J.C.; DOMINGUEZ-GRANDA, L. Assessment of groundwater vulnerability in the Daule aquifer, Ecuador, using the susceptibility index method. **Science of the Total Environment**, v. 574, p. 1674-1683, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.004>

SABADINI, S. C; RUCHKYS, Ú.A.; VELÁSQUEZ, L.N. M.; TAYER, T. C. Potencial de vulnerabilidade natural de aquíferos à contaminação no quadrilátero ferrífero, Minas Gerais e sua relação com a atividade minerária de ouro. **Caderno de Geografia**. 27, n. 49, p.340-352, 2017. Pontificia Universidade Catolica de Minas Gerais.

SILVA, L. C.; CUNHA, H.C.S. **Geologia do Estado do Rio de Janeiro: texto explicativo do mapa geológico do Estado do Rio de Janeiro**. Brasília: CPRM. 2a ed.2001.

SILVA, M.C.L; BRICALLI, L.L. Padrões de Lineamentos e Controle Estrutural, Tectônico e Neotectônico no Relevo da Região de Pancas (Espírito Santo, Sudeste do Brasil). **Sociedade & Natureza**, v.35. 2023.

SILVA, W. F. da. **Análise da vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação na região metropolitana de Maceió**. 158 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e

Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2013.

SRIVASTAVA P.K, BHATTACHARYA A.K. Groundwater assessment through an integrated approach using remote sensing, GIS and resistivity techniques: a case study from a hard rock terrain. **International Journal Remote Sensing**.v.27.p.4599–4620. 2006.

TALTASSE, P. **Mapas de vulnerabilidade à poluição dos lençóis aquíferos do município de Campinas (SP)**. 1. Ed, São Paulo: Editora USP / Instituto de Geociências, 1972.

TEIXEIRA, G., & BRICALLI, L. L. Influência de lineamentos regionais na morfologia do Maciço Mestre Álvaro (Serra-ES). **Revista Geografias**, v.19(1), p.35–54. 2023.

TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T.R.; TOLEDO, M.C.; TAIOLI, F. , **Decifrando a Terra**, 2 ed. São Paulo, Companhia Editora Nacional, 2009, 624 p.

TUBBS, D.; MARQUES, E. D.; GOMES, O. V. O.; SILVA-FILHO, E. V. Impacto da mineração de areia sobre a química das águas subterrâneas, Distrito Areeiro da Piranema, Municípios de Itaguaí e Seropédica, Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Geociências**, v.41(3), p: 472- 485. 2011.

VALERIANO, C. de M.; JUNIOR, R. P.; ALMEIDA, J.; SILVA, L. G. E.; DUARTE, B.; SCHMITT, R.; VALLADARES, C.; NOGUEIRA, J. R.; RAGATKY, C. D.; GERALDES, M.; VALENTE, S; MANSUR, K. L.; GONTIJO, A.; CORVAL, A.; DUTRA, T.; VALENÇA, J; ESTEVES, A.; PALERMO, N.; PEREIRA, R. M.; GUIMARÃES, P. V.; DA SILVA, F. de L. AMARAL, C. P. do; TUPINAMBÁ, M.; HEILBRON, M. **Geologia e recursos minerais da folha Baía de Guanabara, SF-23-Z-B-IV, Estado do Rio de Janeiro**. Escala 1:100.000: Sistema de Informação Geográfica-SIG. Belo Horizonte: CPRM, 2012. 156 p. (Programa Geologia do Brasil).