

## VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM AQUÍFERO FRATURADO, ITABAIANA (SE) – APLICAÇÃO DO MÉTODO GOD

*VULNERABILITY TO GROUNDWATER CONTAMINATION OF FRACTURED AQUIFER IN ITABAIANA (SE) - APPLICATION OF THE GOD METHOD*

**Thaís Santos JESUS<sup>1</sup>, Luiz Alberto VEDANA<sup>1</sup>, Roger Dias GONÇALVES<sup>1</sup>, Franciele Caroline GUERRA<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal de Sergipe – UFS. Departamento de Geologia. Rosa Elze, São Cristóvão – SE.

E-mail: thaissantos2014@hotmail.com; luizvedana@gmail.com; rdgon@hotmail.com

<sup>2</sup>Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Instituto de Geociências. Rua Carlos Gomes, 250. Cidade Universitária Zeferino Vaz - Barão Geraldo, Campinas – SP. E-mail: fran.guerra94@gmail.com

Introdução  
Área de estudo  
Contexto geológico  
Aspectos hidrogeológicos  
Materiais e métodos  
Resultados e discussão  
Grau de Confinamento (G)  
Ocorrência do Substrato Geológico (O)  
Distância até o Lençol Freático (D)  
Conclusões  
Referências

**RESUMO** - Atualmente no Brasil, mesmo com o uso das águas subterrâneas condicionado à obediência de diversas formalidades legais que devem assegurar a qualidade e disponibilidade ao usuário, ainda existem inúmeros poços ilegais que dificultam a gestão das águas subterrâneas e a compreensão da vulnerabilidade deste recurso. Este estudo emprega o método GOD com o objetivo de mapear, em ambiente SIG, a vulnerabilidade natural à contaminação das águas subterrâneas do aquífero fraturado em Itabaiana/SE, agreste nordestino. O método requer análise de três parâmetros: grau de confinamento (G); litologia e grau de consolidação da zona vadosa ou camadas confinantes (O); e profundidade da água (D). Cada parâmetro tem seus valores ponderados de 0 a 1, analisados a partir de dados disponíveis e públicos. Após atribuídos os valores, o índice de vulnerabilidade é gerado através do produto dos parâmetros obtidos, e a partir da interpolação através do método de ponderação pelo inverso da distância (IDW), empregado no QGIS, foi produzido o mapa de vulnerabilidade natural do aquífero fraturado. Itabaiana apresentou predominância de baixos índices de vulnerabilidade à contaminação, entretanto regiões de vulnerabilidade moderada ocorrem em porções isoladas, próximas a grandes corpos d'água, e requer uma atenção especial por parte dos órgãos públicos.

**Palavras-chave:** Hidrogeologia. Aquífero fraturado. Vulnerabilidade. Método GOD.

**ABSTRACT** - Currently in Brazil, even with the use of groundwater conditioned to compliance with various legal formalities that should ensure its quality and availability to users, there are still numerous illegal wells that hinder the management of groundwater and the understanding of its vulnerability as a natural resource. This study employs the GOD method with the aim of mapping, in a GIS environment, the natural vulnerability to contamination of the fractured aquifer in Itabaiana (Sergipe state), in the northeastern agreste region of Brazil. The method requires the analysis of three parameters: aquifer confinement (G); lithology and intensity of consolidation of the vadose zone or confining layers (O); and groundwater depth (D). Each parameter has weighted values from 0 to 1, analyzed based on available public data. After assigning the values, the vulnerability index is generated by multiplying the obtained parameters. The map of natural vulnerability of the fractured aquifer was produced using the inverse distance weighting (IDW) interpolation method employed in QGIS software. Itabaiana showed predominantly low vulnerability indices to contamination; however, regions with moderate vulnerability occur in isolated portions near large water bodies and require special attention from public agencies.

**Keywords:** Hydrogeology. Fractured aquifer. Vulnerability. GOD method.

### INTRODUÇÃO

No cenário atual, com a taxa de crescimento populacional e ritmo de consumo, o uso das águas subterrâneas tem se tornado cada vez mais imprescindível na agricultura, indústria, comércio e até mesmo no uso doméstico. Dados da Agência Nacional das Águas (ANA, 2010) apontam que pouco mais de 50% dos 5.570 municípios brasileiros já dependem total ou parcialmente das águas

subterrâneas para seu abastecimento público, contudo, esse número ainda é baixo frente ao potencial hidrogeológico que se tem conhecimento hoje.

É importante salientar que o papel das águas subterrâneas vai muito além do abastecimento de água às populações e produção de bens e serviços, elas regulam ecossistemas e alimentam os corpos d'água superficiais, pois em tempos de estiagem,

para esses corpos se manterem perenes, necessitarão de uma recarga oriunda dos aquíferos, caso especialmente importante na região Nordeste do Brasil (Gonçalves et al., 2020).

Apesar do uso das águas subterrâneas estar condicionado à obediência de diversas formalidades legais que asseguram a qualidade e disponibilidade ao usuário, ainda há inúmeros poços ilegais que dificultam a gestão das águas subterrâneas. Essa ilegalidade traz prejuízos em vários âmbitos, sobretudo no âmbito ambiental e em áreas de expansão agrícola (Silva et al., 2021).

O mapeamento da vulnerabilidade de unidades

aquíferas à contaminação, via de regra, é o primeiro passo na avaliação do perigo de contaminação das águas subterrâneas e na proteção de sua qualidade, em escala tanto municipal quanto estadual (Foster et al., 2006).

Conhecer as áreas mais propensas à contaminação de aquíferos é imprescindível, inclusive, para a gestão e proteção das águas superficiais. Diante disto, o presente trabalho objetiva estimar a vulnerabilidade natural de aquíferos fraturados em Itabaiana/SE, nordeste brasileiro, por meio da utilização de um sistema de informações geográficas apoiado ao método GOD.

## ÁREA DE ESTUDO

Localizado geograficamente na região nordeste do Brasil e central do estado de Sergipe, o município de Itabaiana dista cerca de 50 km da capital Aracaju. O acesso se dá pelas rodovias pavimentadas BR-235 e BR-101, como mostra a figura 1. Itabaiana possui uma área de 337,295 km<sup>2</sup> e detém a quarta maior população de Sergipe com

103.620 habitantes (prévia IBGE, 2022), sendo 77% em zona urbana e 23% em zona rural. Possui atualmente uma economia baseada no comércio de alimentos, têxteis e material de construção, além da agricultura de mandioca, tomate e batata-doce. Essas atividades geraram um PIB per capita de R\$ 19.906,73 no ano de 2021 (IBGE, 2021).

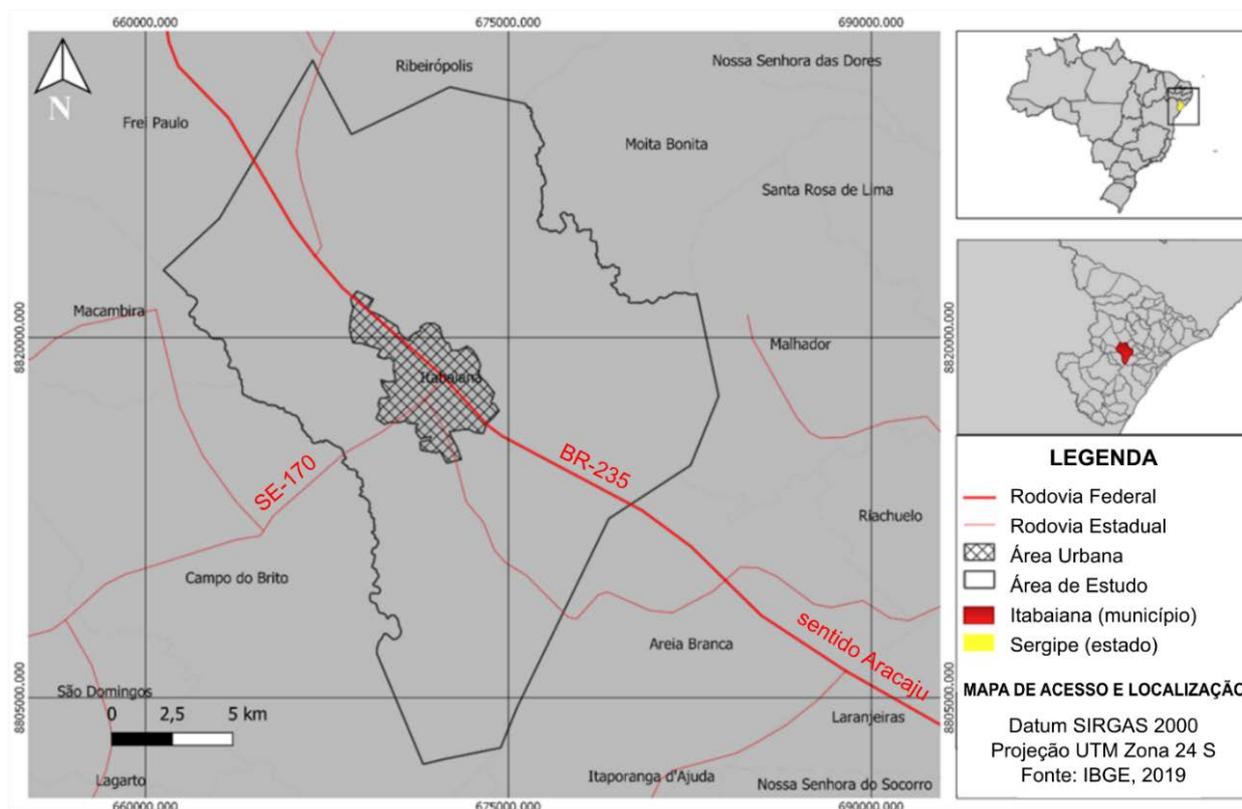
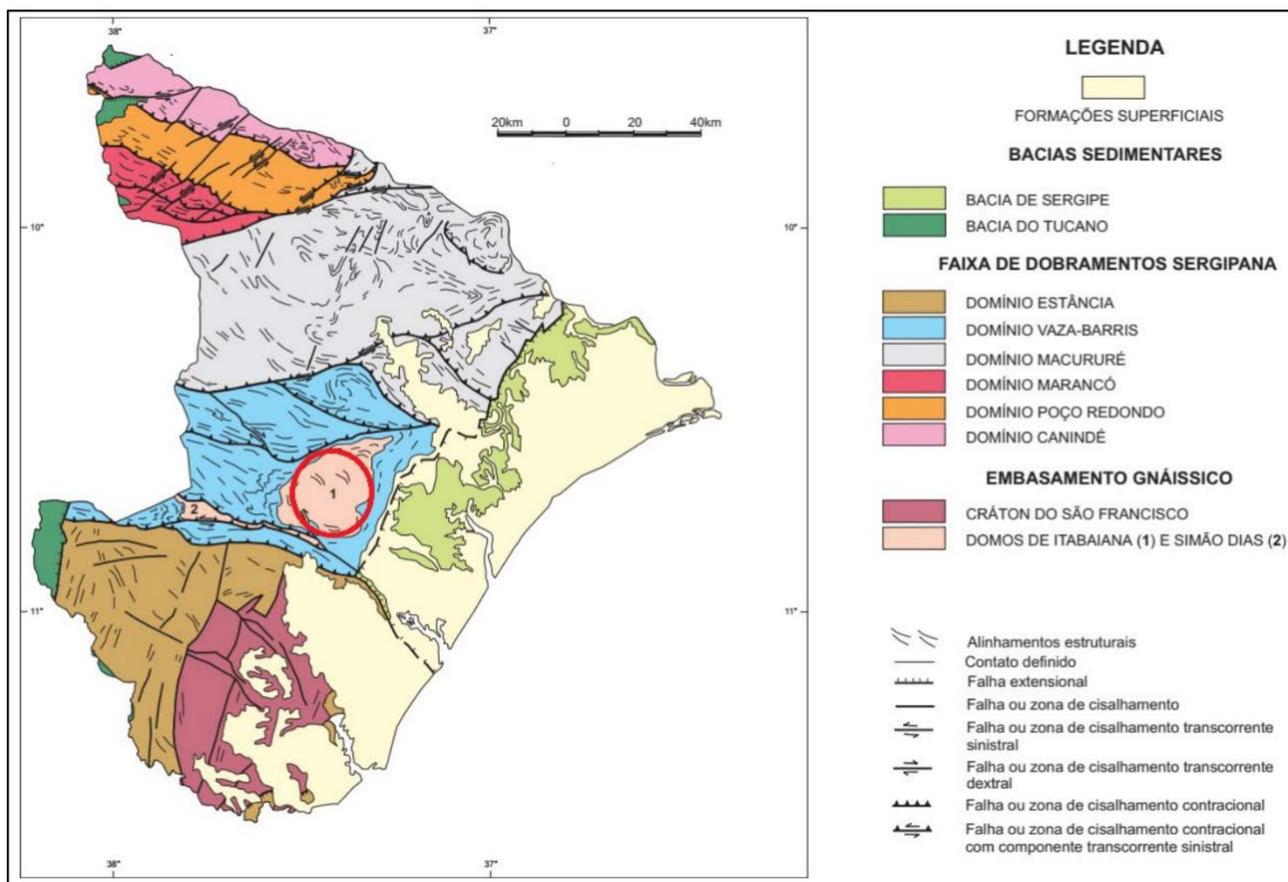


Figura 1 – Localização e acessos do município de Itabaiana (SE).

## CONTEXTO GEOLÓGICO

Segundo Almeida (1976), o Estado de Sergipe possui rochas pertencentes a três grandes províncias estruturais: São Francisco, Borborema e Costeira. A área de estudo contém litotipos da Província São Francisco, representada pelo embasamento em forma de domo e de maior

abrangência, e da Província Borborema de forma subordinada. O esboço tectono-estratigráfico, segundo Santos et al. (1998), é composto pelo Embasamento Gnáissico, pela Faixa de Dobramentos Sergipana e pelas Bacias Sedimentares (Figura 2).



**Figura 2** – Esboço tectono-estratigráfico do Estado de Sergipe, segundo Santos et al. (1998). O círculo vermelho identifica a área de estudo.

O complexo gnáissico-migmatítico do Domo de Itabaiana é uma estrutura elíptica que ocupa cerca de 80% da área do município. É composto basicamente por ortognaisses (Santos et al., 1998), apresentando raras intercalações anfibolíticas. As litologias que predominam são ortognaisses miloníticos bandados, de composição granítica a granodiorítica, com intercalações boudinadas de anfibolitos e gabros, por vezes com feições migmatíticas refletindo vários estágios de anatexia parcial. A composição frequente destes gnaisses de fácies anfibolito inclui quartzo, feldspato potássico, plagioclásio, biotita (hornblenda), moscovita, sericita, epidoto e clorita (Santos et al., 1998).

Estudos geoquímicos (Dantas, 2015) corroboram com o fato de que as rochas do Domo de Itabaiana se assemelham às rochas das suítes TTGs arqueanas. As análises do mesmo estudo, trazem dados geocronológicos que apontam para uma idade de  $2729 \pm 12$  Ma, interpretada como sendo a idade de cristalização dos ortognaisses.

Segundo D'el Rey Silva (1992), há registros, nos gnaisses e migmatitos dos domos de Itabaiana de três eventos de deformação dúctil a dúctil-rúptil que afetaram a cobertura metassedimentar no Domínio Vaza-Barris. O mesmo

autor cita que a posição estrutural atual dos domos na faixa de dobramentos é devido à reativação de falhas lístricas extensionais regionais para falhas contracionais, limítrofes desses segmentos do embasamento (falhas de Mocambo, Simão Dias e Itaporanga). Esta é a principal unidade geológica que ocorrem os aquíferos fraturados aqui estudados.

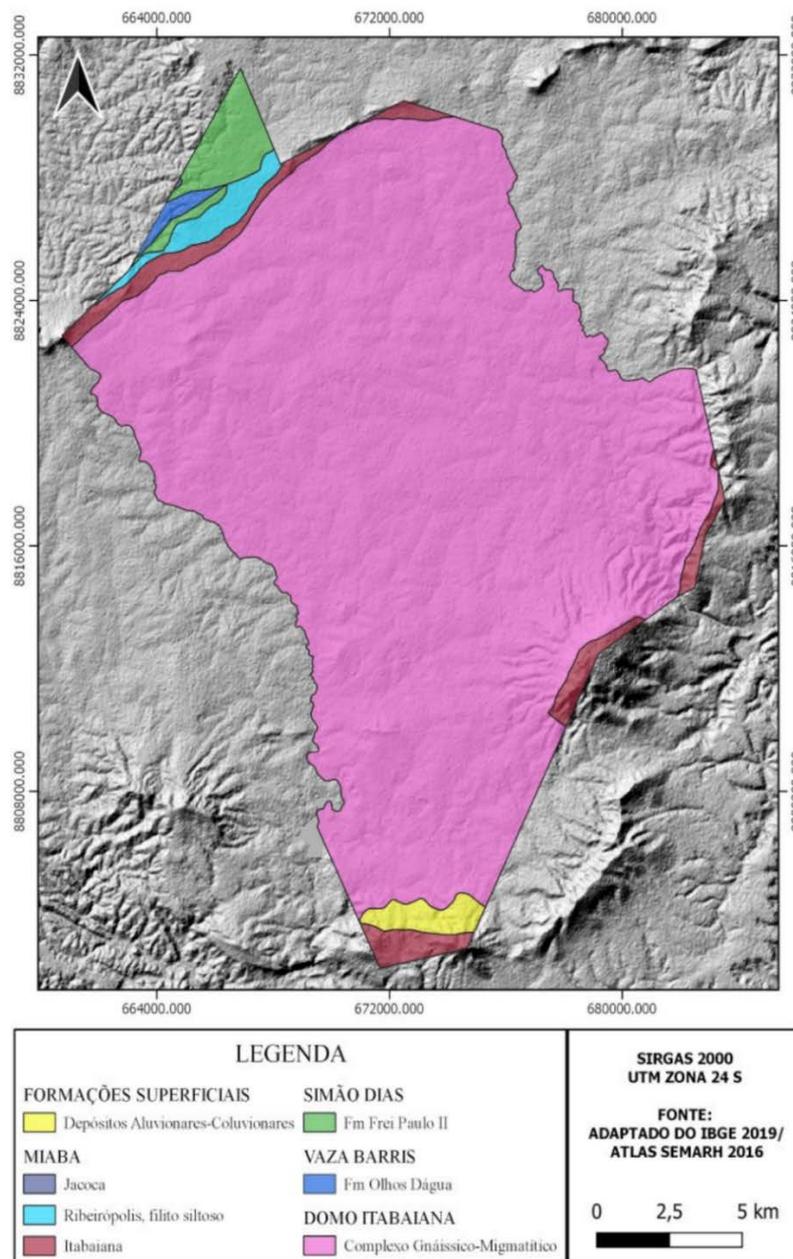
No Estado de Sergipe, a Província Borborema está representada pela Faixa de Dobramentos Sergipana, que diz respeito a uma região orogênica neoproterozoica, localizada a sul da Província Borborema, formada durante o ciclo Brasileiro/Pan-Africano (~600-540 Ma), segundo Almeida (2000). A faixa está dividida em seis domínios litoestratigráficos, que são separados em geral por zonas de cisalhamento alto ângulo, WNW-ESE, e falhas transcorrentes apresentando características estruturais, metamórficas e litoestratigráficas distintas, justapostos por tectônica compressiva vergente para sudoeste, relacionada ao ciclo Brasileiro (Oliveira et al., 2006).

Oliveira et al. (2010; 2015) interpretaram a sua evolução oriunda da fragmentação de um continente paleoproterozoico, seguida por desenvolvimento de um arco continental e, por fim, estabelecendo-se, como uma margem passiva ao

sul, a qual foi invertida e colada durante a orogênese Brasiliana, em um ciclo completo de placa tectônica (Orógeno Sergipano).

O Orógeno Sergipano é representado por rochas metassedimentares e metavulcânicas, com idades mesoproterozoicas a neoproterozoicas. Seu metamorfismo varia de fácies zeólita, xisto verde a anfíbolito e está dividido em seis domínios litoestratigráficos de norte a sul: Canindé, Poço Redondo, Marancó, Macururé, Vaza Barris e Estância (Davison & Santos, 1989; Santos et al., 1998; D'el-Rey Silva, 1999; Oliveira, 2008). Todos os domínios são caracterizados por tectônica compressiva vergente para sudoeste, relacionada ao ciclo Brasiliano, na forma de falhas e zonas de cisalhamento de médio a alto ângulo.

No município de Itabaiana, a Faixa de Dobramentos está representada pelo Domínio Vaza Barris, mais precisamente no entorno do Domo. As rochas são metassedimentos psamopelito-carbonáticos de baixo grau metamórfico, fácies xisto verde, subdivididos nos grupos Miaba (leste e sul), Simão Dias (noroeste) e Vaza Barris (noroeste), depositados em margem continental passiva (D'el-Rey Silva, 1995). O domínio está delimitado ao sul e ao norte, através das falhas do Rio Jacaré e São Miguel do Aleixo respectivamente. A sul, ocorre estreita faixa de depósitos aluvionares e coluvionares arenosos e argilosos-arenosos. Dentro do limite municipal de Itabaiana (Figura 3), é possível observar as formações pertencentes aos grupos supracitados, descritas na figura 4.



**Figura 3** – Mapa das unidades litoestratigráficas presentes no município de Itabaiana (SE).

GRUPO	FORMAÇÃO	DESCRIÇÃO
<b>Vaza Barris</b>	Olhos d'água	Calcários laminados; calcários e dolomitos às vezes oolíticos; e intercalações de carbonatos e filitos; metacherts. Cores negra, rosa ou esbranquiçada.
<b>Simão Dias</b>	Frei Paulo II	Metarenitos impuros filitos intercalados com metarenitos e metacarbonatos, subordinados.
<b>Miaba</b>	Jacoca	Metacarbonatos (calcário e dolomito); metacarbonatos e metapelitos intercalados; níveis de metachert.
	Ribeirópolis I	Filitos siltsosos ou seixos com intercalações de metagrauvacas; metaconglomerados; metavulcanito ácido a intermediário.
	Itabaiana	Conglomerados com clastos do embasamento, metarenitos e quartzitos médios a grossos, quartzitos finos; filitos às vezes negros; metarenitos conglomeráticos no topo. Estruturas paralelas e cruzadas planas e festonadas; ondulações; estruturas de escape de fluidos.

**Figura 4** – Caracterização litológica da Faixa de Dobramentos Sergipana aflorante na área de estudo. Adaptado de Santos et al. (1998).

### ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS

As condições de ocorrência, acumulação e circulação das águas subterrâneas estão diretamente associadas às propriedades litológicas e suas estruturas. Com isso, o Serviço Geológico do Brasil (CPRM), em 2002, conceituou a nível nacional os Domínios Hidrogeológicos como sendo grupos de unidades geológicas com afinidades hidrogeológicas, tendo como base principalmente as características litológicas das rochas, e os dividiu em: 1. Formações Cenozoicas; 2. Bacias Sedimentares; 3. Poroso/Fissural; 4. Metassedimentos/Metavulcânicas; 5. Vulcânicas; 6. Cristalino; 7. Carbonatos/ Metacarbonatos. Esta classificação foi posteriormente expandida para ambiente SIG (Bomfim, 2010).

Segundo Bomfim et al. (2002), em Itabaiana ocorrem cinco desses Domínios (Figura 5), que serão brevemente sumarizados:

Formações Cenozoicas que, na área do município, estão representadas por depósitos aluvionares e coluvionares que recobrem as rochas mais antigas das Bacias Sedimentares, da Faixa de Dobramentos Sergipana e do Embasamento Gnáissico. Trata-se de aquífero granular com porosidade primária, e nos terrenos arenosos há uma elevada permeabilidade, conferindo-lhes

excelentes condições de armazenamento e fornecimento d'água.

Bacias Sedimentares, que neste caso refere-se à Sub-Bacia Sergipe, está representada por sedimentos acentuadamente litificados, com forte compactação e bastante fraturados do Grupo Estância. Conferindo-lhes, além do comportamento de aquífero granular com porosidade primária baixa, um comportamento fissural acentuado.

O Domínio Hidrogeológico Metassedimentos/ Metavulcanitos, composto por rochas das formações Frei Paulo Ribeirópolis e Itabaiana, segundo Stefano et al. (2018), e Cristalino, onde estão as rochas gnáissicas que não apresentam porosidade primária, portanto, são aquíferos fissurais constituídos por fraturas e fendas que ditam a ocorrência das águas subterrâneas nesses domínios, levando aos cenários de reservatórios não homogêneos e de pequena extensão.

O Domínio Hidrogeológico Carbonatos/ Metacarbonatos, representado pelas margas e metacalcários da Formação Frei Paulo, caracteriza-se por porosidade e permeabilidade secundárias, onde se acumulam as águas, porém, esse tipo de reservatório não é uniforme (Silva et al., 2014).

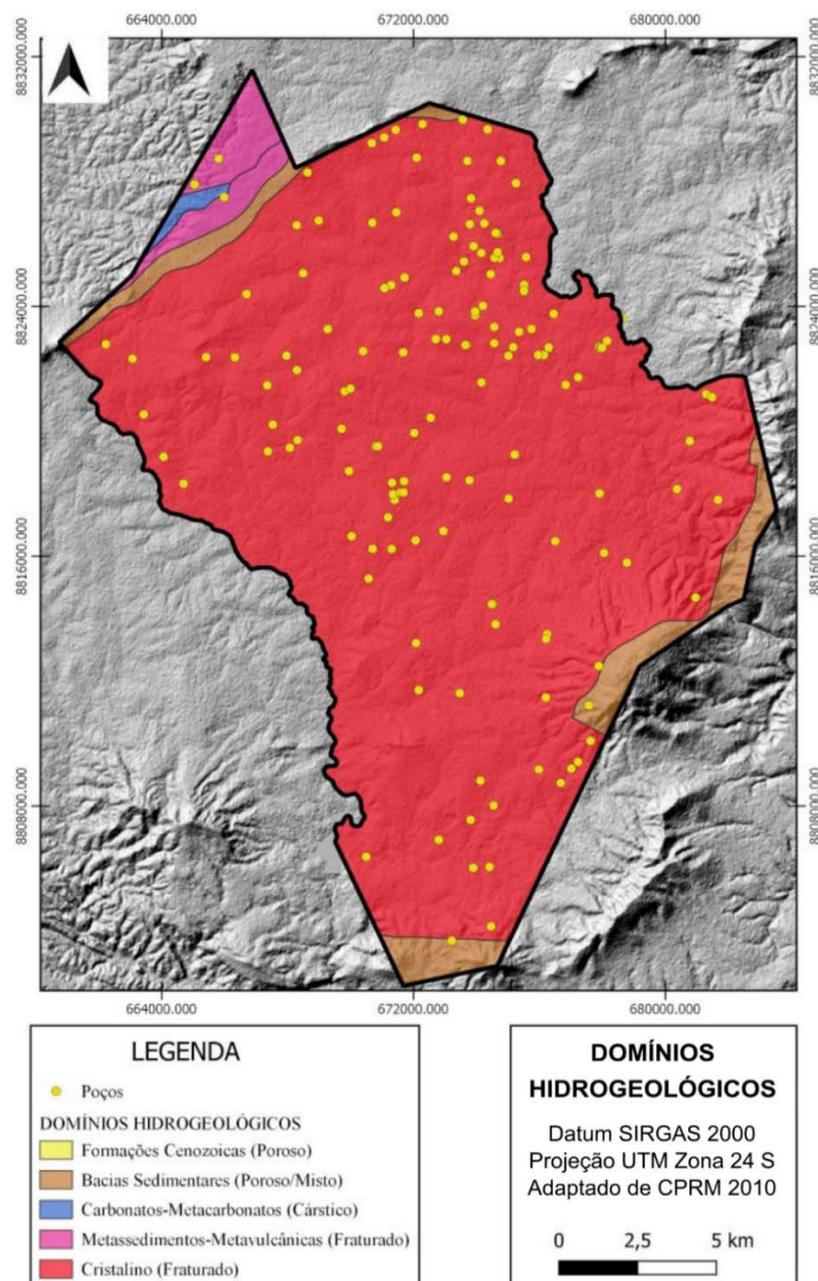
### MATERIAIS E MÉTODOS

O banco de dados de poços empregado para este estudo foi obtido através do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), de domínio público e disponível online, que hospeda o banco de dados elaborado em ambiente SIG e contém o registro de uma série de características hidrogeológicas dos poços existentes em todo território brasileiro. Ao processar a busca por poços na plataforma, verificou-se 897 registros dentro do perímetro municipal de Itabaiana,

constituindo assim o banco de dados preliminar.

Em etapa subsequente os dados de cada poço foram analisados, e após checagem de consistência, foi confeccionado o banco de dados consistido.

Foram selecionados 157 poços por possuírem perfis litológicos completos, dados construtivos e dados de testes de bombeamento, informações indispensáveis que são utilizadas como parâmetro para obtenção dos índices de entrada da metodologia GOD.



**Figura 5** – Mapa dos domínios hidrogeológicos do município de Itabaiana-SE.

Nesse caso, foram extraídas informações sobre a identificação dos poços (ID), coordenadas UTM, nível estático, formação geológica e perfil litológico.

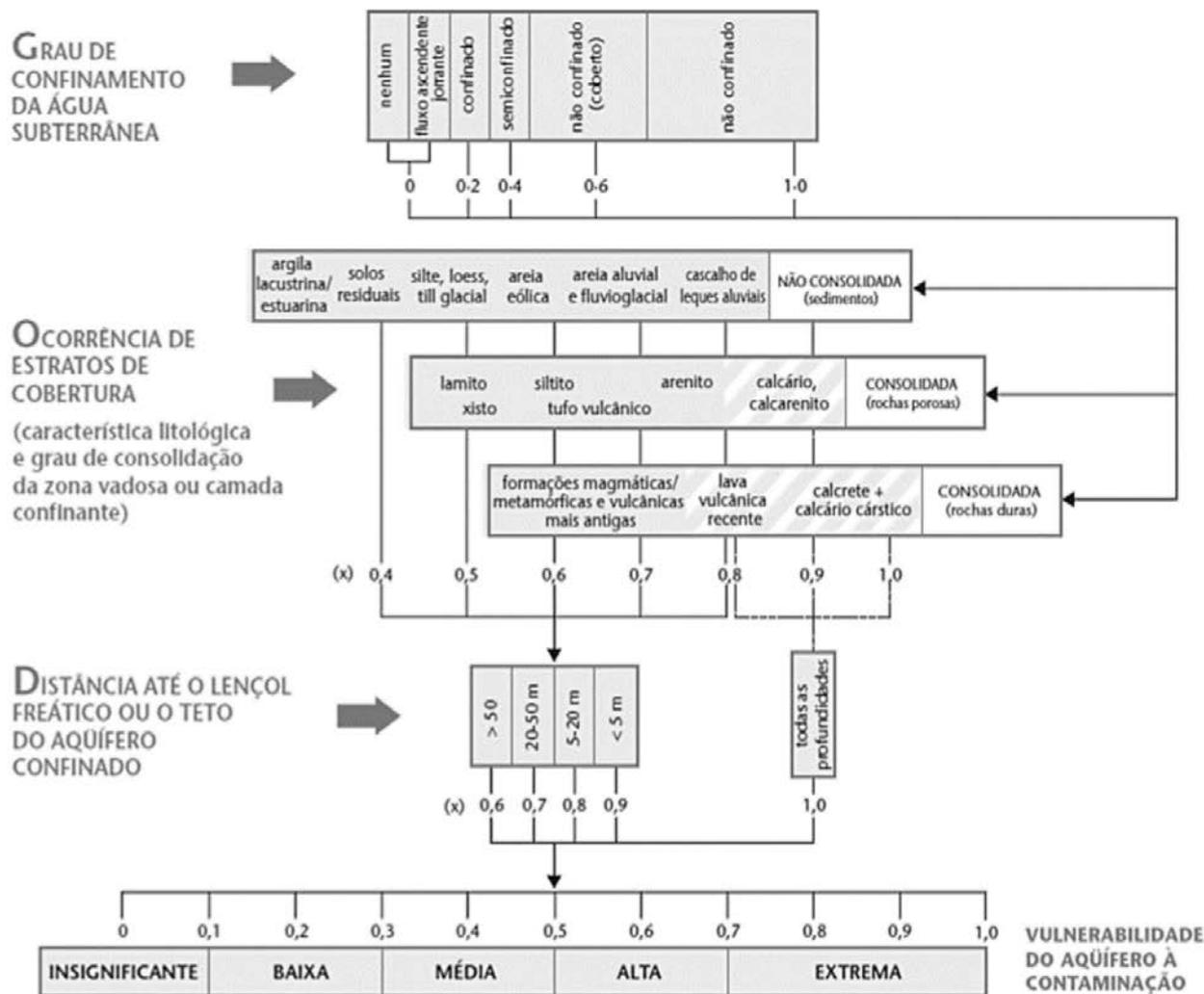
O Índice de Vulnerabilidade GOD (Foster & Hirata, 1988; Foster et al., 2006), aplicado neste estudo, é um dos métodos amplamente utilizados principalmente na América Latina. Sua baixa complexidade somada ao número reduzido de parâmetros adotados confere-lhe significativa viabilidade de execução em pesquisas cujo dados

e recursos são escassos. O método utiliza três parâmetros que levam em consideração as características da unidade aquífera, sendo estes o Grau de confinamento (G); litologia e o grau de consolidação da zona vadosa ou camadas confinantes (O); e profundidade da água no aquífero (D). Cada parâmetro tem seus valores ponderáveis que variam de 0 a 1 e posteriormente o produto dessas variáveis indica a classe de vulnerabilidade que uma determinada área possui (Figura 6).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao observar o mapa da distribuição espacial dos 157 poços na área de estudo (Figura 7), nota-se que a maioria dos poços se encontram fora da área urbana e o arranjo dos pontos está relati-

vamente homogêneo, com menor densidade ao sul. O fato de haver pontos por todo território municipal atribui maior conformidade aos resultados gerados.



**Figura 6** – Método GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação (Foster et al., 2006).

No município de Itabaiana existem evidências de que grande parte dos poços da região não possuem registro legal. Pode-se verificar disponível no SIAGAS, 897 poços cadastrados, mas, se aplicando a estimativa de poços cadastrados versus perfurados a partir de 1958, Cardoso et al. (2008), chega-se ao número de 1.110 poços perfurados, o que sugere a existência de ao menos 213 poços fora do conhecimento público perfurados.

Levantamentos de campo podem confirmar a presença de poços sem o devido cadastro, uma realidade, infelizmente, comum no território brasileiro. Para aplicação do método GOD foram selecionados 157 poços que se encontram inseridos predominantemente em aquíferos fraturados.

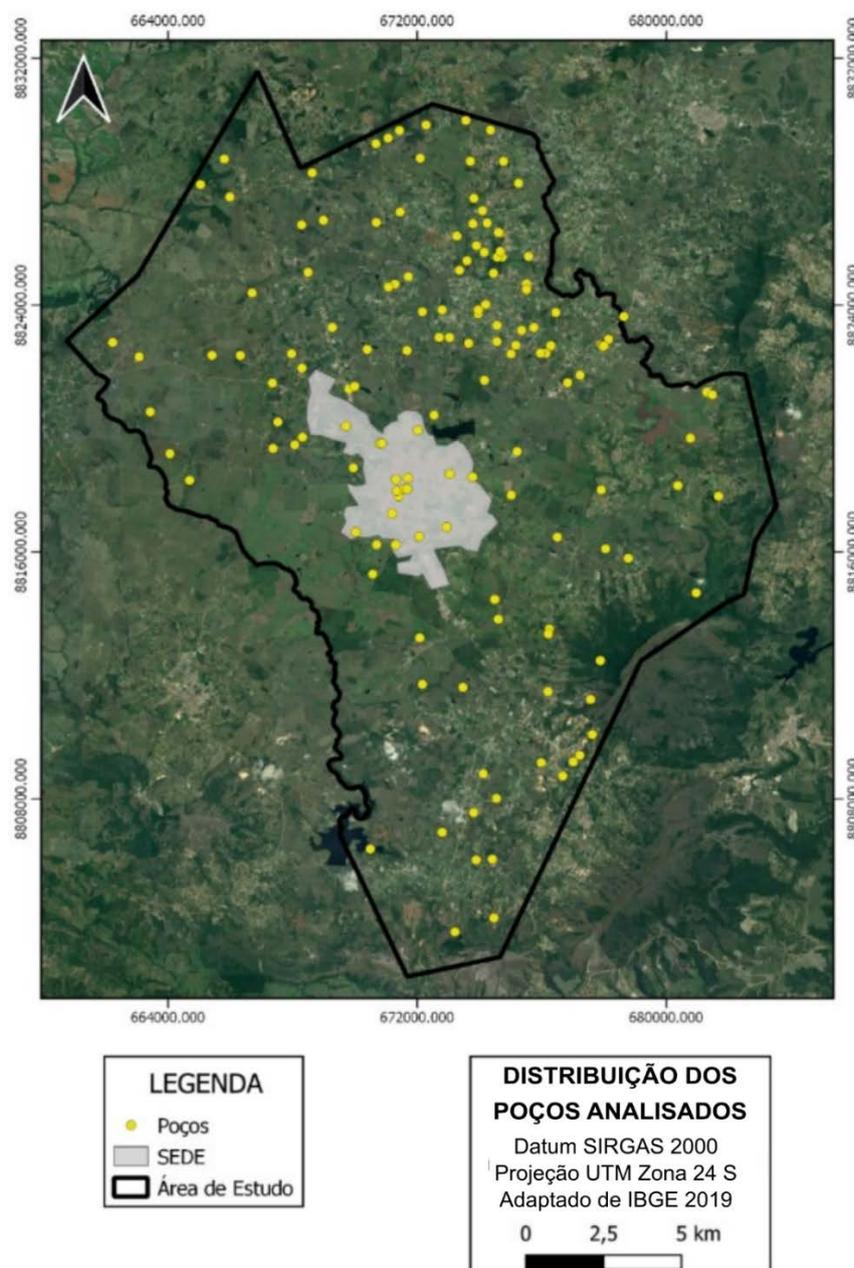
Relativo ao índice de vulnerabilidade natural dos aquíferos, após classificação dos poços de acordo os procedimentos descritos na metodologia, são devidamente analisados os três parâmetros a serem avaliados na metodologia GOD, a saber: Grau de confinamento, Ocorrência do substrato

geológico e Distância ao nível de água subterrânea ou topo do aquífero.

### Grau de Confinamento (G)

O grau de confinamento “G” avalia os tipos de ocorrência dos aquíferos quanto a seu grau de confinamento, se é surgente, livre, semi-confinado ou confinado. Este parâmetro varia entre zero (surgente) a 1,0 (não confinado), como visto na figura 5. Deste modo, o valor 1,0 aponta de maior risco de contaminação. No presente estudo, este parâmetro foi aferido baseado análise do perfil litológico disponível na base de informações dos poços.

Foram identificados quatro tipos de aquíferos: semi-confinado, confinado, não confinado e não confinado coberto. Aproximadamente 95% dos poços (149) tiveram 0,4 como valor atribuído, o que significa que quase toda a área de estudo conta com aquíferos semi-confinados. Apenas 6 poços foram classificados como confinados, localizados a noroeste, centro-oeste e nordeste e somente 1 ponto indexado como 0,6 (aquífero livre coberto) no norte do município.



**Figura 7** – Mapa da distribuição espacial dos poços analisados na área de estudo.

Devido à baixa espessura das camadas de solo, nível estático acima da entrada d’água e a impossibilidade de saber qual o grau de fraturamento das camadas de rocha superiores, optou-se por considerar os aquíferos fraturados como semiconfinados.

Aplicou-se o peso 0,8 para dois poços do nordeste do município, cujo perfil e descrição geológica diziam se tratar de aquíferos não confinados e cobertos por uma ínfima camada de manto de alteração. O peso escolhido se justifica pelo fato de 0,6 caracterizar aquífero livre coberto e o 1 aquífero não confinado, então ajustou-se um meio-termo. A espacialização dos dados obtidos com o parâmetro G, através de interpolação, resulta no mapa da figura 8.

### **Ocorrência do Substrato Geológico (O)**

Este parâmetro classifica cada poço em função do seu substrato suprajacente, ocorrência litológica e grau de consolidação da zona não saturada ou camadas confinantes, cuja informação foi extraída dos perfis litológicos dos poços. Os valores atribuídos para o parâmetro estrato de cobertura “O”, tiveram um percentual de 69% para valores de 0,6; 21% para valores de 0,4 e taxas menores para os pesos 0,7 e 0,5, sendo 6,6% e 3,5%, respectivamente. O alto percentual do peso 0,4 se explica pelo fato de quase todo município estar inserido no contexto geológico do embasamento complexo gnáissico-migmatítico do Domo de Itabaiana. No mapa da figura 9 é possível observar como o parâmetro “O” se comporta quando interpolados os dados dos poços.

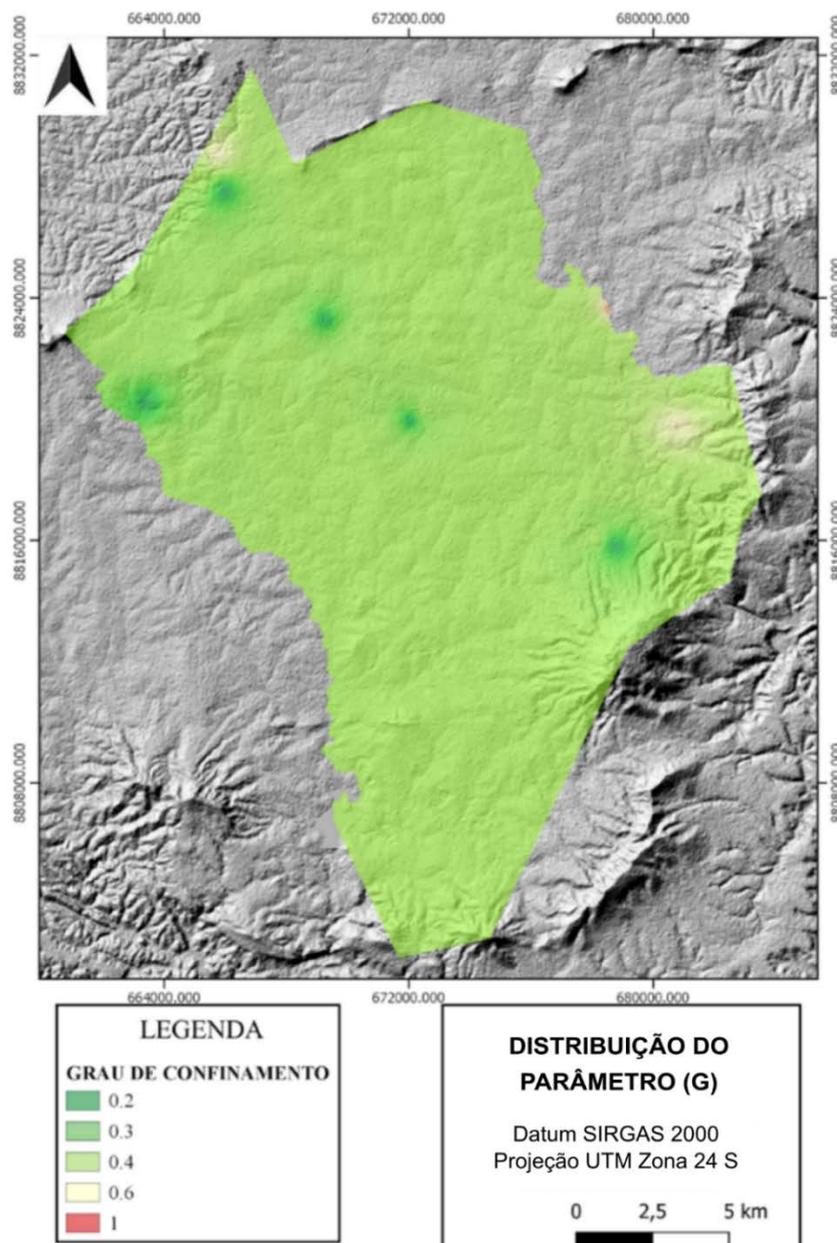


Figura 8 – Índices obtidos para o parâmetro de grau de confinamento.

### Distância até o Lençol Freático (D)

O parâmetro D, para o estudo em questão, foi obtido considerando o topo do aquífero confinado a partir dos perfis litológicos de cada poço. Os valores estão entre 0 e 30 metros de profundidade para topo do aquífero, atribuindo-lhes valores entre 0,7 e 0,9. As menores profundidades, que dizem respeito ao valor de 0,9, estão geralmente associadas a regiões mais arrasadas pelo intemperismo, como é possível observar na figura 10.

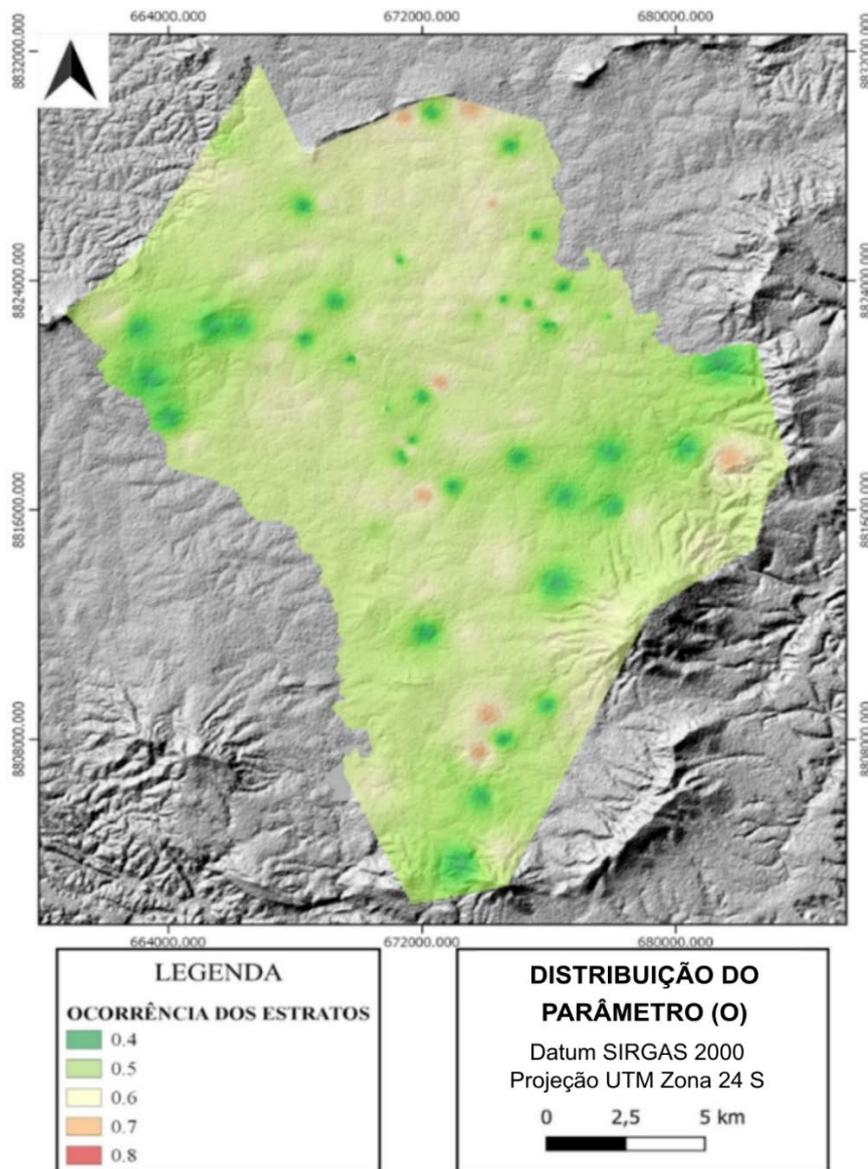
### Vulnerabilidade Natural dos Aquíferos

Com relação ao índice de vulnerabilidade natural dos aquíferos, foram calculados valores abaixo de 0,5, significando que a área de estudo apresenta graus de vulnerabilidade entre insignificante, baixo e médio (Figura 11).

As áreas consideradas com vulnerabilidade

insignificante são as de maior representatividade no mapa, apresentando concentrações principalmente a norte, noroeste e nordeste da área em questão. Esse resultado teve influência direta do grau de confinamento dos aquíferos dessa região, bem como sua geologia que é marcada por rochas magmáticas e metamórficas, o que dificulta a acessibilidade hidráulica do aquífero, isto é, os poluentes levam um tempo maior para passar da zona não-saturada para a zona saturada.

Ao observar o mapa de índice de vulnerabilidade (Figura 11), percebe-se que a incidência do índice de vulnerabilidade insignificante ocorre principalmente em áreas de cultivo e solo exposto, pequenos corpos d'água e alguma porção do território urbano, mais precisamente a noroeste do Açude da Marcela (grande corpo d'água próximo à sede).



**Figura 9** – Índices obtidos para o parâmetro de ocorrência de estratos de cobertura.

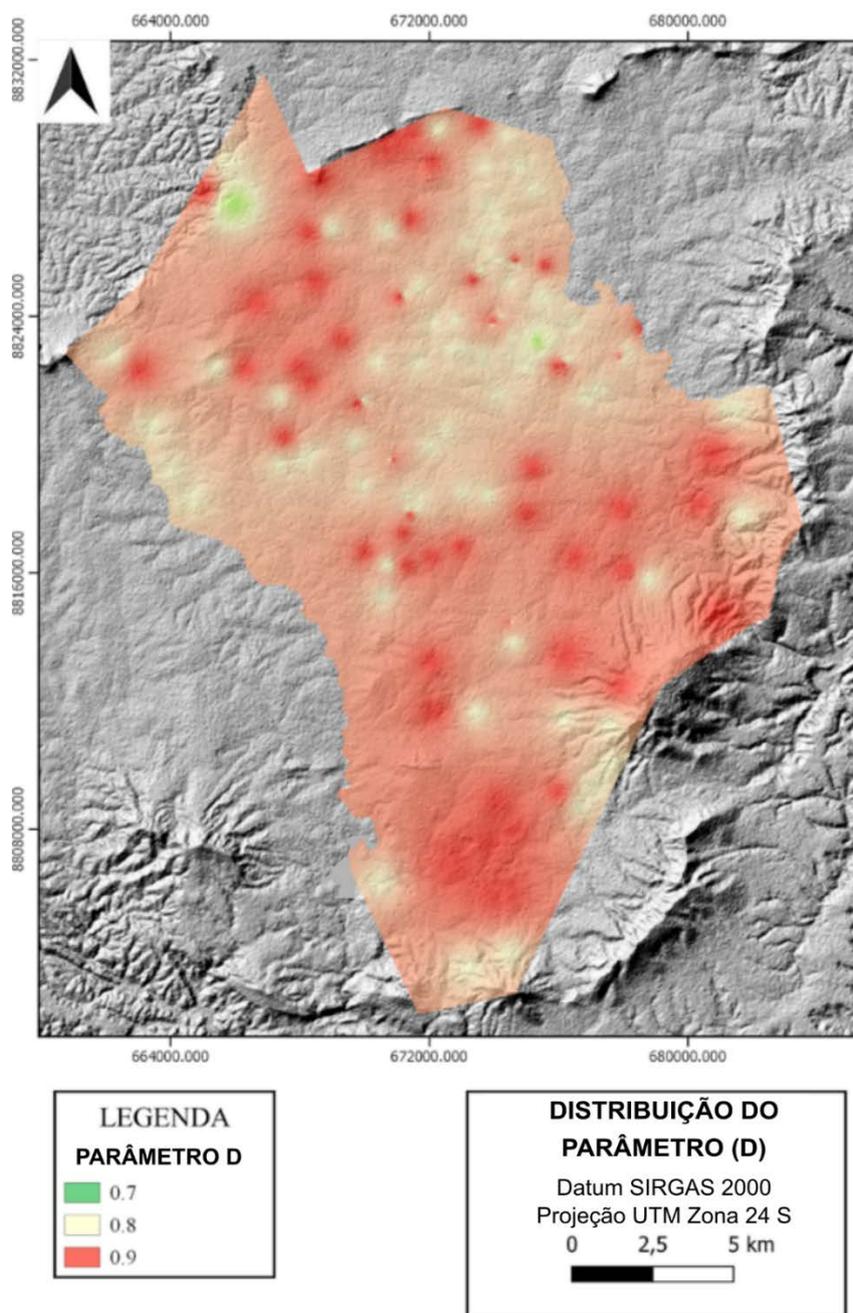
O índice GOD baixo para os aquíferos da área de estudo está representado no mapa nas cores mais claras. O fator que mais influenciou a baixa vulnerabilidade à contaminação nessas áreas foi a menor distância até o topo do aquífero (em comparação às das áreas com índice insignificante), principalmente no sul e leste do município, onde está situado o domo.

Os resultados que apontam áreas de média vulnerabilidade à contaminação apresentam-se em menores proporções no mapa e estão atrelados à baixa profundidade do topo do aquífero, somado ao seu baixo grau de confinamento.

As áreas classificadas como média vulnerabilidade à contaminação possuem detalhes que chamam a atenção. A ocorrência de pontos de média vulnerabilidade estão situados em pontos isolados no nordeste da área de estudo, próximos a grandes corpos d'água. No sul da área urbana,

e nas proximidades das áreas que se encontram degradadas por atividade de mineração, também há manifestação da condição de média vulnerabilidade à contaminação.

Ao lançar os valores dos índices brutos (ou seja, de cada poço analisado) em um gráfico de dispersão, nota-se a tendência com os seguintes padrões expressos na figura 12, onde é possível observar que os índices 0,192; 0,216 e 0,114 são os de maior ocorrência, respectivamente. Apesar de só existirem 2 pontos com índices acima de 0,3, que caracteriza a vulnerabilidade média, mais áreas são abrangidas no mapa com esse índice em virtude da interpolação feita, pelo método de vizinhos mais próximos (IDW aplicada em ambiente SIG). Este resultado reflete como poucos pontos vulneráveis podem influenciar uma área do seu entorno, demandando cuidados nas atividades antrópicas próximas.



**Figura 10** – Índices obtidos para o parâmetro de topo do aquífero.

### CONCLUSÕES

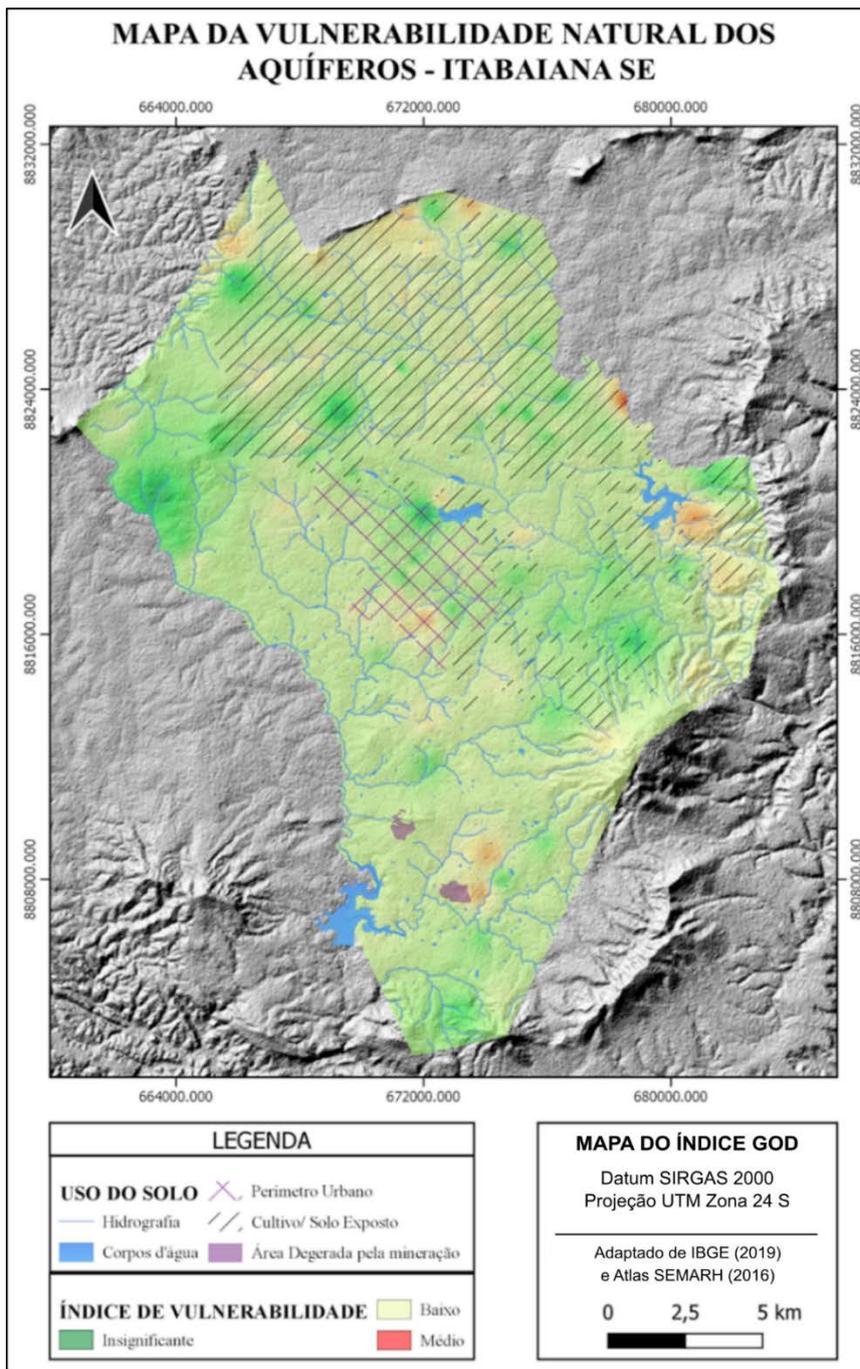
A partir da aplicação do método GOD de Foster & Hirata (1988) chegou-se ao resultado de que o município de Itabaiana (SE) tem predominantemente o índice de vulnerabilidade de aquífero insignificante, seguido do índice de baixa vulnerabilidade à contaminação. O índice de vulnerabilidade moderada ocorre em porções isoladas e não foram encontrados locais de índice de vulnerabilidade alta ou extrema.

Segundo Foster et al. (2006), quando o índice se apresenta insignificante, demonstra que existem camadas confinantes sem fluxo vertical significativo de água subterrânea. Já no cenário de baixa vulnerabilidade fica o alerta quanto a contaminantes conservadores, a longo prazo, quando

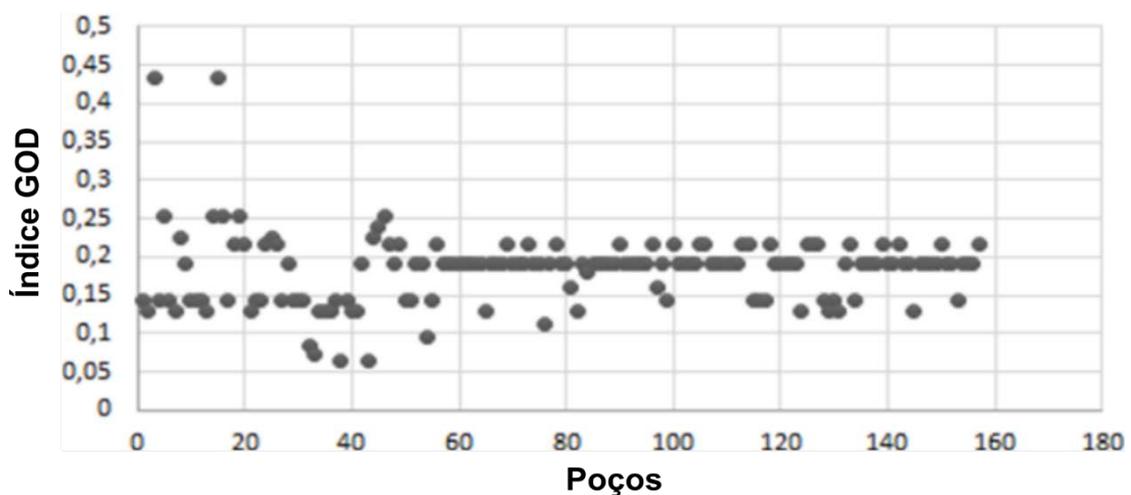
contínua e amplamente lançados ou lixiviados.

A área configurou-se desse modo principalmente devido à condição geológica de semiconfinamento dos aquíferos e, quando apresenta índices mais elevados (médio), esses estão associados à baixa profundidade do topo do aquífero, ou seja, os mais propensos à contaminação. Ao mesmo tempo que as características litológicas são as condicionantes do resultado final, são também agentes que dificultam a confiabilidade dos dados gerados. Isso porque, como se trata de aquífero fraturado, não há homogeneidade no substrato rochoso.

Mesmo diante da predominância do índice “insignificante” de vulnerabilidade à contami-



**Figura 11** – Mapa do índice de vulnerabilidade natural à contaminação dos aquíferos de Itabaiana (SE).



**Figura 12** – Distribuição do índice a vulnerabilidade natural à contaminação relativo aos poços analisados.

nação, preocupa o fato de áreas de média vulnerabilidade à contaminação estarem localizadas em meios que apresentam fonte potencial poluidora, como a área urbana e áreas degradadas. Neste cenário, é recomendado estudar delimitar áreas de proteção, bem como o mapeamento das fontes potenciais de geração de carga contaminante na área, assim como é sugerido o monitoramento físico-químico e microbiológico da qualidade da água distribuída pelos poços em Itabaiana.

É importante salientar que o índice gerado não consiste no fato de que a maioria dos aquíferos do município não estejam propensos à contaminação, pois, como dito em Foster et al.

(2006), para que os resultados sejam mais satisfatórios há a necessidade de realizar análise da vulnerabilidade para cada contaminante ou classe de contaminantes. Deve-se também considerar que há evidências que ainda existem muitos poços não cadastrados que precisam da devida catalogação para atualização do banco de dados.

Por fim, levantamentos hidrogeoquímicos em município vizinho (Jesus, 2020) apresentaram resultados de nitrato, condutividade elétrica e parâmetros microbiológicos acima dos Valores Máximos Permitidos em poços pertencentes à mesma unidade hidrogeológica, atestando que os resultados de vulnerabilidade insignificante não isenta o aquífero de uma possível contaminação.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F.D. Estruturas dos Pré-Cambriano Inferior brasileiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 29. Ouro Preto. 1976. **Anais...**Ouro Preto: Sociedade Brasileira de Geologia, 1976, v. 29, p. 201-212.
- ALMEIDA, F.F.M. The Origin and Evolution of South American Platform. **Earth-Science Reviews**, v. 50, n. 1, p. 77-111, 2000.
- ANA (BRASIL). **Atlas Brasil: abastecimento urbano de água: panorama nacional**. v. 1. Agência Nacional de Águas; Engecorps/Cobrape – Brasília: ANA: Engecorps/ Cobrape. 2010.
- BOMFIM, L.F.C.; COSTA, I.V.G.D.; BENVENUTI, S.M.P. Diagnóstico do Município de Itabaiana. 2002. Projeto Cadastro da Infraestrutura Hídrica do Nordeste - Governo do Estado de Sergipe, Superintendência de Recursos Hídricos, Sergipe. 2002.
- BOMFIM, L.F.C. Mapa de domínios/subdomínios hidrogeológicos do Brasil em ambiente SIG: concepção e metodologia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 16., 2010, São Luís. **Anais...** São Luis: Associação Brasileira de Águas subterrânea, 2010.
- CARDOSO, F.B.; DE OLIVEIRA, F.R.; DO NASCIMENTO, F.S.; NETO, P.L.V.; FLORES, P.M. Poços Tubulares Construídos No Brasil. In: XV CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 15., Natal. 2008. **Anais...** Natal: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, 2008, v. 28: 120-133.
- DAVISON, I. & SANTOS, R.A. Tectonic Evolution of the Sergipano Fold Belt, NE Brazil, during the Brasiliano Orogeny. **Precambrian Research**, v. 45, p. 319-342, 1989.
- DANTAS, T.V. **Mapeamento geológico/geomorfológico com o uso de geotecnologias do domínio Vaza Barris, Faixa de Dobramentos Sergipana**. São Cristóvão, 93 p. 2015. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Sergipe.
- D'EL-REY SILVA, L.J.H. **Tectonic evolution of the southern part of the Sergipano Fold Belt, northeastern Brazil**. Londres, 1992. Tese d(Doutorado), Universidade de Londres, Departamento de Geologia, 256 p. 1992.
- D'EL-REY SILVA, L. J. H. Tectonic evolution of the Sergipano Belt, northeastern Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 25, p. 315-332, 1995.
- D'EL-REY SILVA, L.J.H. Basin infilling in the southern-central part of the Sergipano Belt (NE Brazil) and implications for the evolution of Pan-African/Brasiliano cratons and Neoproterozoic cover. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 12, p. 453-470, 1999.
- FOSTER, S.S.D. & HIRATA, R. Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. World Health Organization, Pan American Health Organization, Centre for Sanitary Engineering and Environmental Sciences, Lima: **Technical Report**, 78 p. 1988.
- 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**. Washington, D.C.: Banco Mundial, 114 p. 2006.
- GONÇALVES, R.D.; STOLLBERG, R.; WEISS, H.; CHANG, H.K. Using GRACE to quantify the depletion of terrestrial water storage in Northeastern Brazil: The Uruçua Aquifer System. **Science of The Total Environment**, v. 705, p. 135845 p. 2020.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **PIB per capita. IBGE, em parceria com os Órgãos Estaduais de Estatística, Secretarias Estaduais de Governo e Superintendência da Zona Franca de Manaus - SUFRAMA**. 2021.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Prévia da População dos Municípios com base nos dados do Censo Demográfico 2022 coletados até 25/12/2022**.
- JESUS, M.F.S. Aspectos Hidrogeológicos do Município de Campo do Brito - SE. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia), Universidade Federal de Sergipe. 2020.
- OLIVEIRA, E P. Geological evolution of the Sergipano belt, southern boundary of the Borborema Province. In: WORKSHOP ON THE PRECAMBRIAN GEOLOGY OF THE BORBOREMA PROVINCE, Campinas: 14-15, 2008. **Atas...** Campinas: Instituto de Geociências, Unicamp,
- OLIVEIRA, E.P.; BUENO, J.F.; MCNAUGHTON, N.J.; SILVA FILHO, A.F.; NASCIMENTO, R.S.; DONATTI-FILHO, J.P. Age, composition, and source of continental arc- and syn-collision granites of the Neoproterozoic Sergipano Belt, Southern Borborema Province, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 58, p. 257-280, 2015.
- OLIVEIRA, E. P.; TOTEU, S. F.; ARAÚJO, M. N. C.; CARVALHO, M. J.; NASCIMENTO, R. S.; BUENO, J.F.; MCNAUGHTON, N.; BASILICI, G. Geologic correlation between the Neoproterozoic Sergipano belt (NE Brazil) and the Yaoundé belt (Cameroon, Africa). **Journal of African Earth Sciences**, Great Britain, v. 44, n. 4-5, p. 470-478, 2006.
- OLIVEIRA, E.P.; WINDLEY, B.F.; ARAÚJO, M.N.C. The Neoproterozoic Sergipano orogenic belt, NE Brazil: a complete plate tectonic cycle in western Gondwana. **Precambrian Research**, v. 181, n. 1-4, p. 64-84, 2010.
- SANTOS, R. A.; MARTINS, A.A.; NEVES, J.P.D.; LEAL, R.A. (1998). **Geologia e Recursos Minerais do Estado de Sergipe**. Texto Explicativo do Mapa Geológico do Estado de Sergipe. Brasília: CPRM, 1998.
- SILVA, A. L.; SOUZA, S.A.; COELHO FILHO, O.; ELOY, L.;

- SALMONA, Y.B.; PASSOS, C.J.S. Water Appropriation on the Agricultural Frontier in Western Bahia and Its Contribution to Streamflow Reduction: Revisiting the Debate in the Brazilian Cerrado. **Water**, v. 13, n. 8, p. 1054, 2021.
- SILVA, C.N.; NEGRÃO, F.I.; DA SILVA, D.R.; DE OLIVEIRA, I.B.; OLIVEIRA, P.R.N.; DE ABREU, A.S.; DE ANDRADE SANTOS, A. Avaliação Preliminar dos Tipos Hidroquímicos e Qualidade das Águas Subterrâneas nos Domínios Hidrogeológicos do Estado de Sergipe. In: XVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 18, Belo Horizonte. 2014. **Anais...**Belo Horizonte: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, 2014, v. 33, p. 15-30.
- STEFANO, P. H. P.; CRISTO, S. A.; GOMES, I. P.; LENZ, C. Avaliação Hidrogeológica do Aquífero Fraturado no Município de Itabaiana - SE. **Revista de Geologia**, v. 31, n. 2, p. 169-178, 2018.

*Submetido em 27 de julho de 2023*  
*Aceito para publicação em 2 de dezembro de 2023*