

ANÁLISE DE VULNERABILIDADE INTRÍNSECA DE UM AQUIFERO NÃO CONFINADO A PARTIR DE DADOS HIDROGEOFÍSICOS - COMPARAÇÃO ENTRE ÍNDICES GOD, AVI E CONDUTÂNCIA LONGITUDINAL.

Renato de Souza **Arruda**¹, Leandson Roberto Fernandes de **Lucena**²

(1 – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, renatoarruda23@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8922-8471>; 2 – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, leandson.lucena@ufrn.br, <https://orcid.org/0000-0002-7713-861X>)

Resumo: A avaliação integrada de vulnerabilidade intrínseca de um aquífero constitui uma ferramenta de suma importância como subsídio ao estabelecimento de políticas públicas de preservação, proteção e uso hidroambiental sustentável de um manancial subterrâneo. Nesse aspecto, o presente trabalho teve como escopo principal a elaboração e comparação de mapeamentos de vulnerabilidade a partir de dados hidrogeofísicos, objetivando a identificação de subáreas com diferentes graus de proteção associados com diferentes vulnerabilidades do Aquífero Barreiras, na área do baixo curso do Rio Maxaranguape, nordeste do Brasil. Esses mapeamentos foram elaborados mediante as metodologias Condutância Elétrica Longitudinal, GOD e do Índice de Vulnerabilidade do Aquífero (AVI), as quais são fundamentadas em parâmetros litológicos, hidráulicos e geoeletricos, além da espessura da zona não saturada. Os resultados obtidos mostram que os domínios delimitados por índices de vulnerabilidade são aproximadamente concordantes entre si. Em linhas gerais, as classes de vulnerabilidades moderada, alta a extremamente alta, abrangem quase a totalidade da área, delineando tanto a faixa central como a porção norte e sul da área investigada, conforme valores inferiores a 3 do $\log c$ e 5 mS, nas metodologias AVI e de Condutância Longitudinal, respectivamente; e magnitudes superiores a 0.4, segundo a metodologia GOD.

Palavras-chave: Vulnerabilidade intrínseca; GOD; AVI; Condutância Longitudinal; Aquífero Barreiras-RN.

INTRINSIC VULNERABILITY ANALYSIS OF AN UNCONFINED AQUIFER FROM HYDROGEOPHYSICAL DATA - COMPARISON BETWEEN GOD, AVI AND LONGITUDINAL CONDUCTANCE INDICES.

Abstract: The integrated assessment of the intrinsic vulnerability of an aquifer is a tool of paramount importance as a subsidy for the establishment of public policies for the preservation, protection and sustainable hydroenvironmental use of groundwaters. In this aspect, the present work had as its main scope the elaboration and comparison of vulnerability mappings from hydrogeophysical data, aiming at the identification of subareas with different degrees of protection associated with different vulnerabilities of the Barreiras Aquifer, in the area of the lower course of the Maxaranguape River, northeast of Brazil. These mappings were elaborated using the methodologies Longitudinal Electrical Conductance, GOD (G – groundwater confinement; O – overlaying strata; D – depth to groundwater table) and Aquifer Vulnerability Indexes (AVI), which are based on lithological, hydraulic and geoelectric parameters, as well as the thickness of the unsaturated zone. The results show that the domains delimited by vulnerability indexes are approximately concordant. In general terms, the moderate, high to extremely high vulnerability classes cover almost the entire area, delineating both the central and the northern and southern portions of the investigated area, according to values lower than 3 of log c and 5 mS, in the AVI and Longitudinal Conductance methodologies, respectively; and magnitudes higher than 0.4, according to the GOD methodology.

Keywords: intrinsic vulnerability; GOD; AVI; Longitudinal Conductance; Barreiras Aquifer-RN.

ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD INTRÍNSECA DE UN ACUÍFERO LIBRE A PARTIR DE DATOS HIDROGEOFÍSICOS - COMPARACIÓN ENTRE ÍNDICES GOD, AVI Y CONDUCTANCIA LONGITUDINAL.

Resumen: La evaluación integrada de la vulnerabilidad intrínseca de un acuífero constituye una herramienta sumamente importante para apoyar el establecimiento de políticas públicas para la preservación, protección y uso hidroambiental sostenible de un manantial subterráneo, Nordeste de Brasil. Estos mapeos fueron elaborados utilizando las metodologías de Conductancia Eléctrica Longitudinal, GOD e Índice de Vulnerabilidad de Acuíferos (AVI), las cuales se basan en parámetros litológicos, hidráulicos y geoeléctricos, además del espesor

de la zona no saturada. Los resultados obtenidos muestran que los dominios delimitados por los índices de vulnerabilidad concuerdan aproximadamente entre sí. En términos generales, las clases de vulnerabilidad moderada, alta a extremadamente alta cubren casi toda el área, delineando tanto la franja central como las porciones norte y sur del área investigada, según valores inferiores a 3 de $\log c$ y 5 mS, en las metodologías AVI y Conductancia Longitudinal, respectivamente; y magnitudes superiores a 0,4, según la metodología GOD.

Palabras-clave: Vulnerabilidad intrínseca; GOD; AVI; conductancia longitudinal; Acuífero Barreiras-RN.

1 – Introdução

A caracterização hidrogeológica acurada de uma determinada área é imprescindível no sentido de definir estratégias de gestão otimizada, racionalizar a utilização desse recurso hídrico e subsidiar tomadas de decisões relacionadas à sua proteção. Para tal finalidade, dentre outros aspectos, faz-se indispensável o conhecimento da configuração hidrogeofísica (geometria do reservatório e zona não saturada adjacente, potenciometria, parâmetros hidráulicos, etc.) e hidroquímica (sobretudo parâmetros hidroquímicos representativos e adequabilidades) do aquífero. A metodologia geoeletrica, particularmente, tem-se mostrando fundamental nesses estudos, uma vez que possibilita, por meio de investigações indiretas, preencher lacunas de informações quando da escassez ou mesmo inexistência de perfis de poços locais disponíveis.

Estudos multidisciplinares dessa natureza envolvendo as águas subterrâneas possuem como importante ferramenta a avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos (Foster & Hirata, 1988; Kalinski *et al.*, 1993; Foster *et al.*, 2006; Mendoza & Barmen, 2006; Kirsch, 2009; Gemail *et al.*, 2011; Uchebulam and Ayolabi, 2014;). Esta avaliação, por exemplo, pode ser estimada igualmente a partir de métodos geoeletricos, cujo parâmetro de Dar Zarrouk condutância longitudinal (Orellana, 1972; Kirsch *et al.*, 2003; Rubin & Hubbard, 2005; Okiongbo *et al.*, 2012; Braga *et al.*, 2014; Akpan *et al.*, 2015; Monteiro e Lucena, 2021) permite a obtenção e análise do grau de proteção a que uma determinada formação aquífera está submetida, por meio das características geoeletricas das camadas sobrejacentes.

Em linhas gerais, o grau de sensibilidade à contaminação decorre basicamente de fatores hidrogeológicos intrínsecos e atributos específicos dos estratos sobrejacentes ao mesmo, bem como do tipo e características inerentes à carga contaminante (Kirsch, 2009).

Nesse sentido, considerando um aquífero de caráter hidráulico livre, a vulnerabilidade natural pode ser entendida em função da facilidade da percolação da carga contaminante através da zona não saturada. Desse modo, uma proteção intrínseca efetiva é caracterizada por camadas sobrejacentes ao aquífero com maiores espessuras e baixa condutividade hidráulica, que venha a proporcionar um alto tempo de residência da solução em percolação (Kirsch, 2009; Monteiro e Lucena, 2021).

Na figura 1, têm-se sinteticamente diferentes configurações hidrogeológicas intrínsecas no tocante ao nível de proteção natural de um aquífero não confinado, conforme Foster & Hirata (1988), Kirsch (2009) e Monteiro e Lucena (2021). Na situação A, o aquífero possui pouca proteção, uma vez que a zona não saturada é pouco espessa e de natureza arenosa, estando o nível freático relativamente próximo à superfície. No quadro B, o aquífero é mais protegido em função da zona não saturada possuir uma espessura considerável, embora seja composta por material de caráter mais arenoso e de maior condutividade hidráulica. Na situação C, além da espessura da zona não saturada elevada relativamente, ocorrem horizontes argilosos em sua constituição, conferindo maior proteção relativa ao aquífero. Os quadros D e E ilustram o comportamento do fluxo hidráulico vertical através de materiais de natureza arenosa e argilosa, ressaltando-se a maior resistência hidráulica nos materiais argilosos, dificultando a percolação vertical de um eventual contaminante em subsuperfície.

Tomou-se como alvo do presente estudo o Aquífero Barreiras, o qual representa o principal manancial subterrâneo da costa oriental do Estado do Rio Grande do Norte (Lucena, 2005; Nunes *et al.*, 2020).

Nesse contexto, a presente pesquisa foi desenvolvida na região do baixo curso do Rio Maxaranguape, localizada no litoral leste do Estado do Rio Grande do Norte e envolvendo parte dos municípios de Maxaranguape e Ceará-Mirim-RN, compreendendo um domínio de aproximadamente 250 km² (figura 2). Esta área acha-se inserida sobre terrenos sedimentares cenozóicos da Formação aquífera Barreiras e coberturas quaternárias, sendo este o principal manancial subterrâneo da costa oriental do Estado do Rio Grande do Norte (Lucena, 2005; Silva *et al.*, 2014; Nunes *et al.*, 2020; Campos *et al.*, 2023; Magalhães e Lucena, 2023).

Figura 1 – Diferentes cenários de nível de proteção intrínseca de um aquífero não confinado. A – Zona não saturada pouco espessa; B – Zona não saturada espessa; C – Zona não saturada com presença de horizontes argilosos; D – fluxo hidráulico vertical através de material de natureza mais arenosa; E - fluxo hidráulico vertical através de material de natureza mais argilosa.

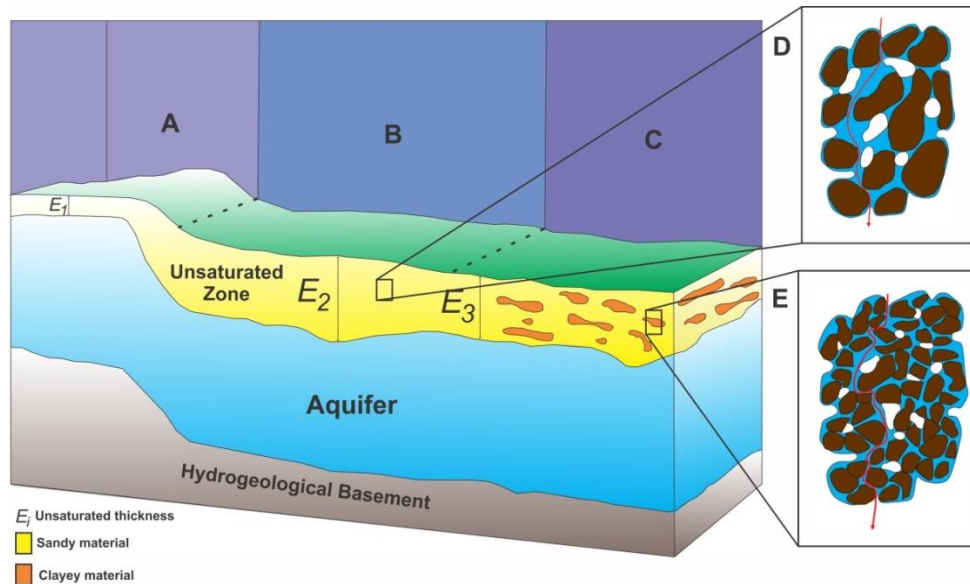
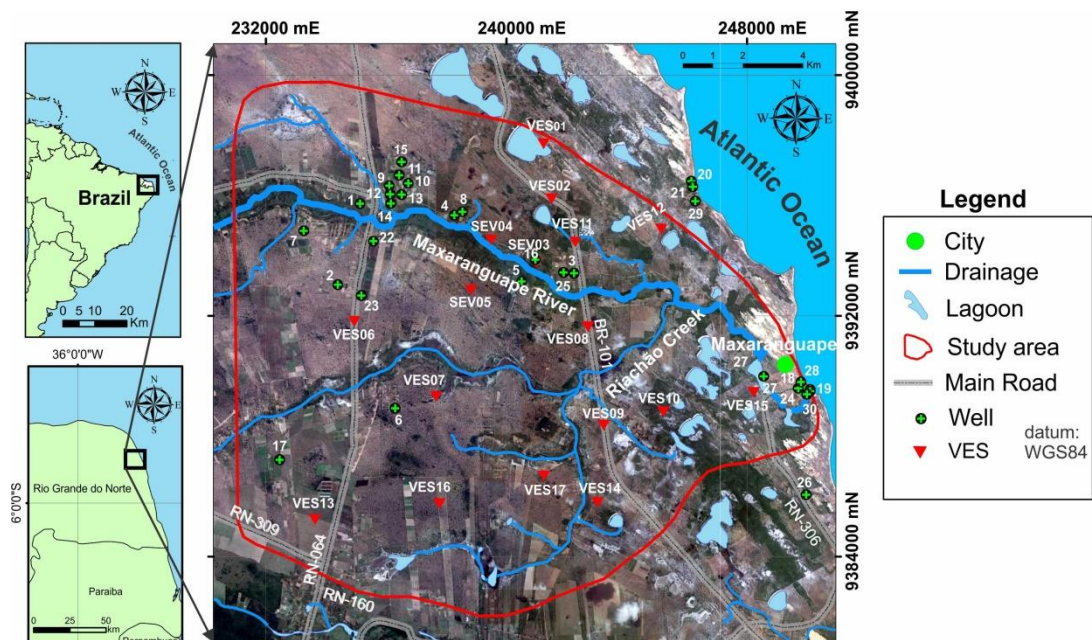


Figura 2 – Identificação da área de estudo no litoral leste do RN, nordeste do Brasil; incluindo a localização de poços considerados no estudo e sondagens geolétricas executadas.



O escopo principal da pesquisa envolveu a elaboração de cartografias de graus de proteção do Aquífero Barreiras, associadas com diferentes índices de vulnerabilidade, além de uma comparação crítica entre estas. As diferentes metodologias ora abordadas, GOD (Foster

& Hirata, 1988), AVI (Van Stempvoort *et al.*, 1993) e Condutância Longitudinal (Monteiro e Lucena, 2021), são fundamentadas na análise conjunta de dados hidrogeofísicos, apesar de suas particularidades no tocante aos parâmetros físicos considerados.

2 – Contexto hidrogeológico

No contexto hidrogeológico, o Aquífero Barreiras é limitado na sua base pelo topo da sequência carbonática mesozóica não aflorante da região, representando seu embasamento hidrogeológico e composto por rochas sedimentares areno-argilosas a argilosas de cimentação calcífera e reduzida condutividade hidráulica (Lucena, 2005; Silva *et al.*, 2014; Souza *et al.*, 2019; Dantas *et al.*, 2021; Alves e Lucena, 2022). As unidades estratigráficas sobrepostas ao aquífero e associadas à hidroestratigrafia não saturada compreendem coberturas arenosas indiscriminadas, campos dunares recentes e sub-recentes, depósitos aluvionares e colúvio-eluviais, além de por vezes ser composta igualmente pela porção superior da própria Formação Barreiras. As unidades hidroestratigráficas da zona não saturada, em virtude de possuírem significativas porosidades e reduzidos índices de escoamento superficial, desempenham importante papel como zonas de recarga do sistema ao possibilitar a infiltração direta de águas pluviais.

O Aquífero Barreiras possui ampla relação com a drenagem superficial ao longo de toda a costa leste do Estado do Rio Grande do Norte, sendo os fluxos de base dos rios normalmente creditados à descarga do aquífero, além de formarem lagoas em zonas de afloramento de suas águas (Lucena, 2005; Silva *et al.*, 2014).

Melo *et al.* (2013), ao realizar teste de bombeamentos na área, possibilitou mensurar parâmetros como condutividade hidráulica e transmissividade, obtendo, respectivamente, valores médios de $1,0 \times 10^{-4}$ m/s e $3,0 \times 10^{-3}$ m²/s, considerando o condicionamento livre do aquífero. Estudos petrofísicos em amostras da Formação Barreiras, realizados por Silva *et al.* (2014), obtiverem valores médios representativos de porosidade efetiva de 7,6%.

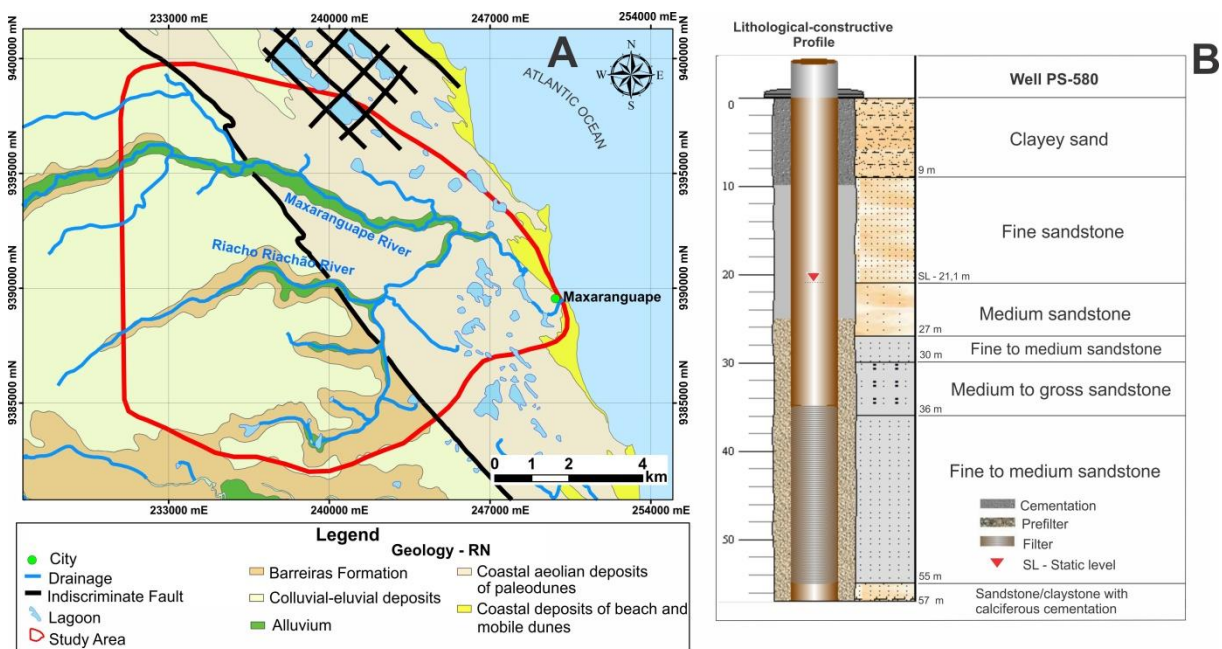
O arcabouço estrutural reportado, com falhas NE e NW, proporciona a configuração de blocos estruturais tipo *grabens* e *horsts*, associados ao processo de rebaixamento e soerguimento relativo do embasamento hidrogeológico do Aquífero Barreiras, conferindo-lhe uma maior e menor espessura, respectivamente (Souza *et al.*, 2019; Nunes *et al.*, 2020). Nesse contexto, a espessura do Aquífero Barreiras na área do Rio Maxaranguape varia de 19 a 72 m (Melo *et al.*, 2013; Nunes *et al.*, 2020), havendo uma tendência de aumento dessas espessuras

de oeste para leste (Melo *et al.*, 2013). As vazões de exploração, normalmente associadas às espessuras saturadas, podem atingir 150 m³/h (Lucena, 2005).

Em termos qualitativos, as águas locais do Aquífero Barreiras são predominantemente cloretadas sódicas, levemente ácidas a pouco alcalinas e com condutividades elétricas variando desde 20 µS/cm a 190 µS/cm, embora com predominância de valores inferiores 40 µS/cm.

Na figura 3 (A), tem-se um esboço da geologia da área (adaptado de Dantas *et al.*, 2021), com suas unidades estratigráficas e falhas dispostas nas direções NW e NE. A figura 3 (B) exhibe o perfil litológico-constutivo representativo de um dos poços inseridos na área, no qual se evidencia aspectos como variações litológicas, espessuras saturada e não saturada, além do topo do embasamento hidrogeológico correspondente ao arenito-argilito mesozóico com cimentação calcífera.

Figura 3 – A) Mapa geológico-estrutural apresentando as unidades geológicas e falhas nas direções NW e NE, na área do baixo curso do Rio Maxaranguape-RN (adaptado de Dantas *et al.*, 2021); B) Perfil litológico-constutivo representativo da área, mostrando os componentes litológicos das zonas não saturada, saturada e embasamento hidrogeológico.



3 – Materiais e métodos

A metodologia adotada na presente investigação fundamenta-se no emprego conjugado de métodos de avaliação de vulnerabilidade de aquíferos, os quais foram

desenvolvidos com base na apreciação de dados hidrogeológicos e geofísicos, além de informações bibliográficas disponíveis sobre a área de estudo e do contexto hidrogeológico regional do Aquífero Barreiras.

O método geofísico da eletrorresistividade, face à sua reconhecida aplicabilidade em investigações hidrogeológicas (Kirsch *et al.*, 2003; Rubin & Hubbard, 2005; Kirsch, 2009; Braga e Francisco, 2014) foi adotado com o intuito de caracterizar o arcabouço hidrogeológico, incluindo, dentre outros aspectos, valores de espessuras saturadas e não saturadas, bem como variações litológicas destas últimas. A técnica geoeletrica utilizada foi a da sondagem elétrica vertical-SEV (VES na terminologia inglesa), segundo o arranjo de eletrodos do tipo Schlumberger.

Nesse aspecto, foi considerado dados de uma sondagem elétrica de calibração na área (Nunes *et al.*, 2020), executada adjacente a um poço com perfil hidroestratigráfico-litológico-constructivo bem definido, tendo em vista a inexistência de perfis elétricos de poços (well-logging) que evidenciassem o comportamento elétrico *in situ* das diferentes camadas. Esse procedimento buscou minimizar ambiguidades inerentes às interpretações das curvas de resistividade aparente, além de favorecer a incorporação de vínculos de natureza hidroestratigráfica aos modelos geoeletricos (resistividade x espessura) no tocante à interpretação quantitativa das demais sondagens geoeletricas. Somado a isso, dados de outras calibrações geoeletricas nesse mesmo contexto hidrogeológico (Lucena, 2005) foram também consideradas na presente pesquisa. As sondagens geoeletricas executadas, em número de 17, possuíam aberturas de eletrodos máxima de 1200 m ($AB/2 = 600$ m), tendo estas sido localizadas prioritariamente em locais de pouca ou ausência de informações de perfis de poços. A modelagem geoeletrica e a aquisição de seus modelos correspondentes de “resistividades x espessuras” das sondagens foi realizada por inversão utilizando-se o software IPI2Win, versão 2.1, (Bobachev *et al.*, 2000), assumindo-se o modelo de camadas plano-paralelas de espessuras (E_i) finitas e resistividades elétrica consideradas homogêneas (Orellana, 1972).

As informações hidrogeológicas-litoestratigráficas foram provenientes de dados de 30 perfis litológicos-constructivos de poços, selecionados de modo a adicionar informações nos diversos setores da área e contribuir na composição das cartografias de vulnerabilidade.

Objetivando-se uma análise de vulnerabilidade intrínseca local mais consistente, bem como confrontar resultados de diferentes métodos ponderados, utilizou-se no presente estudo as metodologias da Condutância Longitudinal-S (Orellana, 1972; Kirsch *et al.*, 2003; Rubin &

Hubbard, 2005; Braga e Francisco, 2014), GOD (Foster & Hirata, 1988; Foster *et al.*, 2006) e Índice de Vulnerabilidade do Aquífero-AVI (Van Stempvoort *et al.*, 1993; Kirsch *et al.*, 2003; Rubin & Hubbard, 2005; Kirsch, 2009).

No âmbito da análise de nível de proteção de aquífero levando em consideração apenas dados geoeletricos, tem-se o parâmetro de Dar Zarrouk Condutância Longitudinal Total (S). Para uma sequência de n camadas, homogêneas e isotrópicas com resistividades ρ_i e espessuras E_i , S é definido como (Orellana, 1972; Braga, 2016; Monteiro e Lucena, 2021):

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{\rho_i} \quad (\text{Eq. 1})$$

Dessa forma, na avaliação dos modelos geoeletricos obtidos na interpretação, cada camada da zona não saturada é constituída por um ou mais horizontes geoeletricos. Os quocientes espessura-resistividades correspondentes a cada horizonte foram somados para a quantificação da condutância longitudinal total pontual, dada em mS. Esses dados foram então interpolados no intuito de analisar o nível de proteção física oferecido pelos horizontes sobrepostos ao aquífero. A referida análise decorre do fato de que, quanto maior o valor de S_T da zona não saturada, tem-se maiores espessuras e/ou menores resistividades; estas últimas associadas com litologias mais argilosas e menos permeáveis.

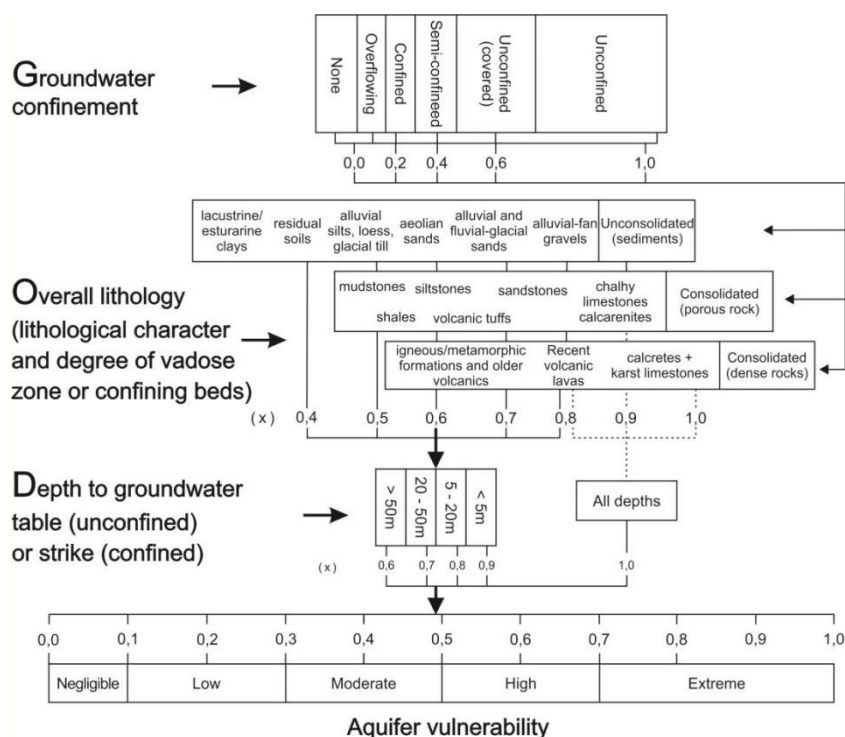
O mapeamento da vulnerabilidade intrínseca pela metodologia GOD (figura 4) foi realizado levando-se em consideração tanto dados dos perfis de poços, associados com a metodologia original proposta por Foster e Hirata (1988) e Foster (2006), como também aqueles resultantes da interpretação geoeletrica, conforme proposta por Monteiro e Lucena (2021).

O cálculo do índice GOD foi efetuado englobando informações a respeito do tipo de aquífero (G), litologia da zona não saturada (O) e profundidade do topo do aquífero (D), perfazendo um total de 47 dados pontuais desse índice. A cada característica reportada foi atribuído um peso relativo e, posteriormente, efetuado o produto desses três fatores para a obtenção pontual do índice GOD.

A atribuição de pesos com relação aos modelos geoeletricos baseou-se nas calibrações geoeletricas para identificação litológica de acordo com as resistividades elétricas

característica mensurada de cada horizonte não saturado, bem como das profundidades do topo do aquífero.

Figura 4 - Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação. Fonte: Foster *et al.* (2006).



A avaliação de vulnerabilidade por intermédio do método AVI (Van Stempvoort *et al.*, 1993), consiste na quantificação da susceptibilidade à contaminação por meio da resistência hidráulica ao fluxo vertical através das camadas que compõem a zona não saturada. Esse método fundamenta-se em dois parâmetros físicos: a espessura (d) de cada horizonte sedimentar acima da porção saturada do aquífero (d_i); e a condutividade hidráulica de cada um desses horizontes (K_i). A resistência hidráulica (C), definida com base nesses dois parâmetros, é calculada pela equação 2 seguinte, para as camadas de 1 a n :

$$C = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{k_i} \quad (\text{Eq. 2})$$

Como os valores de k para sedimentos arenosos são várias ordens de magnitude superiores às das camadas de argila, a resistência hidráulica é, portanto, dominada pelas camadas argilosas, sendo sua dimensão o tempo (Kirsch, 2009). Assim, a resistência hidráulica representa o tempo de percolação do fluido nessas camadas. Tendo em vista a

grande variação de C, pode-se classificar a vulnerabilidade, tomando seu logaritmo, como sendo extremamente alta, alta, moderada, baixa e extremamente baixa, conforme a tabela seguinte (Tabela 1).

Tabela 1 – Classificação da vulnerabilidade – AVI (VAN STEMPVOORT *et al.*, 1993).

Resistência Hidráulica C (anos)	Log C	Classes de Vulnerabilidade
0 – 10	< 1	Extremamente alta
10 – 100	1 – 2	Alta
100 – 1000	2 – 3	Media
1000 – 10000	3 – 4	Baixa
> 10000	> 4	Extremamente Baixa

O mapeamento no presente estudo, consoante à metodologia do Índice de Vulnerabilidade do Aquífero (AVI), foi empreendido conforme estimativa da capacidade de condução hidráulica dos horizontes integrantes da zona não saturada sobrejacente ao Aquífero Barreiras na área investigada. Essa estimativa decorreu da atribuição de valores de condutividade hidráulica para as diferentes litologias identificadas nos perfis de poços, e na correlação elétrica-litológica, nos dados de resistividade elétrica. As magnitudes de condutividade hidráulica foram baseadas em valores disponíveis na bibliografia (Domenico e Schwartz, 1990; Van Stempvoort *et al.*, 1993), além de dados provenientes de ensaios hidrogeológicos no contexto do Aquífero Barreiras e zona não saturada sobreposta efetuado por Lucena *et al.* (2009). Desse modo, atribuiu-se valores da ordem de 10^{-5} m/s para sedimentos arenosos indiferenciados, magnitudes em torno de 10^{-6} m/s para arenitos de textura média a grossa e 10^{-7} m/s para arenitos mais finos, argilosos a argilitos. Os valores pontuais obtidos para "C", a exemplo das demais metodologias reportadas, foram submetidas a tratamento geoestatístico de interpolação e gridagem (Golden Software, *in* Surfer, 2010), no sentido de obtenção da respectiva cartografia de vulnerabilidade.

4 – Resultados

4.1 – Dados de espessuras não saturadas e geoelétricos

Os dados referentes à espessura da zona não saturada e provenientes de 30 perfis de poços locais são apresentados na tabela 2. Essas informações foram de grande importância devido à introdução de vínculos de natureza hidrogeofísica na realização de calibrações das sondagens elétricas verticais, além de definir, de maneira direta, a superfície livre das águas e o conteúdo litológico associadas com a zona não saturada. As espessuras não saturadas

assinaladas nos poços apresentam relevante variação, com valores bastante reduzidos de 2,5 m e 5 m nos poços 19 e 29, e ascendendo para magnitudes da ordem de 25 e 35 m, nos poços 23 e 16, respectivamente.

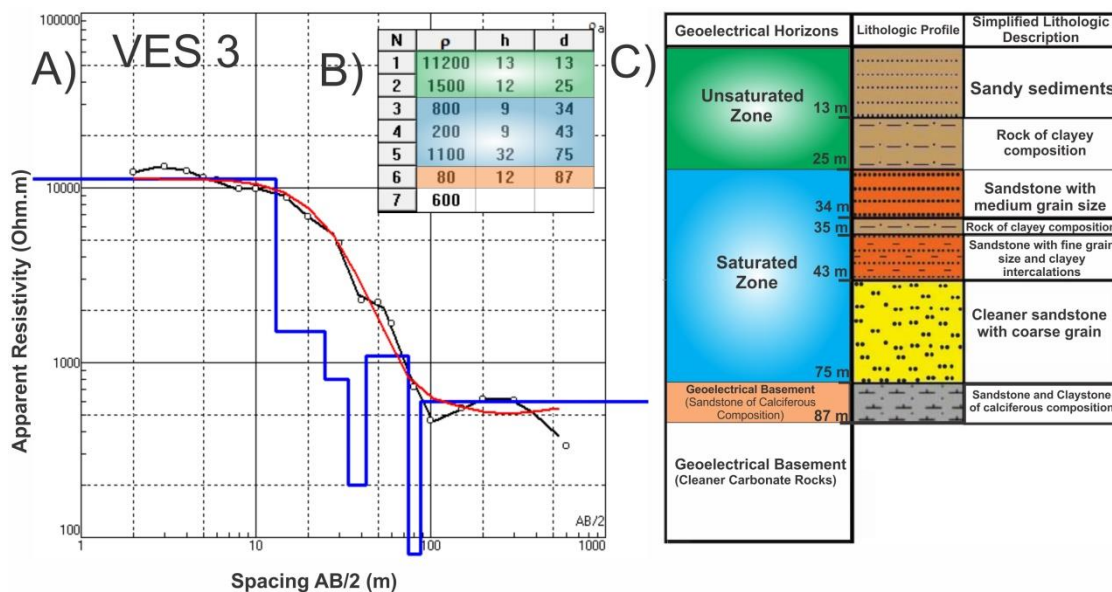
Tabela 2 - Dados de poços tubulares utilizados na composição dos mapas da presente pesquisa.

Poço	UTM E	UTM N	Espessura não saturada (m)
1	235.500	9.396.000	18,8
2	234.390	9.393.040	20,9
3	242.257	9.393.424	19,9
4	238.270	9.395.352	19,3
5	240.508	9.393.150	13,2
6	236.300	9.388.932	19,7
7	233.262	9.394.828	17,1
8	238.540	9.395.465	17,3
9	236.103	9.396.329	19,4
10	236.742	9.396.412	18,2
11	236.424	9.396.677	18,2
12	236.138	9.396.041	21,1
13	236.513	9.396.035	20,4
14	236.152	9.395.741	15,4
15	236.512	9.397.122	12,2
16	232.450	9.387.212	35,0
17	249.700	9.389.600	14,0
18	250.100	9.389.550	10,0
19	246.150	9.396.480	2,5
20	246.200	9.396.300	4,0
21	240.964	9.393.876	25,0
22	235.575	9.394.479	23,4
23	235.174	9.392.680	25,5
24	249.968	9.386.056	8,3
25	241.899	9.393.440	21,0
26	250.100	9.389.500	7,5
27	248.556	9.389.994	2,5
28	249.800	9.389.800	19,0
29	246.290	9.395.820	5,0
30	250.000	9.389.400	3,0

Os resultados geolétricos, provenientes de sondagens elétricas verticais executadas prioritariamente em locais de ausência de informações de poços, contemplaram inicialmente uma sondagem geolétrica de calibração (Nunes *et al.*, 2020). Esta sondagem (figura 5), conduzida adjacente a um poço de perfil litoestratigráfico definido (poço 16, vide figura 1), possibilitou delinear os principais horizontes hidroestratigráficos do âmbito do Aquífero Barreiras e zona não saturada sobreposta em termos de seus respectivos comportamentos

geolétricos. essa calibração evidenciou os três horizontes hidroestratigráficos do sistema aquífero, sendo eles: o embasamento hidrogeológico, o aquífero e a zona não saturada subjacente. O primeiro possui caráter condutivo, com resistividades reduzidas e iguais ou inferiores a 80 $\Omega.m$, sendo associadas a arenitos e argilitos de cimentação calcífera, gradando para um comportamento mais eletricamente resistivo, característico da sequência carbonática cretácica mais pura (600 $\Omega.m$). A zona saturada possui resistividades elétricas compreendidas entre 140 a 1100 $\Omega.m$, as quais se correlacionam a argilitos e arenitos de ampla variação granulométrica, onde as maiores resistividades refletem arenitos mais puros e as menores, arenitos mais argilosos a argilitos.

Figura 5 – Calibração geolétrica (SEV-03); A) curva de resistividade aparente; B) modelo geolétrico interpretado, sendo N as camadas geolétricas, ρ a resistividade, h a espessura e d a respectiva profundidade; C) perfil litológico do poço e os respectivos horizontes geolétricos interpretados; adaptado de Nunes *et al.* (2020).

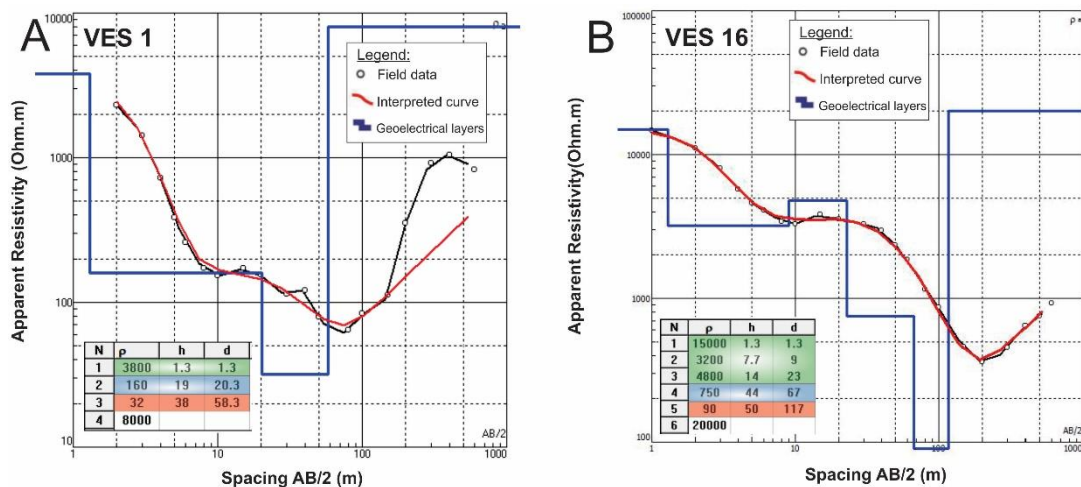


A zona não saturada, principal alvo do presente estudo, é composta por sedimentos e/ou rochas arenosas com eventuais teores de umidade e argila, qualificando-se por horizontes substancialmente resistivos superiores a 1100 $\Omega.m$. Dessa forma, consoante às respostas geolétricas na calibração, associadas a cada tipo litológico constituinte da zona não saturada, tem-se que valores variando a partir de 1100 $\Omega.m$ a 1500 $\Omega.m$ se correlacionam a rochas areníticas de proeminente teor argiloso; valores de 1500 $\Omega.m$ a 3200 $\Omega.m$ estão associados a

arenitos mais puros, de granulometria média e, resistividades superiores a 3200 Ω .m refletindo solos arenosos indiferenciados de ampla variação granulométrica.

Na figura 6, têm-se outras SEVs representativas da área de estudo e seus modelos geoeletricos respectivos (SEV 1 e SEV 16). Em termos qualitativos, as curvas de resistividade aparente expressam feições morfológicas relacionadas com curvas do tipo H (Orellana, 1972). Estas últimas são tipificadas por comportamento eletricamente resistivo inicial, seguido de uma tendência decrescente relacionada com horizontes intermediários condutivos, culminando em um comportamento de maior condutividade relativa e seguida de uma ascendência expressiva, por vezes na assíntota de 45 graus.

Figura 6 - Curvas de resistividade aparente das SEV-01 (A) e SEV-16 (B), com seus respectivos modelos geoeletricos; o quadro representa o modelo geoeletrico interpretado, onde o número de camadas é representado por N; ρ é a resistividade; h e d referem-se, respectivamente, à espessura da camada e profundidade.



No processo interpretativo quantitativo e com base em equivalências geoeletricas reportadas por Orellana (1972), notou-se que variações de até 2 m para espessuras não saturadas não repercutiam de maneira substancial no ajuste morfológico e de magnitude das curvas geoeletricas ajustadas. Esse valor é aproximadamente compatível com a sazonalidade do aquífero, devendo ser encarado preliminarmente como uma margem de erro adotada no presente estudo. Essa margem, contudo, somente possui relevância num cenário de reduzidas espessuras da zona não saturada.

Na tabela 3, têm-se as SEVs realizadas e suas respectivas espessuras não saturadas provenientes dos modelos geoeletricos inversos interpretados. Esses valores são

compreendidos entre 1 m na SEV 1, esta executada próxima a um afloramento do lençol freático, e alcançando aproximadamente 45 m na SEV 13.

Tabela 3 - Sondagens elétricas verticais realizadas na área do baixo curso do Rio Maxaranguape e espessuras não saturadas provenientes dos modelos geoeletricos.

SEV	UTME	UTM N	Espessura não saturada (m)
SEV 1	241.174	9.397.806	1
SEV 2	241.435	9.395.974	10
SEV 3	240.935	9.393.856	25
SEV 4	239.428	9.394.614	13
SEV 5	238.760	9.392.954	15
SEV 6	234.881	9.391.906	20
SEV 7	237.608	9.389.406	3
SEV 8	242.664	9.391.724	12
SEV 9	243.171	9.388.450	18
SEV 10	245.169	9.388.896	6
SEV 11	242.236	9.394.542	10
SEV 12	245.096	9.394.965	3
SEV 13	233.571	9.385.316	45
SEV 14	242.974	9.385.884	5
SEV 15	248.165	9.389.540	10
SEV 16	237.718	9.385.848	23
SEV 17	241.195	9.386.770	23

Esses valores de espessuras não saturadas, juntamente com suas respectivas resistividades elétricas, foram aplicados para o estudo de avaliação do risco de contaminação do aquífero na área mediante as metodologias reportadas.

4.2 - Análise do grau de proteção do aquífero segundo a metodologia da Condutância Longitudinal-S

O cálculo da condutância longitudinal para a zona não saturada foi efetuado com base nos modelos interpretativos de cada SEV e de acordo com a equação 1. A zona não saturada-ZNS foi, dessa forma, caracterizada na forma de até 3 estratos, em conformidade com seu comportamento geoeletrico. Os quocientes espessura-resistividade correspondentes foram somados para a composição da condutância longitudinal total. Tais resultados estão apresentados na tabela 4 e foram utilizados para a elaboração do mapa de condutância longitudinal total da área de estudo (figura 7). Conforme reportado, maiores e menores

magnitudes desse parâmetro correlacionam-se, respectivamente, com um maior e menor nível de proteção às águas subterrâneas.

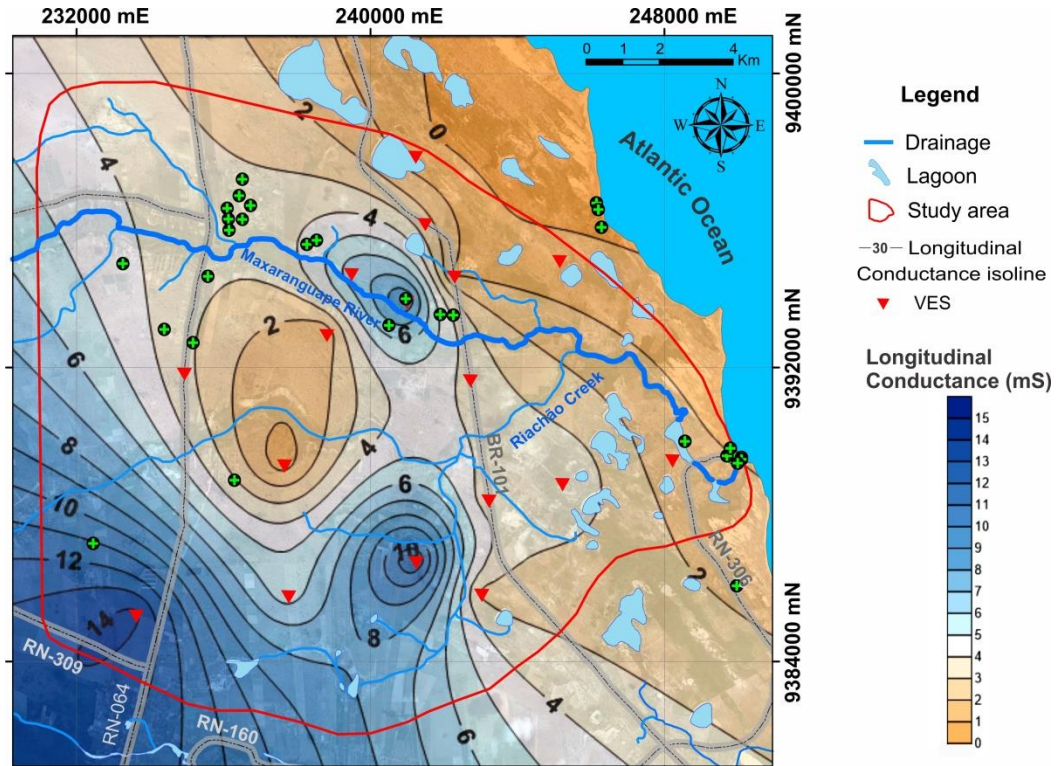
Tabela 4 – Dados para o cálculo da condutância longitudinal, apresentando as espessuras e resistividades elétricas dos horizontes geoeletricos integrantes da zona não saturada.

SEV	Espessura não saturada (m)			Resistividade elétrica (Ohm.m)			Σ S (mS)
	E ₁	E ₂	E ₃	ρ ₁	ρ ₂	ρ ₃	
SEV 1	1,3			3800			0,34
SEV 2	2	8		17700	3400		2,47
SEV 3	13	12		11200	1500		9,16
SEV 4	1,56	7,55	3,43	3000	1400	5800	6,50
SEV 5	1,44	13,6		17800	11500		1,26
SEV 6	2	1	16,8	8100	1250	7300	3,35
SEV 7	2,9			6400			0,45
SEV 8	1	2	8,5	1600	5550	3150	3,68
SEV 9	6,55	18,5		16800	4300		4,69
SEV 10	1,67	4,52		12748	1149		4,06
SEV 11	1,8	8,21		49684	9450		0,90
SEV 12	3			7750			0,39
SEV 13	0,5	44		1700	3150		14,26
SEV 14	0,5	4,5		900	2000		2,81
SEV 15	0,6	0,7	9	17850	74300	6500	1,43
SEV 16	1,2	10,3	5	15800	3300	10400	3,68
SEV 17	3	27		14300	1800		15,21

Nesse cenário, verificam-se maiores valores relativos da condutância longitudinal nos setores sudoeste, centro-sul e centro-norte da área (tons de azul), variando de 5 mS a valores superiores a 14 mS, configurando subáreas de uma maior proteção relativa em virtude de expressivas espessuras não saturadas e/ou maior conteúdo argiloso presente. Por sua vez, os setores onde valores de condutância longitudinal são inferiores a 5 mS (tons alaranjados), nos setores leste, norte e centro-oeste, apresentam uma menor proteção relativa devido a menores espessuras não saturadas e/ou maior ocorrência de sedimentos-rochas de natureza mais arenosa em sua constituição.

A adoção da terminologia grau de proteção em detrimento de vulnerabilidade no presente tópico decorre tão somente da conotação puramente geofísica do parâmetro em questão.

Figura 7 – Mapa da Condutância Longitudinal para o Aquífero Barreiras na área do baixo curso do Rio Maxaranguape-RN.



4.3 - Análise hidrogeofísica de vulnerabilidade segundo a metodologia GOD

O mapeamento da susceptibilidade intrínseca à contaminação do aquífero pela metodologia GOD foi conduzido levando-se em consideração tanto dados dos perfis litológicos de poços, como aqueles resultantes da interpretação geoeletrica. Dessa forma, o cálculo do índice GOD foi efetuado para 47 pontos, sendo 30 pontos provenientes de dados de poços e 17 provenientes de SEVs (tabela 5).

Tabela 5 - Parâmetros que compõem o índice de vulnerabilidade GOD para a área de estudo.

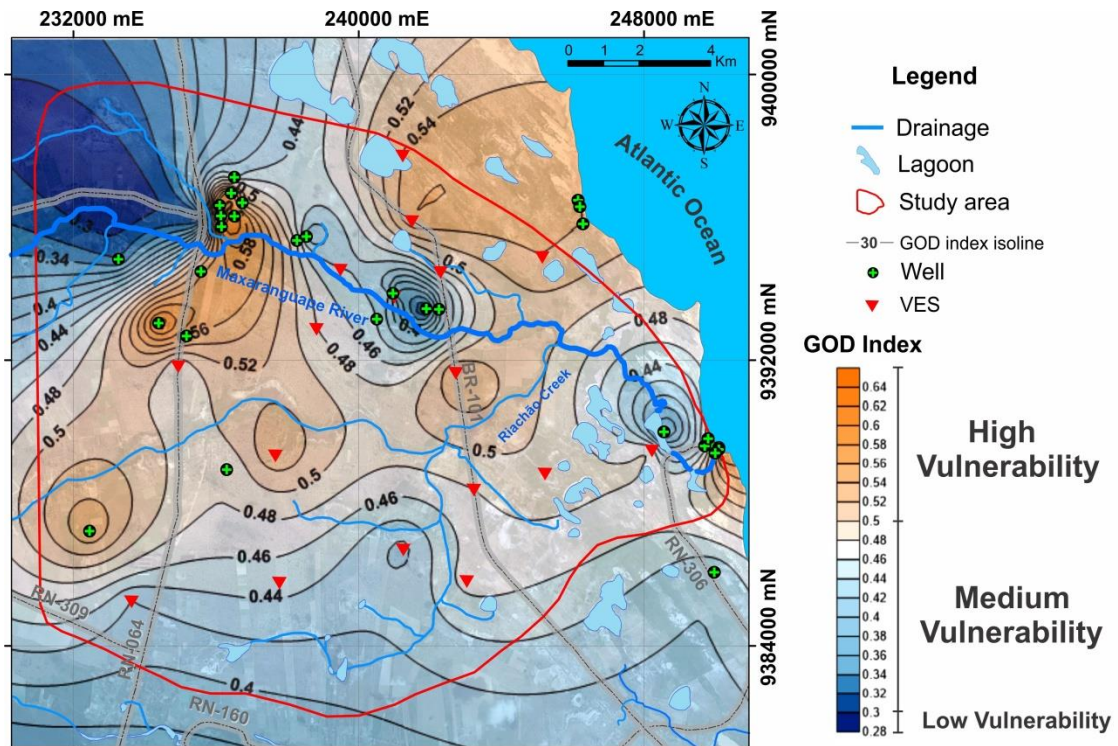
Poço/SEV	Prof. Nível freático (m)	Parâmetros do índice GOD			
		G	O	D	G*O*D
1	18,8	0,6	0,6	0,8	0,29
2	20,94	1	0,8	0,8	0,64
3	19,9	1	0,5	0,8	0,40
4	19,27	1	0,6	0,8	0,48
5	13,17	1	0,55	0,8	0,44
6	19,7	1	0,6	0,8	0,48

7	17,1	1	0,4	0,8	0,32
8	17,33	1	0,5	0,8	0,40
9	19,38	1	0,8	0,8	0,64
10	18,17	1	0,65	0,8	0,52
11	18,18	1	0,75	0,8	0,60
12	21,11	1	0,8	0,7	0,56
13	20,41	1	0,8	0,8	0,64
14	15,39	1	0,78	0,8	0,62
15	12,24	1	0,55	0,8	0,44
16	35,01	1	0,8	0,7	0,56
17	14	1	0,55	0,8	0,44
18	10	1	0,7	0,8	0,56
19	2,5	1	0,6	0,9	0,54
20	4	1	0,6	0,9	0,54
21	25	1	0,5	0,7	0,35
22	23,4	1	0,8	0,7	0,56
23	25,56	1	0,8	0,7	0,56
24	8,3	1	0,6	0,7	0,42
25	20,9	0,6	0,6	0,8	0,29
26	7,5	1	0,8	0,8	0,64
27	2,5	0,6	0,6	0,9	0,32
28	19	1	0,6	0,8	0,48
29	5	1	0,6	0,9	0,54
30	3,03	1	0,6	0,9	0,54
SEV 1	1,3	1	0,6	0,9	0,54
SEV 2	10	1	0,7	0,8	0,56
SEV 3	25	1	0,6	0,7	0,42
SEV 4	12,54	1	0,55	0,8	0,44
SEV 5	15,04	1	0,6	0,8	0,48
SEV 6	19,8	1	0,6	0,8	0,48
SEV 7	2,9	1	0,6	0,9	0,54
SEV 8	11,5	1	0,6	0,9	0,54
SEV 9	18	1	0,6	0,8	0,48
SEV 10	6,19	1	0,55	0,9	0,49
SEV 11	10,01	1	0,6	0,8	0,48
SEV 12	3	1	0,6	0,9	0,54
SEV 13	44,5	1	0,6	0,7	0,42
SEV 14	5	1	0,52	0,9	0,47
SEV 15	10,3	1	0,6	0,8	0,48
SEV 16	23	1	0,6	0,75	0,45
SEV 17	23	1	0,55	0,75	0,41

Na figura 8 se exhibe o resultado da interpolação por krigagem dos dados supracitados. Em linhas gerais, a área possui vulnerabilidades variando de média à alta, à exceção de uma subárea na extremidade noroeste considerada relativamente baixa. Os setores sul e centro-sul possuem vulnerabilidades moderadas variando nos índices em torno de 0.3 a 0.5 (cores com tons de azul), enquanto na faixa central, estendendo-se de leste a oeste, caracteriza-se uma

zona de tendência às elevadas vulnerabilidades com índices variando de 0.5 a valores superiores a 0,56 (coloração alaranjada). Ressalta-se, contudo, que o índice de vulnerabilidade baixa na extremidade noroeste da área deve-se à carência de dados e fruto do processo de interpolação, devendo, portanto, ser tratado com reservas.

Figura 8 – Cartografia de vulnerabilidade intrínseca do Aquífero Barreiras pela metodologia GOD utilizando-se dados hidrogeofísicos; área do baixo curso do Rio Maxaranguape-RN.



4.4 - Análise hidrogeofísica de vulnerabilidade segundo a metodologia AVI

Na presente metodologia, adotou-se valores de condutividades hidráulicas às litologias integrantes da ZNS, de acordo com dados bibliográficos reportados e ensaios hidrogeológicos no Aquífero Barreiras e suas coberturas em áreas adjacentes, bem como dados provenientes de calibrações geolétricas e demais SEVs executadas, conforme reportado. Nesse aspecto, tempos de percolação “c” através da ZNS são apresentados na tabela 6, os quais variam de poucos meses até 13 anos, representando tempos de residência caracteristicamente reduzidos.

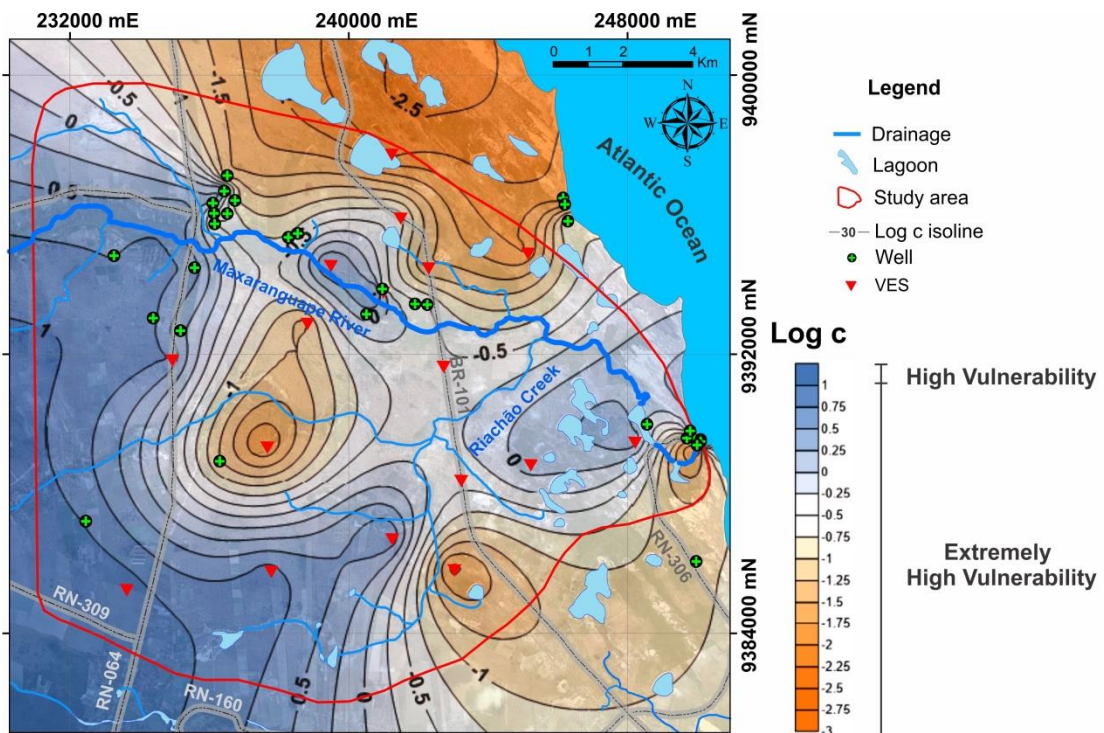
Tabela 6 – Parâmetros que compõem o índice de vulnerabilidade AVI para a área de estudo.

Poço/SEV	Prof. Nível freático (m)	Parâmetros do índice AVI					
		d1	k1	d2	k2	C = d _i /K _i	log c

	(anos)						
1	18,8	6	1,00E-05	12,8	1,00E-07	4,08	0,61
2	20,94	20,94	1,00E-07			6,64	0,82
3	19,9	10	1,00E-05	9,9	1,00E-06	0,35	-0,46
4	19,27	15	1,00E-05	4,27	1,00E-06	0,18	-0,74
5	13,17	9	1,00E-05	4,17	1,00E-07	1,35	0,13
6	19,7	19,7	1,00E-05			0,06	-1,20
7	17,1	17,1	1,00E-07			5,42	0,73
8	17,33	12	1,00E-05	5,33	1,00E-06	0,21	-0,68
9	19,38	14	1,00E-05	5,38	1,00E-07	1,75	0,24
10	18,17	16	1,00E-05	2,17	1,00E-06	0,12	-0,92
11	18,18	11	1,00E-05	7,18	1,00E-07	2,31	0,36
12	21,11	9	1,00E-05	12	1,00E-06	0,41	-0,39
13	20,41	7	1,00E-05	13,41	1,00E-06	0,45	-0,35
14	15,39	7	1,00E-05	8,39	1,00E-06	0,29	-0,54
15	12,24	12,24	1,00E-05			0,04	-1,41
16	35,01	4	1,00E-05	31	1,00E-07	9,84	0,99
17	14	14	1,00E-05			0,04	-1,35
18	10	4	1,00E-05	6	1,00E-07	1,92	0,28
19	2,5	2,5	1,00E-05			0,01	-2,10
20	4	4	1,00E-05			0,01	-1,90
21	25	13	1,00E-05	12	1,00E-06	0,42	-0,37
22	23,4	8	1,00E-05	15,4	1,00E-07	4,91	0,69
23*	25,56	8	1,00E-05	12	1,00E-06	2,17	0,34
24	8,3	6	1,00E-05	2,3	1,00E-06	0,09	-1,04
26	7,5	1	1,00E-05	6,5	1,00E-07	2,06	0,31
27	2,5	2,5	1,00E-07			0,79	-0,10
28	19	16	1,00E-05	3	1,00E-07	1,00	0,00
29	5	4,5	1,00E-05	0,5	1,00E-07	0,17	-0,76
30	3,03	3,03	1,00E-05			0,01	-2,02
SEV 1	1,3	1,3	1,00E-05			0,00	-2,38
SEV 2	10	2	1,00E-05	8	1,00E-06	0,26	-0,58
SEV 3	25	13	1,00E-05	12	1,00E-07	3,85	0,59
SEV 4 *	12,54	1,56	1,00E-05	7,55	1,00E-07	3,49	0,54
SEV 5	15,04	15	1,00E-05			0,05	-1,32
SEV 6 *	19,8	2	1,00E-05	1	1,00E-07	5,65	0,75
SEV 7	2,9	2,9	1,00E-05			0,01	-2,04
SEV 8	11,5	1	1,00E-05	10,5	1,00E-06	0,34	-0,47
SEV 9	18	6,55	1,00E-05	11,5	1,00E-06	0,39	-0,41
SEV 10	6,19	1,67	1,00E-05	4,52	1,00E-07	1,44	0,16
SEV 11	10,01	10	1,00E-05			0,03	-1,50
SEV 12	3	3	1,00E-05			0,01	-2,02
SEV 13	44,5	44	1,00E-07			13,95	1,14
SEV 14	5	4,5	1,00E-05			0,01	-1,85
SEV 15	10,3	0,7	1,00E-05	9	1,00E-07	2,86	0,46
SEV 16	23	1,3	1,00E-05	21,7	1,00E-07	6,89	0,84
SEV 17 *	23	3,2	1,00E-05	14,3	1,00E-07	6,29	0,80

Conforme a classificação de vulnerabilidade fundamento no log c (figura 9), sendo c associado com a resistência hidráulica, toda a área investigada possui vulnerabilidade alta a extremamente alta, com destaque para os quadrantes nordeste e sudeste (tons variando do branco ao laranja). Setores com valores do log c superiores a 0 (tons de azul), em toda porção oeste e pequena faixa litorânea, por sua vez, foram classificadas como sendo de alta vulnerabilidade. A exemplo dos mapas anteriores, algumas subáreas podem apresentar magnitudes de vulnerabilidade que decorrem apenas do processo geostatístico de interpolação, devendo, dessa forma, serem avaliados com reservas e apenas na forma de tendências (extremos sudoeste e nordeste).

Figura 9 – Mapa do Índice de Vulnerabilidade do Aquífero (AVI) na área do baixo curso do Rio Maxaranguape-RN.



5 - Discussão

Em princípio, pode-se ponderar que a relativa similaridade entre os resultados das diferentes metodologias deve-se ao fato de que estas possuem o parâmetro espessura da zona não saturada como fator preponderante. Somado a isso, tem-se uma maior variabilidade dessa espessura em relação às resistividades ao longo da área. Por outro lado, a associação de

condutâncias menores com espessuras não saturadas relativamente maiores, caso da subárea nas proximidades da desembocadura do Rio Maxaranguape, é compatível geológica e geoeletricamente com uma composição mais arenosa da ZNS. Nesse caso, esses estratos conferem menor proteção local ao aquífero em razão de sua maior capacidade de fluxo hidráulico.

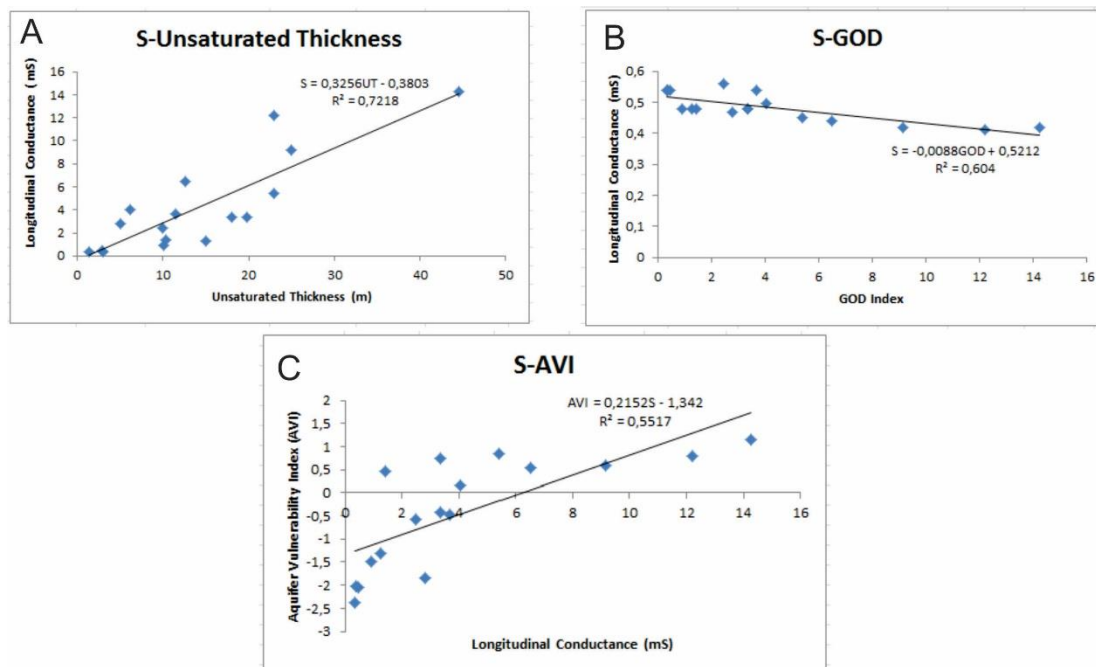
De forma análoga, ao se confrontar valores de espessura não saturada e da metodologia AVI, por sua vez, verifica-se uma substancial correlação destes, na medida em que se têm as maiores vulnerabilidades associadas com as menores espessuras da ZNS. As anomalias negativas de AVI, contudo, são incrementadas (passando para vulnerabilidades extremamente altas) em face da constituição litológica local de natureza mais arenosa da ZNS. Essa observação, caracterizada, por exemplo, na porção central da área, é corroborada pelo comportamento da condutância longitudinal, o qual apresenta valores reduzidos compatíveis com resistividades elétricas mais elevadas e típicas de litologias mais arenosas.

No quadrante nordeste, particularmente, a similaridade entre feições anômalas nos mapas de espessura da ZNS, condutância longitudinal, AVI e índice GOD, evidencia de maneira mais incisiva a predominância da profundidade do nível freático na quantificação do grau de proteção do aquífero.

Algumas dessas correlações podem ser observadas na figura 10, mediante análises gráficas comparativas entre os distintos índices obtidos, além da espessura da ZNS, onde foi caracterizado um fator de correlação R^2 de até 0.72 (figura 10A). Nesse caso, maiores valores de condutância longitudinal, evidenciando um maior grau de proteção do aquífero, acompanham maiores valores de espessuras não saturadas.

A correlação inversa entre a condutância longitudinal e índices GOD (figura 10B) decorre dos fundamentos de seus respectivos sistemas de classificação de vulnerabilidade, ou seja, enquanto os índices GOD maiores denotam um incremento da vulnerabilidade, condutâncias maiores reportam melhores proteções do aquífero. O coeficiente de correlação estimado na relação entre a condutância longitudinal e o índice AVI foi cerca de 0.55 (figura 10C), com uma tendência positiva de alinhamento dessas magnitudes. Ambos os fatores refletem um bom nível de afinidade entre as diferentes metodologias, embora considerando suas distintas abordagens.

Figura 10 – Análises gráficas comparativas entre diferentes índices de vulnerabilidade em relação a Condutância Longitudinal; A) Espessura da zona não Saturada, B) Índice GOD e C) Índice AVI.



Um aspecto a ser ponderado, onde maiores fatores de correlação poderiam ser obtidos, reside no fato de diferenças no quantitativo das amostragens utilizadas no mapa de condutância longitudinal (decorrente apenas de modelos inversos interpretados das SEVs) em relação aos demais. Já a adoção de dados conjugados de perfis de poços (investigação direta) e SEV (investigação indireta) mostrou-se bastante satisfatória na medida em que possibilita, sob certas condições de incorporação de vínculos hidrogeológicos locais, um aprofundamento na elaboração de cartografias de vulnerabilidade. Esse fato reside, sobretudo, na condição de preenchimento de espaços no terreno com escassez de informações. Nesse mesmo contexto, a utilização apenas de dados provenientes das SEVs na forma do parâmetro condutância longitudinal, a julgar pela razoável correlação ora reportada com os demais índices avaliados, mostrou-se satisfatória, sobretudo em termos de sua utilização em áreas com reduzidas informações de poços.

Afora as particularidades e relações entre as respectivas metodologias utilizadas, foi constatado que toda a área do baixo curso do Rio Maxaranguape possui classes de vulnerabilidades variando de moderada-alta a extremamente alta, notadamente em significativos setores na faixa central, sudeste e norte. Somente na porção extremo noroeste, pelo método GOD, a vulnerabilidade é classificada como sendo mais reduzida.

5 - Conclusões

- A análise integrada de vulnerabilidade utilizando-se de metodologias distintas, com dados provenientes de investigação de natureza hidrogeológica e geolétrica, possibilitou um incremento no que diz respeito à contextualização da zona não saturada sobrejacente ao Aquífero Barreiras. Essa zona não saturada, responsável pela proteção principal do referido aquífero, considerando este de caráter hidráulico não confinado, foi abordada sob diferentes parâmetros, notadamente sua espessura e constituição litológica. As metodologias avaliadas, condutância longitudinal, GOD e AVI, embora sob análises diferenciadas de parâmetros, mostraram uma razoável concordância entre seus resultados. Nesse caso, os índices de vulnerabilidade e de grau de proteção revelaram classes de vulnerabilidade intrínseca do Aquífero Barreiras para a área do baixo curso de Rio Maxaranguape variando de moderada a extremamente alta, ou seja, com reduzido grau de proteção creditada à zona não saturada sobrejacente.
- Esses índices elevados de vulnerabilidades intrínsecas, traduzidos na forma de sensibilidade a contaminações, decorrem essencialmente do cenário de ocorrência de formações sedimentares de elevada permeabilidade e reduzidas profundidades do nível freático, fazendo com que um eventual contaminante possua um reduzido tempo de trânsito através da zona não saturada e atinja o aquífero com maior facilidade.
- A adoção de dados geolétricos, particularmente, seja como incremento na composição das metodologias GOD e AVI, seja na forma isolada na análise de condutância longitudinal, mostrou-se fundamental, sobretudo por possibilitar o preenchimento de espaços com poucas informações diretas disponíveis (dados de perfis de poços).
- No cômputo geral, mapeamentos dessa natureza revelam o condicionamento hidroambiental subterrâneo da área, subsidiando a elaboração de políticas públicas de proteção e preservação de aquíferos, bem como de suas utilizações sustentáveis.

6 - Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, através do suporte fornecido pela bolsa de pesquisa nº 473625/2013-0, bem como à Companhia de Águas e Esgotos do RN-CAERN pelo apoio logístico e acesso aos dados de poços.

7 – Referências bibliográficas

- Akpan, A. E.; Ebong, E. D.; & Emeka, C. N. (2015). Exploratory assessment of groundwater vulnerability to pollution in Abi, southeastern Nigeria, using geophysical and geological techniques. *Environmental monitoring and assessment*, 187(4): 1-18. Doi: 10.1007/s10661-015-4380-2.
- Alves, R.S., Lucena, L.R.F. (2021). Uso de dados hidrogeofísicos e modelos numéricos como alternativa na otimização de locações de poços em um aquífero não confinado. *Revista Águas Subterrâneas*, v.35, n.1, p.51-64, 2021. Doi: 10.14295/ras.v35i1.29987.
- Alves, R. S.; Lucena, R.F.L. (2022). Numerical modeling of NE Brazil coastal aquifer: Fault controlled conduits for seawater intrusion. *Journal of South American Earth Sciences*, 117. Doi: 10.1016/j.jsames.2022.103872.
- Bobachev, A.A.; Modin, I.N.; Shevnin V.A. (2000). *IPI2Win v. 2.1, IPI_RES2, IPI_RES3, User's Guide*. Geoscan-M Ltd., Moscou, Rússia. 25p.
- Braga, A.C.O; Francisco, R.F. (2014). Natural Vulnerability Assessment to Contamination of Unconfined Aquifers by Longitudinal Conductance-(S) Method. *Journal of Geography and Geology*, 6(4):68. Doi: 10.5539/jgg.v6n4p68.
- BRAGA, A.C. O. (2016). *Geofísica aplicada: métodos geoeletricos em hidrogeologia*. Oficina de Textos. 159p.
- Campos, B.C.S.; Lucena, L.R.F.; Rightto, A.M.; Araújo, P.V.N. (2023). Evaluation of the impact of variable recharge in an urban aquifer associated with land use and occupation. *Journal of South American Earth Sciences*, 124. Doi: 10.1016/j.jsames.2023.104283.
- Dantas, E.P.; Medeiros, V.C.; Cavalcante, R. (2021). *Mapa geológico do Estado do Rio Grande do Norte*. Recife: Serviço Geológico do Brasil-CPRM. 1 color map.132,72cm x 85,45cm. Escala 1:500.000. Programa Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Ação: Levantamentos Geológicos e Integração Geológica Regional. Available in cprm.gov.br.
- Domenico P.A.; Schwartz F.W.(eds). (1990). *Physical and Chemical Hydrogeology*. Wiley Press. 324 p.
- Foster S.S.D; Hirata R.C.A. (1988). *Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data*. Lima, Peru, WHO-PAHO/HPE-CEPIS Technical Manual. 81pp.
- Foster S.S.D.; Hirata R.C.A.; Gomes, D.; D'elia M.; Paris, M. (2006). *Groundwater Quality Protection: a guide for water utilities, municipal authorities and environment agencies*. Groundwater Management Advisory Team, WHO/PAHO/CEPIS and UNESCO/ROSLAC/PHI, The World Bank, Washington, D.C.

- Gemal, K. S.; El-Shishtawy, A. M.; El-Alfy, M.; Ghoneim, M. F.; El-Bary, M. A. (2011). Assessment of aquifer vulnerability to industrial waste water using resistivity measurements. A case study, along El-Gharbyia main drain, Nile Delta, Egypt. *Journal of Applied Geophysics*, 75(1):140-150. Doi: 10.1016/j.jappgeo.2011.06.026.
- Kalinski, R.J., Kelly, W.E., Bogardi, I., Pesti, G. (1993). Electrical resistivity measurements to estimate travel time through unsaturated groundwater protective layers. *Journal of Applied Geophysics*, 30:161–173. Doi: 10.1016/0926-9851(93)90024-S.
- Kirsch R.; Sengpiel K-P.; Voss, W. (2003). The use of electrical conductivity mapping in the definition of an aquifer vulnerability index. *Near Surface Geophysics*, 1:3-20. Doi:10.3997/1873-0604.2002003.
- Kirsch, R. (2009). *Groundwater Geophysics: A tool for Hydrogeology*. Ed. Springer, Germany, 548 p.
- Lucena, L.R.F. (2005). *Implicação da compartimentação estrutural no Aquífero Barreiras na área da bacia do Rio Pirangi-RN*. PhD Thesis, Universidade Federal do Paraná-UFPR, Curitiba, Brasil.
- Lucena, L. R. F., Oliveira Junior, J. G., Diniz Filho, J. B. (2009). Análise da disposição de efluentes na área das dunas de Alagamar (Parnamirim-Natal/RN): integração de dados geofísicos e hidrogeológicos. *Revista Brasileira de Geociências*. 39:181-189.
- Melo, J.G.; Morais, S.D.O.; Silva, R.A.; Vasconcelos, M.B. (2013). Avaliação dos recursos hídricos do Aquífero Barreiras na Bacia do Rio Maxaranguape-RN. *Revista Águas Subterrâneas*, 27:53-64. Doi:10.14295/ras.v27i1.26875.
- Magalhães, A. L. P.; Lucena, L. R. F. (2023). Análise da hierarquia dos parâmetros que compõem a resitência elétrica transversal e sua aplicabilidade ao estudo do Aquífero Barreiras – litoral sul do RN. *Geoambiente On-line*, Goiânia, n. 46, Disponível em: <https://revistas.ufj.edu.br/geoambiente/article/view/76513>. Acesso em: 02 out. 2023.
- Mendoza, J.A.; Barmen, G. (2006). Assessment of groundwater vulnerability in the Río Artiguas basin, Nicaragua. *Environmental Geology*, 50:569-580. Doi: 10.1007/s00254-006-0233-1.
- Monteiro, A.R.O.; Lucena, L.R.F. (2021). Contribution of Hydrogeophysical data for the assessment of unconfined aquifer protection levels – an example from the northeast of Brazil. *Brazilian Journal of Geophysics* 39(3): 1-19. Doi: 10.22564/rbgf.v39i3.2107.

- Nunes, L. M. G.; Lucena, L. R. F.; Nascimento Silva, C. C. (2020). Reserve evaluation of a fault-conditioned aquifer: the Barreiras Aquifer in the coastal region of NE Brazil. *Brazilian Journal of Geology*. 50(1): e20180127. Doi: 10.1590/2317-4889202020180127.
- Okiongbo, K.S.; Akpofure, E. (2012). Determination of Aquifer Properties and Groundwater Vulnerability Mapping Using Geoelectric Method in Yenagoa City and Its Environs in Bayelsa State, South South Nigeria. Kenneth. *Journal of Water Resource and Protection*, 4:354-362. Doi: 10.4236/jwarp.2012.46040.
- Orellana E. (1972). *Prospeccion geoeletrica em corrente continua*. Ed. Paraninfo, Madrid, 523 p.
- Rubin, Y. & Hubbard, S.S. (eds.). (2005). *Hydrogeophysics*. The Netherlands, Springer, Dordrecht, 50. 521 p.
- Silva, L.R.D.; Lucena, L.R.F.; Vieira, M.M.; Nascimento, A.F. (2014). Estimativa de parâmetros hidráulicos do Aquífero Barreiras-RN a partir de análise computacional de imagens de lâminas delgadas. *Revista Águas Subterrâneas*, ABAS, São Paulo, 28:14-27. Doi: 10.14295/ras.v28i2.27873.
- Souza, I. V. F.; Lucena, L. R. F.; Bezerra, F. H. R.; Diniz Filho, J. B. (2019). Use of hydrogeophysical data to determine the role of faults in the geometry of the Barreiras Aquifer, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 49(2): e20170141. Doi: 10.1590/2317-4889201920170141.
- Surfer. (2010). *Contouring and 3D Surface Mapping for Scientists and Engineers*. Golden Software, Inc. Golden, Colorado, USA. 664p, 2010. <http://www.goldensoftware.com>.
- Uchegbulam, O. and Ayolabi, E. (2014). Application of Electrical Resistivity Imaging in Investigating Groundwater Pollution in Sapele Area, Nigeria. *Journal of Water Resource and Protection*, 6, 1369-1379. Doi: 10.4236/jwarp.2014.614126.
- Van Stempvoort, D.; Ewert, L.; Wassenaar, L. (1993). Aquifer vulnerability index: a GIS-compatible method for groundwater vulnerability mapping. *Canadian Water Resources Journal*, 18:25-37. Doi: 10.4296/cwrj1801025.