

**ANÁLISE DA HIERARQUIA DOS PARÂMETROS QUE COMPÕEM A  
RESISTÊNCIA ELÉTRICA TRANSVERSAL E SUA APLICABILIDADE AO  
ESTUDO DO AQUÍFERO BARREIRAS – LITORAL SUL DO RN**

Álvaro Luís Patriota Lima **Magalhães**<sup>1</sup>, Leandson Roberto Fernandes **de Lucena**<sup>2</sup>

(1 – Universidade Federal do Rio Grande do Norte-UFRN, Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, luis.lima.701@ufrn.edu.br, <https://orcid.org/0009-0003-6002-7766>; 2 – Universidade Federal do Rio Grande do Norte-UFRN, Departamento de Geofísica, leandson.lucena@ufrn.br, <https://orcid.org/0000-0002-7713-861X>

**Resumo:** As cidades da costa leste do Rio Grande do Norte possuem cerca de 80% de seus abastecimentos creditados ao Aquífero Barreiras, sendo este de caráter hidráulico não confinado. Nessa conjuntura e considerando o referido manancial, o alvo desta pesquisa foi a bacia do Rio Catu-RN, a qual é esculpida nas sequências cenozóicas da Formação Barreiras e suas coberturas. O objetivo foi identificar locais de maiores potencialidades hidrogeológicas, utilizando dados geoeletricos, particularmente através do parâmetro resistência elétrica transversal (RT). As regiões nordeste e central da área apresentaram valores de RT superiores a  $50000 \Omega \cdot m^2$ , relacionadas a setores de espessuras e/ou de resistividades médias maiores da zona saturada e atestando essas subáreas como mais promissoras em termos de potencialidades hidrogeológicas. As maiores espessuras médias da zona saturada localizam-se nas porções nordeste e central, atingindo 95 m. Os maiores valores das resistividades médias da zona saturada, situam-se nas partes central e extremo nordeste da área, atingindo até  $950 \Omega \cdot m$ . Todavia, regressões lineares revelaram que a espessura saturada média impõe uma maior influência no cálculo da resistência elétrica transversal, apresentando um fator de correlação de 0,70, enquanto que o de resistividade média foi de 0,47.

**Palavras-chave:** Aquífero Barreiras; resistência elétrica transversal; potencialidade hidrogeológica.

## **ANALYSIS OF THE HIERARCHY OF THE PARAMETERS THAT COMPOSE THE TRANSVERSE ELECTRICAL RESISTANCE AND ITS APPLICABILITY TO THE STUDY OF THE BARREIRAS AQUIFER - SOUTH COAST OF RN.**

**Abstract:** The towns of the east coast of Rio Grande do Norte have about 80% of their supplies credited to Aquifero Barreiras, this being of unconfined hydraulic character. In this context and considering the aforementioned source, the aim of this research was the River Catu basin, which is carved in the Cenozoic sequences of the Barreiras Formation and their coverings. The objective was to identify places of the greatest hydrogeological potential, using geoelectric data, particularly through the transversal electric resistance parameter (TR). The northeast and central regions of the area showed TR values greater than  $50.000 \Omega m^2$ , related to thickness sectors and/or higher average resistivities of the saturated zone and attesting these subareas as more promising in terms of hydrogeological potentials. The greater average thickness of the saturated zone is located in the portions northeast and central, reaching 95 m. The highest values of the average resistivities of the saturated zone are located in the central and extreme northeast parts of the area, reaching up to  $950 \Omega m$ . However, linear regressions revealed that the average saturated thickness imposes a greater influence on the strength calculation transverse electric current, presenting a correlation factor of 0,70, while the factor of average resistivity was 0,47.

**Keywords:** Barreiras aquifer; transverse electrical resistance; hydrogeological potential.

## **ANÁLISIS DE LA JERARQUÍA DE LOS PARÁMETROS QUE COMPONEN LA RESISTENCIA ELÉCTRICA TRANSVERSAL Y SU APLICABILIDAD AL ESTUDIO DEL ACUÍFERO BARREIRAS – COSTA SUR DE RN.**

**Resumen:** Las ciudades de la costa este de Rio Grande do Norte tienen alrededor del 80% de sus suministros acreditados al Acuífero Barreiras, que es de naturaleza hidráulica no confinada. En ese contexto y considerando la fuente antes mencionada, el objetivo de esta investigación fue la cuenca del río Catu - RN, que está tallada en las secuencias cenozoicas de la Formación Barreiras y sus cubiertas. El objetivo fue identificar los sitios con mayor potencial hidrogeológico, utilizando datos geoelectricos, particularmente a través del parámetro de resistencia eléctrica transversal (RT). Las regiones nororiental y central del área mostraron valores de RT superiores a  $50.000 \Omega \cdot m^2$ , relacionados con sectores más gruesos y/o resistividades promedio más altas en la zona saturada, lo que atestigua que estas subáreas son más promisorias en términos de potencial hidrogeológico. Los mayores espesores promedio

de la zona saturada se ubican en las porciones noreste y central, alcanzando los 95 m. Los valores más altos de resistividades promedio de la zona saturada se ubican en la parte central y extremo noreste del área, alcanzando hasta 950  $\Omega$ .m. Sin embargo, regresiones lineales revelaron que el espesor medio saturado impone una mayor influencia en el cálculo de la resistencia eléctrica transversal, presentando un factor de correlación de 0,70, mientras que la resistividad media fue de 0,47.

**Palabras clave:** Acuífero Barreiras; resistencia eléctrica transversal; potencial hidrogeológico.

## 1. Introdução

O aumento da demanda hídrica nos seus mais diversos usos vem sendo acompanhado por uma igualmente necessidade de se aprimorar e, de fato, implantar ações efetivas de gestão hidrogeambiental sustentável. Estas ações devem objetivar, dentre outros aspectos, evitar que o volume de água explorado dos aquíferos supere sua capacidade de recarga anual natural, prevenindo prejuízos a esses mananciais e suas captações. Desse modo, estudos hidrogeológicos exploratórios básicos contribuem de forma decisiva na elaboração de estratégias para a preservação dos recursos hídricos. Nesse caso, métodos geofísicos de investigação contribuem decisivamente na identificação de áreas mais promissoras em termos de potencialidades hidrogeológicas, sobretudo em locais onde não se dispõem de dados de poços (Silva e Lucena, 2021).

Nessa conjuntura, o Aquífero Barreiras representa a principal fonte de água subterrânea do litoral oriental do Estado do Rio Grande do Norte, abastecendo aproximadamente 80% da população da região (Lucena, 2005).

Estudos prévios com respeito a caracterização hidrogeológica e hidrogeofísica do sistema aquífero em relação a zona saturada, destacam a determinação da profundidade do nível d'água e identificação litológica (caracterização do aquífero), bem como estimativas de parâmetros hidráulicos (Braga, 2016). Levantamento geoeletrico de eletroresistividade, principalmente com a técnica de Sondagem Elétrica Vertical (SEV), é essencial para este tipo de estudo, pois permite caracterizar as variações de resistividade em função da profundidade em um modelo de camadas plano paralelas. Adicionalmente, a aplicação de parâmetros geoeletricos Dar Zarrouk, particularmente da resistência elétrica transversal, pode contribuir de maneira significativa para identificar áreas com maior potencial hidrogeológico, além de

propor estimativas das transmissividades hidráulicas (Orellana, 1972; Braga, 2016; Silva e Lucena, 2021).

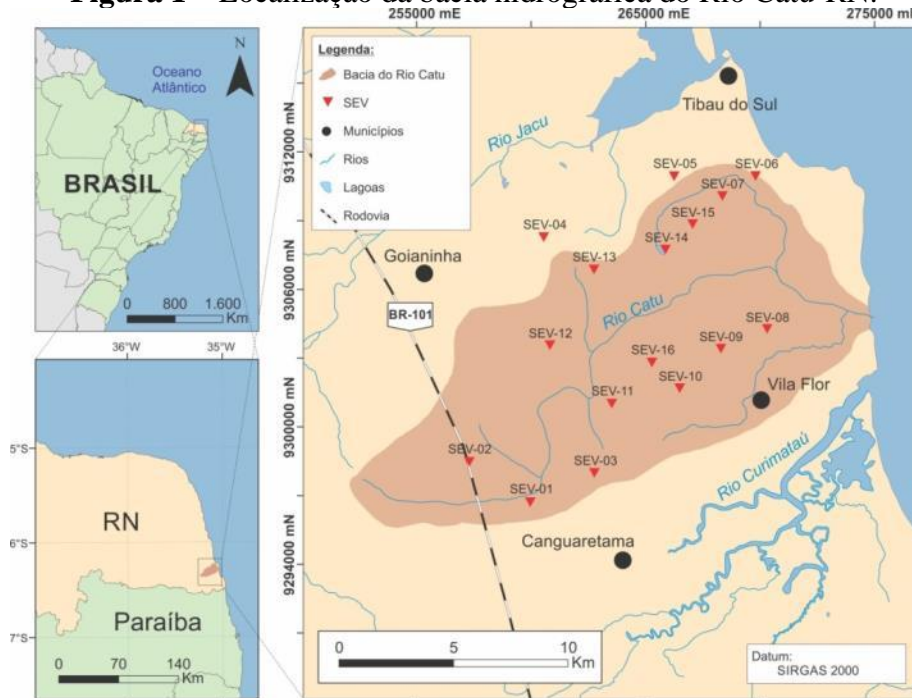
Dentre os diversos métodos geofísicos existentes, os métodos geoeletricos são os mais eficazes nos estudos hidrogeológicos, tendo aplicação principal de aquíferos aluvionares (sedimentos inconsolidados) e aquíferos sedimentares (rochas sedimentares), no âmbito da locação de poços para a captação das águas subterrâneas (Braga, 2016). A partir de dados geoeletricos, pode-se determinar as espessuras de cada camada geológica e juntamente com as resistividades, é possível delimitar locais com alta transmissividade hidráulica. Este último pode ser estimado pelos parâmetros Dar Zarrouk, sendo estes decorrente do produto entre as espessuras das camadas e as resistividades em cada uma delas (resistência transversal) ou o quociente entre elas (condutância longitudinal) (Orellana, 1972; Braga, 2016). A resistência elétrica transversal, particularmente, é aplicada à identificação de áreas com maior favorabilidade hídrica, sendo os fatores condicionantes a espessura média e resistividade de cada camada geoeletrica na zona saturada.

Estudos realizados com os parâmetros Dar Zarrouk (resistência transversal e condutância longitudinal) ressaltam tais aplicações nas pesquisas em diversos cenários hidrogeológicos. Soupios et al. (2007), utilizando parâmetros de Dar Zarrouk estimaram parâmetros hidráulicos em diversos aquíferos na Bacia de Keritis (Grécia), confrontando-os com dados laboratoriais e testes de bombeamento. Empregando igualmente dados geoeletricos e parâmetros Dar Zarrouk, Iduma et al. (2016) sugeriram locais propícios para locação de poços na Bacia de Afikpo, sudeste da Nigéria. Silva e Lucena (2021), utilizando o parâmetro Dar Zarrouk resistência elétrica transversal e demais dados geoeletricos, estimaram as potencialidades hidrogeológicas em um aquífero não confinado em uma área no baixo curso Rio Maxaranguape, litoral leste do Rio Grande do Norte. Estes mesmos autores avaliaram, preliminarmente, que a resistividade média da zona saturada mostrava-se mais relevante na composição da resistência elétrica transversal para aquela área de estudo. Yusuf et al. (2021) definiram zonas promissoras de águas subterrâneas a partir dos parâmetros Dar Zarrouk e de dados geoeletricos na aldeia de Karlahi, no Estado de Adamawa, Nigéria.

A bacia do Rio Catu, alvo do presente estudo, tem uma área de aproximadamente 211 Km<sup>2</sup>, situando-se no litoral oriental do Estado do Rio Grande do Norte e abrangendo os municípios de Goianinha, Canguaretama, Tibau do Sul e Vila Flor (figura 1). A mesma limita-se com as bacias dos rios Curimataú ao sul e Jacu ao norte. A geomorfologia da bacia do Rio Catu é composta predominantemente pelos tabuleiros costeiros, com uma área de

aproximadamente 193 Km<sup>2</sup> e as planícies fluviais, marinhas e formações dunares, compreendendo uma área de aproximadamente 18 Km<sup>2</sup> (IDEMA, 2008; Oliveira, 2011). Esta bacia é esculpida sobre terrenos sedimentares cenozóicos da Formação Barreiras, sofrendo uma forte influência do aquífero homônimo (Lucena et al. 2013).

**Figura 1** – Localização da bacia hidrográfica do Rio Catu-RN.



adaptado de Monteiro e Lucena (2021).

O padrão geral de drenagem é o detrítico e seus principais tributários são: Rio Catu, com cerca de 30 km de extensão e regime perene (IDEMA, 2008), e os riachos Carrapato, Galhardo, Catuzinho e Gramació.

O principal manejo sócio-econômico da região é a agricultura, representando 99% da ocupação do solo, sendo 90% relacionado a cana-de-açúcar. Além disso, a região é caracterizada pela a cultura de coco da Bahia, mandioca, banana, manga, entre outros (Lucena et al. 2013).

Nessa conjuntura, o objetivo deste trabalho é avaliar o grau de influência dos parâmetros espessura e resistividade elétrica da zona saturada, na composição da resistência elétrica transversal, sendo o contexto hidrogeológico o Aquífero Barreiras. Essa análise foi conduzida através de correlações por regressão linear entre espessura do aquífero e resistividade média da zona saturada x resistência elétrica transversal, bem como seus respectivos mapas elaborados. Os resultados dessas análises foram destinados adicionalmente a subsidiar a

identificação de subáreas com maiores potencialidades com vistas a execução de captações futuras.

## 2. Contextualização Geológica

Este item envolve uma caracterização lito-estratigráfica e avaliação do arcabouço tectônico estrutural da bacia do Rio Catu-RN, utilizando materiais bibliográficos e mapas geológicos existentes da área do presente estudo. A coluna estratigráfica apresenta duas sequências básicas, sendo uma não aflorante (representada pelo o embasamento cristalino Pré-Cambriano e sedimentos do Mesozóico) e outra aflorante (sedimentos Cenozóicos) (Bezerra et al., 2001; Lucena, 2005).

A sequência não aflorante é marcada por rochas do embasamento cristalino e sedimentos do Mesozóico. Correlacionadas ao Complexo Caicó, as rochas que compõem o embasamento cristalino são descritas como sendo granitos, granodioritos, migmatitos e gnaisses (Bezerra et al., 2001; Souza et al, 2019). De acordo com Lucena (2005), afloramentos dessa unidade mais próximas da área de estudo, encontram-se expostas nos municípios de Monte Alegre e Macaíba-RN.

No que diz a respeito das rochas sedimentares do Mesozóico, provavelmente de idade cretácica e sobrepostas discordantemente ao Complexo Caicó, denotam duas unidades: uma de composição arenítica, constituindo a base, e outra de composição carbonática com intercalações areníticas, representando o topo da sequência (Lucena, 2005; Souza et al, 2019). Esta sequência acha-se correlacionada às Formações Beberibe e Gramame-Maria Farinha, respectivamente, as quais integram a Bacia Pernambuco-Paraíba (Lucena, 2005; Souza et al, 2019).

A sequência aflorante é definida por Lucena (2005) como sendo rochas sedimentares cenozóicas de idade Terciária-Quaternária, representadas pela Formação Barreiras, e as coberturas quaternárias, constituídos de beachrocks, depósitos praias sub-recentes e recentes, depósitos aluviais, diversas gerações de dunas, depósitos de mangues e/ou fluviolacustrinos e depósitos arenosos (Rossetti et al., 2013; Lucena e Simonato, 2021).

As constituições litológicas das rochas clásticas da Formação Barreiras envolvem, da base ao topo, arenitos médios a grosseiros, por vezes conglomeráticos, e rochas areno-argilosas ou argilo-arenosas (Nogueira et al., 2010; Alves e Lucena, 2021). Segundo Lucena (2005), as características geomorfológicas da Formação Barreiras são de um relevo plano a

suavemente ondulados, menos nas imediações de algumas drenagens expressivas, onde este assume a inclinação acentuada condicionada pelos vales dessas drenagens.

Sobrepondo discordantemente à Formação Barreiras, encontram-se as coberturas quaternárias, diferenciando-se uma sedimentação sub-recente (beachrocks e dunas fixas) e recente (dunas móveis, aluviões, coberturas arenosas, sedimentos de mangues a praias atuais) (Lucena, 2005; Dantas et al., 2021). Essa subdivisão é utilizada para diferenciar as unidades litoestratigráficas do Quaternário, que estão ou não, respectivamente, sujeitas aos processos de sedimentação atuais (Lucena, 2005).

Os campos de tensões que atuam em toda costa do litoral oriental do Rio Grande do Norte possuem três *trends* de falhas principais com direções NE-SW, NW-SE e N-S, de modo que os de direções nordeste e noroeste são predominantes. Essas falhas são caracterizadas por movimentos transcorrentes e normais, com uma compressão máxima E-W e distensão N-S, onde juntos definem o campo de tensões neotectônicos (Bezerra et al., 2001; Balsamo et al., 2010; Nunes et al., 2020). Uma configuração de estruturas transcorrentes dextrais (NE-SW) e sinistrais (NWSE) foram favorecidas por estes campos de tensões. Tais estruturas demarcam grabens e horsts, controlando os principais vales da região e acomodando unidades estratigráficas quaternárias com direções preferenciais.

### 3. Contextualização hidrogeológica

O sistema Aquífero Barreiras possui um caráter hidráulico predominantemente não confinado, sendo a principal reserva hídrica do litoral oriental do Rio Grande do Norte e abastecendo grande parte dos municípios dessa região do Estado, incluindo a capital Natal. De acordo com Nunes et al. (2020), o aquífero em questão possui uma área de ocorrência de cerca 4870 Km<sup>2</sup> no Estado do Rio Grande do Norte, limitando-se ao norte pelo município de Touros, ao sul pelo Estado da Paraíba, a oeste pelas rochas do embasamento cristalino do Complexo Caicó e a leste pelo Oceano Atlântico.

Em termos de limites hidroestratigráficos, o Aquífero Barreiras é limitado na sua base pelo embasamento cristalino (este ocorrendo com mais frequência nas áreas mais próximas de contato entre a bacia costeira e o próprio embasamento cristalino) ou pelo topo da sequência carbonática mesozóica não aflorante, indicada em perfis de poços por rochas de constituição areno-argilosos e composição calcífera, com baixas potencialidades hidrogeológicas (Lucena et al., 2013; Silva et al., 2014; Stein et al., 2019). Em relação ao limite superior, este é representado prioritariamente por sedimentos eólicos ou coberturas arenosas indiferenciadas,

as quais desempenham um papel importante como transmissor de precipitações pluviométricas que infiltram e recarregam o aquífero (Monteiro e Lucena, 2021; Alves e Lucena, 2021). Em linhas gerais, a composição litológica do aquífero envolve desde argilitos a arenitos conglomeráticos, havendo uma predominância de arenitos argilosos.

Um fator preponderante nas potencialidades hidrogeológicas regionais na configuração da geometria do Aquífero Barreiras no litoral leste do RN é o contexto estrutural regional, conforme ressaltado por Lucena (2005). Souza et al., (2019) sugeriram que determinadas áreas do aquífero tem uma correlação direta entre as espessuras saturadas e falhas do neógeno, indicando zonas de maiores ou menores transmissividades hidráulicas.

Utilizando processamento de imagens de lâminas delgadas e estudos petrográficos, Silva et al. (2014) definiram porosidades eficazes de 7,6%. Alves et al. (2016), por sua vez, falam em estimativas de porosidades eficazes da ordem 10%. Testes de aquífero realizados em poços indicam valores de transmissividades locais (T) entre  $10^{-4}$  a  $10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s, condutividades hidráulicas na ordem de  $10^{-4}$  m/s e descargas individuais de até 100 m<sup>3</sup>/h (Alves e Lucena, 2021).

Uma potenciometria local elaborada por Monteiro (2015), utilizando valores de cargas hidráulicas de 43 poços locais, evidenciou um fluxo principal de oeste para leste, em direção à linha de costa, além de fluxos secundários no sentido do Rio Catu, retratando uma descarga natural do aquífero e uma extensa interação com a drenagem superficial.

#### **4. Metodologia**

A metodologia empregada para o presente estudo foi baseada em dados de levantamentos geoeletricos, utilizando-se a técnica da Sondagem Elétrica Vertical (SEV), nos quais os 16 modelos inversos adquiridos foram reinterpretados e juntamente com perfis litológicos, estimou-se uma caracterização geométrica do contexto que envolve o Aquífero Barreiras. As localizações das respectivas SEVs acham-se assinaladas na figura 1.

O método geofísico da eletroresistividade é considerado o mais importante em pesquisas hidrogeológicas, no qual seu princípio é baseado na determinação da resistividade elétrica dos solos e rochas, ressaltando características específicas tais como grau de saturação, fraturamentos, espessuras das camadas, bem como identificação de litotipos na ausência do dado direto de investigação (perfis de poços e afloramentos).

Nesse contexto, a resistividade pode ser definida como a dificuldade da corrente elétrica se propagar no meio geológico (Orellana, 1972), enfatizando-se a condutividade



iônica, sobretudo em face ao deslocamento dos íons nas águas contidas nos poros (Braga, 2016).

Com base na lei de Ohm, é definida a fundamentação física da resistividade ( $\rho$ ), estabelecendo uma relação direta com a resistência (R), considerando um meio homogêneo de forma cilíndrica de comprimento (L) e área da seção transversal (S), dada na Eq. 4.1.

$$\rho = R \frac{S}{L} (\Omega m) \quad (4.1)$$

Para uma investigação vertical em um subespaço do substrato rochoso, a propagação da corrente elétrica será na forma semiesférica desde o seu ponto de origem. O potencial elétrico (V), possuindo uma proporcionalidade direta com a resistência elétrica (R) e a corrente elétrica (I), pode ser mensurado conforme Eq. 4.2.

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (4.2)$$

Logo, considerando-se horizontes geoeletricos isotrópicos, pode-se calcular suas respectivas resistividades conforme a Eq 4.3.

$$\rho = 2\pi r \frac{V}{I} \quad (4.3)$$

onde r é distância entre o eletrodo de corrente e o ponto em que o potencial é medido (Braga, 2016).

Na prática, as aquisições geoeletricas consistem na utilização de quatro eletrodos (AMNB), injetando-se a corrente elétrica (I) no solo pelos eletrodos (A e B) e gerando um campo elétrico que flui no subsolo como linhas equipotenciais. Este fluxo elétrico estabelece uma diferença de potencial ( $\Delta V$ ), o qual é captado por dois eletrodos de potencial (M e N), conforme ilustrado na figura 2.

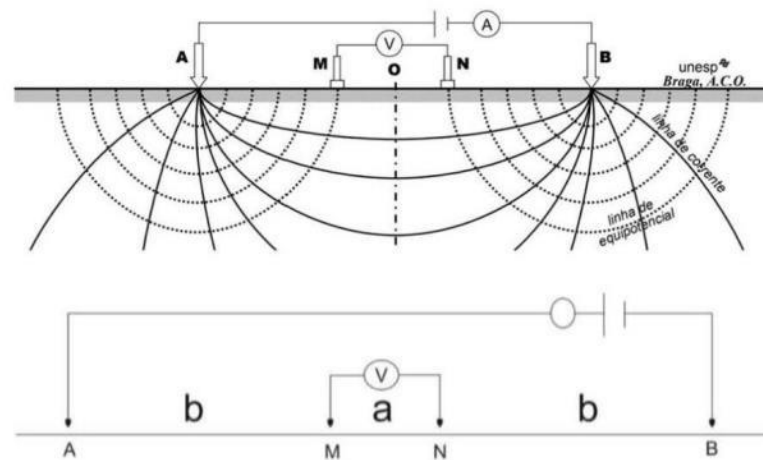
Neste tipo de configuração, supondo que o meio investigado é homogêneo e isotrópico, é possível calcular o potencial resultante desse campo elétrico criado nos eletrodos M e N, respectivamente, utilizando a equação 4.4 (Orellana, 1972; Braga, 2016).

$$\Delta V_{MN} = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (4.4)$$

Desse modo, isolando a resistividade ( $\rho$ ) e considerando K como o coeficiente geométrico entre os quatro eletrodos têm-se (Eq. 4.5):

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (4.5)$$

**Figura 2** – Modelo de aquisição vertical de resistividades com os eletrodos de corrente (AB) e de potencial (MN) (acima) e esboço do arranjo de eletrodos Schlumberger (abaixo); adaptado de Braga (2016).



A técnica da Sondagem Elétrica Vertical consiste em deslocar simetricamente os eletrodos em relação a um ponto central fixo, permitindo investigar variações de resistividade em profundidade. À medida que se aumenta a distância entre os eletrodos de corrente (AB), aumenta-se a profundidade teórica de investigação (Kearey et al., 2009).

Dentre os tipos de arranjos de campo para um levantamento da SEV, o arranjo Schlumberger foi adotado pela sua ampla empregabilidade em investigações geológicas mais complexas, justamente por ser mais sensível a variações horizontais e verticais de resistividade (Braga, 2016). Nessa configuração, o fator geométrico  $K_s$  é dado pela Eq. 4.6.

$$K_s = \frac{\pi b(b+a)}{a} \quad (4.6)$$

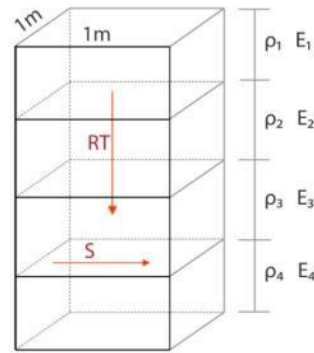
Onde “a” representa a distância entre os eletrodos MN, e “b” é a distância entre os eletrodos AM e NB.

A interpretação qualitativa e, sobretudo, quantitativa das sondagens elétricas foi efetuada considerando-se dados de calibrações geoeletricas realizadas no contexto do aquífero em questão (Lucena, 2005; Souza et al., 2019). Tais calibrações são conduzidas adjacentes a poços com perfis hidroestratigráficos conhecidos, de forma a se obter resistividades características das camadas geoeletricas que compõem o substrato rochosos, tendo estas suas espessuras previamente conhecidas (Lucena, 2005; Souza et al., 2019). No presente estudo, tais calibrações foram reinterpretadas, com ênfase na determinação pontual do parâmetro resistência elétrica transversal.

Em termos conceituais, a resistência elétrica transversal é definida supondo-se uma seção geoeletrica, de resistividade  $\rho_i$  e espessura da camada  $E_i$  (figura 3), onde o fluxo da corrente elétrica injetada no subsolo tende a seguir dois caminhos preferenciais: um paralelo e

outro perpendicular a estratificação. Particularmente em face dos objetivos do presente estudo, enfatizou-se o fluxo perpendicular. Nesse caso, as diferentes camadas comportam-se como condutores em série, somando suas respectivas resistências.

**Figura 3** – Prisma indicando o fluxo de corrente elétrica no substrato rochoso. Adaptado de Silva e Lucena (2021).



Portanto, considerando a resistência da camada  $i$ , sendo  $L$  seu comprimento e  $S$  sua seção transversal, tem-se que (Eq. 4.7) (Orellana, 1972; Braga, 2016):

$$R_i = \rho_i \frac{L}{S} = \rho_i \frac{E_i}{1 \times 1} = \rho_i E_i \quad (4.7)$$

Esse produto, denominado de resistência elétrica transversal unitária (RT), calculado para o contexto das camadas geológicas que compõem a zona saturada em estudo, é reescrito conforme a equação 4.8, sendo o mesmo diretamente proporcional à transmissividade hidráulica do aquífero (Braga, 2016; Souza et al., 2019). Este último aspecto reside no fato de que rochas areníticas mais limpas apresentam resistividades mais elevadas e, portanto, condutividades hidráulicas igualmente maiores.

$$RT_i = \sum \rho_i E_i \quad (4.8)$$

RT = Resistência Transversal ( $\Omega m^2$ )

E = Espessura da Camada (m)

$\rho$  = Resistividade Elétrica ( $\Omega m$ )

Nesse aspecto, considerando-se o somatório das espessuras de todas as camadas geológicas da zona satura nos modelos interpretados para cada SEV, a resistividade média do aquífero é avaliada pela equação 4.9, equivalendo-se a uma média ponderada, onde o fator de ponderação é representado pelas respectivas espessuras de cada camada que compõe o aquífero (Orellana, 1972; Silva e Lucena, 2021).

$$\rho = \frac{RT}{\sum E} \quad (\Omega m) \quad (4.9)$$

A Análise da hierarquia dos parâmetros espessura e resistividade média foi realizada através do método dos mínimos quadrados, correlacionando-se linearmente duas variáveis, entre os eixos X e Y, através de uma regressão linear simples, originando-se um fator de correlação ( $R^2$ ) nas linhas de tendência. Nesse caso, atribuiu-se X (variável independente) à resistência média e espessura da zona saturada, enquanto que Y (variável dependente) corresponde nos respectivos gráficos à resistência elétrica transversal. Esse processo objetivou avaliar qual dos parâmetros é dominante no cálculo da resistência elétrica transversal, auxiliando análises de locais com distintas potencialidades hidrogeológicas (Silva e Lucena, 2021).

Para a obtenção dos mapas de resistividade média, resistência transversal e espessura média da zona saturada utilizaram-se procedimentos geoestatísticos através de técnicas de interpolação e gridagem (Kriging). Esta técnica consiste em estabelecer valores de variáveis a serem estudadas em pontos não amostrados (Chistakos, 2000; Landim, 2003; Souza et al., 2019). As referidas interpolações e gridagens foram efetuadas em ambiente SIG e no software Surfer (SURFER, 2010).

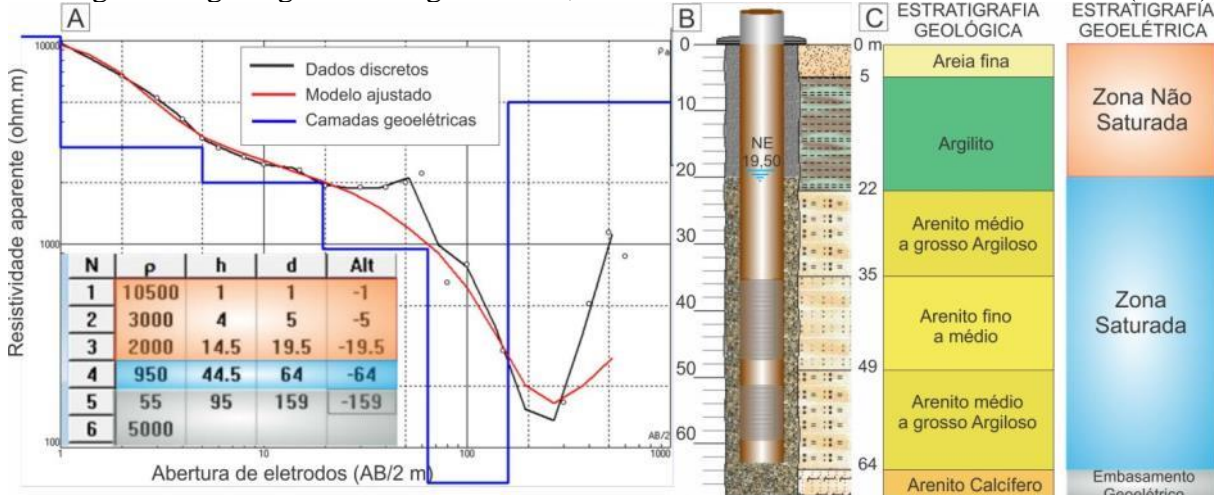
## 5. Resultados e discussões

Os comportamentos das SEVs analisadas apresentaram um caráter qualitativo símile, contendo valores maiores de resistividade na abertura de eletrodos iniciais, natureza característica da zona não saturada, seguido por um decaimento da curva do gráfico  $AB/2 \times$  Resistividade relacionada a zona saturada. O aspecto final dos gráficos, associadas às aberturas maiores dos eletrodos, indica valores baixos de resistividade correlacionados a arenitos e argilitos de composição calcífera e concernente ao embasamento hidrogeológico carbonático do Aquífero Barreiras, embora presente em algumas SEVs resistividades crescentes análogas à rochas carbonáticas de composição mais pura (Formação Gramame Maria Farinha).

As análises quantitativas foram obtidas de acordo com o modelo inverso adquirido na sondagem elétrica de calibração (SEV-16, adjacente ao poço Pt-15), realizado por Souza et al., 2016. Neste modelo (figura 4A), “N” corresponde ao número de camadas, “ $\rho$ ” a resistividade elétrica aparente de cada camada, “E” e “d” representam a espessura e profundidade, respectivamente, das camadas geoeletricas. As cores cinza, azul e laranja no gráfico representam o embasamento hidrogeológico, a zona saturada e a zona não saturada,

respectivamente. As figuras 4B e 4C ilustram o perfil litológico e as estratigrafias geológicas e geolétricas, respectivamente.

**Figura 4** - (A) Curva de resistividade aparente da sondagem geolétrica utilizada para a calibração (SEV-16); (B) Perfil litológico (Pt-15) adjacente a sondagem geolétrica; (C) Estratigrafia geológica e geolétrica; modificado de Souza et al. (2019).



Os valores de espessura saturada (m), resistividade média da zona saturada ( $\Omega.m$ ) e resistência elétrica transversal ( $\Omega.m^2$ ), estão inseridas na tabela 1. Levando em conta esses valores, elaboraram-se mapas de resistência elétrica transversal, espessura e resistividade média da zona saturada (figuras 5, 6 e 7, respectivamente).

De modo geral, as resistências elétricas transversais (RT) variaram entre  $8000 \Omega.m^2$  e  $57117 \Omega.m^2$ , com uma mediana de  $27750 \Omega.m^2$ . Já as espessuras médias tiveram uma variação de 20 m e 95 m, com mediana de 44,75 m, enquanto as resistividades médias variaram de 265  $\Omega.m$  e 950  $\Omega.m$ , com mediana de 500  $\Omega.m$ .

A correlação e análise de dependência dos parâmetros de espessura e resistividade média da zona saturada com o parâmetro resistência elétrica transversal foram conduzidas pelo método dos mínimos quadrados, através de regressão linear (figuras 5B e 6B). Na equação da reta, os primeiros parâmetros abordados representam as variáveis independentes, enquanto a variável dependente é dada pela resistência elétrica transversal. Sendo assim, os resultados das regressões lineares ( $R^2$ ) foram de 0,70 e 0,47 para as espessuras e resistividades médias, respectivamente.

Analisando o mapa gerado de resistência elétrica transversal da zona saturada (Figura 7), nota-se que os maiores valores estão situados nas porções nordeste (SEVs 7 e 15) e central (SEV 9) da área, com valores chegando a aproximadamente  $57000 (\Omega.m^2)$ . Portanto,

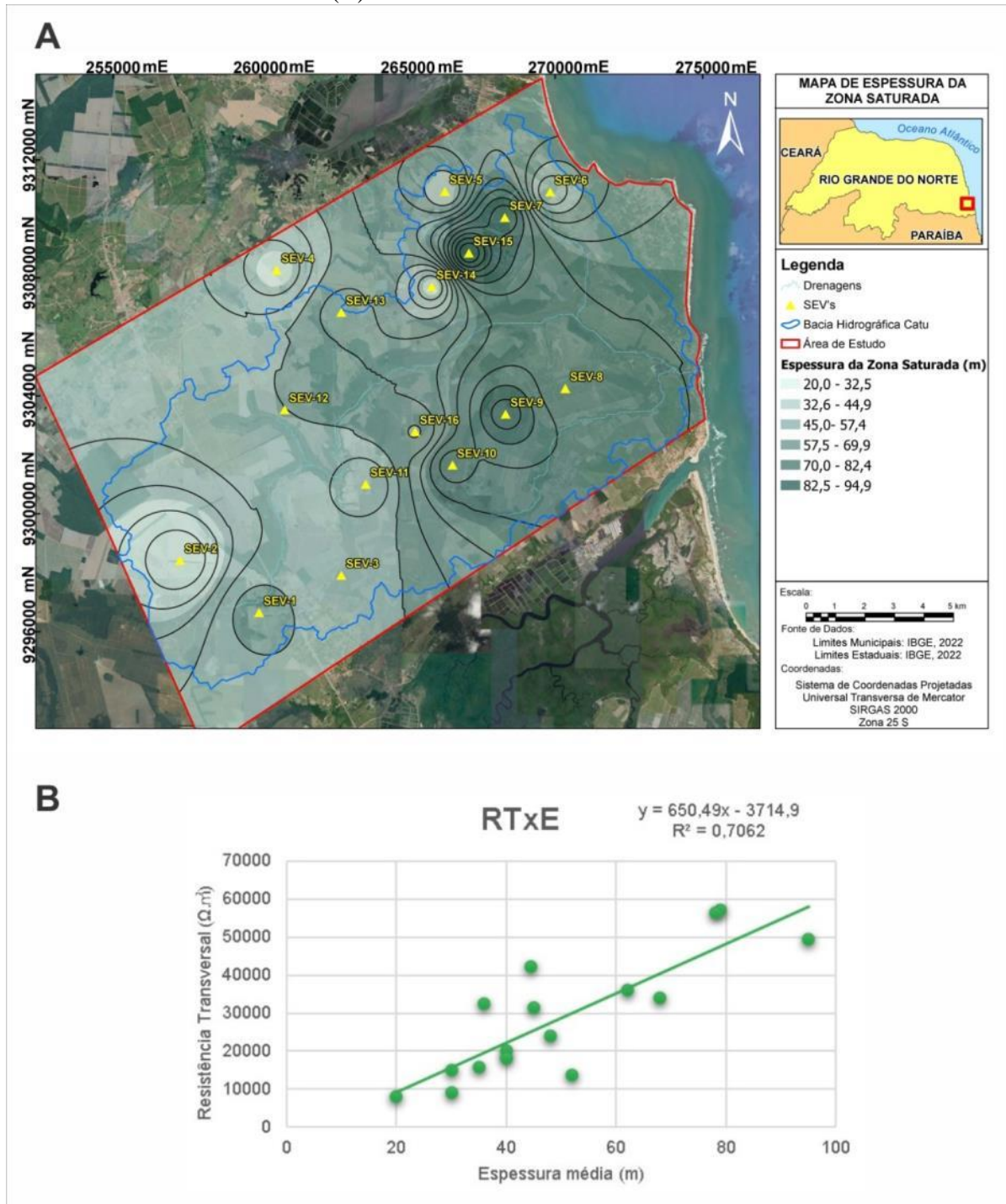
considera-se essas áreas como as mais promissoras em termos de potencialidades hidrogeológicas.

**Tabela 1** - Valores de espessura saturada (m), resistividade média da zona saturada (Ohm.m) e resistência elétrica transversal (Ohm.m<sup>2</sup>).

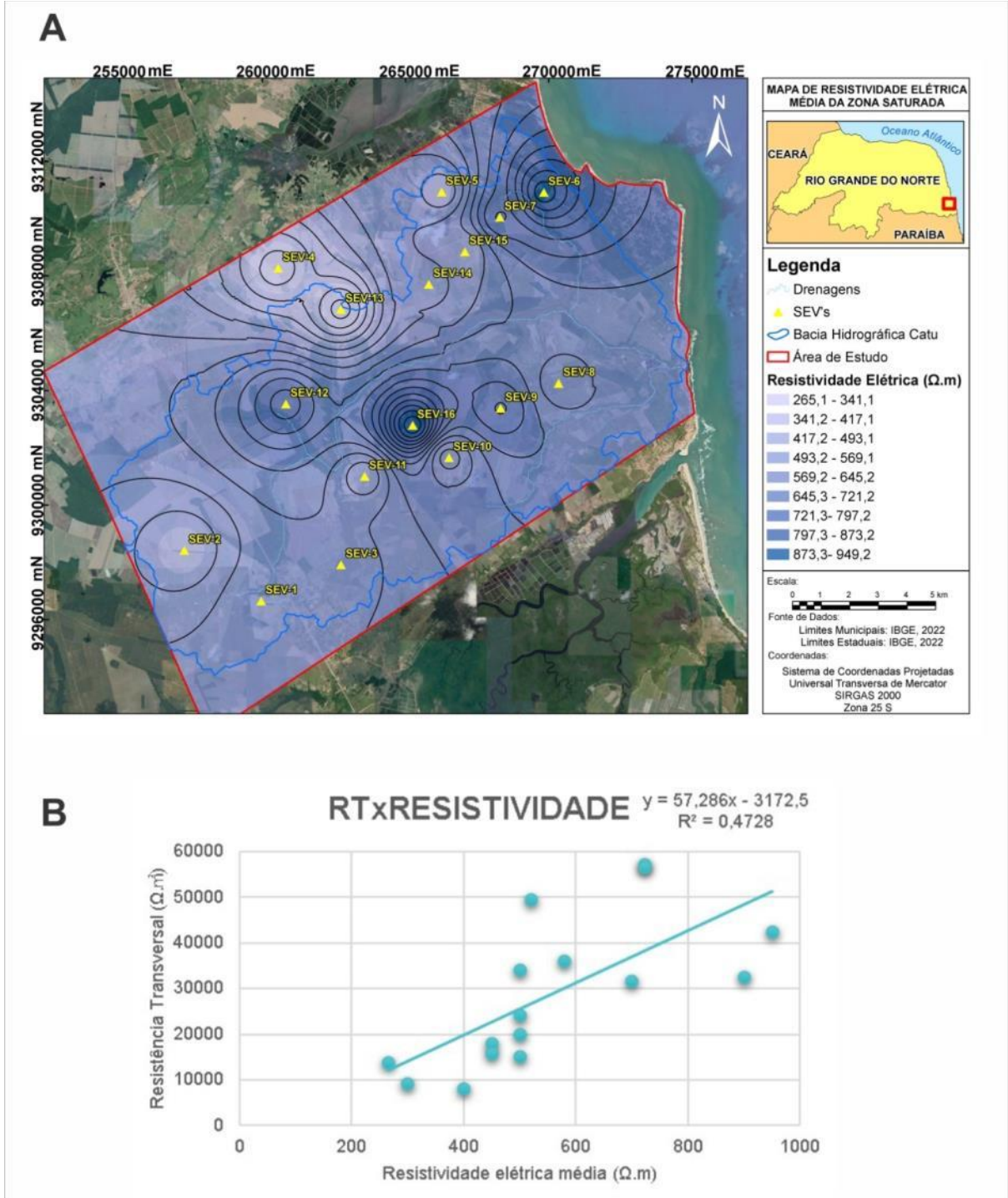
SEV	X	Y	Z(m)	$E_m$ (m)	$\rho_m$ (Ohm.m)	RT(Ohm.m <sup>2</sup> )
1	259952 m E	9296649 m N	68	48	500	24000
2	257270 m E	9298420 m N	100	20	400	8000
3	262744 m E	9297921 m N	61	40	500	20000
4	260549 m E	9308267 m N	54	30	300	9000
5	266258 m E	9310933 m N	42	40	450	18000
6	269825 m E	9310917 m N	47	36	900	32400
7	268383 m E	9310050 m N	46	79	723	57117
8	270343 m E	9304251 m N	36	62	580	35960
9	268318 m E	9303382 m N	42	78	723	56394
10	266511 m E	9301654 m N	46	68	500	34000
11	263531 m E	9300966 m N	53	35	450	15750
12	260815 m E	9303536 m N	58	45	700	31500
13	262738 m E	9306832 m N	54	52	265	13780
14	265810 m E	9307705 m N	53	30	500	15000
15	267066 m E	9308847 m N	49	95	520	49400
16	265245 m E	9302786 m N	49	44,5	950	42275

No que diz respeito sobre o mapa de espessura média da zona saturada (5A), percebe-se que as maiores espessuras estão localizadas nas porções nordeste e central da área, em torno das SEVs 7, 9 e 15, com valores de 79 m, 78 m e 95 m, respectivamente. Contudo, é notável um alinhamento nas direções nordeste e leste das maiores espessuras, podendo estar relacionado com a estruturação regional (Bezerra et. al., 2001; Souza et. al., 2019; Nunes et. al., 2020). Os autores citados relatam que a geometria do Aquífero Barreiras é compartimentada por falhas regionais, nos quais deram origem a grabens e horsts locais, causando variações nas espessuras.

**Figura 5** - Mapa de espessura média da zona saturada (A) e correlação numérica com a resistência elétrica transversal (B).

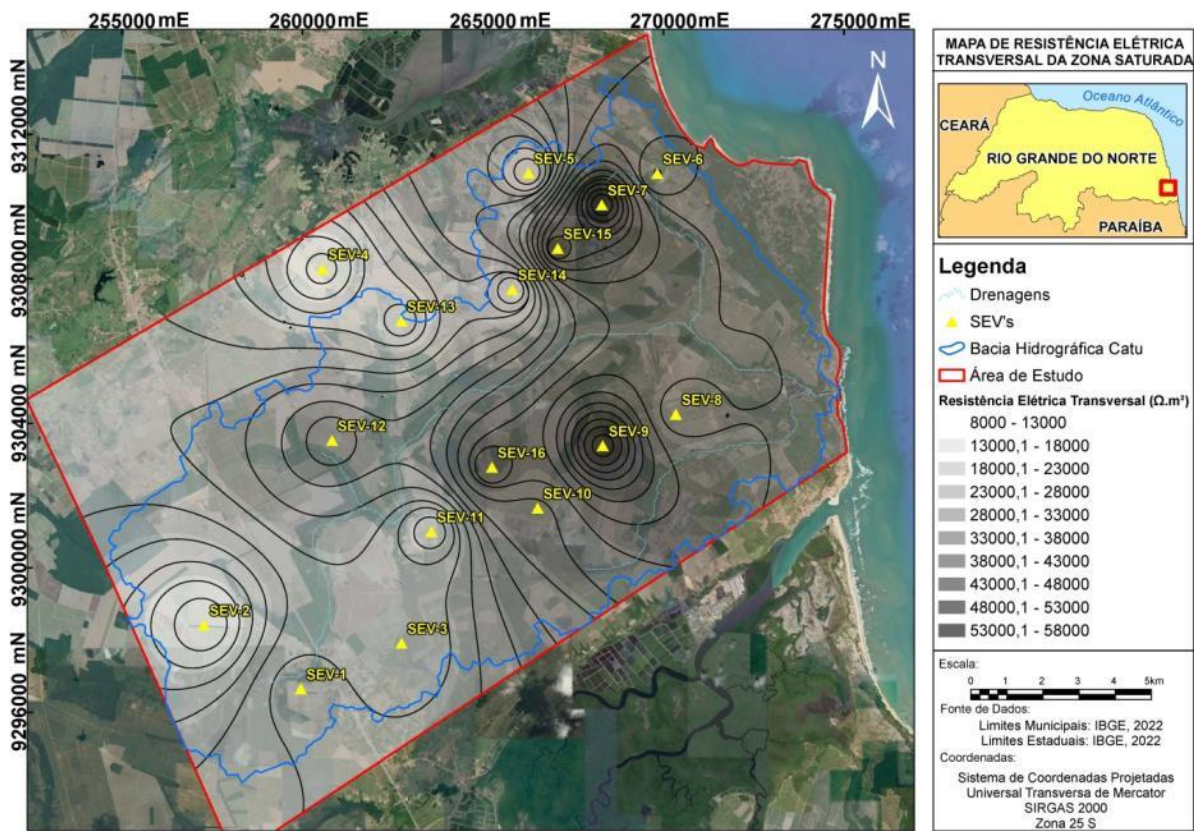


**Figura 6** - Mapa de resistividade média da zona saturada (A) e correlação numérica com a resistência elétrica transversal (B).





**Figura 7** - Mapa de resistência elétrica transversal para a área de estudo, derivado de dados de modelos inversos de SEVs.



Há uma semelhança entre os mapas de espessura média e resistência elétrica transversal, pois apresentam seus maiores valores nas porções nordeste e central. Essa similitude de ambos os mapas se confirma também na análise do grau de dependência, onde o fator de correlação  $R^2$  entre as espessuras médias e resistência elétrica transversal é substancialmente superior ao fator de correlação entre resistividade e resistência elétrica transversal. Diante disso, analisando conjuntamente os mapas e gráficos das figuras 5, 6 e 7, aponta-se que a espessura média da zona saturada é o fator preponderante no cálculo da resistência elétrica transversal em comparação com a resistividade média da zona saturada. Dessa forma, pode-se inferir que os locais de potenciais hidrogeológicos mais proeminentes acham-se associadas com subáreas de maiores espessuras saturadas.

No mapa da resistividade média da zona saturada (Figura 6A), os maiores valores estão nas partes central e extremo nordeste da área, próximos às SEVs 16 e 6, com resistividades de  $950 \Omega.m$ .

Os resultados ora reportados corroboram as diversas pesquisas no âmbito nacional e internacional acerca da utilização do parâmetro Dar Zarrowk resistência elétrica transversal

aplicado à identificação de áreas mais promissoras em termos hidrogeológicos de aquíferos clásticos. A análise da hierarquia em termos de importância dos parâmetros que compõem a resistência transversal, resistividade média e espessura da zona saturada, contudo, necessita de pesquisas adicionais, particularmente no contexto do Aquífero Barreiras. Essa ressalva deve-se ao fato de que os resultados ora apresentados diferem daqueles observados por Silva e Lucena (2021) no mesmo aquífero, embora em área de ocorrência distinta. Dessa forma, pode-se ponderar de que, a depender do contexto considerado, a resistividade média, esta associada diretamente com rochas areníticas mais limpas e conseqüentemente de maior condutividade hidráulica, seja preponderante em relação à espessura dessa mesma zona saturada, salvo se as pesquisas futuras em outras áreas de ocorrência do Aquífero Barreiras mostrarem uma tendência contrária, a exemplo do presente estudo.

## 6. Conclusões

- A aplicação do método geoeletrico envolvendo o cálculo da resistência elétrica transversal (RT), considerando modelos interpretativos inversos de sondagens elétricas verticais e calibração geoeletrica prévia, permitiu inferir subáreas mais promissoras de potencialidades hidrogeológicas no âmbito da bacia hidrográfica do Rio Catu-RN. A referida abordagem hidrogeofísica deve ser ressaltada, na medida que se observa uma carência ou mesmo uma ausência de informações diretas provenientes de poços na região.
- O parâmetro resistência elétrica transversal-RT mostra-se bastante efetivo como indicativo de potencialidades hidrogeológicas relativas, pois envolve conjuntamente as espessuras e resistividades elétricas da zona saturada do referido aquífero, sendo esta última associada diretamente com condutividades hidráulicas. Os resultados obtidos denotaram valores maiores de RT na direção da linha de costa, especialmente nas porções nordeste e central, atingindo até  $57000 \Omega.m^2$  e indicando essas subáreas como as mais promissoras para a execução de captações futuras (poços de maior produtividade).
- Nesse contexto e utilizando-se regressões lineares, avaliou-se graficamente a hierarquia em termos de preponderância dos parâmetros espessura e resistividade média na composição da resistência transversal do Aquífero Barreiras, através da análise das linhas de tendência e o fator de correlação ( $R^2$ ) entre os referidos parâmetros (variáveis independentes) e a resistência elétrica transversal (variável

dependente). Dessa forma, obtiveram-se valores de  $R^2 = 0,70$  e  $R^2 = 0,47$  para as correlações entre espessura e resistividade elétrica média da zona saturada com a resistência elétrica transversal, respectivamente. Este resultado demonstra que o fator preponderante no cálculo é a espessura média saturada, aspecto este igualmente observado pela similaridade entre os mapas de espessura média e resistência transversal da zona aquífera.

- Os referidos resultados, entretanto, não devem considerar previamente a preponderância do parâmetro espessura saturada para outras áreas de ocorrência do Aquífero Barreiras, tendo em vista, inclusive, conclusões obtidas por outros autores no mesmo contexto hidrogeológico, embora em outra área de pesquisa, em que se observa a preponderância da resistividade média, em detrimento da espessura da zona saturada na avaliação da resistência transversal. Diante do ora exposto, recomenda-se a ampliação dessas análises para outras áreas de ocorrência do Aquífero Barreiras, no sentido de se obter uma tendência mais abrangente em termos de predominância de espessura ou da resistividade média do aquífero (esta, associadas às suas condutividades hidráulicas) na caracterização da resistência elétrica transversal e, conseqüentemente, na identificação de subáreas mais promissoras em termos hidrogeológicos.

## Referências

- ALVES, R. S., MELO, J. G., SILVA, C. T. X. L., OLIVEIRA, C. C. C. 2016. Recursos Hídricos Subterrâneos da Região de Parnamirim, RN: uso das águas e potencialidades. Revista *Águas Subterrâneas*, v.30, n.1, p.37-52, 2016. <https://doi.org/10.14295/ras.v30i1.28486>.
- 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. <https://doi.org/10.14295/ras.v35i1.29987>
- BALSAMO, F., STORTI, F., SALVINI, F., SILVA, A.T., LIMA, C.C. 2010. Structural and petrophysical evolution of extensional fault zones in low-porosity, poorly lithified sandstones of the Barreiras Formation, NE Brazil. *Journal of Structural Geology*, v.32, n.11, p.1806-1826, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2009.10.010>
- BEZERRA, F. H. R., AMARO, V. E., VITA-FINZI, C., SAADI, A. 2001. Pliocene-quaternary fault control of sedimentation and coastal plain morphology in NE Brazil. *Journal*

- of South American Earth Sciences, v.14, n.1, p.61-75, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(01\)00009-8](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(01)00009-8).
- BRAGA, A.C.O., 2016. Geofísica aplicada: métodos geoeletricos em hidrogeologia. Oficina de textos. 157 p.
- CHRISTAKOS, G. 2000. Modern Spatiotemporal Geostatics. New York: Oxford Univ. Press, 2000. 312 p.
- DANTAS, E.P., MEDEIROS, V.C., CAVALCANTE, R. 2021. Programa Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Norte. Escala 1:500.000. Recife: Serviço Geológico do Brasil -CPRM, 2021.
- IDEMA. 2008. Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente do Rio Grande do Norte -Perfil do Seu Município. 2008. Disponível em <http://www.idema.rn.gov.br>. Acessado em 10/10/2022.
- IDUMA, R. E. O., ABAM, T. K. S., UKO, E. D. 2016. Dar Zarrouk Parameter as a Tool for Evaluation of Well Locations in Afikpo and Ohaozara, Southeastern Nigeria. Journal of Water Resource and Protection, v.8, n.4, p.505-521, 2016. <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2016.84043>
- KEAREY, P., BROOKS, M., HILL, I. 2009. Geofísica de exploração. Oficina de textos, 429 p.
- LANDIM, P. M. B., 2003. Análise Estatística de Dados Geológicos. 2a. UNESP, São Paulo. 256 p.
- LUCENA, L.R.F. 2005. Implicação da compartimentação estrutural no Aquífero Barreiras na área da bacia do Rio Pirangi – RN. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, 2005.
- LUCENA, L. R. F., MEDEIROS, W. E., OLIVEIRA JR, J. G., QUEIROZ, M. A. 2013. The potential of the Barreiras Aquifer in the lower course of the Doce River, Rio Grande do Norte State, Northeast Brazil – Integration of hydrogeological and geophysical data. Brazilian Journal Geophysics, RBGf, v.31, n.1, p. 43-57, 2013. <https://doi.org/10.22564/rbgf.v31i1.245>.
- LUCENA, L. R. F., DANTAS, J. A., MEDEIROS, A. A., FILHO, E.F.R. 2013. A lixiviação de fertilizantes nitrogenados na zona não saturada superior do Aquífero Barreiras – Áreas da bacia do Rio Catu-RN. Associação brasileira de águas subterrâneas, ABAS, v. 27, n.1, p. 79-91, 2013. <https://doi.org/10.14295/ras.v27i1.27338>.

- LUCENA, L.R.F., SIMONATO, M.D. 2021. Considerações Sobre a Conexão Hidráulica de um Aquífero Não Confinado em Zonas de Falhas a Partir de Dados Isotópicos, NE/Brasil. *Geoambiente On-line*, n.40, 2021. <https://doi.org/10.5216/revgeoamb.i40.67603>
- MONTEIRO, A. R. O. 2015. Análise do Grau de Proteção do Aquífero Barreiras em Perímetros sob Fertilização Química a Partir de Dados Hidrogeofísicos – Área da Bacia do Rio Catu-RN. Tese (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2015.
- MONTEIRO, A. R. O., LUCENA, L. R. F. 2021. Contribution of hydrogeophysical data for the assesment of unconfined aquifer protection levels - an example from the northeast of Brazil. *Near-surface geophysics, environmental and forensic geophysics*, 2021. <http://dx.doi.org/10.22564/rbgf.v39i3.2107>
- NOGUEIRA, F. C. C., BEZERRA, F. H. R., FUCK, R. A. 2010. Quaternary fault kinematics and chronology in intraplate northeastern Brazil. *J. Geodyn.* v. 49, n.2, p. 79–91, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2009.11.002>.
- NUNES, L.M.G., LUCENA, L.R.F., SILVA, C.C.N. 2020. Reserve evaluation of a fault-conditioned aquifer: the Barreiras Aquifer in the coastal region of NE Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, v.50, 2020. <https://doi.org/10.1590/2317-04889202020180127>.
- OLIVEIRA, F. F. G. 2011. Aplicação das técnicas de geoprocessamento na análise dos impactos ambientais e na determinação da vulnerabilidade ambiental no litoral sul do Rio Grande do Norte. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, 2011.
- ORELLANA, E., 1972. *Prospeccion geoeletrica en corriente continua*. Ed. Paraninfo, Madrid. 523 p.
- ROSSETTI, D. F., BEZERRA, F. H. R., DOMINGUEZ, J. M. L. 2013. Late Oligocene – Miocene transgressions along the equatorial and eastern margins of Brazil. *Earth-Science Reviews*, v.123, p.87–112, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.04.005>.
- 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. *Águas Subterrâneas*, v.28, n.2, p.14-27, 2014. <https://doi.org/10.14295/ras.v28i2.27873>.