

## Avaliação e classificação do grau de proteção intrínseca do Aquífero Barreiras com base no parâmetro geoeletrico de Dar Zarrouk, condutância longitudinal, na área da bacia do Rio Catu – RN.

Alexandre Richardson Oliveira Monteiro<sup>2</sup>, Danyelle Cristiny Lira Cavalcante<sup>1</sup>, Renato de Souza Arruda<sup>2</sup>, Isaac Vinicius Fagundes de Souza<sup>2</sup>, Lucas Miguel Gomes Nunes<sup>2</sup>, Leandson Roberto Fernandes de Lucena<sup>1,2</sup> (1 Departamento de Geofísica-UFRN, 2 Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica-PPGG-UFRN)

Copyright 2015, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 14<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 03-06, 2015.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 14<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

### Resumo

O presente trabalho apresenta os estudos relacionados à avaliação do grau de proteção intrínseca do Aquífero Barreiras no âmbito da bacia do Rio Catu-RN, localizada no litoral leste do estado do Rio Grande do Norte.

O referido aquífero possui grande importância para o abastecimento populacional da área em estudo, principalmente na irrigação. Devido ao fato da área ser amplamente utilizada para a monocultura da cana-de-açúcar e adubação química de natureza nitrogenada, tem-se um risco natural à contaminação desse manancial decorrente do processo de lixiviação de excedentes químicos não assimilados pela cobertura vegetal. Em termos hidrogeológicos, o Aquífero Barreiras possui caráter hidráulico predominantemente livre, o que agrava ainda mais a problemática.

Diante desse contexto, objetivou-se avaliar o grau de proteção deste aquífero com base no parâmetro geoeletrico de Dar Zarrouk, condutância longitudinal. Este parâmetro foi obtido pontualmente por meio da aquisição de 16 sondagens elétricas verticais, com o arranjo tipo Schlumberger, realizadas na área em estudo.

O mapa de condutância longitudinal evidencia subáreas mais susceptíveis a contaminação, com valores de condutância em torno de 10 mS, como também aquelas com maior grau de proteção, tendo condutâncias variando nos 35 mS. De acordo com os intervalos de valores obtidos de espessuras, resistividades e "S" referentes à ZNS, propôs-se adicionalmente uma classificação do grau de proteção para essa área em específico, sendo apresentada na forma de gráfico "Resistividade ( $\rho_{ZNS}$ ) x Espessura ( $E_{ZNS}$ ) x Condutância Longitudinal (S)".

As informações conquistadas neste estudo têm o intuito de subsidiar uma gestão hidrogeoambiental sustentável em perímetros cultivados e que fazem uso de fertilização química.

### Introdução

A bacia do Rio Catu está localizada no litoral oriental do Rio Grande do Norte (nordeste brasileiro), ocupando

parte dos municípios de Canguaretama, Goianinha, Tibau do Sul e Vila Flor, correspondendo uma área com aproximadamente 200 Km<sup>2</sup> (figura 1).

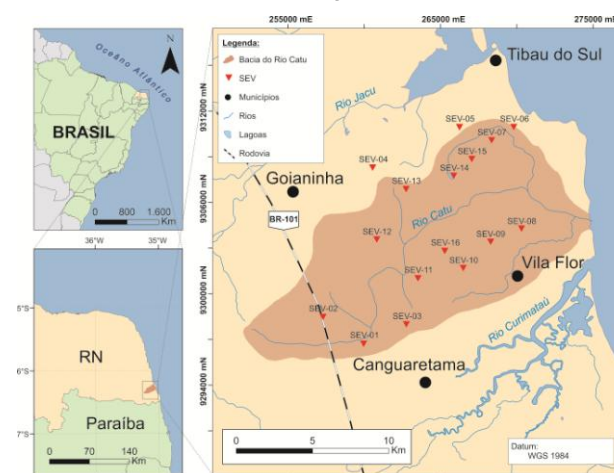


Figura1 - Mapa com a localização da área de estudo, além das SEV's executadas.

A estratigrafia regional é composta por duas seqüências básicas (Nogueira, 1982; Bezerra, 1998; Lucena, 2005; Angelim *et al.*, 2006): (1) uma seqüência não aflorante, envolvendo o embasamento cristalino Pré-Cambriano (representado por granitos, granodioritos, migmatitos e gnaisses correlacionados ao Complexo Caicó) e rochas sedimentares da bacia mesozóica (constituídas por uma unidade arenítica, na base, e outra carbonática, no topo, de composição calcárea com intercalações areníticas) e (2) uma seqüência aflorante, abrangendo rochas sedimentares cenozóicas da Formação Barreiras de idade terciária-quadernária (constituída por um conjunto de litologias siliciclásticas desde argilitos a conglomerados, embora com predominância de arenitos argilosos), e as coberturas quadernária (envolvendo dunas, aluviões, coberturas arenosas, mangues, e sedimentos praias).

Trabalhos anteriores, com destaque para os de Lucena (2005) e Lucena *et al.* (2013a), mostram o contexto estrutural regional como preponderante na configuração da geometria do Aquífero Barreiras em outras áreas do litoral leste do Estado. De acordo com Souza *et al.* (2013), os rejeitos das falhas na área da bacia do Rio Catu, quantificados com base em variações do topo da camada arenítica mesozóica de composição calcífera (embasamento do Aquífero Barreiras), variam de 10 a 50 metros. A associação de estruturas frágeis e espessuras saturadas, ainda de acordo com esses autores, refletem-se nas potencialidades hidrogeológicas regionais,

incluindo zonas de maiores ou menores transmissividades hidráulicas relativas (em relação a subáreas adjacentes).

O contexto hidrológico local é representado pelo o Aquífero Barreiras (referente à hidrologia subterrânea local) e a bacia hidrográfica do Rio Catu (compondo à hidrologia superficial). Segundo Lucena (2005), o limite inferior desse aquífero é o embasamento cristalino (ocorrência mais frequentes nas áreas mais próximas de contato deste com a bacia sedimentar costeira), ou mesmo o topo da sequência carbonática mesozóica não aflorante, a qual foi identificada nas perfurações como sendo constituída por sedimentos areno-argilosos e argilosos de composição calcífera e de baixa potencialidade hidrogeológica.

De acordo com os relatórios desenvolvidos pelo IPT (1982), o Aquífero Barreiras possui predominantemente um caráter hidráulico característico de aquífero livre, o que torna as águas subterrâneas particularmente mais susceptíveis a contaminações, sobretudo em locais onde as espessuras não saturadas são reduzidas. De acordo com Rodrigues *et al.* (2011), este manancial possui variações de espessura da ordem de 20 m a 90 m.

Em termos de uso e ocupação do solo, a agricultura representa cerca de 99% de toda a área da bacia, sendo aproximadamente 90% ocupado apenas pela cana-de-açúcar (SEHIRD, 1998).

Embora a fertirrigação desempenhe um papel importantante na produtividade agrícola, possibilitando o desenvolvimento econômico da região, sua prática intensiva e de forma aleatória pode ocasionar sérios problemas ambientais relacionados à qualidade das águas subterrâneas para o consumo humano. Os perímetros agrícolas demandam elevadas quantidades de águas para irrigação, bem como de substanciais quantitativos de fertilização de natureza química, incluindo compostos nitrogenados.

Apesar dessa adubação ser importante no tocante à produtividade, pode igualmente representar um incremento no risco de contaminação do manancial subterrâneo na área em estudo (Lucena *et al.*, 2013b), decorrente da lixiviação de excedentes não assimilados pela cobertura vegetal (cana-de-açúcar), particularmente do nitrogênio, que pode atingir a superfície livre das águas na sua forma mais oxidada (nitrato).

Nesse contexto, o presente trabalho explorou a vantagem que o parâmetro condutância longitudinal (S) pode fornecer. De acordo com Braga (2008), a aplicação desse parâmetro geoeletrico de Dar Zarrouk pode contribuir de maneira significativa com os estudos de manejo ambiental de determinada área de ocorrência de um aquífero. Através deste, pode-se ter uma avaliação do risco de determinado sistema hidrogeológico ser alcançado por alguma carga contaminante imposta na superfície do terreno, através da determinação da espessura e resistividades das camadas que compõem essa zona não saturada. Esta última, adjacente ao aquífero, é responsável pela proteção física do manancial frente a possíveis cargas contaminantes, considerando um deslocamento vertical desta em subsuperfície (Foster

& Hirata, 1988). Quanto maior a espessura da camada não saturada, maior o tempo de percolação do poluente, ou seja, mais tempo terá para a degradação destes contaminantes antes de atingir o aquífero.

### Metodologia

No presente trabalho, a caracterização geométrica do contexto que envolve o Aquífero Barreiras e zona não saturada adjacente, na área da bacia do Rio Catu, seguiu a metodologia geofísica de eleorresistividade, de caráter exploratório e qualitativo.

Foram realizadas 16 sondagens elétricas verticais (SEV's) na área, obtendo como resultado curvas de resistividade para cada ponto local medido na qual consiste em gráfico bi-logaritmo de " $\rho_a \times AB/2$ ". Essas foram interpretadas utilizando o software IPI2Win, versão 2.1 (Bobachev *et al.*, 2000), onde modelos de "resistividades elétricas x espessura" foram obtidos a partir de inversão desses dados de campo, possibilitando a identificação de valores pontuais de espessuras saturadas e não saturadas. Nessa análise qualitativa, utilizou-se a calibrações geoeletricas (SEVs executadas adjacentes a poços com perfil litológico conhecidos) realizada por Lucena (2005), fora da área de estudo (no município de Parnamirim, localizado próximo a região em estudo), mas de mesmo contexto hidrogeológico.

A técnica geoeletrica utilizada foi da sondagem elétrica vertical (SEV) com o arranjo de eletrodos do tipo Schlumberger. A SEV consiste, basicamente, em injetar corrente elétrica no meio através dos eletrodos de corrente (A e B) e medir a diferença de potencial entre os eletrodos de potencial (M e N). Sendo o arranjo de eletrodos do tipo "Schlumberger", os eletrodos de potencial ficam posicionados entre os eletrodos de corrente de tal forma que o espaçamento MN deve ser no máximo um quinto do espaçamento AB.

Com o conhecimento dos valores de corrente injetada (i) no subsolo, diferença de potencial ( $\Delta v$ ) e o fator geométrico ( $k_{Schl}$ ), que é em função do tipo de arranjo adotado, a resistividade aparente do meio ( $\rho_a$ ) é determinada de acordo com a equação 1 (Orellana, 1972; Reynolds, 1997):

$$\rho_a = k_{Schl} \left( \frac{\Delta v}{i} \right) \text{ (Equação 1)}$$

Nos meios condutores estratificados, determinados parâmetros têm fundamental importância na interpretação e entendimento do modelo geoeletrico para uma determinada situação geológica em profundidade (Braga *et al.*, 2006). Maillet foi o primeiro a relatar a importância desses parâmetros, denominados parâmetros de Dar Zarrouk (Orellana, 1972; Zohdy, 1974; Henriet, 1976; Koefoed, 1979). O presente estudo explorou as vantagens que o parâmetro da condutância longitudinal é capaz de fornecer para estudos hidrogeológicos.

Em um meio estratificado, considera-se um prisma reto de secção transversal quadrada, com eixo perpendicular à orientação de suas camadas e cujos lados tenham comprimentos unitários. De acordo com Orellana (1972), o fluxo de uma corrente elétrica a partir do subsolo pode

tomar dois caminhos preferenciais: um perpendicular e o outro paralelo à estratificação. Para a corrente elétrica fluindo paralelamente à estratificação (figura 2), as resistências das diferentes camadas estarão em paralelo.

Deste modo, usa-se o parâmetro inverso da resistência (a condutância) uma vez que essa possui propriedade aditiva. Portanto, a condutância  $S_i$ , para o conjunto das  $n$  primeiras camadas da secção, será:

$$S_i = \sum_i \frac{E_i}{\rho_i} \text{ (Equação 1)}$$

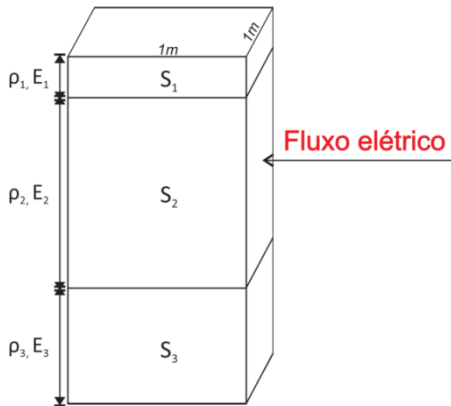


Figura 2 - Mapa com a localização da área de estudo, além das SEV's executadas.

A condutância longitudinal unitária (S) permite avaliar o quanto o aquífero estaria vulnerável ou não de ser afetado por determinado tipo de contaminante. A vulnerabilidade de aquífero é definida por Foster (1987) e Foster & Hirata (1988) como sendo as características intrínsecas que determinam a sensibilidade de um aquífero ser adversamente afetado por uma carga contaminante antrópica imposta, sendo função, primordialmente, da acessibilidade da zona saturada (no presente caso, o Aquífero Barreiras) e da capacidade de atenuação da zona não saturada.

Nesse aspecto, quanto maior o valor do parâmetro S, maior será o grau de proteção do aquífero frente a cargas contaminantes impostas em superfície, pois é evidenciado um aumento de espessura não saturada (E) ou uma diminuição do valor de resistividade elétrica da zona não saturada ( $\rho$ ), associada a rochas sedimentares de composição mais argilosa (rochas de menor condutividade hidráulica, ou seja, mais impermeáveis).

## Resultados

Após a inversão matemática e incorporação de vínculos provenientes da hidroestratigrafia local durante a interpretação das SEV's, foram discriminadas as camadas correspondentes à zona não saturada com seus respectivos valores de espessura e resistividade para, posteriormente, efetuar-se o cálculo dos valores de condutância longitudinal (S) correspondentes a tais camadas. Os valores de espessuras não saturadas (ZNS) com as respectivas resistividades foram aplicados na equação 1. Com os valores de S pontuais, apresentados na tabela 1, elaborou-se um mapa a partir da interpolação destes, seguindo o método "kriging".

Ressaltando-se que o parâmetro S é o produto dos fatores resistividade e espessura do meio não saturado, para um meio com valores de "S" reduzidos, deve-se estar relacionando espessuras relativamente reduzidas ou com resistividades elevadas, estas últimas associadas com rochas sedimentares de composição predominantemente arenosa. Esse tipo de litologia proporciona taxas de infiltração mais elevadas, refletindo uma maior permeabilidade vertical, o que torna o meio aquífero mais susceptível de ser degradado qualitativamente. Já as regiões em que o parâmetro S é mais elevado, tem-se um meio aquífero mais protegido, uma vez que pode estar associado a um espesso pacote sedimentar não saturado. Isso confere um maior filtro de percolação da carga contaminante, protegendo as águas subterrâneas. Alternativamente, o valor de S elevado pode estar relacionado com resistividades reduzidas da ZNS, fato este característico de litologias predominantemente argilosas, isto é, de menor permeabilidade vertical. Nesse caso, a acessibilidade hidráulica à zona saturada por uma determinada carga contaminante será dificultada.

Tabela 1 - Localizações geográficas das SEV's e os respectivos valores de espessura da zona não saturada e da condutância longitudinal.

SEV's	x (m)	y (m)	h <sub>ZNS</sub> (m)	$\rho_{ZNS}$ ( $\Omega \cdot m$ )	S (mS)
SEV-01	259948	9296646	19,6	988	19,8
SEV-02	257278	9298415	66,0	1230	53,6
SEV-03	262757	9297930	32,0	807	39,7
SEV-04	260539	9308256	12,0	1022	11,7
SEV-05	266251	9310920	17,0	821	20,7
SEV-06	269823	9310928	25,5	2704	9,4
SEV-07	268370	9310058	4,7	2486	1,9
SEV-08	270330	9304236	25,0	1321	18,9
SEV-09	268304	9303375	6,5	1230	5,3
SEV-10	266500	9301640	11,2	1474	7,6
SEV-11	263523	9300966	24,6	1534	16,0
SEV-12	260812	9303524	7,0	461	15,2
SEV-13	262745	9306840	20,0	923	21,7
SEV-14	265875	9307718	34,0	847	40,2
SEV-15	267062	9308822	3,0	1259	2,4
SEV-16	265282	9302766	19,5	2247	8,7

Nesse contexto, a variação dos valores obtidos no mapa de S (Figura 3) indica um valor intermediário relativo na ordem de 20 mS ( $20 \cdot 10^{-3}$  siemens). Logo, de maneira geral, os setores nordeste e leste do mapa apresentam-se mais vulneráveis, com condutâncias longitudinais em torno de 10 mS, quando comparadas com o setor sudoeste, com valores de S em torno dos 35 mS.

Esta cartografia elaborada e as devidas análises podem servir de ferramentas para a gestão hidrogeoambiental sustentável da região em perímetros cultivados e que fazem uso de fertilização química.

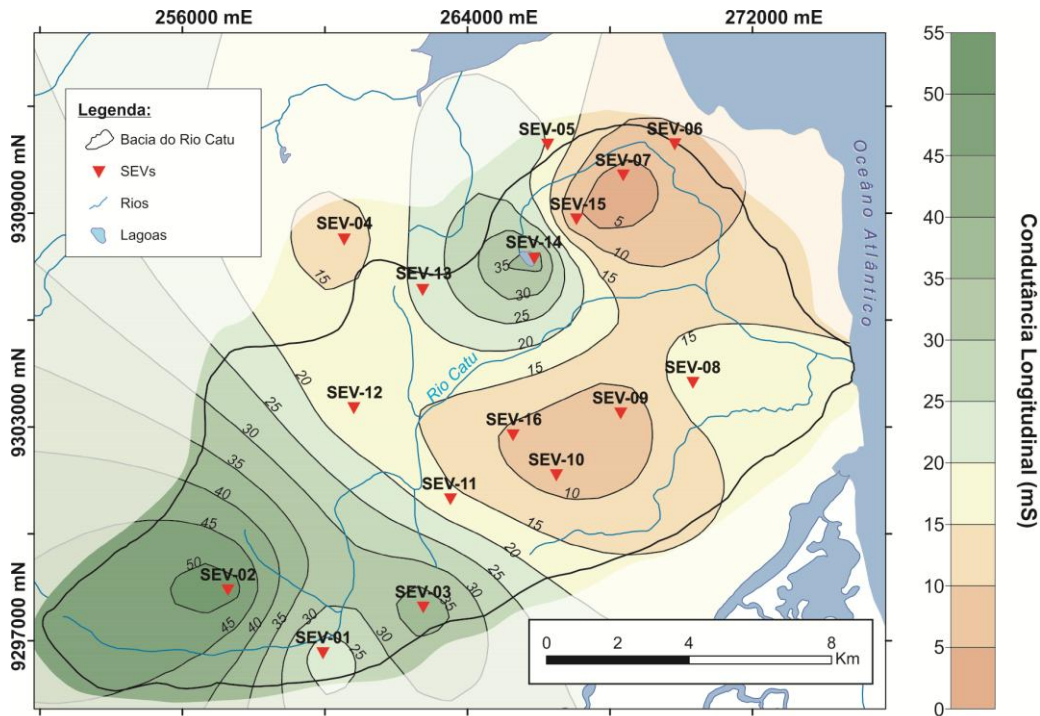


Figura 3 - Mapa de condutância longitudinal (S), na área da bacia do Rio Catu – RN.

A classificação do grau de proteção intrínseca do Aquífero Barreiras na área em estudo ora proposta é apresentada na forma de um gráfico "Resistividade ( $\rho_{ZNS}$ ) x Espessura ( $E_{ZNS}$ ) x Condutância Longitudinal (S)". Esta demonstra a relação matemática entre os parâmetros da zona não saturada "condutância longitudinal x espessura x resistividade", individualizando subáreas no gráfico com os diferentes níveis de grau de proteção intrínseca do aquífero para a realidade hidrogeofísica local.

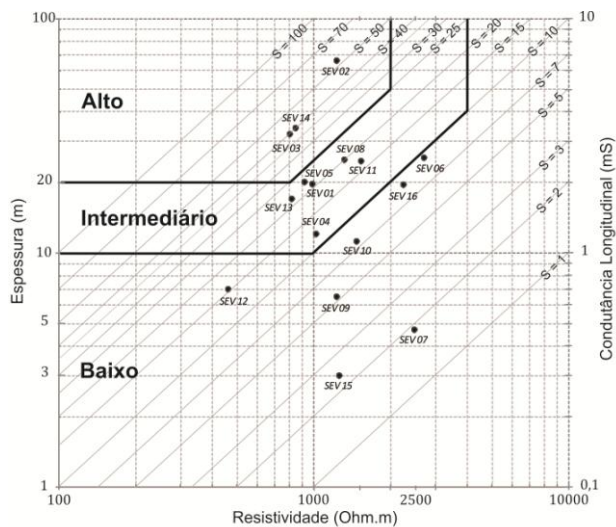


Figura 4 – Relação entre "condutância longitudinal x espessura x resistividade" da zona não saturada e o grau de proteção intrínseca do Aquífero Barreiras, área da bacia do Rio Catu – RN (modificado de Braga, 2008).

A classificação proposta no gráfico (figura 4) apresenta o grau de proteção intrínseca do Aquífero Barreiras sendo

preponderado pela espessura do pacote de proteção física do manancial, se comparada com a composição litológica desta, indicada pelos valores de resistividade.

Neste caso, têm-se as sondagens SEV-10 e SEV-11, nas quais possuem certa semelhança nos valores de resistividade e/ou composição litológica, porém suas classificações são distintas devido à última apresentar uma ZNS mais delgada do que a primeira. A SEV-12, por sua vez, possui valor de S compatível com a classificação de "intermediária", porém o valor reduzido da espessura não saturada proporciona o baixo grau de proteção intrínseca do aquífero nessas proximidades.

**Conclusões**

Diante da aplicabilidade não invasiva do método geofísico utilizado, bem como das condições limitadas do acesso as áreas para a sua execução, os resultados obtidos, até então, mostram-se capazes de auxiliar uma gestão hidrogeoambiental sustentável da região em estudo de maneira eficaz.

O mapa de condutância longitudinal, juntamente com o gráfico elaborado, apresenta, de forma qualitativa e quantitativa, os níveis de proteção que o meio físico propicia para as águas subterrâneas do contexto hidrogeológico do Aquífero Barreiras, frente a quaisquer cargas contaminantes impostas em superfície. Para a problemática que o estudo aborda, tem-se que esta carga contaminante pode ser atribuída a lixiviação dos compostos químicos nitrogenados utilizados como adubo para os perímetros cultivados na região, sobretudo a cana-de-açúcar, visto que esta atividade ocupa praticamente toda a extensão da área em análise.



## Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES (Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior) pelas bolsas de estudo concedidas aos alunos, além do PPGG/CCET (Programa Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica), ao Departamento de Geofísica por toda infraestrutura disponibilizada para o desenvolvimento do trabalho e aos colaboradores das aquisições geoeletricas realizadas em 2011 na área da bacia do Rio Catu – RN (área do presente estudo).

## Referências

- Angelim, L.A.A.; Medeiros, V.C.; Nesi, J.R. Programa Geologia do Brasil – PGB. Projeto Geologia e Recursos Minerais do Estado do Rio Grande do Norte. Mapa geológico do Estado do Rio Grande do Norte. Escala. 1:500.000. Recife: CPRM/FAPERNA, 2006.
- Bezerra, F.H.R. Neotectonics in Northeastern Brazil. Ph.D. Thesis. University of London. Londres. p. 208, 1998.
- Bobachev, A.A.; Modin, I.N.; Shevnin, V.A. IPI2Win v. 2.1, IPI\_RES2, IPI\_RES3, User's Guide. Geoscan-M Ltd., Moscou, Rússia. Manual do usuário. p. 25, 2000.
- Braga, A.C.O.; Filho, W.M.; Dourado, J.C. Resistivity (DC) method applied to aquifer protection studies. Revista Brasileira de Geofísica. v.24, n. 4, p. 573-581, 2006.
- Braga, A.C.O. Estimativa da vulnerabilidade natural de aquíferos: uma contribuição a partir da resistividade e condutância longitudinal. Revista Brasileira de Geofísica. v. 26, n. 1, p. 61-68, 2008.
- Foster, S.S.D. Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability Pollution Risk and Protection Strategy; Vulnerability of soil and groundwater to pollution. In: INTERNATIONAL CONFERENCE HELD IN THE NETHERLANDS. TNO/RIVM, Committee on Hydrological Research, Deft, Netherlands. Proceedings and information. p. 69-86, 1987.
- Foster, S.S.D. & Hirata, R.C.A. Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. WHO-PAHO/HPE-CEPIS, Technical Manual. Lima. p. 81, 1988.
- Henriet, J.P. Direct application of the Dar Zarrouk parameters in ground water surveys. Geophysical Prospecting. v. 24, p. 344-353, 1976
- IPT. Estudo hidrogeológico regional detalhado do Estado do Rio Grande do Norte. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A. Secretaria de Indústria e Comércio do Estado do Rio Grande do Norte. Relatório técnico IPT nº 15.795. Natal. p. 389, 1982.
- Koefoed, O. Geosounding Principles, 1: Resistivity Sounding Measurements. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam, Oxford, New York. p. 273, 1979.
- Lucena, L.R.F. Implicação da compartimentação estrutural no Aquífero Barreiras na área da bacia do Rio Pirangi-RN. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná – UFPR. Curitiba. 151 p, 2005.
- Lucena, L.R.F.; Dantas, J.A.; Medeiros, A.A.; ROSA FILHO, E.F. A lixiviação de fertilizantes nitrogenados na zona não saturada superior do Aquífero Barreiras – área da bacia do Rio Catu – RN. Revista Águas Subterrâneas. Natal. v. 27, n. 1, p. 79-91, 2013(a).
- Lucena, L.R.F.; Oliveira JR., J.G.; Medeiros, W.E.; Queiroz, M.A. The potential of the Barreiras Aquifer in the lower course of the Doce River, Rio Grande do Norte, northeast Brazil – Integration of hydrogeological and geophysical data. Revista Brasileira de Geofísica. Natal, v.31, n.1, p. 43-57, 2013(b).
- Nogueira, A.M.B. O Cenozóico continental da região de Natal. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 1982.
- Orellana, E. Prospección geoeletrica en corriente continua. Ed. Paraninfo. Madrid. p. 523, 1972.
- Reynolds, J.M. An introduction to applied and environmental geophysics. Ed. Wiley. England. p. 796, 1997.
- Rodrigues, M.A.C.; Lucena, L.R.F.; Souza, I.V.F. Preliminary geometric model of the Barreiras Aquifer derived from hydrogeophysics data at the River Catu basin, NE Brazil. In: 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Anais. Rio de Janeiro, RJ, 2011.
- SERHID. Plano Estadual de Recursos Hídricos – Relatório Síntese. Secretaria de Estado dos Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte. Natal. 254p, 1998. Disponível em: [www.semarh.rn.gov.br](http://www.semarh.rn.gov.br)
- Souza, I.V.F.; Lucena, L.R.F.; Monteiro, A.R.O.; Cavalcante, D.C.L. Characterization of subsurface fault in Barreiras Aquifer Formation from geoelectrical and hydrogeological data – area of River Catu basin, NE Brazil. In: 13TH INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY. Anais. Rio de Janeiro, RJ, 2013.
- Zohdy, A.A.R. Use of Dar Zarrouk curves in the interpretation of vertical electrical sounding data. United States Geological Survey Bulletin 1313 - D, p. 41, 1974.