



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:
GEOLOGIA AMBIENTAL, HIDROGEOLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

MODELOS QUANTITATIVOS PARA ESTIMATIVA DA
TRANSMISSIVIDADE NO AQUÍFERO SALITRE NA REGIÃO DE
IRECÊ – BA, BRASIL

THIAGO DOS SANTOS GONÇALVES

SALVADOR

2017

**MODELOS QUANTITATIVOS PARA ESTIMATIVA DA
TRANSMISSIVIDADE NO AQUÍFERO SALITRE NA REGIÃO DE
IRECÊ – BA, BRASIL**

Thiago dos Santos Gonçalves

Orientador: Prof. Dr. LUIZ ROGÉRIO BASTOS LEAL

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Geologia, Área de Concentração: Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos.

SALVADOR

2017

THIAGO DOS SANTOS GONÇALVES

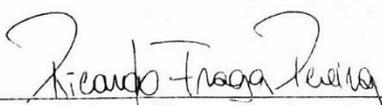
**“MODELOS QUANTITATIVOS PARA A ESTIMATIVA DA
TRANSMISSIVIDADE NO AQUÍFERO CÁRSTICO DE
IRECÊ, BAHIA”**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia, como requisito para a obtenção do Grau de Mestre em Geologia na área de concentração em Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos, em 09/03/2017.

DISSERTAÇÃO APROVADA PELA BANCA EXAMINADORA:


Dr. Luiz Rogério Bastos Leal
Orientador – UFBA


Dr.ª Ana Rita Gonçalves Neves Lopes Salgueiro
Examinador Externo - UFC


Dr. Ricardo Galeno Fraga de Araujo Pereira
Examinador Externo – UFBA

AGRADECIMENTOS

É com muita satisfação que declaro concluída mais uma etapa da minha vida. Esta foi construída em função de muito trabalho, dedicação, erros e acertos. Esta nova fase me fez enxergar o quão pouco eu sabia e o longo caminho que ainda tenho a trilhar para alcançar meus objetivos de vida.

Diante de tantas dificuldades enfrentadas ao longo deste período, não poderia esquecer da força sobrenatural que rege toda a existência. Baseado nesta força procurei minha fortaleza e em todos os momentos foi o meu escudo: Nela sempre confiarei! Gostaria de agradecer, em primeiro ao meu Pai, Sr. Josué, que além da amizade me ensinou a ser forte, perseverante, e que o caráter do homem é fruto do que ele constrói; as minhas irmãs as Srtas Carla, Sheila e Vitória pelo amor incondicional; as minhas avós as Sras. Gizélia, Carmelita (em memória) e Alzira (em memória) pelo amor que só avó pode dar; as minhas Tias as Sras. Rute, Rosana, Ademildes, Rosemeire, Rubenita e Rosa Virgínia, pelo amor de mãe que nunca me faltou; aos meus tios, Srs. Daniel, Antônio, Josafá e Carlos, pela amizade e companheirismo; aos primos, Daniel Jr, Lucas e Alan, pela amizade de irmãos; aos amigos, Thiago, Stalone, Paulo Cesar e Frederico, pela irmandade.

Gostaria de agradecer, em especial, ao meu orientador Prof. Luiz Rogério que proporcionou todas as condições necessárias para o desenvolvimento deste trabalho; ao Prof. Ricardo Fraga, pelas excelentes contribuições ao longo dessa jornada; ao Prof. Danilo Melo, pela primária oportunidade em trabalhar no Núcleo de Estudos Hidrogeológico e do Meio Ambiente – NEHMA; ao Prof. Hailton Mello, por me ajudar a dar os primeiros passos no mundo da pesquisa com a orientação no TCC; ao Prof. Telésforo Martinez, por me ensinar a ensinar geologia; a Prof. Simone Cruz, pelo esforço e dedicação com que vem conduzindo o Programa de Pós Graduação em Geologia – PPGG; e, aos demais professores que contribuíram, em muito, através dos ensinamentos passados em suas disciplinas Profa. Rita Salgueiro, Prof. Geilson Demétrios, Profa. Iara Brandão, Prof. Landim, e Profa. Debora.

Um muito obrigado aos meus parceiros de laboratório (NEHMA), minha casa nos últimos seis anos, dentre eles gostaria de destacar: Lucas Salles e Jean Carlos, grandes parceiros e irmãos que contribuíram em muito com este trabalho; Carlos, Jamile, Renilda, Raissa, Paulo, Cesar e Rogério pela amizade; e, Rose, Liliane e Rita pela boa vontade em sempre me ajudar no que fosse necessário.

Um agradecimento especial ao pessoal da Companhia de Engenharia Rural do Estado da Bahia – CERB, pelo fornecimento dos dados de poços tubulares e pela cordialidade com que fui recebido por todos. E, a CAPES pela bolsa de mestrado.

RESUMO

Diante das propriedades hidráulicas dos aquíferos cársticos como elevadas anisotropia e heterogeneidade, o cálculo dos parâmetros hidráulicos como transmissividade - T, condutividade hidráulica - K, coeficiente de armazenamento - S e capacidade específica - Sc não são convencionalmente concebidos. Fomentando a necessidade em recorrer aos modelos empíricos. Dentre esses parâmetros T e Sc destacam-se por através destes haver a possibilidade de estimar a potencialidade em um dado aquífero. A presente dissertação visa preencher uma lacuna no conhecimento de parâmetros hidráulicos no Aquífero Cárstico Salitre na região de Irecê. As modelagens presentes nesta dissertação estão contidas em dois artigos científicos que integram os capítulos II e III. Para a geração dos modelos foram utilizados dados de 1.334 testes de bombeamento, fornecidos pela Companhia de Engenharia Hídrica e Saneamento da Bahia - CERB, desse total foram utilizados 213 e 54 testes, onde foi aplicado o método de recuperação de Theis para aquisição da Transmissividade (método analítico), esses testes foram utilizados para modelagem no Aquífero Cárstico Salitre - ACS e Aquífero Cárstico Salitre Sul - ACSS, respectivamente. Assim, foram concebidos dois modelos empíricos, sendo para o ACS obteve-se $T = 0,5Sc^{1,18}$ e para ACSS $T = 0,42Sc^{1,08}$. Partindo dos modelos empíricos, foram adquiridos novos valores de T, com base em 1.334 valores de Sc. Os novos valores de T foram espacializados e modelados sob critérios de métodos probabilísticos e determinísticos a fim de criar zonas de transmissividade e conseqüentemente potencialidades. Os métodos de interpolação utilizados foram o Inverso Ponderado da Distância - IPD e a Krigagem Ordinária - KO, sendo o primeiro método aplicado para espacializar T em todo o ACS e o segundo método somente no ACSS. Assim, o ACS foi dividido em cinco principais zonas de T, com valores representando em sua maioria, cerca de 75% potencialidades baixas a moderadas. Quanto ao ACSS, este apresentou em cerca de 90% potencialidades variando entre moderada a alta. Dentre os dois modelos o que apresentou maiores precisões foi o do ACSS, com valores de Coeficiente de Variação em 1,16 e o ACS em 1,32. Entretanto, os dois modelos apresentam-se elevadas heterogeneidades. Este trabalho apresentou um modelo empírico para transmissividade no ACS, viabilizando a obtenção deste parâmetro através de testes simples de bombeamento, sem a necessidade de poços de observação. Este fato poderá contribuir, sobremaneira, para tomadas de decisão pelas entidades gestoras dos recursos hídricos no ACS (incluindo o ACSS) e demais partes interessadas, para além de permitir a identificação das áreas com diferentes potencialidades hídricas no local.

Palavras-chave: Potencialidades, Transmissividade, Aquíferos Cársticos e Geoestatística.

ABSTRACT

Considering the hydraulic properties of karstic aquifers such as high anisotropy and heterogeneity, the calculation of hydraulic parameters such as T - transmissivity, hydraulic conductivity - K , storage coefficient - S and specific capacity - Sc are not conventionally designed. Fostering the need to resort to empirical models. Among these parameters T and Sc stand out because through these there is the possibility of estimating the potentiality in a given aquifer. The present dissertation aims to fill a gap in knowledge of hydraulic parameters in the Salitre Karstic Aquifer in the region of Irecê. The modeling presented in this dissertation is contained in two scientific articles that integrate chapters II and III. For the generation of the models, data from 1,334 pumping tests were used, provided by the Bahia Hydroelectric Engineering and Sanitation Company (CERB), of which 213 and 54 tests were used, where the Theis recovery method was applied for the acquisition of Transmissivity (Analytical method), these tests were used for modeling in the Salitre Karstic Aquifer - ACS and Salitre Sul Karstic Aquifer - ACSS, respectively. Thus, two empirical models were designed, and for ACS it was obtained $T = 0,5Sc^{1,18}$ and for ACSS = $0,42Sc^{1,08}$. Starting from the empirical models, new T values were acquired, based on 1,334 Sc values. The new T values were spatialized and modeled using probabilistic and deterministic methods to create transmissivity zones and consequently potentialities. The interpolation methods used were the Weighted Inverse of Distance - IPD and the Ordinary Kriging - KO, being the first method applied to spatialize T throughout the ACS and the second method only in the ACSS. Thus, ACS was divided into five main T zones, with values representing mostly 75% of low to moderate potentialities. Regarding the ACSS, this showed in about 90% potentialities ranging from moderate to high. Among the two models, the one that presented greater precision was that of the ACSS, with values of Coefficient of Variation in 1.16 and the ACS in 1.32. However, both models have high heterogeneities. This work presented an empirical model for transmissivity in the ACS, making it possible to obtain this parameter through simple pumping tests, without the need for observation wells. This fact may contribute significantly to decision-making by the water resources management entities in the ACS (including ACSS) and other interested parties, in addition to allowing the identification of areas with different water potential in the area.

Keywords: Potentialities, Transmissivity, Karstic Aquifers and Geostatistics.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL.....	8
CAPÍTULO 2 - ARTIGO 1: RELAÇÕES EMPÍRICAS ENTRE TRANSMISSIVIDADE E CAPACIDADE ESPECÍFICA COMO ESTIMADOR DE POTENCIALIDADES HÍDRICAS NO AQUÍFERO CARSTICO SALITRE NA REGIÃO DE IRECÊ, BAHIA.....	25
CAPÍTULO 3 - ARTIGO 2: ESTIMATIVA DA TRANSMISSIVIDADE NO AQUÍFERO CÁRSTICO SALITRE NA BACIA DO RIO SANTO ANTÔNIO – BA, BRASIL.....	44
CAPÍTULO 4 - CONCLUSÕES.....	68
APÊNDICE A – JUSTIFICATIVA DA PARTICIPAÇÃO DOS AUTORES.	71
ANEXO A – REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA.	72

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL

INTRODUÇÃO

O semiárido baiano é umas das regiões com os maiores déficits hídrico do Brasil, perfazendo o contexto do “polígono das secas” (MIN, 2005). Compreender a dinâmica das águas subterrâneas é fundamental nesse contexto, sendo nesta região onde se apresentam sistemas aquíferos de natureza complexa e de difícil quantificação. Dentre esses sistemas aquíferos, os aquíferos cársticos da microrregião de Irecê serão alvos do presente estudo.

A quantidade d’água armazenada por um aquífero cárstico está diretamente associada à porosidade, sendo esta resultante dos processos de carstificação, que atuam continuamente, bem como às estruturas deformacionais, representadas por planos de descontinuidade, dentre os quais destacam-se: foliação, fraturas e falhas. Estas estruturas são favoráveis aos processos de diluição das rochas carbonáticas, que também é condicionado pelo clima. Deste modo, quanto maiores os índices de precipitação e a quantidade de estruturas presentes na rocha, maior será a carstificação e, conseqüentemente, serão maiores a porosidade e a produtividade no aquífero.

Uma maneira de conhecer a produtividade dos aquíferos cársticos é através dos testes de bombeamento dos poços. Dentre os parâmetros de destaque, na determinação do potencial hídrico subterrâneo de um aquífero, estão a Capacidade Específica – Sc e a Transmissividade - T. Embora T seja o parâmetro mais utilizado, sua modelagem para

os aquíferos cársticos não é concebida por métodos analíticos. De maneira geral, os aquíferos cársticos apresentam elevadas heterogeneidades do ponto de vista hidráulico, assim, a seleção dos poços deve passar por uma rigorosa análise exploratória, com o objetivo de diminuir ao máximo as heterogeneidades, por meio da eliminação dos poços que apresentem valores atípicos, sendo estes representados pelos valores que se encontram acima da média acrescidos por duas vezes o desvio padrão, conhecidos como outliers. Evitando subestimar ou superestimar a produtividade no aquífero.

A necessidade em correlacionar esses dois parâmetros surgiu por Thomassom *et al.* (1960), onde foram desenvolvidas equações que estabelecem uma relação direta entre a capacidade específica (SC) e a transmissividade (T). Além de Thomassom *et al.* (1960), outros pesquisadores trabalharam nesta questão, dentre eles, podemos destacar: Binsariti (1980), Ahmed e Marsily (1987) utilizaram análises de regressão linear na correlação, e, para espacializar estes parâmetros fizeram uso da krigagem (FABRRI, 1997; KYRUAKIDIS e JOURNAL, 1999; YAO e JOURNAL, 2000; LIBERA *et al.*, 2017).

Na microrregião de Irecê devido a ampla disponibilidade de solos férteis houve um aumento gradativo na exploração das águas subterrâneas durante as décadas de 80 e 90 (BASTOS LEAL e SILVA, 2004). Os regimes pluviométricos variam entre 500 a 800 mm/ano (IMET, 1992), não sendo suficientes para a perenização das drenagens superficiais, tendo como consequência o aumento no uso das águas subterrâneas. Importantes trabalhos científicos foram desenvolvidos na área de estudo, ao longo dos

últimos trinta anos houve trabalhos relevantes, dentre eles: Guerra (1986), Negrão (1987), Luz *et al.* (2004), Silva (2005), Nossa *et al.* (2009), e, Villanueva *et al.* (2014).

Esta pesquisa destina-se a concepção das zonas de potencialidades do ACS, a partir de parâmetros hidrodinâmico extraídos de testes de bombeamento em poços tubulares. Os resultados desta pesquisa podem servir de base para tomada de decisões dos órgãos gestores das águas subterrâneas na micro região de Irecê.

Logo, este trabalho se propõe a zonar as potencialidades hídricas no aquífero cárstico da formação Salitre na região de Irecê. Para este fim, serão utilizados modelos geológicos pré-definidos, dados de Sc existentes e T a serem definidos nos modelos hidrogeológicos.

1.1 Referencial teórico

Conforme brevemente apresentado na introdução, existem duas formas distintas de estimar a transmissividade, através de relações analíticas ou empíricas. O modelo utilizado no presente projeto de pesquisa foi desenvolvido em função de relações empíricas. No entanto, os valores da transmissividade precisam ser estimados, onde se faz necessário o emprego de métodos analíticos. Assim, construindo uma relação de dependência dos modelos empíricos com as relações analíticas. Portanto, neste capítulo de revisão teórica, serão abordados os principais trabalhos acerca da temática proposta.

Analiticamente a transmissividade é diretamente proporcional a capacidade específica, essa relação pode ser obtida através da equação de Dupuit - Thiem

trabalhadas por: Theis (1963); Razack e Huntley (1991); e, Huntley *et al.* (1992). Ainda se tratando de métodos analíticos, enfatizando os sistemas heterogêneos e anisotrópicos, através do método da recuperação de Theis (1935), destaca-se os seguintes autores: Kawecki (1993) e Ballukraya e Sharma (1992).

Vários estudos têm analisado as relações entre transmissividade e capacidade específica através de modelos empíricos. Dentre esses estudos, podemos destacar os seguintes autores e trabalhos: Razack e Huntley (1991) onde foram estimadas as relações entre T e Sc , extraídos em 215 poços, num dado aquífero aluvionar no Marrocos, apresentando coeficiente de determinação, R^2 , em 0,63. O valor apresentado para R^2 , sugere que há uma correlação entre os dados de T e Sc , entretanto, como o valor de R^2 não apresenta-se acima de 0,75, a correlação entre os dados de T e Sc neste caso não é forte.

Huntley *et al.* (1992), propôs a relação empírica entre esses dois parâmetros, através de testes de bombeamento em 60 poços no sistema aquífero cristalino Ranges - San Diego, EUA. A transmissividade foi estimada pelo método de Cooper – Jacob, enquanto a capacidade específica pelo método da vazão constante. Resultando na relação expressa na figura 1.c, o R^2 dessa relação é de 0,89, mostrando que os valores de T e Sc são fortemente correlatos.

O sistema aquífero Ammam-Wadi na Jordânia teve sua função empírica T em função de Sc determinada por El-Naqa (1994). A transmissividade do ponto de vista analítico foi deduzida a partir do método de Hantush , e, posteriormente pelo método empírico, sendo esse estudo realizado em 237 poços. O coeficiente de determinação,

R^2 , apresentou o valor de 0,95, representando uma forte correlação entre os parâmetros.

Mace (1997), utilizou o método aqui proposto em aquíferos cársticos fraturados nos estados da Florida e Texas – TX, EUA. As relações empíricas entre T e S_c apresentaram-se fortes nos dois casos, sendo os valores de R^2 : 0,89, para o Floridan Aquifer; e, 0,80, para o aquífero Edward, TX, EUA.

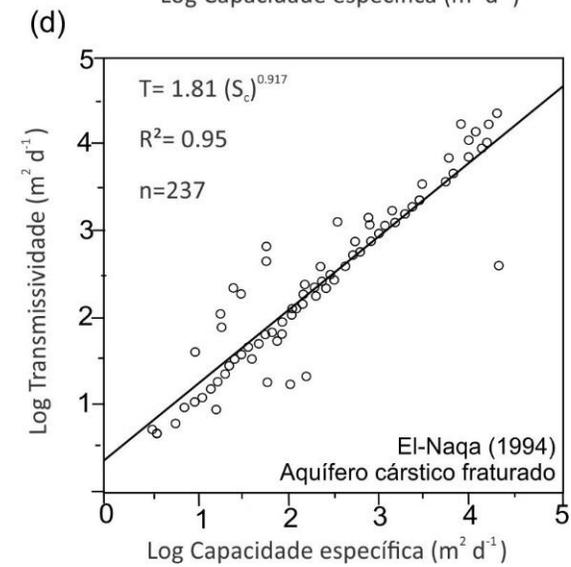
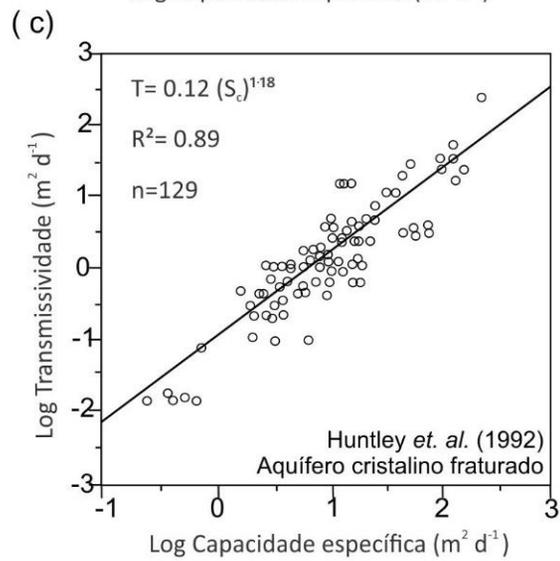
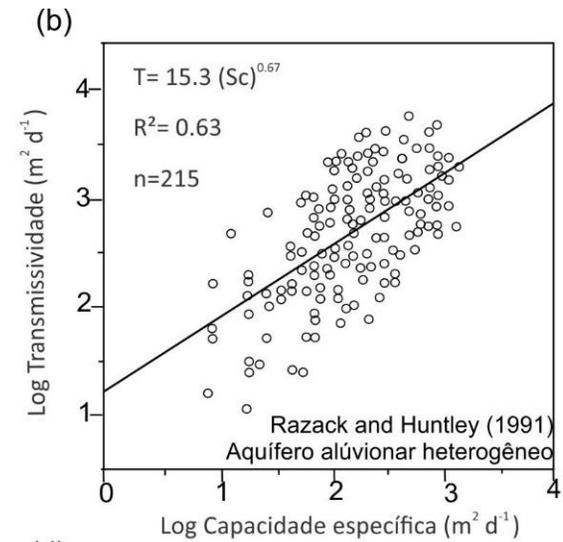
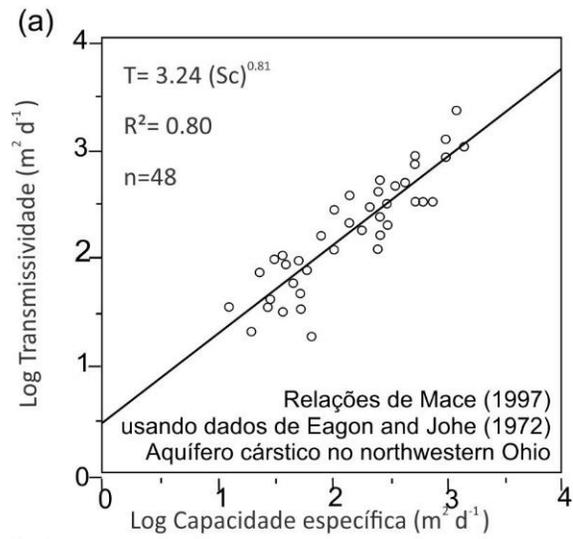
No noroeste da Itália, inserido em rochas carbonáticas das colinas Eugêneas, encontra-se o aquífero modelado por Fabbri (1997). A função e a representação gráfica do referido estudo estão apresentadas na figura 1.1.g. Onde observa-se o R^2 com o valor de 0,95, sendo esta considerada uma forte correlação linear entre os dados.

Hamm *et al.* (2005), utilizou dados de parâmetros hidráulicos de 116 poços no aquífero vulcanoclástico Jeju Island, Coreia do Sul. A transmissividade na sua forma analítica foi calculada pelo método de dupla porosidade de Moench (1985), onde sua relação com a capacidade específica foi representada pelo coeficiente de determinação, R^2 , com valor de 0,94, apresentando uma forte correlação.

O único estudo que emprega o método aqui apresentado no Brasil, foi trabalhado por Galvão (2015). Esse estudo avaliou as propriedades hidráulicas do aquífero Bambuí, no município de Sete Lagoas.

A evolução do conhecimento acerca do método proposto, mostra-se muito abrangente, sendo amplamente aplicado em regiões onde há uma baixa oferta e alta demanda dos recursos hídricos. Muitas das regiões citadas, apresentam condições climáticas e hidrogeológicas semelhantes às da área em estudo, e, conseqüentemente de todo o semiárido brasileiro.

A figura 1.1 apresenta, em termos diagramáticos, os modelos usados pelos autores já citados neste capítulo acrescido por outros trabalhos relevantes. A representação diagramática está associado a relação empírica da função, que representa a transmissividade – T em função da capacidade específica – Sc. Esta representação é dada por: $T_{emp} = 10^{b_0} \cdot Sc^{b_1}$; onde, 10^{b_0} representa o coeficiente linear da reta; e, Sc^{b_1} é a capacidade específica elevada pelo coeficiente angular da reta. Vale destacar que os valores apresentados na figura 1 estão representados pelo seu logaritmo.



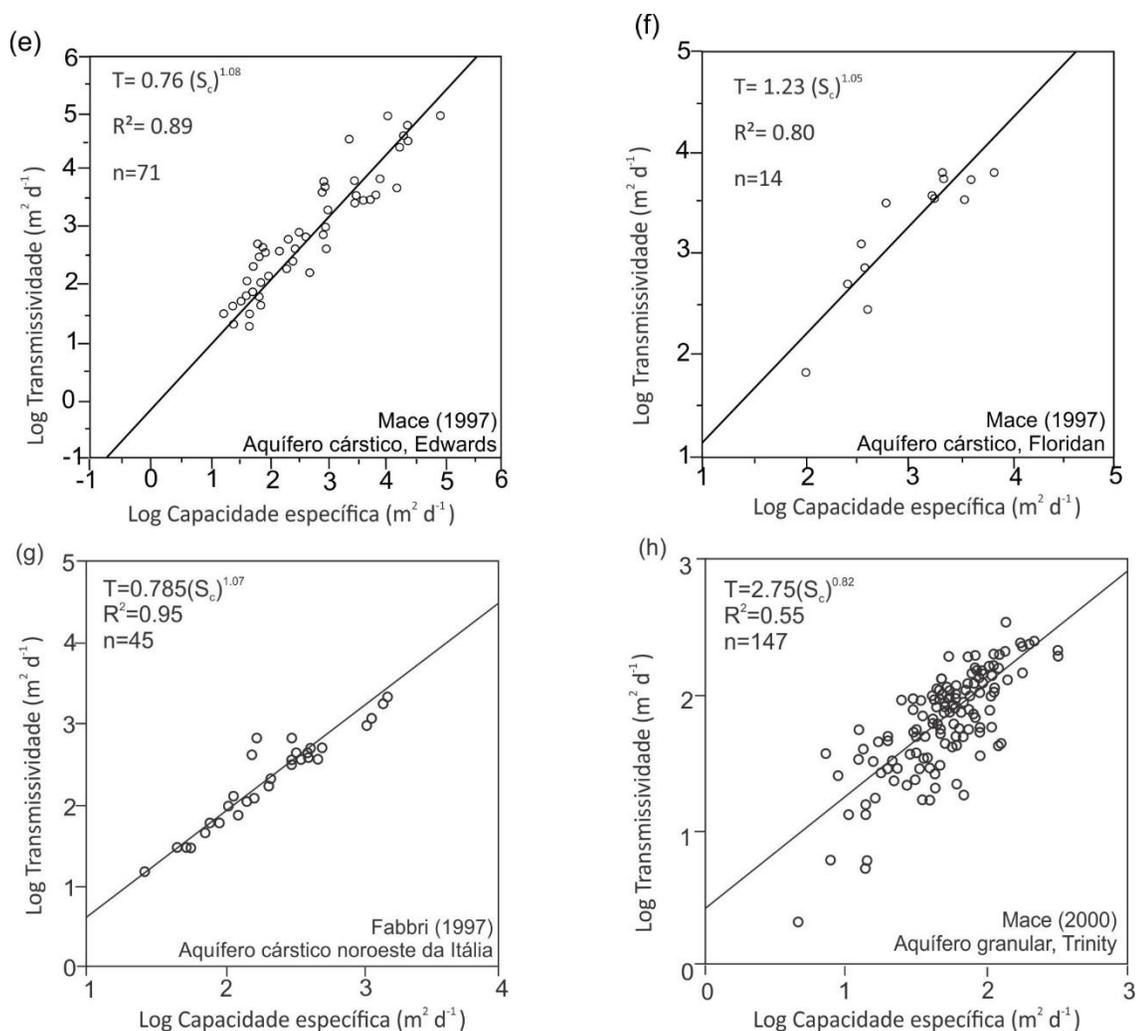


Figura 1. Modelos diagramáticos da correlação linear entre transmissividade e capacidade específica. *Figure 1. Diagrammatic models of linear correlation between transmissivity and specificity capacity.*

1.2 Localização e aspectos fisiográficos da microrregião de Irecê

A região em estudo está inserida nas bacias hidrográficas dos rios Santo Antônio, Verde e Jacaré, e fica situada na porção centro Norte do Estado da Bahia, ocupando uma área aproximada de 22.385 Km² (CPRM, 2003). Irecê é o município mais influente da região, conferindo o nome “bacia de Irecê” a todo domínio cárstico da porção central da

Chapada Diamantina, que é drenado por três bacias hidrográficas. Portanto, conforme representado na figura 2, os limites adotados para a área de estudo foram: o rio São Francisco a norte e a leste, oeste e sul os contatos com as rochas silissiclásticas do grupo Chapada Diamantina.

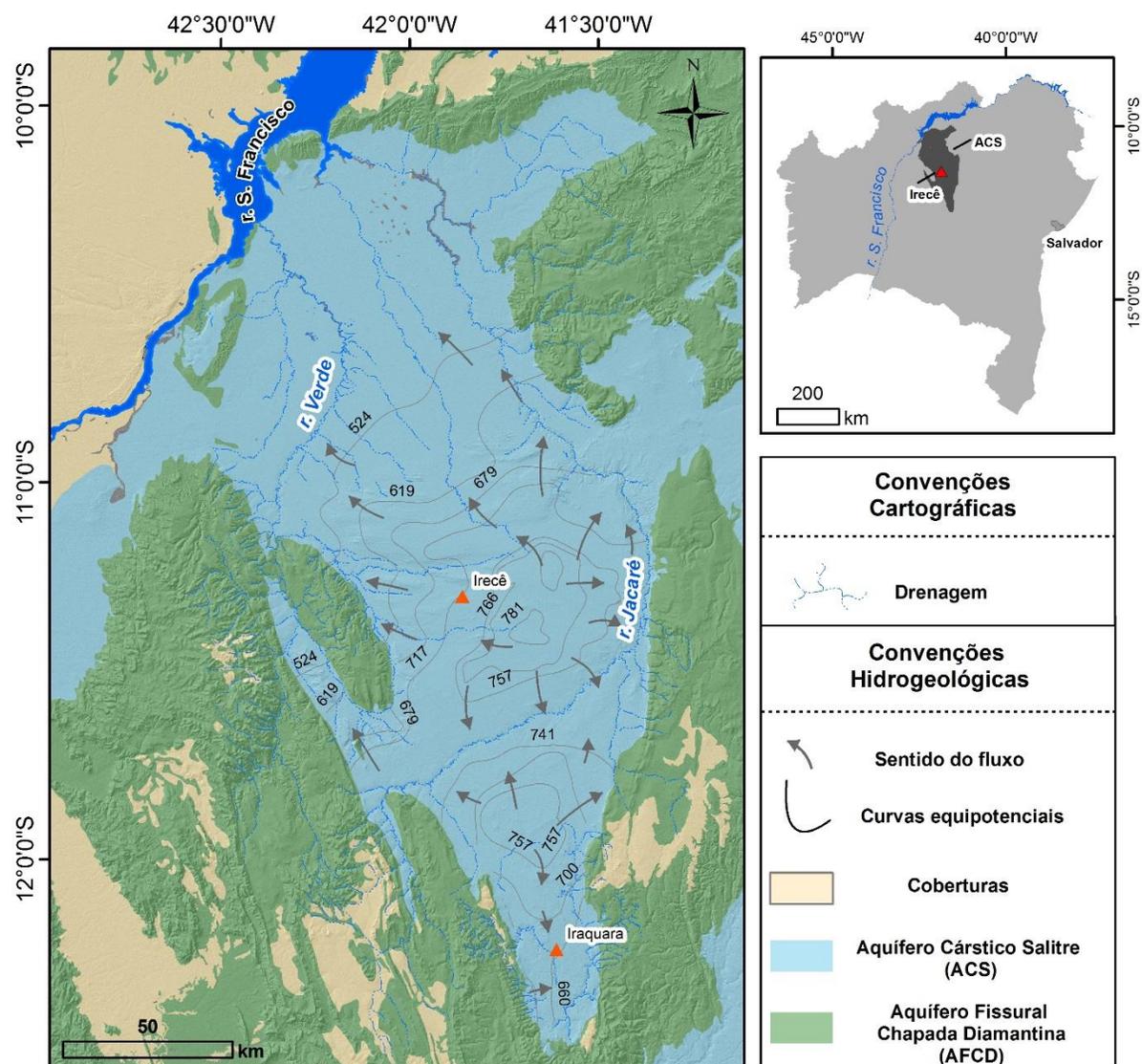


Figura 1. 2. Mapa de localização da área de estudo. *Figure 1.2. Location map of the study area.*

Os regimes pluviométricos na região apresentam diferenças significativas. Com precipitações variando de 500 – 600 mm/ano, na poção central, e 800 – 1000 mm/ano na poção sul (INMET, 2015). Vale destacar que as precipitações mais elevadas estão diretamente associadas com as cotas topográficas mais altas, ficando situadas nas regiões próximas dos relevos montanhosos instalados sobre as rochas silissiclásticas do grupo Chapada Diamantina.

A “bacia” de Irecê é constituída pelos litotípos do grupo Una, que é subdividido nas formações Bebedouro e Salitre.

Sedimentos de caráter, predominantemente, siliciclásticos característicos de sistema deposicional glacial, ocorrem com maior frequência na formação Bebedouro (GUIMARÃES,1996). Esta formação, é constituída por rochas de granulometria fina, apresentando baixa permeabilidade ao sistema, sendo assim considerada como um aquitarde, exceto nas situações em que se encontrem muito fraturadas.

Quanto à formação Salitre, é constituída por sequências de calcarenitos, calcilutitos, silexitos, arenitos, siltitos, lamitos e margas, com espessuras máximas de 530 metros (DOMINGUEZ, 1993). Brito Neves *et al.* (1980) e Macedo *et al.* (1984), determinaram a idade aproximada da formação Salitre, através do método Rb/Sr, em 760 Ma, enquadrando estas rochas no Neoproterozóico. Segundo Lagoeiro (1990), a formação Salitre, na região de Irecê, encontra-se inserida em um cinturão epidérmico de antepaís, relacionado a um evento tardio durante o ciclo Brasileiro, sendo estes sobrepostos aos sistemas de dobramentos e empurrões da Chapada Diamantina. Ainda

na porção central da bacia, este mesmo autor defende a presença de um sistema de falhas e dobramentos com eixos orientados, preferencialmente, segundo E-W, predominando dobras em Chevron, de duplo caimento, e abundância em estruturas de interferências do tipo domos e bacias (SOUZA *et. al.*, 1993). Ao distanciar-se do centro em direção as bordas leste e oeste da “bacia”, nota-se uma diferença no arcabouço estrutural das rochas da Formação Salitre.

O relevo da região é representado por dois domínios geomorfológicos: o planalto cárstico, que ocupa, aproximadamente, 60% nas porções central e Sul da área estudada, e o pediplano cárstico, ocupando aproximadamente 40% na porção Norte da área. Esses domínios estão inseridos nas bacias dos rios Verdes, Jacaré e Santo Antônio. O relevo cárstico da região é caracterizado por feições como: dolinas, sumidouros, lapiás, cavernas, vales cegos e zonas de surgências. Essas feições apresentam-se alinhadas aos eixos de dobras e zonas de cisalhamento, na porção central da área, sugerindo controle estrutural da carstificação (SILVA, 2005). Porém, é no domínio Sul onde a carstificação é observada com maior magnitude (GUERRA, 1986). Vale destacar a presença de grandes cavernas, como a Lapa Doce, delineada por vários sistemas de condutos, preferencialmente orientados para NNW com aproximadamente 17 km de extensão (AULER *et al.*, 2001).

O aquífero cárstico da formação salitre, em toda sua extensão, está limitado em superfície, pelas rochas da formação homônima e em profundidade pela por um sistema de fraturamentos e condutos, provedores de água às obras de captação (poços tubulares). A água contida neste sistema de fratura ou condutos apresentam

profundidades preferenciais em todo aquífero, esta profundidade da qual limita o topo do aquífero predomina entre 40 e 80 metros de profundidade. Em profundidades inferiores a 40 metros essas fraturas ou condutos não é comum estarem preenchidas por água, sendo este domínio no aquífero conhecido como zona vadosa, e em profundidades superiores a 80 metros são raras as fraturas abertas que possibilitem a presença de água (Gonçalves *et al.*, 2016)

1.3 Formato da dissertação

Conforme recomendações do Programa de Pós Graduação em Geologia - PPGeo da Universidade Federal da Bahia esta dissertação está dividida em quatro capítulos. Sendo o capítulo 1, referente à introdução, e o capítulo 4 refere-se às conclusões da dissertação. Nos os capítulos 2 e 3 estão incluídos os artigos, intitulados: “RELAÇÕES EMPÍRICAS ENTRE TRANSMISSIVIDADE E CAPACIDADE ESPECÍFICA COMO ESTIMADOR DE POTENCIALIDADES HÍDRICAS NO AQUÍFERO CARSTICO SALITRE NA REGIÃO DE IRECÊ – BA, BRASIL” e “ESTIMATIVA DA TRANSMISSIVIDADE NO AQUÍFERO CÁRSTICO SALITRE NA BACIA DO RIO SANTO ANTÔNIO – BA, BRASIL”.

Os artigos abordados nessa dissertação apresentaram distintas formas de espacializar dados de transmissividade em função de modelos determinísticos e probabilísticos. Além dos métodos que são diferentes também houve mudança de escala, onde o artigo 2 apresenta-se numa escala de detalhe maior que o artigo 1. Outro fator que motivou a confecção do segundo artigo foi a dificuldade em aplicar o método da krigagem ordinária para dados com projeções espaciais em coordenadas geográficas.

Isso ocorre devido a impossibilidade em trabalhar com sistemas de coordenadas planimétricas como a UTM, pelo fato da área de estudo interceptar as zonas SD 23 e SD 24. No entanto, área estudada no artigo 2 está inserida somente na zona SD 24, facilitando a modelagem do semivariograma.

Esses artigos estão no formato de submissão para a Revista Brasileira de Águas Subterrâneas periódico de circulação nacional de alta relevância entre profissionais e pesquisadores da temática tratada nesta dissertação. A revista proposta apresenta conceito CAPES B2, o que atende aos requisitos estabelecidos pelo Programa de Pós Graduação em Geologia - PPGeo. No ANEXO A, encontram-se as regras de formatação de submissão da revista. O apêndice A estão justificados os motivos pela presença dos coautores.

REFERÊNCIAS

AULER, A.; RUBBIOLI, E. BRANDI, R.. **As Grandes Cavernas do Brasil**. GBPE. Belo Horizonte/MG – Brasil, 2001.

BALLUKRAIA, P. N.; SHARMA, k. k. Estimation of Storativity from Recovery Data. **Ground Water**, Vol. 34, Nº 4, 1992.

BARKER, J.A. A generalized radial flow model for hydraulic tests in fractured rock, **Water Resources Research**, vol. 24, no. 10, pp. 1796-1804, 1988.

BASTOS LEAL, L. R.; SILVA, H. P. da. (Org.) Modelização da dinâmica hidrológica e instrumentos para a gestão do sistema aquífero-rio das bacias hidrográficas dos rios Verde e Jacaré - região semi-árida do estado da Bahia. Relatório técnico final do convênio de cooperação técnico-científica celebrado entre a Superintendência de Recursos Hídricos do Estado da Bahia e a Universidade Federal do Estado da Bahia. 2004. 435p.

BINSARITI, A. A. Statistical analysis and stochastic modeling of the Cortaro aquifer in Southern Arizona, 243p. Dissertação de mestrado, Universidade do Arizona, 1980.

BLAIL, A. A.; ABDUCADER, O. N. Estimate of Transmissivity of Injana aquifer from specific capacity data in two selected area within Ninewa Governorate. **Tikrit Journal of Pure Science**, Vol 17, n°2, 2012.

BRASIL. Ministério da Minas e Energia. Secretaria Geral. **Projeto RADAMBRASIL**, Folha SD24 Salvador. Mapa de Vegetação, Geologia, Geomorfologia e Solos. Rio de Janeiro, 1981.

BRITO NEVES, B.B.; CORDANE, U.G.; TORQUATO, J.R. Evolução geocronológica do pré cambriano no estado da Bahia. In: INDA, H.A.V; DUARTE, F. **Geologia dos recursos minerais da Bahia: textos básicos**, vol. 3, p 1-101. Salvador, Bahia, 1980.

CHOI, B.S. Determination of aquifer characteristics from specific capacity data of wells in Cheju Island. J. Korean Soc. **Groundwater**. 6 (4), 180–187, 1999.

CPRM/CBPM. Geologia e Recursos Minerais do Estado da Bahia – Sistema de Informações Geográficas – SIG, escala 1:1.000.000, 2003.

DOMINGUES, J.M.L. As coberturas do cráton do São Francisco: uma abordagem do ponto de vista de análise de bacias. In: J.M.L. DOMINGUES, A. Misi, **O cráton do São Francisco**, v.1, 137-159. Salvador: SBG/SGM/CNPq, 1993.

EL-NAQA, A. Estimation of transmissivity from capacity data in fractured rock aquifer. **Environmental Geology**, vol. 23, n°1, p.73-80, 1994.

FABBRI, P. Transmissivity in the Geothermal Euganean Basin: A Geoestistical Analysis. **Ground Water**, Vol. 35, N° 5, 1997.

GALVÃO, P. H. F. Hydrogeological Conceptual Model of Sete Lagoas (MG) and Associated Implications of Urban Development in Karst Region. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 124p., 2015.

GONÇALVES, T. S.; BASTOS LEAL, L.R.; SALLES, L.Q.; PEREIRA, R.F.A.; SILVA, H.M. ZONEAMENTO DO POTENCIAL PRODUTIVO NO AQUÍFERO CÁRSTICO DA FORMAÇÃO SALITRE, NA MICRO REGIÃO DE IRECÊ. Anais do XIX Congresso Brasileiro de Hidrogeologia, Campinas, SP, 2016.

GRINGARTEN, A.C., RAMEY, H.J., JR. AND R. RAGHAVAN. Unsteady-state pressure distributions created by a well with single infinite-conductivity vertical fracture, SPE Journal, pp. 347-360, 1974.

GUERRA, A. M. Processos de Carstificação e hidrogeologia do grupo Bambuí na região de Irecê- Bahia. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1986, 132 p.

GUIMARÃES, J.T. A formação Bebedouro no estado da Bahia: faciologia, estratigrafia e ambientes de sedimentação. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências - UFBA, Salvador, 1996.

HAMM, S. Y.; CHEONG, J. Y.; JANG, S.; JUNG, C. Y.; KIM, B. S. Relationship between transmissivity and specific capacity in the volcanic aquifers of Jeju Island, Korea. **Journal of Hydrology**, 310, pg 111 - 121, 2005.

HUNTLEY, D., NOMMENSEN, R., STEFFEY, D.. The use of specific capacity to assess transmissivity in fractured rock aquifers. **Ground Water** 30 (3), 396–402, 1992.

HUNTSAN, M.S. Analysis of data from pumping test in leaky aquifers. **American Geophysical Union Transaction**, vol. 37, 1956, p. 702-714.

IBGE/SEI. Cartas Plani-Altimétricas do Estado da Bahia. Escala 1:100.000. 2003.

INMET- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Normas Climatológicas. Brasília.

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), acessado em dezembro de 2015. < <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>.

JALLUDIN, M., RAZACK, M.. Assessment of hydraulic properties of sedimentary and volcanic aquifer systems under arid conditions in the Republic of Djibouti (Horn of Africa). **Hydrogeology Journal**, 12, 159–170, 2004.

KAWECKI, M. W. Recovery Analyses from Pumping Tests with Stepped Discharge. **Ground Water**, Vol. 34, Nº 4, 1993.

KYRUAKIDIS, P. C.; JOURNAL, A. G. Geostatistical Space - Time Models: A Review. **Mathematical Geology**, Vol. 31, Nº 6, 1999.

KRIGE, D. G. A statistical approach to some basic Mine valuation Problems on the Witwatersrand. **Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa**. South Africa, p.201-202, 1951.

LAGOEIRO, L.E. Estudo da deformação das sequências carbonáticas do grupo Una, na região de Irecê, Bahia. Dissertação (Mestrado), Ouro Preto: Escola de Minas, Departamento de Geologia – UFOP, 1990.

LIBERA, N. D, FABBRI, P., MASON, L., PICCININI, L., POLA, M. Geostatistics as a tool to improve the natural background level definition: An application in groundwater. *Science of the Total Environment*. Ed. 598, 2017.

LUZ, J. A. G.; BASTOS LEAL, L. R.; BARRETO, F. S. Tratamento estatísticos dos dados dos poços da região do platô de Irecê-Ba. XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrânea, 2004, 18 p.

MACE, R. E. Determination of transmissivity from specific capacity tests in a karst aquifer. **Groundwater**, Vol. 35, nº 5, 1997.

MACE, R. E. Estimating transmissivity using specific data. **Bureau of Economic Geology**. The University of Texas at Austin. Austin, Texas, v. 01, p. 01-44, 2000.

MACEDO, M. H. F.; BONHOME, M. G. Contribuição à cronoestratigrafia das Formações Caboclo, Bebedouro e Salitre da Chapada Diamantina (Ba), pelos métodos Rb-Sr e K-Ar. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, Vol. 14, n.3. p.153-163. 1984.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. Relatório de Trabalho Interministerial para Redelimitação do Semiárido Nordestino e do Polígono das Secas. Brasília, 2005.

MOENCH, A.F.. Double-porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin. **Water Resources Research**, vol. 20, no. 7, pp. 831-846, 1984.

MOENCH, A.F. The response of partially penetrating wells to pumpage from double-porosity aquifers, Proceedings of the International Conference on Fluid Flow in Fractured Rocks, Atlanta, GA, May 16-18, 1988.

NEGRÃO, F. I. Caracterização Hidroquímica e Vulnerabilidade do Sistema Hidrogeológico Cárstico da Região de Irecê. Tese de doutoramento, USP, São Paulo – SP, 1987, 107p.

NOSSA, T. C. B.; BASTOS LEAL, L. R.; ZUCHI, M. R. Hidroquímica e índices de saturação dos minerais do sistema aquífero cárstico Salitre na região de Irecê- Lapão, Bahia, Brasil. Anais: II Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo, São Paulo, 2011.

VILANUEVA, T. C. B.; LEAL, L. R. B. L.; ZUCHI, M. R.; AZEVEDO, A. E. G.; MIRANDA, J. G. M.; VILANUEVA, P. R. Avaliação isotópica e hidroquímica do aquífero cárstico salitre na região de Irecê, Bahia. **Revista Brasileira de Águas Subterrânea**, v. 28, nº2, 2014, p. 82-94.

SRIVASTAV, S. K.; LUBCZYNSKI, M. W.; BIYANI, A. K. On aquifer properties, ground water abstraction and recharge in Doon Valley, Uttaranchal. *Bhujal News: Special Issue-Uttaranchal* 21 (in press), 2006.

THEIS, C.V. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage, *Am. Geophys. Union Trans.*, vol. 16, pp. 519-524, 1935.

THEIS, C.V. Estimating the transmissivity of a water-table aquifer from the specific capacity of a well. *US Geol Surv Water Suppl, Surv Water Suppl*, 1963.

THOMASSON HJ, OLMSTEAD FH, LE ROUX ER. Geology, water resources, and usable groundwater storage capacity of part of Solano County, CA. *US Geol Surv Water Suppl Pap*, 1960.

RAMOS, S. O.; ARAÚJO, H. A.; BASTOS - LEAL, L.R.; LUZ, J. A. G.; DUTTON, A. R. V. Variação temporal do nível freático do aquífero cárstico de Irecê - Bahia: contribuição para uso e gestão das águas subterrâneas no semi-árido. **Revista Brasileira de Geociências**, Vol. 37, nº 4, 2007.

RAZACK, M.; HUNTLEY, D. Assessing transmissivity from specific capacity in a large and heterogeneous alluvial aquifer. **Ground Water**, vol. 29, nº 6, p. 856-861, 1991.

RAZACK M.; LASM T. Geostatistical estimation of the transmissivity in a highly fractured metamorphic and crystalline aquifer (Man-Danane Region, Western Ivory Coast). **Journal of Hydrology**, 325 (2004), p 164 - 178.

VERBOVSEK, T. Estimation of transmissivity and hydraulic conductivity from specific capacity and specific capacity index in dolomite aquifers. **Journal of Hydrology**, 13:817-823, 2008.

YAO, T.; JOURNEL, A. G. Integrating seismic attribute maps and well logs porosity modeling in a west Texas carbonate reservoir: addressing the scale and precision problem. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 28, 65 - 79, 2000.

CAPÍTULO II

ARTIGO I – POTENCIALIDADES HÍDRICAS NO AQUÍFERO CARSTICO SALITRE NA REGIÃO DE IRECÊ, BAHIA

RESUMO

Os aquíferos cársticos apresentam propriedade hidráulicas peculiares, dificultando a aquisição de parâmetros hidráulicos, como a transmissividade – T , pelos métodos analíticos concebidos atualmente. Assim, este trabalho propõe estimar T no Aquífero Cárstico Salitre – ACS na região de Irecê através de dados de Capacidade Específica – SC. Para isto foram processados dados de 213 testes de bombeamento, sendo estes, utilizados os métodos de recuperação de Theis e da avaliação do rebaixamento para estimar T e Sc , respectivamente. Sendo possível a comparação entre esses dois parâmetros, pelo Modelo de Regressão Linear – MRL, e assim, determinar a função empírica, $T = 0,5Sc^{1,18}$, característica para o ACS. Após estabelecido o modelo empírico, foram utilizados valores de Sc extraídos de 1.334 ensaios de bombeamento, e, assim, calculado os valores de T_{emp} em função de Sc . Os valores de T_{emp} foram espacializados resultando em cinco diferentes domínios de produtividade, demonstrando que o ACS apresenta-se predominantemente com potencialidades moderadamente baixas. Este trabalho apresentou uma importante ferramenta na concepção de T no ACS e sua disposição espacial. Portanto, uma importante ferramenta para entidades gestoras e perfuradores de poços da região.

Palavras-chave: Transmissividade; Capacidade Específica; Aquífero Cárstico Salitre; Potencialidades.

ABSTRACT

Karstic aquifers present peculiar hydraulic properties, making it difficult to acquire hydraulic parameters, such as T - transmissivity, by analytical methods currently conceived. Thus, this work proposes to estimate T in the Aquifer of the Salitre Formation - ACS in the region of Irecê through data of Specific Capacity - SC. For this, 213 pumping tests were analyzed, where Theis recovery methods and the kneeling evaluation were used to estimate T and Sc , respectively. It is possible to compare the two parameters, by the Linear Regression Model - LRM, and thus, determine the empirical function, $T = 0,5Sc^{1,18}$, characteristic for ACS. After the empirical model was established, values of Sc extracted from 1,334 were used, and, therefore, the values of T_{emp} as a function of Sc were calculated. The values of T_{emp} were spatialized resulting in five different domains of productivity, demonstrating that the ACS is dominant with moderately low potentials. This work presented an important tool in the design of T in the ACS and its spatial arrangement. Therefore, an important tool for well management entities and drillers in the region.

Keywords: Transmissivity; Specific Capacity; Karstic Aquifer Salitre; Potentials.

INTRODUÇÃO

Aquíferos cársticos têm elevada anisotropia e por essa razão a determinação de seus parâmetros hidráulicos como transmissividade - T, condutividade hidráulica - K, coeficiente de armazenamento - S e capacidade específica - Sc não são convencionalmente concebidos, geralmente requerendo o uso e aplicação de modelos empíricos. No ambiente anisotrópico a maioria das observações de campo indicam que os valores de T calculados a partir de dados de Sc a partir de soluções analíticas não são coerentes com os valores obtidos através de teste de bombeamento. Entretanto, muitos hidrogeólogos, devido a facilidade de se obter valores de Sc, tem tentado estabelecer relações empíricas para a determinação de T a partir de Sc em aquíferos heterogêneos anisotrópico (e.g. El-Naqua, 1994, Fabbri 1997, Mace 1997, Razack & Lasm 2004, Galvão 2015 dentre outros) (Tabela 2.1).

Autor	Aquífero	Localização	Modelo analítico		Modelo empírico	R ²
			Capacidade específica	Transmissividade		
Fabbri (1997)	Cárstico	Noroeste da Itália	Vazão constante	Dupuit-Thiem	$T = 0,85(Sc)^{1,07}$	0,95
Jalludin and Razack (1991)	Vulcanoclástico	Djibuti, Horn of Africa	Rebaixamento	Cooper-Jacob, Boulton	$T = 2,99(Sc)^{0,938}$	0,82
Razack and Lasm (2004)	Cristalino fraturado	Man Danane, Ivory Coast	Rebaixamento	Theis Recovery	$T = 0,33(Sc)^{1,30}$	0,88
Mace (1997)	Cárstico	Edwards-TX, EUA	Escalonado	Cooper-Jacob	$T = 0,76(Sc)^{1,08}$	0,8
Mace (1997)	Cárstico	Floridan aquifer - Florida, EUA	Escalonado	Cooper-Jacob	$T = 1,23(Sc)^{1,05}$	0,89
Verbovsek (2008)	Cárstico	Slovenia	Vazão constante	Dupuit-Thiem	$T = 2,39(Sc)^{1,07}$	0,8
Mustafa e Lawson (2002)	Cárstico	Sudoeste da Austrália	Vazão constante	Theis Recovery	$T = 3,95(Sc)^{0,89}$	0,82
Hamm et al, (2005)	Vulcanoclástico	Jeju, Korea	Vazão constante	Moench	$T = 0,99(Sc)^{0,89}$	0,94
El Naqa (1993)	Cárstico	Ammam - Wadi Sir aquifer, Jordan	Vazão constante	Huntush	$T = 1,81(Sc)^{0,917}$	0,95
Eagon e Johe (1972)	Cárstico	Noroeste de Ohio, EUA	Rebaixamento	Theis, Cooper-Jacob	$T = 3,24(Sc)^{0,81}$	0,8

Tabela 2.1 Exemplos de estudos de relações empíricas entre T e Sc . *Table 2.1 Summary of empirical relationships between T and Sc .*

Estima-se que existem atualmente mais de 20.000 poços tubulares profundos no Aquífero Cárstico Salitre (ACS) na região centro norte do Estado da Bahia.

Importantes trabalhos científicos de cunho hidrogeológico foram desenvolvidos ao longo dos últimos trinta anos, com destaque para: Guerra (1986), definiu os principais domínios de carstificação em função dos litotipos e clima; Negrão (1987), caracterizou o aquífero sob seus aspectos hidrogeoquímicos e vulnerabilidade resultante do uso e ocupação da superfície; Luz *et al.* (2004), realizou tratamento estatístico em parâmetros hidrodinâmicos extraídos de poços tubulares; Silva (2005), aplicou os Sistemas de Informações Geográficas – SIG para afim de espacializar parâmetros hidrogeológicos; Ramos *et al.* (2007), monitorou o nível estáticos de poços em diferentes domínios no aquífero em função dos períodos chuvosos e secos; Nossa *et al.* (2011), avaliou a vulnerabilidade no sistema aquífero através de isótopos; e, Villanueva *et al.* (2014), caracterizou o aquífero sob seus aspectos hidrogeológicos e hidrogeoquímicos.

É objetivo deste trabalho é o mapeamento dos domínios de potencialidade do ACS através da quantificação e espacialização de valores da transmissividade T a partir das relações com a capacidade específica Sc . Adicionalmente, pretende-se estabelecer a equação característica da relação entre T e Sc para o ACS que será um importante instrumento para a determinação dos valor de transmissividade em diferentes seguimento deste aquífero, servindo como orientador para a exploração e gestão das águas subterrâneas na região.

ASPÉCTOS HIDROGEOLÓGICOS REGIONAIS

O ACS ocupa uma área aproximadamente de 22.385 Km² da região centro norte do Estado da Bahia (Figura 2.1). Se trata de um aquífero livre associado as rochas carbonáticas neoproterozóicas do Grupo Una (GU), formando um platô dissecado com altitudes médias de 800m, circundado por metassedimentos siliciclásticos mesoproterozóicos do Grupo Chapada Diamantina (GCD). Trata-se de um aquífero com grande heterogeneidade e anisotropia resultantes de diferentes ciclos de deformação e processos de carstificação, conferindo grande variabilidade nos valores dos seus parâmetros hidrodinâmicos.

As formas de absorção e cársticas são representadas por juntas, falhas e fraturas, além de dolinas, sumidouros, uvalas, condutos e cavernas e se constituem nas zonas preferenciais de recarga, armazenamento e drenagem subterrânea. Em condições normais de precipitação o aquífero apresenta nível freático próximo à superfície, com profundidades menores que 15 metros, observado em cerca de 50% dos poços. Enquanto níveis freáticos mais profundos (> 45 m) são observados nas porções sul e sudeste (ex: região de Iraquara), onde predomina feições tipo vales cegos e amplos sistemas de cavernas (ex: Lapa Doce) alimentados por rede de drenagem alogênica (SILVA 1973, LUZ *et al.* 2004). O fluxo subterrâneo em direção às calhas dos rios Verde e Jacaré incluindo seus afluentes.

Estima-se que há na região 20.000 poços produtores em operação no ACS nessa região. Geralmente são poços com vazões menores que 7 m³/h (~ 50%), sendo que apenas 8% possuem vazões superiores a 25 m³/h (Luz *et al.* 2004). Estes poços de produção com maiores vazões e também altos valores de Sc estão geralmente perfurados próximos aos grandes lineamentos estruturais regionais e nas zonas das bordas oriental e ocidental em

contato com metassedimentos do GCD, onde o carste se apresenta mais desenvolvido e com melhores condições de recarga e armazenamento de água subterrânea (GUERRA 1986; BASTOS LEAL & SILVA 2005).

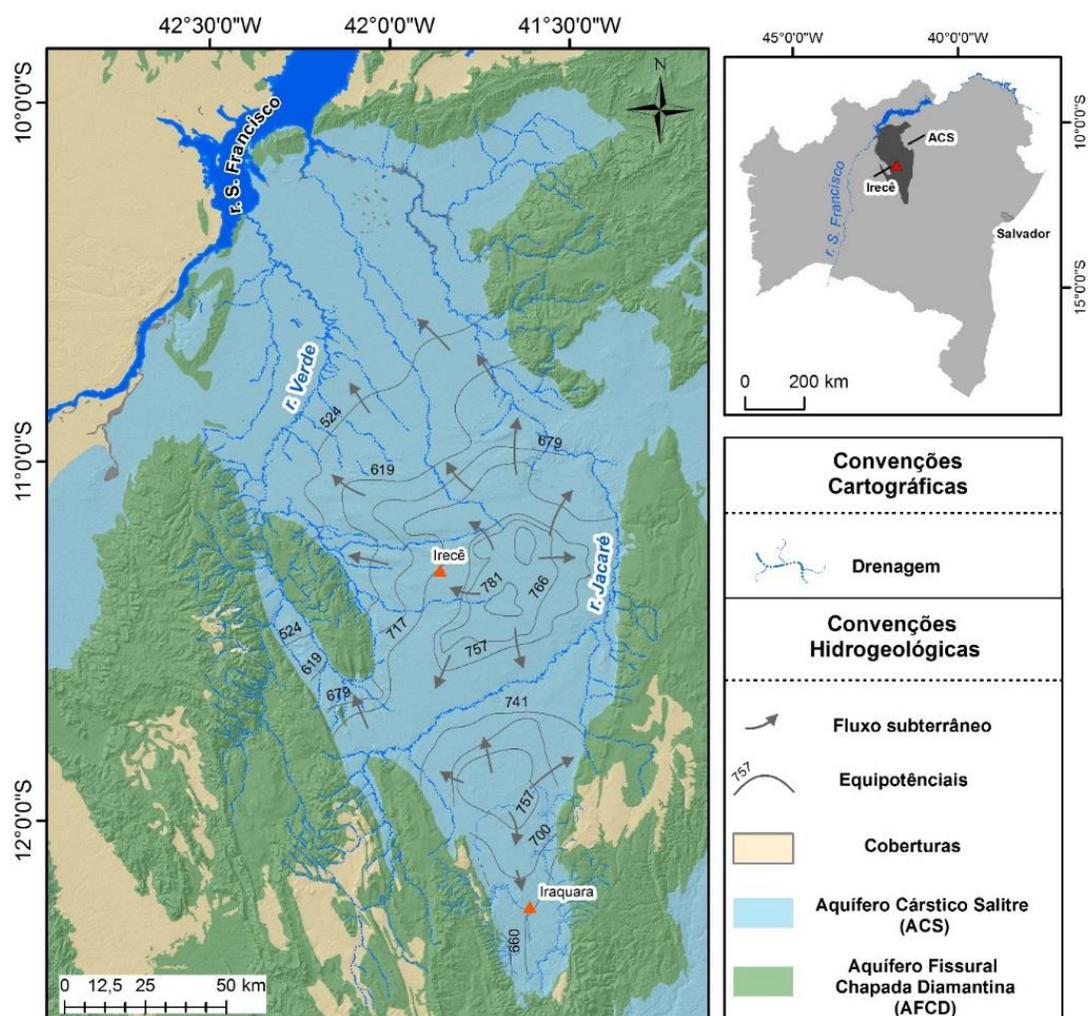


Figura 2.1. Localização da área de estudo. *Figure 2.1. Location of the study area.*

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foram utilizados dados de vazão e rebaixamento de 1.334 poços perfurados pela Companhia de Engenharia Hídrica e Saneamento da Bahia – CERB para

o cálculo da capacidade específica. Por outro lado, foram utilizados 213 testes de bombeamento para calcular a transmissividade (T) através do método da recuperação de Theis (1935) e construção do modelo empírico que correlaciona T com a capacidade específica (Sc).

A figura 2.3a apresenta os poços onde foram determinados os valores de transmissividade e a figura 2.3b mostra o total de poços utilizados para estabelecimento da correlação entre T e Sc .

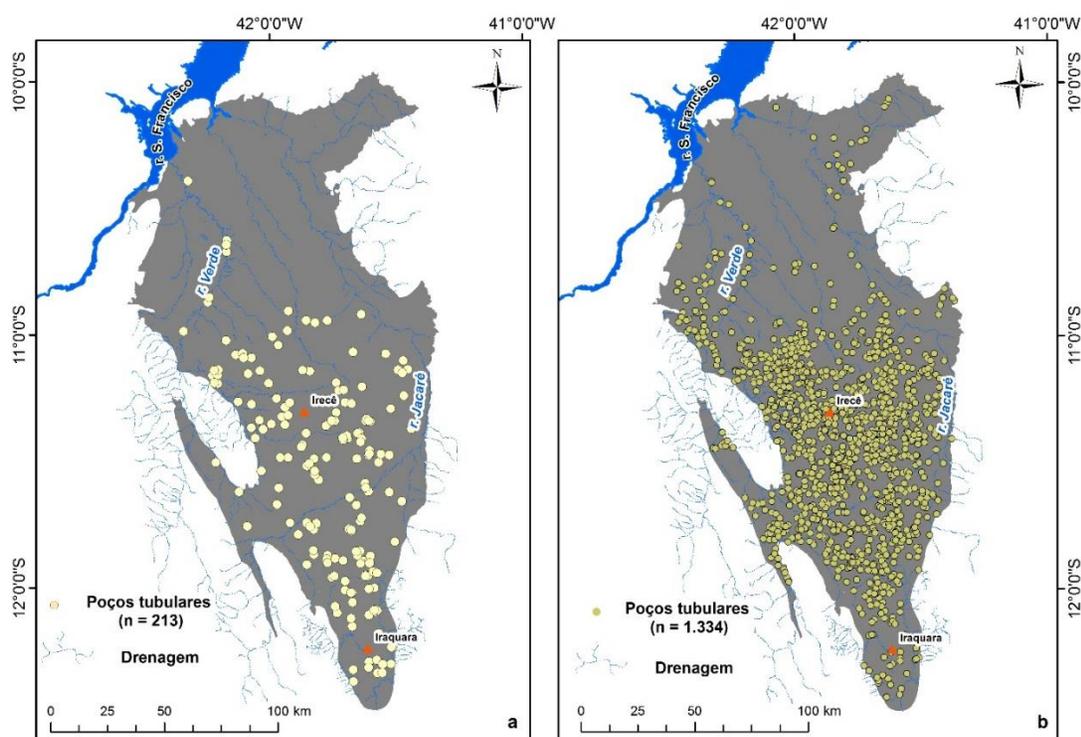


Figura 2.3a. Distribuição espacial dos poços usados na modelagem da transmissividade pelo método de recuperação de Theis. Figura 2.3b. Distribuição espacial do total de poços usado na modelagem da transmissividade pelo método empírico. *Figure 2.3.a. Spatial distribution of the wells used in the modeling of transmissivity by the Theis recovery method. Figure 2.3.b. Spatial distribution of total wells used in the modeling of transmissivity by the empirical method.*

Considerando o fluxo linear durante os períodos de bombeamento e recuperação, o método da recuperação de Theis (1935) é representado pela seguinte função:

$$m(r, t) = \frac{2,3.Q}{4\pi T} \cdot \log \frac{t}{t'} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde $m(r, t)$, é a recuperação, Q a vazão, T é a transmissividade e (t/t') o tempo total pelo tempo de recuperação.

Os valores de recuperação (r) e o $\log(t/t')$ são plotados no gráfico (s) vs. $(\log(t/t'))$, onde é calculada a tangente entre esses dois parâmetros. Resultando na expressão de T , dada por:

$$T = \frac{2,3.Q}{4\pi \Delta p} \quad (\text{Equação 2})$$

Sendo, Δp a relação direta entre (m) e $(\log(t/t'))$. Os valores de T são representados pelas grandezas área e tempo. Nesse trabalho adotou-se a unidade de medida m^2/dia para T afim de se estabelecer comparações com a literatura internacional (MACE 2001; MACE 1997; EL NAQA 1994).

A correlação de T e Sc se ajusta a uma reta de regressão linear representada pela seguinte equação:

$$\hat{Y} = b_0 + b_i X_i \quad (\text{Equação 3})$$

Sendo,

$$\hat{Y} = \log(T)_i \quad (\text{Equação 4})$$

$$X_i = \log(Sc)_i \quad (\text{Equação 5})$$

$$b_i = (SS_{XY}) / (SS_X) \quad (\text{Equação 6})$$

Onde,

$$SS_{XY} = \sum_{i=1}^n X^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i) \quad (\text{Equação } 7)$$

$$SS_X = \sum_{i=1}^n X^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n X_i)^2 \quad (\text{Equação } 8)$$

Temos,

$$b_0 = \bar{Y} - b_1 \bar{X} \quad (\text{Equação } 9)$$

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \quad (\text{Equação } 10)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (\text{Equação } 11)$$

A partir da determinação b_0 e b_1 (equações 9 e 6) é possível calcular o log de T pela equação 3. Essa equação pode ser convertida para função linear a partir da retirada do log da função. Deste modo, T em função da Sc será representada por:

$$T_{emp} = 10^{b_0} \cdot Sc^{b_1} \quad (\text{Equação } 12)$$

A modelagem descritiva univariada e bivariada dos dados foi realizada a partir do software Microsoft Excel e a espacialização com o uso do método Inverso Ponderado da Distância – IPD através do Sistema de Informações Geográficas - SIG ARCMAP / ARCGIS 10.1.

O IPD é um interpolador determinístico da média ponderada caracterizado pela ponderação durante a interpolação. Ou seja, a influência de um ponto sobre o outro decresce com o aumento da distância. A função que representa o IPD é demonstrada a seguir:

$$\hat{Z}_j = \sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{h_{ij}^\beta} \quad (\text{Equação}) 13$$

Onde: \hat{Z} representa o valor interpolado pelo IPD, h_{ij} a distância efetiva entre o valor amostrado e o valor interpolado e Z_i os valores dos pontos vizinhos.

RESULTADOS e DISCUSSÃO

A análise univariada dos dados de T e Sc revela diferenças entre a média e a mediana demonstrando uma distribuição não paramétrica. Enquanto o valor do Coeficiente de Variação – CV é maior para T quando comparado com Sc demonstra que há maior anisotropia nos valores de T . Esta diferença também é observada por Razack & Lasm (2006) ao calcular a transmissividade em aquíferos cristalinos na África.

Tabela 2.2 Sumário descritivo dos dados de T e Sc usados na construção do modelo empírico. *Table 2.2 Descriptive summary of the T and Sc data used in the construction of the empirical model.*

	T (m²/dia)	Sc (m²/dia)
Número de valores	213	213
Mínimo	0,271	0,639
Máximo	3.490,494	3.738,710
Média	201,044	185,104
Mediana	54,203	66,819
Desvio Padrão	413,625	357,871
Coeficiente de Variação	2,057	1,933

Os histogramas das figuras 2.4a e 2.4b revela expressiva assimetria positiva com representação de duas populações principais de T e Sc . Essa característica pode sugerir a ocorrência de diferentes domínios hidrodinâmicos e de carstificação no ACS, tal como sugerido originalmente por Silva (1973) e Guerra (1986). Também observado em aquíferos inseridos em rochas com diferentes graus de deformação rúptil, trabalhados por El Naqa (1994) e Razack & Lasm (2006).

Verbovsek (2008), em estudo comparativo, aponta que ao utilizar a transformada logarítmica dos dados de T e Sc os dados tendem ao comportamento simétrico possibilitando a construção do modelo de regressão linear com poucas diferenças quando comparado a modelos não paramétricos. O resultado das transformas logarítmicas de T e Sc é apresentado nas figuras 2.4c e 2.4d. A regressão linear (RL) apresentada na figura 2.5 revela uma relação direta entre os dados de T com Sc , com coeficiente de determinação $R^2 = 0,844$. Trabalhos similares, em aquíferos cársticos, realizados por Mace (1997) e Verbovsek (2008) apresentaram coeficiente de determinação similar ao apresentado neste estudo, com valores de $R^2 = 0,89$ e $R^2 = 0,8$, respectivamente. Assim, a função que expressa a RL é apresentada como:

$$\mathbf{Log(T) = -0,298 + 1,09.Log (Sc)} \qquad \text{(Equação) 14}$$

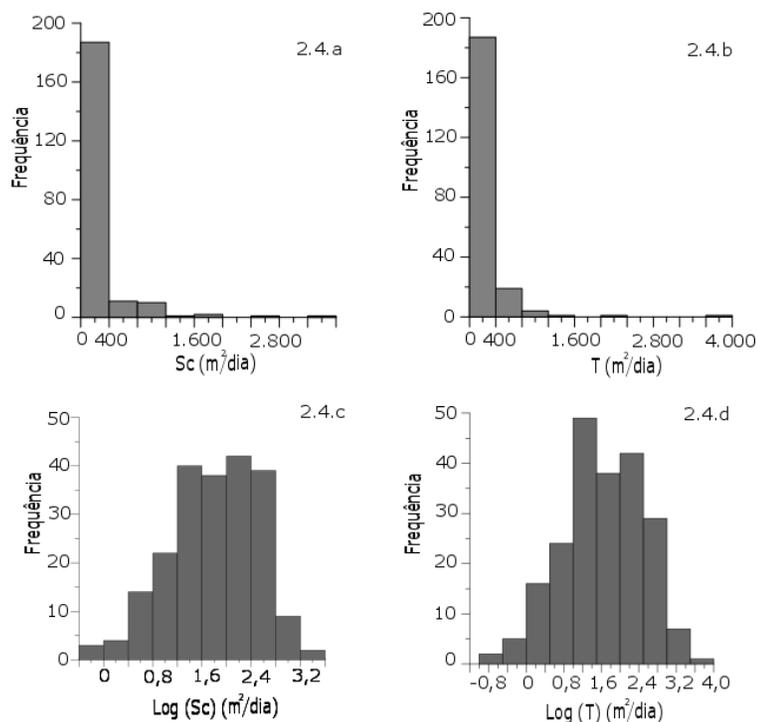


Figura 2.4.a e 2.4.b . Representação histogramática para os dados de Sc e T , respectivamente. Figura 2.4.c e 2.4.d. Representação histogramática para os logaritmos de T e Sc , respectivamente. *Figure 2.4.a and 2.4.d. Histogrammatic representation for the Sc and T data, respectively. Figure 2.4.c and 2.4.d. Histogrammatic representation for the logarithms of T and Sc , respectively.*

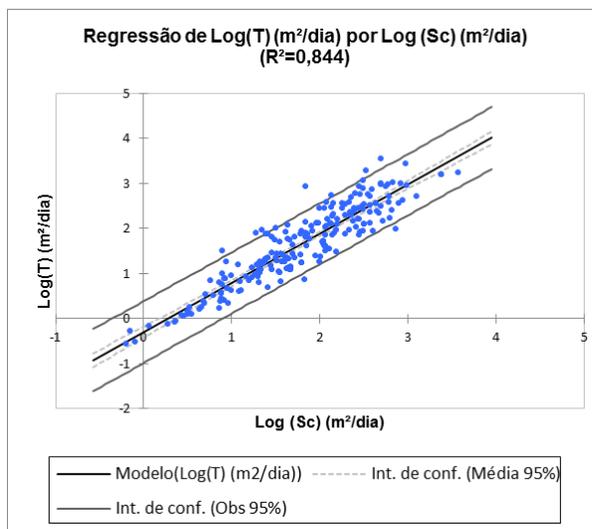


Figura 2.5. Modelo de regressão linear entre os dados de $\text{log}(T)$ e $\text{Log}(Sc)$. *Figure 2.5. Linear regression model between $\text{log}(T)$ and $\text{Log}(Sc)$ data.*

Diante do observado na equação 14, ao converter esta equação para os termos proposto na equação 12, a função que representa a transmissividade no ACS é dada pela seguinte expressão:

$$T_{emp} = 0,5 \cdot Sc^{1,09} \quad \text{(Equação) 15}$$

Conforme demonstrado na tabela 2.1, a relação entre T e Sc apresentada na equação 15 deste estudo é semelhante aos modelos definidos para o aquífero Edward (Texas, EUA) por Mace (1997), e para o aquífero cárstico no noroeste da Itália por Fabbri (1997). Embora os estudos tenham sido realizados através de métodos analíticos para o cálculo de T_{emp} diferentes, a natureza litológica dos aquíferos é a mesma, tratando-se de aquíferos cársticos.

Baseado na função empírica do ACS, os dados analíticos de Sc extraídos das 1.334 fichas de ensaios de bombeamento, foram inseridas na equação 15, e assim calculado 1.334 valores de T_{emp} . O sumário descritivo dos resultados apresentado na tabela 2.3.

Tabela 2.3. Sumário descritivo para os valores de T_{emp} . *Table 2.3. Descriptive summary for T_{emp} values.*

	T_{emp} (m ² /dia)
Número de valores	1.334
Mínimo	0,916
Máximo	1.245,800
Média	229,066
Mediana	86,866
Quartil inferior	28,002
Quartil superior	313,631
Desvio Padrão	303,128
Coefficiente de Variação	1,323

Os parâmetros descritivos univariados apresentados na tabela 2.3, demonstram elevada dispersão representados pelo CV de 1,323. Embora este valor seja elevado, ele é quase metade do apresentado pelo modelo analítico da tabela 2.2. Destaca-se que o valor máximo de T_{emp} cujo valor é 1.245,8 (m²/dia) apresenta uma elevada assimetria com relação a média, indicando que valores nessa ordem de grandeza não são representativos. A tabela 2.3 demonstra uma predominância de valores entre 28,002 (m²/dia) e 313,63 (m²/dia), e são representativos para o quartil inferior e o quartil superior, respectivamente.

A partir da espacialização dos dados, através IPD, foi possível quantificar as diferentes classes de T_{emp} em função das diferentes zonas aquíferas na região e definindo cinco domínios hidrogeológicos. Esses domínios corroboram a classificação de potencialidades em função dos dados de T_{emp} segundo (DE WIEST, 1965; ŞEN, 1995; ŞEN, 2014). Para o ACS o domínio de alta potencialidade ($T_{emp} > 500$ (m²/dia)) ocupa menos de 1% da área total do aquífero. Já as área de moderada alta potencialidade ocupam 22% da área do aquífero, enquanto as áreas de moderada baixa potencialidade ($T_{emp} = 50$ a 250 (m²/dia)) representa uma área de aproximadamente 66% do aquífero (Tabela 2.4).

Tabela 2.4. Escala de potencialidade de aquíferos em função de T_{emp} , adaptado de (DE WIEST 1965 ; ŞEN,1995; ŞEN, 2014). Acrescida pela proporção de cada domínio no ACS. *Table 2.4. Capacity scale of aquifers as a function of T_{emp} , adapted from (DE WIEST, 1965; ŞEN,1995; ŞEN, 2014). Added by the proportion of each domain in the ACS.*

T_{emp} (m ² /dia)	Potencialidade	Área (km ²)	Área (%)
0 - 1	Insignificante	2.044	9,13
0 - 50	Baixa	380	1,70
50 - 250	Moderada baixa	14.837	66,28
250 - 500	Moderada alta	4.977	22,23
> 500	Alta	147	0,66

Na figura 2.6 é apresentado o mapa de potencialidade do ACS. Se observa que as áreas com maiores potencialidades se associam às zonas de convergência de fluxo e / ou zonas de descarga, especialmente nas porções sul e lestes do aquífero. Este modelo se aproxima das constatações de Guerra (1986) que formulou inicialmente a hipótese das maiores potencialidades hidrogeológicas associadas às zonas mais carstificadas e de convergência de fluxo. Essa configuração hidráulica do aquífero é também convergente com a ocorrência de importantes sistemas de cavernas e feições cársticas nas áreas de maior potencialidade (AULER, 2001).

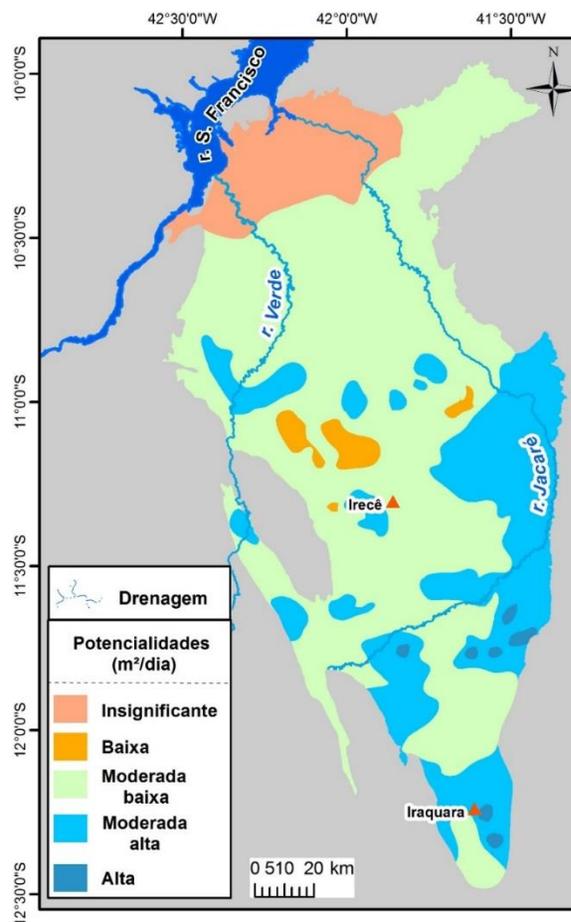


Figura 2.6. Mapa de domínios de T_{emp} para o ACS. *Figure 2.6. Map of T_{emp} domains for ACS.*

CONCLUSÕES

A transmissividade empírica no aquífero cárstico da Formação Salitre foi obtida a partir de dados de capacidade específica de 1.334. A função da reta que representa o modelo é dado por $T_{emp} = 0,5.Sc^{1,09}$. O modelo estabelecido neste trabalho mostra-se similar àquele obtido por Mace (1997) para o aquífero cárstico Edward no estado do Texas, Estados Unidos, bem como àquele obtido por Fabbri (1997) para aquífero cárstico situado na região nordeste da Itália.

A espacialização dos valores de T_{emp} do ACS possibilitou individualizar cinco diferentes domínios em função de suas potencialidades hidrogeológicas, revelando o

predomínio de zonas de moderada potencialidade, sendo as zonas de mais altas potencialidades presentes principalmente na porção sul e leste do aquífero.

Os dados foram espacializados a partir do IPD e sua validação foi realizada a partir de métodos descritivos, demonstrando que há uma alta variabilidade dos valores de T_{emp} dentro dos principais domínios. Entretanto, a média desses valores é equivalente ao modelo apresentado pelo IPD.

Este trabalho apresentou um modelo empírico da transmissividade no ACS, o que favorecerá a fácil aquisição deste parâmetro através de um simples teste de bombeamento de 12h sem necessidade de poços de observação. Além disto, o conhecimento das áreas com diferentes potencialidades hídricas, no ACS, pelas entidades gestoras de recursos hídricos, servirá como ferramenta nas tomadas de decisões para orientar o uso e gestão das águas subterrâneas na região.

REFERÊNCIAS

AULER, A.; RUBBIOLI, E. BRANDI, R. – 2001. As Grandes Cavernas do Brasil. GBPE. Belo Horizonte/MG – Brasil.

AHMED, S.; D. MARSILY, G. Comparison of geostatistical methods for estimating transmissivity using data on transmissivity and specific capacity. **Water Resources Research**, Vol. 23, nº9, p. 1717-1737, 1987.

BRASIL. Ministério da Minas e Energia. Secretaria Geral. **Projeto RADAMBRASIL**, Folha SD24 Salvador. Mapa de Vegetação, Geologia, Geomorfologia e Solos. Rio de Janeiro, 1981.

CHOI, B.S. Determination of aquifer characteristics from specific capacity data of wells in Cheju Island. J. Korean Soc. **Groundwater Environ.** 6 (4), 180–187, 1999.

CPRM/CBPM. Geologia e Recursos Minerais do Estado da Bahia – Sistema de Informações Geográficas – SIG, escala 1:1.000.000, 2003.

De Wiest, R.J.M.. **Geohydrology**. John Wiley, NewYork, 1965.

DOMINGUES, J.M.L. As coberturas do cráton do São Francisco: uma abordagem do ponto de vista de análise de bacias. In: J.M.L. DOMINGUES, A. Misi, **O cráton do São Francisco**, v.1, 137-159. Salvador: SBG/SGM/CNPq, 1993.

EL-NAQA, A. Estimation of transmissivity from capacity data in fractured rock aquifer. **Environmental Geology**, vol. 23, nº1, p.73-80, 1994.

EL OSTA, M. Relationships between Hydraulic Parameters of the Nubian Aquifer and Wells in El Shab Area, South Western Desert, Egypt (A Case Study). **International Journal of Geosciences**, nº 3, 1107 - 1119, 2012.

GALVÃO, P. H. F. Hydrogeological Conceptual Model of Sete Lagoas (MG) and Associated Implications of Urban Development in Karst Region. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 124p., 2015.

GUERRA, A. M. Processos de Carstificação e hidrogeologia do grupo Bambuí na região de Irecê- Bahia. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1986, 132 p.

GUIMARÃES, J.T. A formação Bebedouro no estado da Bahia: faciologia, estratigrafia e ambientes de sedimentação. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências - UFBA, Salvador, 1996.

HAMM, S. Y.; CHEONG, J. Y.; JANG, S.; JUNG, C. Y.; KIM, B. S. Relationship between transmissivity and specific capacity in the volcanic aquifers of Jeju Island, Korea. **Journal of Hydrology**, 310, pg 111 - 121, 2005.

HUNTLEY, D., NOMMENSEN, R., STEFFEY, D.. The use of specific capacity to assess transmissivity in fractured rock aquifers. **Ground Water** 30 (3), 396–402, 1992.

IBGE/SEI. Cartas Plani-Altimétricas do Estado da Bahia. Escala 1:100.000. 2003.

INMET- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Normas Climatológicas. Brasília.

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), acessado em dezembro de 2015. < <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>.

JALLUDIN, M., RAZACK, M.. Assessment of hydraulic properties of sedimentary and volcanic aquifer systems under arid conditions in the Republic of Djibouti (Horn of Africa). **Hydrogeology Journal**, 12, 159–170, 2004.

KRIGE, D. G. A statistical approach to some basic Mine valuation Problems on the Witwatersrand. **Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa**. South Africa, p.201-202, 1951.

LAGOEIRO, L.E. Estudo da deformação das sequências carbonáticas do grupo Una, na região de Irecê, Bahia. Dissertação (Mestrado), Ouro Preto: Escola de Minas, Departamento de Geologia – UFOP, 1990.

LUZ, J. A. G.; BASTOS LEAL, L. R.; BARRETO, F. S. Tratamento estatísticos dos dados dos poços da região do platô de Irecê-Ba. XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrânea, 2004, 18 p.

MACE, R. E. Determination of transmissivity from specific capacity tests in a karst aquifer. **Groundwater**, Vol. 35, nº 5, 1997.

MACE, R. E. Estimating transmissivity using specific data. **Bureau of Economic Geology**. The University of Texas at Austin. Austin, Texas, v. 01, p. 01-44, 2001.

MUSTAFA, S.; LAWSON, J. S. Review Tertiary Gambier Limestone aquifer properties, lower South-East, South Australia. The Department of Water, Land e Biodiversity Conservation. Report, DWLBC 2002/24.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. Relatório de Trabalho Interministerial para Redelimitação do Semiárido Nordeste e do Polígono das Secas. Brasília, 2005.

NEGRÃO, F. I. Caracterização Hidroquímica e Vulnerabilidade do Sistema Hidrogeológico Cárstico da Região de Irecê. Tese de doutoramento, USP, São Paulo – SP, 1987, 107p.

NOSSA, T. C. B.; BASTOS LEAL, L. R.; ZUCHI, M. R. Hidroquímica e índices de saturação dos minerais do sistema aquífero cárstico Salitre na região de Irecê- Lapão, Bahia, Brasil. Anais: II Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo, São Paulo, 2011.

VILANUEVA, T. C. B.; LEAL, L. R. B. L.; ZUCHI, M. R.; AZEVEDO, A. E. G.; MIRANDA, J. G. M.; VILANUEVA, P. R. Avaliação isotópica e hidroquímica do aquífero cárstico salitre na região de Irecê, Bahia. **Revista Brasileira de Águas Subterrânea**, v. 28, nº2, 2014, p. 82-94.

RAMOS, S. O.; ARAÚJO, H. A.; BASTOS - LEAL, L.R.; LUZ, J. A. G.; DUTTON, A. R. V. Variação temporal do nível freático do aquífero cárstico de Irecê - Bahia: contribuição para uso e gestão das águas subterrâneas no semi-árido. **Revista Brasileira de Geociências**, Vol. 37, n° 4, 2007.

RAZACK, M.; HUNTLEY, D. Assessing transmissivity from specific capacity in a large and heterogeneous alluvial aquifer. **Ground Water**, vol. 29, n° 6, p. 856-861, 1991.

RAZACK M.; LASM T. Geostatistical estimation of the transmissivity in a highly fractured metamorphic and crystalline aquifer (Man-Danane Region, Western Ivory Coast). **Journal of Hydrology**, 325 (2004), p 164 - 178.

SILVA A.B. 1973. Contribuição a hidrogeologia dos karsts da região da Bahia. **Rev. Água Subterrânea**. 3:11- 16.

SRIVASTAV, S. K.; LUBCZYNSKI, M. W.; BIYANI, A. K. On aquifer properties, ground water abstraction and recharge in Doon Valley, Uttaranchal. *Bhujal News: Special Issue-Uttaranchal* 21 (in press), 2006.

CAPÍTULO III

ARTIGO II - ESTIMATIVA DA TRANSMISSIVIDADE NO AQUÍFERO CÁRSTICO SALITRE NA BACIA DO RIO SANTO ANTÔNIO – BA, BRASIL

RESUMO

Os aquíferos cársticos apresentam propriedade hidráulicas peculiares, dificultando a aquisição de parâmetros hidráulicos, como a transmissividade – T, pelos métodos analíticos concebidos para os demais tipos de aquíferos. Assim, este trabalho propõe estimar T no Aquífero Carstico da formação Salitre Sul – ACSS, na bacia do Rio Santo Antônio, através de dados de Capacidade Específica – Sc. Para isto foram analisados 54 ensaios de bombeamento, nos quais foram utilizados os métodos de recuperação de Theis e da avaliação do rebaixamento para estimar T e Sc, respectivamente. Através da comparação entre esses dois parâmetros, pelo Modelo de Regressão Linear – MRL, determinou-se a função empírica, $T = 0,42Sc^{1,08}$, característica para o ACSS. Posteriormente, foram utilizados valores de Sc, extraídos de 134 ensaios de bombeamento, e assim foram calculados os valores de T_{emp} , em função de Sc. Os valores de T_{emp} foram espacializados, através da Krigagem Ordinária – KO, resultando em quatro diferentes domínios de produtividade. O modelo teórico que melhor apresentou correlação ao experimental foi o exponencial e o seu ajuste revelou anisotropia dos dados. A estrutura do variograma apresentou os seguintes azimutes N 280 e N 065 os de melhor adequação. O ACSS apresenta altas potencialidades em 13,29% da área estudada, seguida por 86,7% de áreas com potencialidades moderadas (baixa a alta). Ao validar o modelo, notou-se que as zonas periféricas da área em estudo apresentaram inferências menos confiáveis quando comparadas a região central. A ferramenta de concepção de T no ACSS, apresentada neste trabalho, representa, uma importante ferramenta para entidades gestoras e perfuradores de poços da região.

Palavras-chave: Modelos de Regressão Linear; Krigagem Ordinária; Aquífero Cárstico Salitre; Potencialidades.

ABSTRACT

Karstic aquifers present peculiar hydraulic properties, making it difficult to acquire hydraulic parameters, such as T - transmissivity, by the analytical methods designed for the other types of aquifers. Thus, this work proposes to estimate T in the Karst Aquifer of the South Salitre formation - KASS, in the Santo Antônio River basin, through data of Specific Capacity - Sc. For this, 54 pumping tests were analyzed, in which the Theis recovery methods and the lowering evaluation were used to estimate T and Sc, respectively. By comparing these two parameters, the empirical function, $T = 0,42Sc^{1,08}$, was determined by the Linear Regression Model - LRM, characteristic for the KASS.

Subsequently, Sc values, extracted from 134 pumping tests were used, and thus the values of T_{emp} , as a function of Sc , were calculated. The values of T_{emp} were spatialized, through the Ordinary Kriging - KO, resulting in four different domains of productivity. The theoretical model that presented the best correlation to the experimental one was the exponential one and its adjustment showed data anisotropy. The structure of the variogram had the following azimuths N 280 and N 065 of the best suitability. The KASS has high potentialities in 13.29% of the studied area, followed by 86.7% of areas with moderate potentialities (low to high). When validating the model, it was observed that the peripheral zones of the study area presented inferences less reliable when compared to the central region. The tool of conception of T in the KASS, presented in this work, represents, an important tool for managing entities and well drillers of the region.

Keywords: Linear Regression Models; Ordinary Kriging; Aquifer Karstic Salitre; Potentials.

INTRODUÇÃO

Os aquíferos cársticos apresentam propriedades hidráulicas particulares, tais como: elevada anisotropia e heterogeneidade. Deste modo, os modelos analíticos, convencionalmente, utilizados para meios granulares de fluxo laminar, não se aplicam para as peculiaridades destes aquíferos. Fomentando assim a necessidade de se recorrer aos modelos empíricos.

Vários estudos têm analisado as relações entre T e capacidade específica – Sc através de modelos empíricos em aquíferos heterogêneos anisotrópicos. Dentre esses estudos, podemos destacar os seguintes autores e modelos, listados na tabela 3.1.

Autor	Aquífero	Localização	Modelo analítico		Modelo empírico	R ²
			Capacidade específica	Transmissividade		
Fabbri (1997)	Cárstico	Noroeste da Itália	Vazão constante	Dupuit-Thiem	$T = 0,85(Sc)^{1,07}$	0,95
Jalludin and Razack (1991)	Vulcanoclástico	Djibuti, Horn of Africa	Rebaixamento	Cooper-Jacob, Boulton	$T = 2,99(Sc)^{0,938}$	0,82
Razack and Lasm (2004)	Cristalino fraturado	Man Danane, Ivory Coast	Rebaixamento	Theis Recovery	$T = 0,33(Sc)^{1,30}$	0,88
Mace (1997)	Cárstico	Edwards-TX, EUA	Escalonado	Cooper-Jacob	$T = 0,76(Sc)^{1,08}$	0,8
Mace (1997)	Cárstico	Floridan aquífer - Florida, EUA	Escalonado	Cooper-Jacob	$T = 1,23(Sc)^{1,05}$	0,89
Verbovsek (2008)	Cárstico	Slovenia	Vazão constante	Dupuit-Thiem	$T = 2,39(Sc)^{1,07}$	0,8
Mustafa e Lawson (2002)	Cárstico	Sudoeste da Austrália	Vazão constante	Theis Recovery	$T = 3,95(Sc)^{0,89}$	0,82
Hamm et al. (2005)	Vulcanoclástico	Jeju, Korea	Vazão constante	Moench	$T = 0,99(Sc)^{0,89}$	0,94
El Naqa (1993)	Cárstico	Ammam - Wadi Sir aquífer, Jordan	Vazão constante	Huntush	$T = 1,81(Sc)^{0,917}$	0,95
Galvão (2015)	Cárstico	Sete Lagoas - MG, Brasil	Rebaixamento	Thiem	$T = 330(Sc)^{0,21}$	0,55
Eagon e Johe (1972)	Cárstico	Noroeste de Ohio, EUA	Rebaixamento	Theis, Cooper-Jacob	$T = 3,24(Sc)^{0,81}$	0,8

Tabela 3.1 Sumário das relações empíricas entre T e Sc. Segundo vários autores. *Table 3.1 Summary of empirical relationships between T and Sc. According to several authors.*

O Aquífero Cárstico Salitre Sul - ACSS carece de estudos, de cunho quantitativo, acerca dos seus parâmetros hidráulicos. Entretanto, importantes trabalhos científicos de cunho hidrogeológico, foram desenvolvidos ao longo dos últimos trinta anos, com destaque para: Guerra (1986), Negrão (1987), Silva (2005), Nossa *et al.* (2009), Villanueva *et al.* (2014).

É objetivo deste trabalho quantificar e espacializar os valores de transmissividade do ACSS. Ao estabelecer uma equação característica para o aquífero, o parâmetro transmissividade será calculado de forma simplificada, sendo necessário apenas o teste de Sc, com 12 h de duração, para o conhecimento do valor deste parâmetro. Deste modo, os hidrogeólogos e entidades gestoras poderão ter à disposição uma nova ferramenta no conhecimento e dimensionamento espacial de T no ACSS.

LOCALIZAÇÃO E ASPÉCTOS FISIAGRÁFICOS

A região em estudo está inserida na porção centro norte do Estado da Bahia, ocupando uma área aproximada de 1.564 Km² (CPRM, 2003). Conforme representado

na figura 2.1, os limites adotados para a área de estudo foram os seguintes: Norte, os limites dos divisores de águas superficiais entre a bacia do rio Santo Antônio e do rio Jacaré; sul, leste e oeste os contatos com as rochas silissiclásticas do grupo Chapada Diamantina.

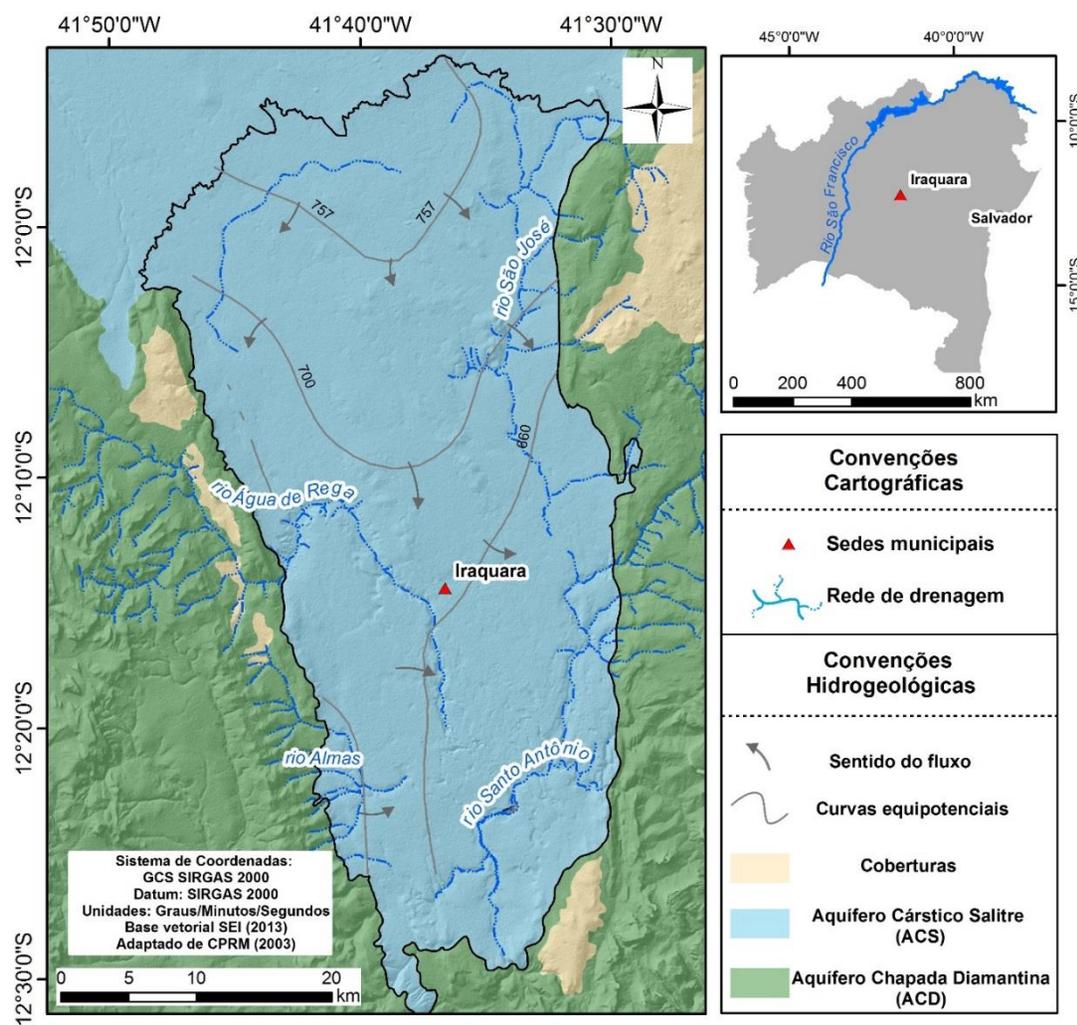


Figura 3.1. Localização da área de estudo. *Figure 3.1. Location of the study area.*

O ACSS é constituído por litotipos da formação Salitre, sendo formado por sequências de calcarenitos, calcilutitos, silexitos, arenitos, siltitos, laminitos e margas, com espessuras máximas de 530 metros (DOMINGUEZ, 1993). Brito Neves *et al.* (1980), determinaram a idade aproximada da formação Salitre, através do método Rb/Sr, em 760 Ma.

O relevo cárstico da região é caracterizado por feições como dolinas, sumidouros, lapiás, cavernas, vales cegos e zonas de surgências. Apresenta-se, de maneira geral, como um relevo aplainado, com uma cobertura arenoargilosa, de cor avermelhada e espessura variável. Segundo Auller e Ferrant (1996), essa região consiste em um dos mais relevantes sítios espeleológicos do país, sendo, possivelmente, o local com maior diversidade de cavernas, por unidade de área, no território brasileiro. As dolinas encontram-se alinhadas, preferencialmente, no sentido NW-SE, e, de forma subordinada, N – S e E – W (figura 3.2.b), sugerindo um controle no fluxo subterrâneo e no desenvolvimento das cavidades naturais subterrâneas. Tais direções de desenvolvimento de condutos, possivelmente estão associadas às descontinuidades estruturais na rocha que tendem a formar relevo negativo, como apresentados na figura 3.2.a.

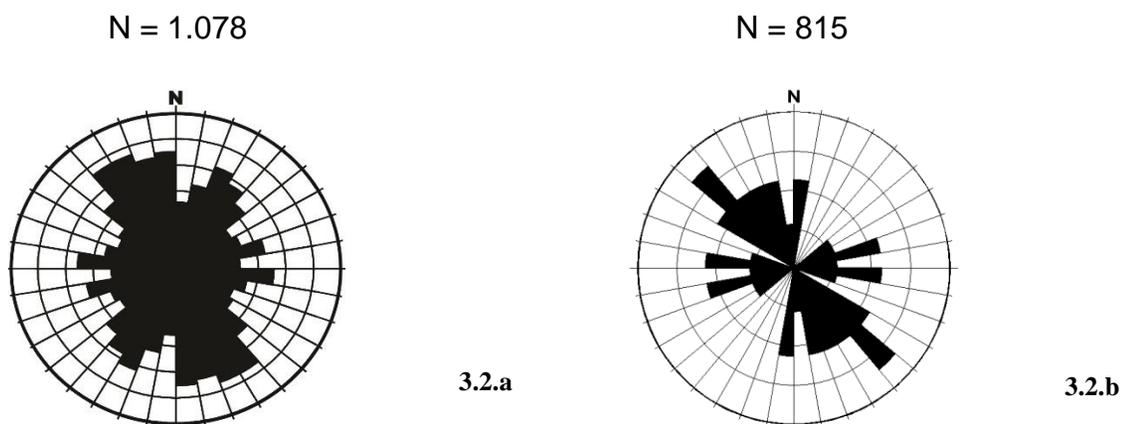


Figura 3.2.a. Roseta exibindo direções principais de foto lineamentos. Figura 3.2.b. Roseta exibindo direções dos eixos principais das cavidades mapeadas na região em estudo. *Figure 3.2.a. Rosette exhibiting main directions of photo lineaments. Figure 3.2.b. Rosette showing directions of the main axes of the cavities mapped in the study region.*

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foram utilizadas 134 fichas descritivas de testes de bombeamento, adquiridos no banco de dados da Companhia de Engenharia Hídrica e Saneamento da Bahia - CERB. Deste total, foram utilizados os dados de rebaixamento e recuperação (doze horas e uma hora, respectivamente) de 54 ensaios de bombeamento, para o cálculo da transmissividade, através do método da recuperação de Theis. A capacidade específica foi calculada pelo método do rebaixamento, onde é medida a relação direta da vazão de bombeamento e o rebaixamento.

A análise univariada dos dados e o cálculo pelo modelo analítico foram realizados no *software* Microsoft Excel 2013. Para variografar e espacializar os valores através da Krigagem Ordinária optou-se pelos seguintes *softwares*: *Stanford Geostatistical Modeling*

Software – SGeMS e o *Geostatistical Analyst Tools* – ARCMAP/Arcgis 10.1, respectivamente.

Os mapas da figura 3.3a e 3.3b apresentam a distribuição espacial dos poços no ACS. Na figura 3.3a, estão distribuídos 54 poços onde a transmissividade foi estimada em função método de recuperação de Theis. Enquanto a figura 3.3b, encontram-se representados 134 poços, incluindo os 54 poços do modelo analítico, sendo a transmissividade destes, estimadas pelo modelo empírico extraídos da relação entre transmissividade – T e capacidade específica – Sc.

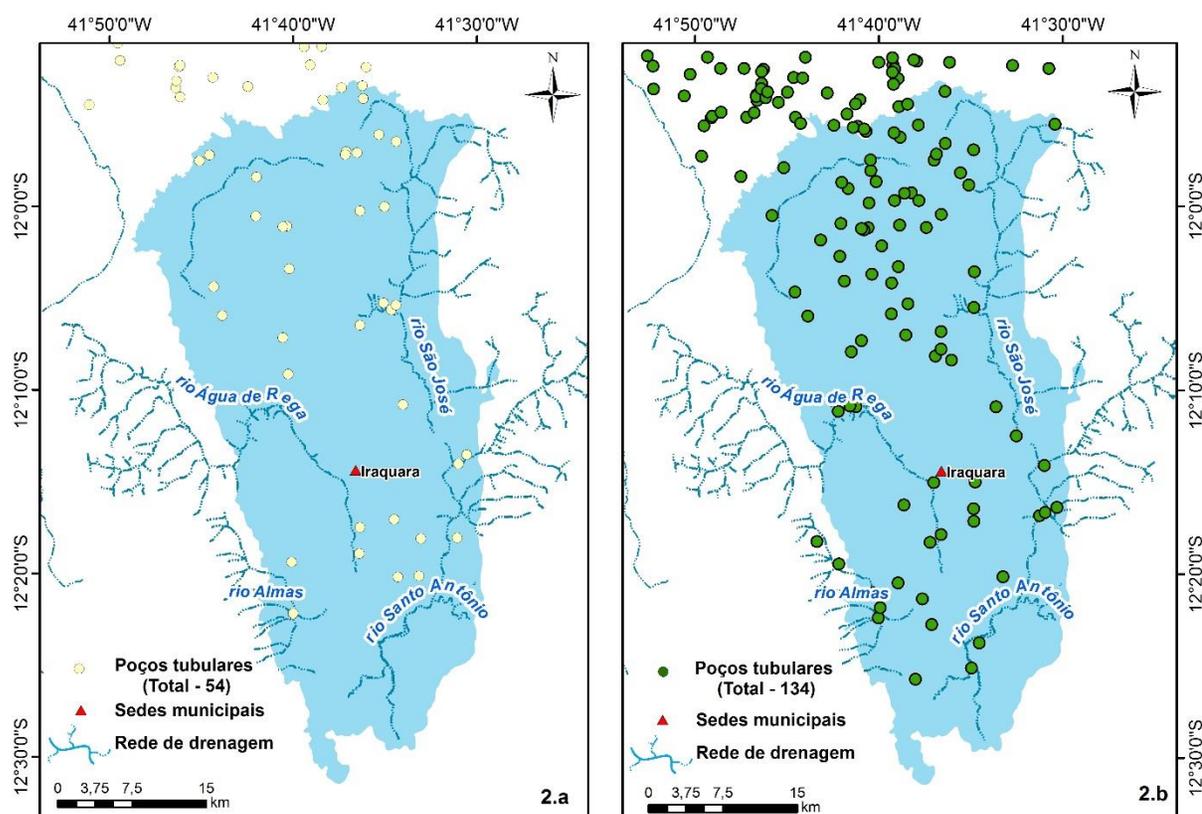


Figura 3.3a. Distribuição espacial dos poços usados na modelagem da transmissividade, utilizando o método de recuperação de Theis. Figura 3.3b. Distribuição espacial do total de poços usado na modelagem da transmissividade, através do método empírico. *Figure 3.3a. Spatial distribution of the wells used in the modeling of transmissivity by the Theis recovery method.*

Figure 3.3b. Spatial distribution of total wells used in the modeling of transmissivity by the empirical method.

Considerando o fluxo linear, durante os períodos de bombeamento e recuperação, o método da recuperação de Theis é representado pela seguinte função:

$$s(r, t) = \frac{2,3.Q}{4\pi T} \cdot \log \frac{t}{t'} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde, $s(r,t)$ é a recuperação, Q a vazão, T a transmissividade e a taxa de tempo (t/t') o tempo total pelo tempo de recuperação.

Para o cálculo da transmissivdiade pelo método da recuperação foram relacionados os valores de recuperação (s) e taxa de tempo $\log(t/t')$, onde estes são plotados no gráfico $(s) \times (\log(t/t'))$, expressando a tangente entre esses dois parâmetros. Resultando na expressão de T , dada por:

$$T = \frac{2,3.Q}{4\pi \Delta s} \quad (\text{Equação 2})$$

Sendo, Δs a relação direta entre (s) e $(\log(t/t'))$. Os valores de T são representados pelas grandezas área e tempo. Seguindo o modelo adotado na literatura, neste trabalho T será representado pela unidade de medida m^2/dia .

A capacidade específica (Sc), definida por Logan (1964) é a relação entre a vazão de bombeamento pelo rebaixamento. Ao realizar as devidas simplificações algébricas, Sc , bem como T , será representada por m^2/dia .

A partir da compilação dos dados de T e Sc é possível ajustar a curva através de uma reta de regressão linear, esta é representada pela seguinte equação:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X_i \quad (\text{Equação } 3)$$

Sendo,

$$\hat{Y} = \log(T)_i \quad (\text{Equação } 4)$$

$$X_i = \log(Sc)_i \quad (\text{Equação } 5)$$

$$b_1 = (SS_{XY}) / (SS_Y) \quad (\text{Equação } 6)$$

Onde,

$$SS_{XY} = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i) \quad (\text{Equação } 7)$$

$$SS_X = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n X_i)^2 \quad (\text{Equação } 8)$$

Temos,

$$b_0 = \bar{Y} - b_1 \bar{X} \quad (\text{Equação } 9)$$

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \quad (\text{Equação } 10)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (\text{Equação } 11)$$

Resolvendo b_0 e b_1 e usando as equações 9 e 6, conseqüentemente o log da transmissividade pode ser estimado diretamente pela equação 3. Ao retirar o log da função, esta será convertida para forma exponencial. Assim, a transmissividade em função da capacidade específica será representada por:

$$T_{emp} = 10^{b_0} \cdot Sc^{b_1} \quad (\text{Equação } 12)$$

Após determinar a melhor curva em função dos dados pareados, é possível determinar o coeficiente de determinação, R^2 , sendo este representado pela equação abaixo:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{\varepsilon}}{SS_Y} \quad (\text{Equação } 13)$$

Com base nos dados de T_{emp} calculados pelos métodos analíticos e, posteriormente, empíricos, é feita a espacialização dos valores. O método usado para espacializar os valores da transmissividade foi a Krigagem Ordinária – KO.

Matheron (1963) caracteriza variograma como uma curva que define o grau de continuidade espacial de um determinado conjunto de dados, possibilitando o estabelecimento do grau de anisotropia espacial entre os dados em questão.

O variograma é a estrutura que representa a relação espacial entre os dados demonstradas a partir de funções que expressam o grau de continuidade espacial entre os dados. No sentido literal representa o valor médio do quadrado das diferenças entre os blocos pares de pontos regionalizados, presentes na área estudada, a partir de uma distância “h” um dos outros. Em um comportamento típico de variograma ajustado, o valor da variância aumenta à medida que aumenta a distância de separação entre os pontos, até atingir o patamar máximo (ISAACS e SRIVASTAVA, 1989).

$$\gamma(h) = \left(\frac{1}{2n} \sum (x_{i+h} - x_i)^2 \right) \quad (\text{Equação } 14)$$

A krigagem ordinária é o método de interpolação mais utilizado, tanto pela sua simplicidade quanto pelos resultados que proporciona. É um método local, onde a

estimativa em um ponto não amostrado resulta na combinação linear dos valores encontrados na vizinhança. Assim, o estimador da krigagem ordinária é dado por Z^* :

$$Z^*(X_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(X_i) \quad (\text{Equação } 15)$$

Ao fazer cada uma das derivadas parciais da função lagrangeana e derivando a função lagrangeana em relação a μ (multiplicador de lagrange), chega-se ao sistema de equações da krigagem ordinária, equação 16.

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j C(x_i - x_j) - \mu = C(x_i - x_0) \text{ para } i = 1, n \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \end{cases} \quad (\text{Equação } 16)$$

RESULTADOS

A partir dos dados analíticos de T e Sc dos 134 poços estudados, foi realizada a análise univariada dos dados. Destaca-se a elevada diferença entre a média e a mediana, demonstrando uma distribuição assimétrica negativa dos dados. No sumário descritivo da tabela 3.2 é notada a similaridade nos parâmetros de tendência central e dispersão entre as duas variáveis. No entanto, os valores do Coeficiente de Variação – CV apresentam-se maiores para T, embora esses valores não representem diferenças expressivas.

Tabela 3.2. Sumário descritivo dos dados de T e Sc usados na construção do modelo empírico.
Table 3.2. Descriptive summary of the T and Sc data used in the construction of the empirical model.

	Sc (m²/dia)	T (m²/dia)
Número de valores	51	51
Mínimo	2,331	1,061
Máximo	870,549	640,487
Média	158,888	107,843
Mediana	72,960	43,901
Desvio padrão	203,843	147,006
Coeficiente de variação	1,283	1,363

A representação histogramática da figura 3.4a e 3.4b esboça uma forte assimetria negativa para os valores de T e Sc, como apresentado pelos valores da média e mediana. Para diminuir as assimetrias, os dados foram transformados para o seu logaritmo e os novos histogramas são apresentados nas figuras 3.4c e 3.4d que ilustram a distribuição simétrica dos dados, através de histogramas.

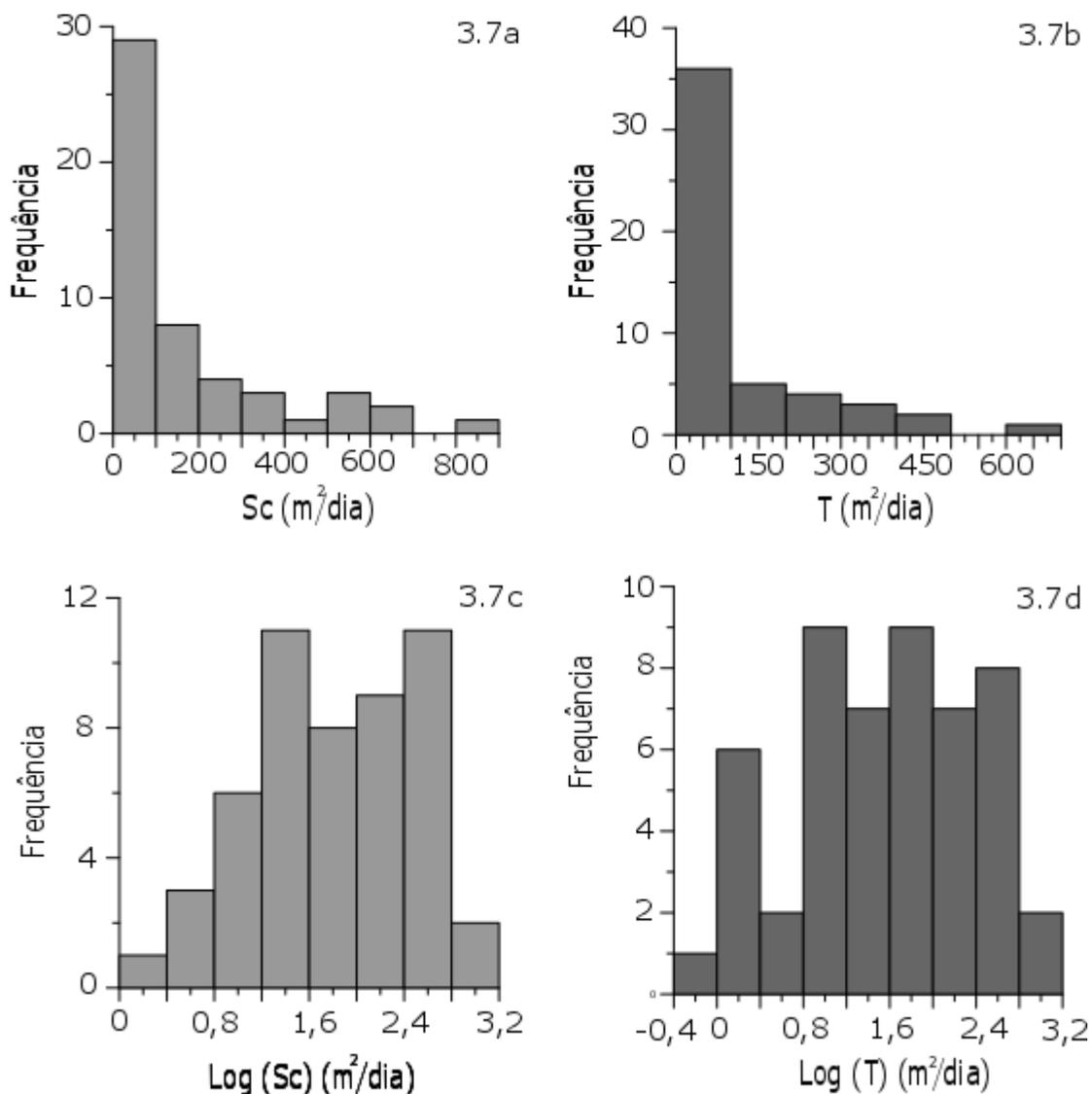


Figura 3.4.a e 3.4.b . Representação histogramática para os dados de Sc e T , respectivamente. Figura 3.4.c e 3.4.d. Representação histogramática para os logaritmos de T e Sc , respectivamente. *Figure 3.4.a and 3.4.b. Histogrammatic representation for the Sc and T data, respectively. Figure 3.4.c and 3.4.d. Histogrammatic representation for the logarithms of T and Sc , respectively.*

A conversão logarítmica dos dados possibilitou a parametrização dos mesmos, e consequentemente a construção do modelo de regressão linear – MRL. Outra informação extraída a partir da parametrização dos histogramas, é a presença de duas populações presentes nos histogramas normalizados das figuras 3.4.c. e 3.4.d. Isso é

decorrente dos diferentes grupos de dados influenciados pelas peculiaridades do meio hidrogeológico, corroborando a necessidade de espacialização dos dados.

Como apresentado no diagrama da figura 3.5, o Modelo de Regressão Linear - MRL apresentou uma forte correlação, evidenciado pelo valor do coeficiente de determinação, $R^2 = 0,844$. O que representa uma forte correlação entre os dados de T com Sc. O R^2 do presente estudo está entre os maiores conhecidos no contexto internacional, se equiparando aos modelos apresentados pelos alguns autores aqui citados e listados na tabela 3.1, com destaque: Mace (1997) e Mustafa e Lawson (2002). Assim como neste estudo, os autores recém citados também desenvolveram seus modelos em aquíferos de natureza cárstica. A função que expressa o MRL é apresentada a seguir, como:

$$\mathbf{Log(T) = -0,37 + 1,08.Log (Sc)}$$

(Equação) 17

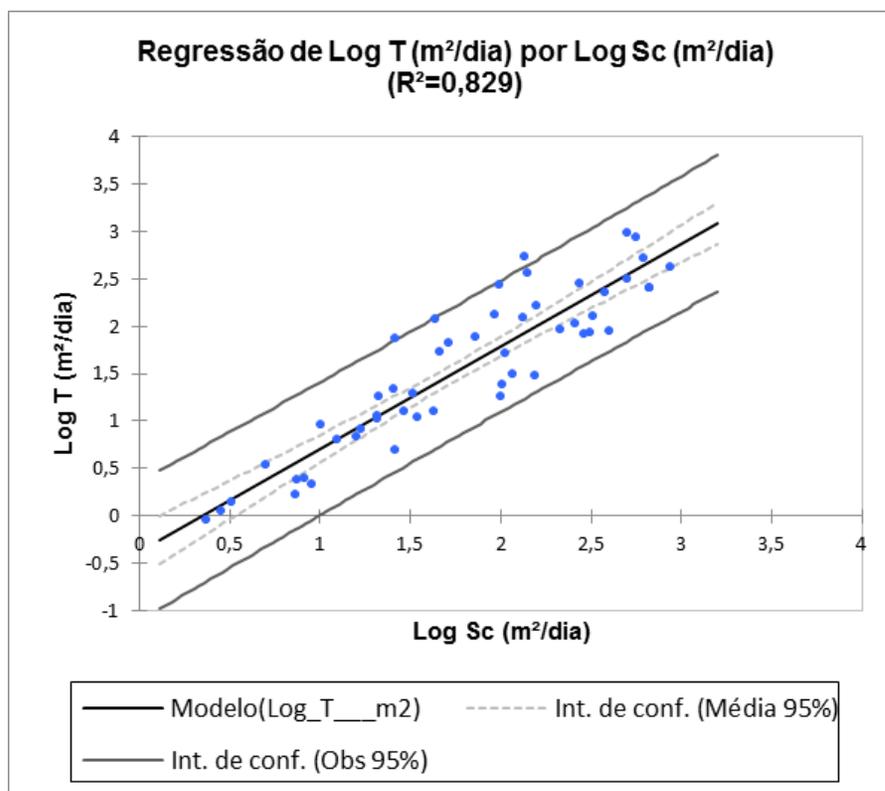


Figura 3.5. Modelo de regressão linear entre os dados de log (T) e Log(Sc). *Figure 3.4. Linear regression model between log (T) and Log (Sc) data.*

Conforme apresentado na equação 17, pode-se concluir que a mesma está representada em termos logarítmicos. Ao converter esta equação para os termos proposto na equação 12, a função que empírica da transmissividade no ACS é representado pela seguinte expressão:

$$T_{emp} = 0,42 \cdot Sc^{1,08} \quad \text{(Equação) 18}$$

Na tabela 3.1 demonstra-se a relação entre T e Sc apresentada na equação 15 deste estudo, sendo semelhante aos modelos definidos para o aquífero Edward por Mace (1997), e para o aquífero cárstico da Itália por Fabbri (1997). Embora os estudos

tenham sido realizados através de métodos analíticos para o cálculo de T diferentes, a natureza litológica dos aquíferos é a mesma, tratando-se de aquíferos cársticos.

Baseado na função empírica do ACSS, representado pela equação 18, os dados analíticos de Sc extraídos das 134 fichas de ensaios de bombeamento, foram inseridas na equação 18, e, assim calculados 134 valores de T_{emp} do ACSS. O sumário descritivo deste total de poços é apresentado na tabela 3.3.

Tabela 3.3. Sumário descritivo para os valores de T_{emp} . *Table 3.3. Descriptive summary for T_{emp} values.*

	T_{emp} (m ² /dia)
Número de dados	134,00
Mínimo	5,38
Máximo	4.492,22
Média	732,79
Mediana	265,15
Quartil inferior	66,92
Quartil superior	1.052,56
Desvio padrão	977,79
Coefficiente de variação	1,33

Os parâmetros descritivos univariados apresentados na tabela 3.3, demonstram elevada dispersão, que pode ser constatada pelo CV de 1,33. Embora este valor seja elevado, ele é próximo ao apresentado pelo modelo analítico da tabela 3.2. Vale destacar, o valor máximo de T_{emp} , correspondente a 4.492 m²/dia, apresentando uma elevada diferença com relação à média. A tabela 3.3 demonstra uma predominância de valores entre 66,92 (m²/dia) e 1.052,56 (m²/dia), valores estes representativos para o quartil inferior e o quartil superior, consecutivamente. Deste modo, observa-se o valor

máximo obtido não é representativo do conjunto de dados analisados e parece tratar de um valor anômalo.

Os valores de T_{emp} foram interpolados pelo método probabilístico KO, como apresentado na equação 17. Entretanto, antes de serem espacializados os dados foram variografados segundo a equação 16. O modelo de variograma teórico, melhor correlacionado com os dados experimentais foi o exponencial. Além deste, foram analisados os modelos gaussiano e esférico com baixas correlações visual. No variograma apresentado na figura 3.6 é possível visualizar a correlação entre os variogramas teórico (curva contínua) e experimental (pontos).

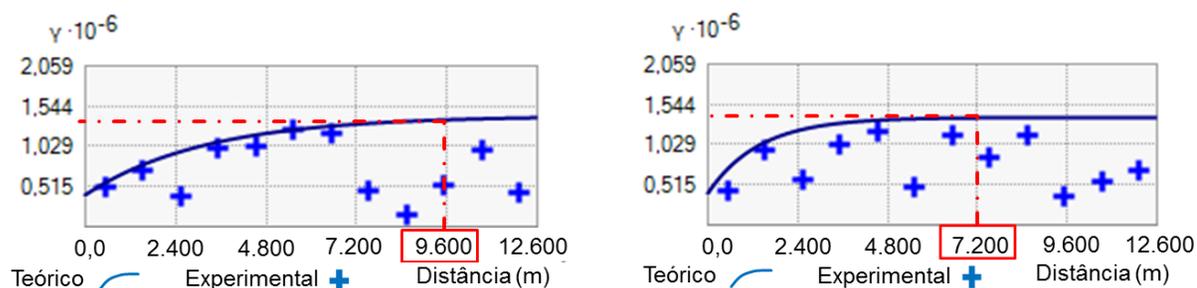


Figura 3.6. Variograma teórico (exponencial) modelado ao experimental. O modelo da esquerda representa o azimuth N 280, enquanto o modelo da direita representa o azimuth N 065.

Figure 3.6. Theoretical (exponential) variogram modeled to experimental. The left model represents the azimuth N 280, while the model of the right represents the azimuth N 065.

O modelo representado na figura 3.6 demonstra correlação entre os dados espacializados, até distancias máximas de 9.600 metros e 7.200 metros, para azimuthes de N 280 e N 065, respectivamente. Os outros parâmetros usados na modelagem do variograma estão apresentados na tabela 3.4.

Tabela 3.4. Parâmetros usados na construção do variograma. *Table 3.4. Parameters used in the construction of the variogram.*

Parâmetros	Valores
Número de lags	12
Separação do lag	2.700 metros
Tolerância do lag	500 metros
Número de direções	4
Tolerância angular	22°
Patamar	956.068
Efeito Pepita	411.569

O efeito pepita apresentado na tabela 3.4 representa 43% da variância dos dados. Este resultado demonstra o elevado grau de aleatoriedade entre os dados vizinhos, ou seja, representa em termos numéricos a alta heterogeneidade do aquífero. Característica esta, comum aos aquíferos cársticos. Entretanto, é observado uma correlação maior entre os dados na direção N 280 e N 065, estas se apresentam como uma das direções principais de condutos mapeados em cavernas na região e dos fotolineamentos apresentados na figura 2.1.a e 2.1.b.

Seguida a modelagem do variograma os parâmetros foram inseridos na função KO, onde foram identificados cinco principais domínios de T_{emp} . Esses domínios estão divididos conforme apresentado na tabela 3.5. Os dados de T_{emp} foram comparados com a escala de produtividade em função da transmissividade.

Tabela 3.5. Escala de potencialidade de aquíferos em função de T. Acrescida pela proporção de cada domínio no ACSS. *Table 3.5. Capacity scale of aquifers as a function of T. Added by the proportion of each domain in the ACSS.*

Pontecialidades	T_{emb}(m²/dia)	Área (m²)	Área (%)
Baixa	5 -- 60	1	0,07
Moderada baixa	60-200	102,00	7,06
Moderada	200-570	438	30,31
Moderada alta	570-1.500	712,00	49,27
Alta	>1.500	192,00	13,29

Como observado na tabela 3.5, 62,56% da área do ACSS apresenta moderado alto a alto potencial hídrico subterrâneo. As áreas de potencial variando entre moderado a moderado baixo representam 37,37%, e áreas com baixas potencialidades são insignificantes na região em estudo. Esses domínios estão espacializados conforme apresentado no mapa da figura 3.7a. Nota-se, uma forte correlação visual entre as zonas de convergência de fluxo subterrâneo e superficial com os domínios de altas potencialidades. Na figura 3.7a observa-se que nos entornos dos principais rios da área em estudo, estão comumente distribuídos os domínios potencialidade moderada alta e alta. Embora seja na zona de confluência entre os rios São José, Água de Rega, Stº Antônio e Almas onde se encontra o domínio com maior potencial hídrico da região.

Na figura 3.7.b é apresentado o mapa de validação modelo na figura 3.7.a, é possível perceber uma elevada diferença entre os valores estimados e os valores reais. Tais diferenças são esperadas diante da pequena escala de trabalho, 1:350.000, denotando um caráter regional ao estudo. Através da validação cruzada entre os dados calculados e estimados, da figura 3.7.b, observa-se as zonas mais periféricas da área em estudo apresentam precisões menores para o modelo probabilístico, sendo tais

domínios de baixa acurácia, os mesmos onde se observa uma menor densidade amostral. Contudo, o modelo presente neste estudo, busca estimar a potencialidade do aquífero acessando dados de poços tubulares previamente instalados.

O mapa apresentado na figura 3.7.a. tem por objetivo nortear tomadas de decisão por órgãos gestores sob uma escala regional do ACSS, não se referindo a aspectos locais de poços tubulares em escala de detalhe.

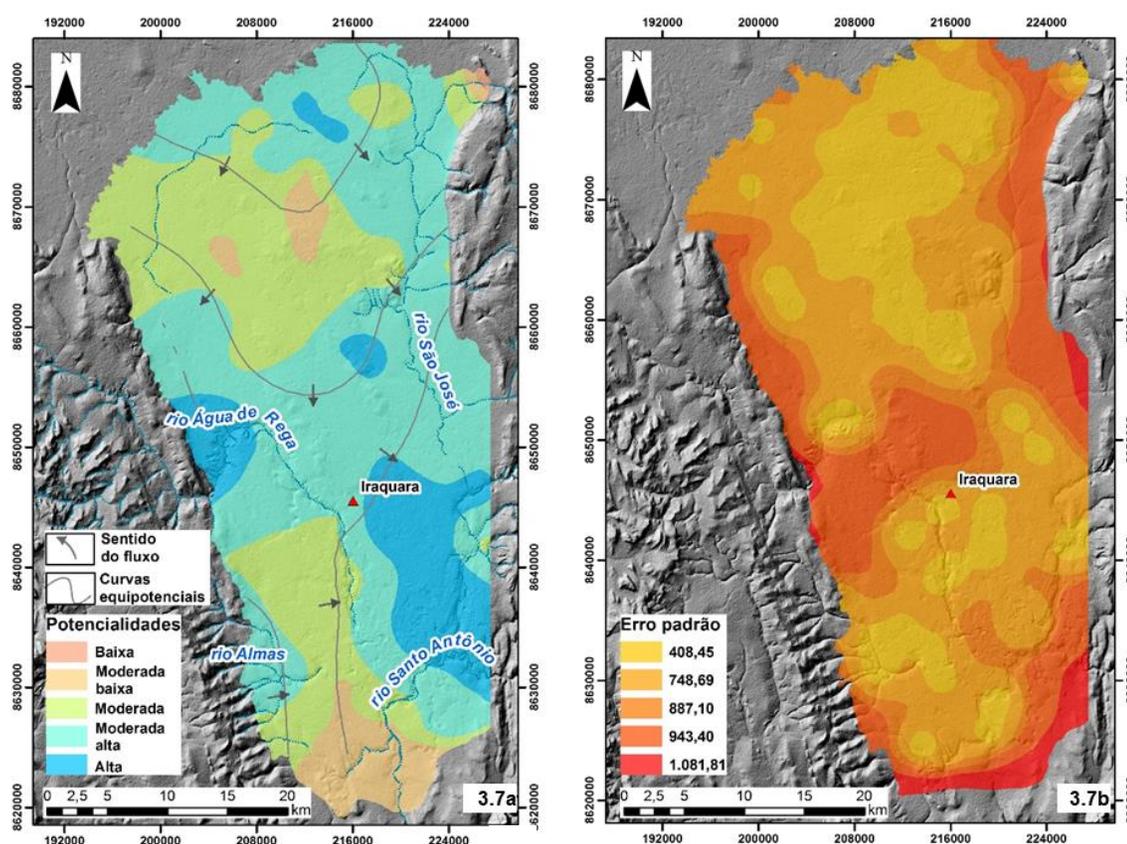


Figura 3.7a. Mapa de domínios de T para o ACSS. Figura 3.7b. Mapa representando os erros padrão das estimativas do modelo da figura 3.7a. *Figure 3.7a. Map of T domains for ACSS. Figure 3.7b. Map representing the standard errors of the model estimates of figure 3.7a.*

CONCLUSÕES

A transmissividade no aquífero cárstico da formação Salitre foi obtida a partir de dados de ensaios de bombeamento em 134 poços. A função da reta que representa o modelo da transmissividade em função da capacidade específica no ACS é dado pela equação $T_{emp} = 0,42.Sc^{1,08}$.

O modelo variográfico teórico exponencial, para os valores de T_{emp} , foi o que melhor se adaptou ao modelo experimental. A direção dos cones de variografia, principalmente o N 280, corresponde ao *trend* principal de desenvolvimento das cavidades naturais subterrâneas e dos fotoneamentos. Este cenário sugere que há uma forte relação entre os domínios mais produtivos do aquífero e as áreas mais carstificadas. Deste modo, pode-se inferir que os elementos que controlam a carstificação influenciam também no desenvolvimento das áreas mais produtivas do aquífero.

Ao espacializar os valores de T_{emp} no ACSS, foi possível individualizar cinco diferentes domínios em função de suas potencialidades. Observa-se que 92,87% da área do aquífero apresenta potencialidades variando entre moderadas a altas. Vale destacar que os rios Água de Rega, Almas e São José convergem para as zonas de potencialidade mais alta. Os dois primeiros chegam a ser capturados para o meio subterrâneo nestas zonas, corroborando com os resultados do modelo, já que o ambiente subterrâneo nestes domínios deve apresentar porosidade e permeabilidade mais elevadas, contribuindo para a captura da drenagem superficial.

Este trabalho apresentou um modelo empírico para transmissividade no ACSS, viabilizando a obtenção deste parâmetro através de testes simples de bombeamento, sem a necessidade de poços de observação. Este fato poderá contribuir, sobremaneira, para tomadas de decisão pelas entidades gestoras dos recursos hídricos na ACSS e demais partes interessadas, para além de permitir a identificação das áreas com diferentes potencialidades hídricas no local.

REFERÊNCIAS

AULER, A. S., FARRANT, A. R. A Brief Introduction to Karst and Caves in Brazil. Univer. Britl Speloca. Soc. Volume 20, 187-200, 1996.

AHMED, S.; D. MARSILY, G. Comparison of geostatistical methods for estimating transmissivity using data on transmissivity and specific capacity. **Water Resources Research**, Vol. 23, nº9, p. 1717-1737, 1987.

BRASIL. Ministério da Minas e Energia. Secretaria Geral. **Projeto RADAMBRASIL**, Folha SD24 Salvador. Mapa de Vegetação, Geologia, Geomorfologia e Solos. Rio de Janeiro, 1981.

CHOI, B.S. Determination of aquifer characteristics from specific capacity data of wells in Cheju Island. J. Korean Soc. **Groundwater Environ.** 6 (4), 180–187, 1999.

CPRM/CBPM. Geologia e Recursos Minerais do Estado da Bahia – Sistema de Informações Geográficas – SIG, escala 1:1.000.000, 2003.

DOMINGUES, J.M.L. As coberturas do cráton do São Francisco: uma abordagem do ponto de vista de análise de bacias. In: J.M.L. DOMINGUES, A. Misi, **O cráton do São Francisco**, v.1, 137-159. Salvador: SBG/SGM/CNPq, 1993.

EL-NAQA, A. Estimation of transmissivity from capacity data in fractured rock aquifer. **Environmental Geology**, vol. 23, nº1, p.73-80, 1994.

GALVÃO, P. H. F. Hydrogeological Conceptual Model of Sete Lagoas (MG) and Associated Implications of Urban Development in Karst Region. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 124p., 2015.

GUERRA, A. M. Processos de Carstificação e hidrogeologia do grupo Bambuí na região de Irecê- Bahia. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1986, 132 p.

GUIMARÃES, J.T. A formação Bebedouro no estado da Bahia: faciologia, estratigrafia e ambientes de sedimentação. Dissertação (mestrado). Instituto de Geociências - UFBA, Salvador, 1996.

HAMM, S. Y.; CHEONG, J. Y.; JANG, S.; JUNG, C. Y.; KIM, B. S. Relationship between transmissivity and specific capacity in the volcanic aquifers of Jeju Island, Korea. **Journal of Hydrology**, 310, pg 111 - 121, 2005.

HUNTLEY, D., NOMMENSEN, R., STEFFEY, D.. The use of specific capacity to assess transmissivity in fractured rock aquifers. **Ground Water** 30 (3), 396–402, 1992. I

BGE/SEI. Cartas Plani-Altimétricas do Estado da Bahia. Escala 1:100.000. 2003. INMET- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Normas Climatológicas. Brasília. Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), acessado em dezembro de 2015. < <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. Applied Geostatistics. New York: Oxford University Press, 561p. 1989.

JALLUDIN, M., RAZACK, M.. Assessment of hydraulic properties of sedimentary and volcanic aquifer systems under arid conditions in the Republic of Djibouti (Horn of Africa). **Hydrogeology Journal**, 12, 159–170, 2004.

LAGOEIRO, L.E. Estudo da deformação das sequências carbonáticas do grupo Una, na região de Irecê, Bahia. Dissertação (Mestrado), Ouro Preto: Escola de Minas, Departamento de Geologia – UFOP, 1990.

LUZ, J. A. G.; BASTOS LEAL, L. R.; BARRETO, F. S. Tratamento estatísticos dos dados dos poços da região do platô de Irecê-Ba. XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrânea, 2004, 18 p.

MACE, R. E. Determination of transmissivity from specific capacity tests in a karst aquifer. **Groundwater**, Vol. 35, nº 5, 1997.

MACE, R. E. Estimating transmissivity using specific data. **Bureau of Economic Geology**. The University of Texas at Austin. Austin, Texas, v. 01, p. 01-44, 2000.

MATHERON, G. Principles of Geoestistics. **Economic Geology**, v. 58, 1963.

MUSTAFA, S.; LAWSON, J. S. Review Tertiary Gambier Limestone aquifer properties, lower South-East, South Australian. The Department of Water, Land e Biodiversity Conservation. Report, 2002.

NEGRÃO, F. I. Caracterização Hidroquímica e Vulnerabilidade do Sistema Hidrogeológico Cárstico da Região de Irecê. Tese de doutoramento, USP, São Paulo – SP, 1987, 107p.

NOSSA, T. C. B.; BASTOS LEAL, L. R.; ZUCHI, M. R. Hidroquímica e índices de saturação dos minerais do sistema aquífero cárstico Salitre na região de Irecê- Lapão, Bahia, Brasil. Anais: II Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo, São Paulo, 2011.

VILANUEVA, T. C. B.; LEAL, L. R. B. L.; ZUCHI, M. R.; AZEVEDO, A. E. G.; MIRANDA, J. G. M.; VILANUEVA, P. R. Avaliação isotópica e hidroquímica do aquífero cárstico salitre na região de Irecê, Bahia. **Revista Brasileira de Águas Subterrânea**, v. 28, nº2, 2014, p. 82-94.

RAMOS, S. O.; ARAÚJO, H. A.; BASTOS - LEAL, L.R.; LUZ, J. A. G.; DUTTON, A. R. V. Variação temporal do nível freático do aquífero cárstico de Irecê - Bahia: contribuição para uso e gestão das águas subterrâneas no semi-árido. **Revista Brasileira de Geociências**, Vol. 37, nº 4, 2007.

RAZACK, M.; HUNTLEY, D. Assessing transmissivity from specific capacity in a large and heterogeneous alluvial aquifer. **Ground Water**, vol. 29, nº 6, p. 856-861, 1991.

RAZACK M.; LASM T. Geostatistical estimation of the transmissivity in a highly fractured metamorphic and crystalline aquifer (Man-Danane Region, Western Ivory Coast). **Journal of Hydrology**, 325 (2004), p 164 - 178.

SRIVASTAV, S. K.; LUBCZYNSKI, M. W.; BIYANI, A. K. On aquifer properties, ground water abstraction and recharge in Doon Valley, Uttaranchal. *Bhujal News: Special Issue-Uttaranchal 21* (in press), 2006.

THEIS, C.V. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage, *Am. Geophys. Union Trans.*, vol. 16, pp. 519-524, 1935.

THEIS, C. V. Estimating the transmissivity of a water-table aquifer from the specific capacity of a well. *US Geol Surv Water Suppl, Surv Water Suppl*, 1963.

VERBOVSEK, T. Estimation of transmissivity and hydraulic conductivity from specific capacity and specific capacity index in dolomite aquifers. **Journal of Hydrology**, 13:817-823, 2008.

CAPÍTULO IV

CONCLUSÕES

A presente dissertação vem a preencher uma lacuna no conhecimento hidrodinâmico quantitativo no Aquífero Cárstico Salitre nos domínios da Chapada Diamantina. Onde, até então, o conhecimento das zonas de transmissividade ainda não estavam definidos. Sendo este parâmetro crucial no conhecimento do potencial hídrico subterrâneo e estimativas de suas reservas.

No artigo I foi apresentado uma função empírica representativa para o ACS. Através desta função, o parâmetro transmissividade será calculado apenas com testes de capacidade específica. Assim, facilitando o cálculo deste parâmetro, em um meio hidrogeológico onde não é concebida a construção de poços de observação. Ao espacializar os dados através do método determinístico Inverso Ponderado da Distância, foi possível setorizar o aquífero em cinco domínios distintos, onde T varia na ordem de 1 a 500 m^2/dia , predominando variações entre 50 a 250 m^2/dia , ou seja, potencialidades baixas a moderadas. O IPD é um método determinístico, onde não é feita validação cruzada dos dados. No entanto, ao validar os dados através de análises descritivas observou-se os elevados erros implícitos ao método.

O artigo II apresenta uma modelagem distinta quando comparado ao artigo I. Entretanto, foi utilizado o mesmo método empírico para estimar a transmissividade. Os valores de T foram espacializados através da krigagem ordinária com o uso do modelo de variograma teórico exponencial. A validação cruzada dos valores estimados com os

valores calculados, demonstrou que nas zonas periféricas da área em estudo os erros associados a estimação são maiores.

Nos artigos apresentados houve emprego de métodos determinísticos e probabilístico para espacialização dos dados. Toda modelagem apresenta um erro implícito ao método, e, no estudo em questão, tem um agravante maior, a pequena escala e elevada heterogeneidade do meio. Assim, buscou-se compreender os erros por estimativas associados aos dois casos, ficando claro que a estimativa pela Krigagem apresentou dados mais confiáveis em relação aos valores interpolados pelo IPD. Isso se deve a dois motivos: a escala de trabalho na área do artigo II é menor, com relação ao artigo I, e ao interpolar os dados pela KO, como feito no segundo artigo, pode-se considerar de forma mais confiável as diferenças entre valores de dados vizinhos. Assim, considerando a possibilidade de quantificar as incertezas implícitas a modelagem, o segundo artigo apresentou resultados de maior confiabilidade.

Os valores de T_{emp} nos dois trabalhos mostram-se heterogêneos, apresentando coeficientes de variação de 1,32 para o ACS e 1,16 para o ACSS. Embora elevados, os valores de CV mostram-se próximos nos dois casos. No entanto, ao comparar os desvios percebe-se que no ACSS este parâmetro apresenta-se menor. Mesmo que a diferença entre quantidade de dados seja expressiva, estimando-se em até dez vezes mais o número de poços do ACS em comparação ao ACSS. Logo, o fator que controla a qualidade na resposta descritiva dos dados está na homogeneidade do meio geológico em questão.

Para o presente trabalho foram utilizados uma gama expressiva de poços representativa para todas as porções do aquífero. No entanto, há necessidade de

implementar uma rede de monitoramento com objetivo de fornecer uma série histórica acerca da hidráulica do aquífero.

APÊNDICE A – JUSTIFICATIVA DA PARTICIPAÇÃO DOS

CO-AUTORES

Luiz Rogério Bastos Leal – Orientador.

Ricardo Fraga Pereira – Participação nas discussões dos trabalhos e revisão dos artigos.

Jean Carlos Santana Ferreira – Participação no tratamento dos dados.

Lucas de Queiroz Salles – Contribuições nas discussões do artigo.

ANEXO A – REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA

Diretrizes para Autores

Cadastro

Entrar na página da revista: <http://aguassubterraneas.abas.org/>
Clicar em “CADASTRO” e preencher o formulário. Não esquecer de ativar as caixas de “LEITOR” e “AUTOR”

Submissão

1. Entrar na página da revista: <http://aguassubterraneas.abas.org/> e clicar em “PÁGINA DO USUÁRIO”
2. Clicar em “AUTOR”
3. Na página “SUBMISSÕES ATIVAS”, clicar em “Clique aqui para iniciar o processo de Submissão” (final da página) ou em “NOVA SUBMISSÃO” (coluna à direita).
4. Na página seguinte: “PASSO 1. INICIAR SUBMISSÃO”, ativar a caixa “DECLARAÇÃO DE DIREITO AUTORA” e escolher a seção apropriada para a submissão (= “ARTIGOS”).
5. Clicar em “SALVAR E CONTINUAR”
6. Na página seguinte: “PASSO 2. METADADOS DA SUBMISSÃO (INDEXAÇÃO)”, incluir os nomes dos autores e seus respectivos e-mails.
7. Complete o resto do formulário com os dados do artigo: Título, resumo, abstract, indexação e agência de fomento.
8. Clicar em “SALVAR E CONTINUAR”
9. Na página seguinte: “PASSO 3. TRANSFERÊNCIA DO MANUSCRITO”, leia os itens 1 a 5 e, principalmente, o texto vinculado ao link “Assegurando uma Avaliação Cega segura”
10. Para transferir o arquivo, clicar em “PROCURAR”. Na janela “PROCURAR ARQUIVO” selecionar o arquivo e clicar em “ABRIR”. O nome do arquivo aparecerá ao lado do botão Browse. Clicar em “TRANSFERIR”.
11. Sob o título “DOCUMENTO DE SUBMISSÃO”, aparecerão os dados do arquivo. Por exemplo:

Nome	do	documento:	9588-29437-1-SM.doc	
Nome	original	do	Documento:	Drumond.doc
Tamanho	do	Documento:	19KB	
Data de transferência:	2007/10/19 11:48 AM			
12. Conferir os dados e clicar em “SALVAR E CONTINUAR”
13. Na página seguinte: “PASSO 4. TRANSFERÊNCIA DE DOCUMENTOS SUPLEMENTARES”, repetir os passos do item “TRANSFERÊNCIA DE ARQUIVOS”, caso tenha algum documento suplementar a ser enviado.
14. Clicar em “SALVAR E CONTINUAR”
15. Na página seguinte: “PASSO 5. CONFIRMAÇÃO DA SUBMISSÃO”. Conferir os dados informados em “RESUMO DE DOCUMENTOS” e clicar em “CONCLUIR SUBMISSÃO”

Visualização do Andamento da Submissão

1. O autor poderá acompanhar o andamento da avaliação. Para isso, basta acessar o sistema, localizar o nome do artigo submetido e clicar no link da coluna “SITUAÇÃO”, por exemplo: “Em fila para Avaliação”

2. Os arquivos com os comentários dos revisores estarão disponíveis para leitura ou para baixar no computador, em “POR PARES”. Basta clicar no nome do “DOCUMENTO TRANSFERIDO”, que surgirá a opção para abrir ou baixar o arquivo.

Orientações para Preparação do Artigo

O trabalho submetido para avaliação preliminar deverá ser submetido em programa Word for Windows ou compatível, fonte Arial, tamanho 12, espaçamento duplo, em papel A4, margens de 2,5 cm, sem numeração de páginas e ter, no máximo, 20 páginas, já incluindo figuras e tabelas.

O documento deverá ter a numeração de linhas visível e contínua a partir do seu título, visando acelerar o processo de revisão pelos pares.

IMPORTANTE: O(s) nome(s) do(s) autor(es), sua(s) instituição(ões) e endereço(s) para correspondências NÃO DEVEM CONSTAR do texto, a identificação do trabalho será feita pelo preenchimento dos metadados da submissão e pelo número de identificação gerado automaticamente. Referências a publicação(ões) do(s) autor(es) dentro do texto ou na lista de referências devem aparecer somente como "AUTOR", de modo a garantir uma avaliação cega segura.

Serão aceitos trabalhos em **Português, Espanhol e Inglês** e serão publicados no idioma em que foi redigido originalmente. Os artigos deverão, obrigatoriamente, apresentar resumo em Português e Inglês. Além disso, caso o idioma escolhido não seja o Português, o título deverá obrigatoriamente ser apresentado secundariamente nesse idioma, sendo mantido o título original no idioma do artigo. O **título** do trabalho, com no máximo 140 toques, deverá aparecer na primeira página do trabalho, sem a identificação do(s) autor(es).

Antecedendo o texto serão apresentados dois **resumos** em Português e Inglês. Para trabalhos redigidos em Espanhol, o segundo resumo será em Português e o terceiro em Inglês. O resumo deverá ser redigido em parágrafo único, variando entre 1.000 a 1.500 toques, apresentando de forma breve e objetiva a justificativa do trabalho, os métodos utilizados, os resultados e as conclusões. Após o resumo, incluir obrigatoriamente uma lista de até cinco palavras-chave que expressem o assunto do trabalho.

O texto deverá ser redigido de forma impessoal, objetiva, clara, precisa e coerente.

O título do trabalho, bem como os das tabelas e figuras deverão ser apresentados no idioma do trabalho e em Inglês. As abreviaturas deverão ser identificadas, por extenso, na primeira vez que aparecem no texto. As unidades das grandezas numéricas deverão obedecer aos padrões do Sistema Internacional de Unidades (SI).

As **tabelas** serão numeradas seqüencialmente e inseridas normalmente dentro do texto. O título deve ser claro e conciso e colocado no topo da tabela. Outras informações relativas à tabela (origem dos dados, observações, etc.), serão colocadas logo abaixo da tabela, com espaçamento simples e fonte de tamanho menor que a do texto principal.

As **figuras** (mapas, fotos, perfis, esboços, gráficos, diagramas, etc.), devem ser numeradas seqüencialmente. O título deve ser claro e conciso e colocado na base da figura. Outras informações relativas à figura (legenda, origem dos dados, observações, etc.), serão colocadas logo abaixo da figura, com espaçamento simples e fonte de tamanho menor que a do texto principal. As figuras devem ser preparadas em alta resolução (maiores que 1Mb). Para uma boa legibilidade, os símbolos e caracteres de texto das figuras devem ter tamanho mínimo de 1 mm, mesmo após a redução da figura.

As citações mencionadas no texto devem ser indicadas pelo sistema Autor-Data, obedecendo a norma ABNT NBR 10.520 (agosto/2002), ou a que estiver vigente.

Informações Adicionais

Ao submeter o artigo à Revista Águas Subterrâneas, os autores declaram conjuntamente que consentem com a publicação do trabalho, com aceitação das recomendações dos relatores e a confirmação de não publicação em nenhum outro veículo enquanto estiver sendo avaliado pelos membros do Corpo Consultivo da revista.

A avaliação dos manuscritos é duplamente cega, isto é, tanto os avaliadores quanto os autores não tem acesso às identidades uns dos outros. O trabalho será submetido a pelo menos 3 (três) avaliadores, os quais emitirão pareceres independentes recomendando ou não sua publicação, havendo ou não a necessidade de revisão do texto. Em caso de trabalho não aceito, será feito um comunicado aos autores informando, sucintamente, o motivo da recusa para publicação.

Após a adaptação do texto às recomendações dos avaliadores e editores, os autores enviarão ao Comitê Editorial uma cópia em meio digital para a análise final do trabalho. Os editores reservam-se o direito de fazer adaptações na forma do texto para manter a uniformidade da revista.

Antes da impressão da revista, os editores disponibilizarão no próprio sistema uma prova do trabalho para verificação e correção de possíveis erros de digitação e/ou diagramação. Nesta etapa, não serão admitidas quaisquer alterações no conteúdo do texto. Os autores deverão se manifestar sobre a aceitação da prova no prazo de 5 (cinco) dias. Excedido esse prazo, o artigo será considerado pronto para impressão.

Condições para submissão

Como parte do processo de submissão, os autores são obrigados a verificar a conformidade da submissão em relação a todos os itens listados a seguir. As submissões que não estiverem de acordo com as normas serão devolvidas aos autores.

1. Este documento submetido para a Revista Águas Subterrâneas é original, não tendo sido publicado no todo ou em parte em outro periódico ou anais de evento

Declaração de Direito Autoral

Direitos Autorais para artigos publicados nesta revista são do autor, com direitos de primeira publicação para a revista. Em virtude de aparecerem nesta revista de acesso público, os artigos são de uso gratuito, com atribuições próprias, em aplicações educacionais e não-comerciais.

Política de Privacidade

Os nomes e endereços de email neste site serão usados exclusivamente para os propósitos da revista, não estando disponíveis para outros fins.


[Capa](#) > [Usuário](#) > [Autor](#) > [Submissões](#) > #28940 > [Resumo](#)

CAPA

SOBRE

PÁGINA DO USUÁRIO

PESQUISA

ATUAL

ANTERIORES

RESUMOS DE TESES

TUTORIAIS EM VÍDEO

ABAS

AJUDA DO SISTEMA

#28940 Sinopse

[RESUMO](#) [AVALIAÇÃO](#) [EDIÇÃO](#)

Submissão

Autores	Thiago Dos Santos Gonçalves, Luiz Rogério Bastos Leal		
Título	POTENCIALIDADES HÍDRICAS NO AQUIFERO CARSTICO SALITRE NA REGIÃO DE IRECÊ, BAHIA		
Documento original	28940-106683-1-SM.DOCX	19-09-2017	
Docs. sup.	Nenhum(a)		INCLUIR DOCUMENTO SUPLEMENTAR
Submetido por	Sr Thiago Dos Santos Gonçalves		
Data de submissão	19 de setembro de 2017 - 12:11		
Seção	Artigos		
Editor	Nenhum(a) designado(a)		

Situação

Situação	Aguardando designação
Iniciado	19-09-2017
Última alteração	19-09-2017

Metadados da submissão

[EDITAR METADADOS](#)

Autores

Nome	Thiago Dos Santos Gonçalves
Instituição/Afiliação	Universidade Federal da Bahia
País	Brasil
Resumo da Biografia	Programa de Pós Graduação em Geologia - UFBA
Contato principal para correspondência.	
Nome	Luiz Rogério Bastos Leal
Instituição/Afiliação	Universidade Federal da Bahia
País	Brasil
Resumo da Biografia	Departamento de Geofísica.

Título e Resumo

Título	POTENCIALIDADES HÍDRICAS NO AQUIFERO CARSTICO SALITRE NA REGIÃO DE IRECÊ, BAHIA
Resumo	Os aquíferos cársticos apresentam propriedade hidráulicas peculiares, dificultando a aquisição de parâmetros hidráulicos, como a transmissividade - T , pelos métodos analíticos concebidos atualmente. Assim, este trabalho propõe estimar T no Aquífero Cárstico Salitre - ACS na região de Irecê através de dados de Capacidade Específica - Sc . Para isto foram processados dados de 213 testes de bombeamento, sendo estes, utilizados dos métodos de recuperação de Theis e da avaliação do rebaixamento para estimar T e Sc , respectivamente. Sendo possível a comparação entre esses dois parâmetros, pelo Modelo de Regressão Linear - MRL, e assim, determinar a função empírica, característica para o ACS. Após estabelecido o modelo empírico, foram utilizados valores de Sc extraídos de 1.334 ensaios de bombeamento, e, assim, calculado os valores de em função de . Os valores de foram espacializados resultando em cinco diferentes domínios de produtividade, demonstrando que o ACS apresenta-se predominantemente com potencialidades moderadamente baixas. Este trabalho apresentou uma importante ferramenta na concepção de T no ACS e sua disposição espacial. Portanto, uma importante ferramenta para entidades gestoras de perfuradores de poços da região

Indexação

Palavras-chave	Transmissividade; Capacidade Específica; Aquífero Cárstico Salitre; Potencialidades.
Idioma	pt

Agências de fomento

Agências	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES; Programa de Pós Graduação em Geologia - UFBA; Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e do Meio Ambiente - NEHMA.
----------	--

A revista Águas Subterrâneas é uma publicação da Associação Brasileira de Águas Subterrâneas - ABAS - para divulgação de artigos científicos sobre Hidrogeologia e outros temas pertinentes.

A Revista Águas Subterrâneas é um periódico com classificação QUALIS Nacional e Internacional.

A Revista Águas Subterrâneas não cobra dos autores quaisquer taxas para submissão ou publicação.

É de LIVRE acesso a todos os interessados, gratuitamente.

ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, São Paulo, Brasil

IDIOMA

PATROCINADORES

HIDROPLAN

CONHEÇA AS OPORTUNIDADES

unesp

USUÁRIO

 Logado como:
thiagogoncalves

- Perfil
- Sair do sistema

NOTIFICAÇÕES

- Visualizar
- Gerenciar

AUTOR

 Submissões

- Ativo (1)
- Arquivo (0)
- Nova submissão

CONTEÚDO DA REVISTA

 Pesquisa

Escopo da Busca

Todos

Pesquisar

 Procurar

- Por Edição
- Por Autor
- Por Título

TAMANHO DE FONTE

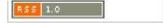
INFORMAÇÕES

- Para Leitores
- Para Autores
- Para Bibliotecários

EDIÇÃO ATUAL



eISSN 2179-9784 (eletrônico)
ISSN 0101-7004 (impresso)



Filiada:



Revista Águas Subterrâneas está licenciada com uma Licença Creative Commons - Atribuição 4.0 Internacional.

Todos aqueles que se cadastram na Revista Águas Subterrâneas tornam-se *filia*dos da ABAS gratuitamente, podendo usufruir de descontos em eventos e material técnico. Por extensão, tornam-se também associados do Capítulo Brasileiro da Associação Internacional de Hidrogeólogos*, podendo também usufruir de descontos em eventos internacionais da IAH e outras ofertas. O acesso à revista é livre e independente do cadastramento.

*Clique [aqui](#) para saber maiores detalhes e limitações dos filiados.