

# Aplicação de sensoriamento remoto e análise espacial em alinhamentos geológicos como indicador da potencialidade de acumulação de águas subterrâneas

## RESUMO

**Paulo Sérgio de Rezende Nascimento**

[psrn.geologia@gmail.com](mailto:psrn.geologia@gmail.com)

[orcid.org/0000-0002-4929-7373](https://orcid.org/0000-0002-4929-7373)

Universidade Federal de Sergipe (UFS),  
São Cristóvão, Sergipe, Brasil.

**Nicole Príncipe Carneiro da Silva**

[nicoleprincipe@gmail.com](mailto:nicoleprincipe@gmail.com)

[orcid.org/0000-0002-0013-5592](https://orcid.org/0000-0002-0013-5592)

Universidade Federal de Sergipe (UFS),  
São Cristóvão, Sergipe, Brasil.

Os alinhamentos geológicos representam sistemas de fraturamento que possibilitam a infiltração, percolação e acumulação de águas subterrâneas em terrenos cristalinos, formando os aquíferos fraturados. A exploração de águas subterrâneas nestes aquíferos é condicionada à densidade de fraturamento das rochas cristalinas, como no caso do Agreste Sergipano. Dessa forma, o objetivo do presente trabalho foi identificar as áreas propícias ao armazenamento de águas subterrâneas através da espacialização dos alinhamentos geológicos, visando definir a potencialidade de acumulação de água subterrânea nos aquíferos fraturados do Agreste Sergipano. Foram extraídos os alinhamentos geológicos de relevo e drenagem no Modelo Digital de Elevação (MDE) e na rede de drenagem das bacias hidrográficas da área de estudo; e a consecutiva espacialização das densidades desses alinhamentos pelo interpolador Kernel. A aplicação desse interpolador possibilitou a espacialização de cinco classes de densidade de lineação, indicando a maior ou menor potencialidade de armazenamento de água subterrânea nos aquíferos fraturados das bacias hidrográficas no Agreste Sergipano. Concluiu-se que as bacias hidrográficas dos rios Japarutuba, Sergipe e Vaza Barris apresentaram as maiores potencialidades hidrogeológicas do que as bacias dos rios Piauí, Real e São Francisco nos terrenos cristalinos da área de estudo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Aquífero Fraturado. Modelo Digital de Elevação. Interpolador Kernel. Densidade de Lineamento.

## INTRODUÇÃO

Incluído no Polígono das Secas, a região Agreste do Estado de Sergipe, apresenta um regime pluviométrico marcado pela irregularidade de chuvas, cujos efeitos catastróficos estão registrados desde os primórdios da história do Brasil. Esse cenário de escassez de água constitui um forte entrave ao desenvolvimento socioeconômico e à subsistência da população. Fato preocupante é a captação de água subterrânea de forma inadequada nas rochas cristalinas. É importante ressaltar que em terrenos geológicos de rochas cristalinas, os aquíferos fraturados são as principais fontes de disponibilidade de água e a delimitação do potencial dessas fontes hidrogeológicas é um problema perene (ANDRADE, 2014).

No entanto, o desperdício de recursos financeiros públicos investidos em aquíferos em terrenos cristalinos é significativo no Estado de Sergipe (ROCHA; LESSA, 2010; BRITO *et al.*, 2012). Há um desperdício significativo de recursos financeiros públicos na execução de poços tubulares, perfurados como medidas emergenciais desde o início do século passado, e que se encontram desativados e abandonados. No entanto, esse quadro pode ser modificado com estudos hidrogeológicos regionais e específicos.

O aprofundamento dos estudos em aquíferos fraturados é necessário para o melhor entendimento sobre a disponibilidade hídrica dos aquíferos fraturados, gerando assim, conhecimento para consolidar políticas confiáveis de gerenciamento integrado de recursos hídricos. Dessa forma, é imperativo o conhecimento teórico-prático da dinâmica desde as áreas de recarga até a definição de áreas propícias à perfuração de poços tubulares. Nesse contexto, a delimitação de áreas propícias à acumulação de águas subterrâneas no Agreste Sergipano é primordial para direcionar os recursos financeiros públicos e privados de forma adequada.

O mapeamento de estruturas geológicas contribui para o entendimento dos processos de migração e da gênese das ocorrências de acumulações de águas subterrâneas. As pesquisas em aquíferos fraturados precisam de investigações contínuas e detalhadas devido à alta variabilidade do sistema de fraturamento (RUSHTON; WELLER, 1985; MORIN *et al.*, 1997; EDET *et al.*, 1998; SINGHAL; GUPTA, 2010; AL-MUQDAD; MERKEL, 2012; CHUMA *et al.*, 2013; FASHAE *et al.* 2014; ZAWAWI *et al.*, 2015; AGBOTUI *et al.*, 2017). Nesse sentido, diversas pesquisas estão sendo realizadas e publicadas, principalmente empregando técnicas de sensoriamento remoto, geoprocessamento e análise espacial de lineamentos/lineações estruturais, nos estudos dos aquíferos fraturados.

Em hidrogeologia, os sistemas de fraturamento são interpretados como porosidades e permeabilidades secundárias penetrativas e distensivas, isto é, possuem uma continuidade em profundidade que permitem a infiltração (recarga) das águas pluviométricas, podendo formar reservatórios de águas subterrâneas (aquíferos fraturados). Neste sentido, a análise e a espacialização, por interpolação Kernel, da densidade das lineações de drenagem e relevo proporciona identificar a probabilidade de ocorrência de água subterrânea em ambientes geológicos cristalinos. É importante ressaltar que quanto maior a densidade de lineações, maior é o grau de fraturamento da rocha, conseqüentemente, maior é a probabilidade de recarga em aquíferos fissurais.

Nesse sentido, o objetivo desse trabalho foi identificar as áreas propícias ao armazenamento de águas subterrâneas através da espacialização dos alinhamentos geológicos, empregando o interpolador Kernel nas lineações de drenagem e relevo, visando definir a potencialidade do armazenamento de água subterrânea dos aquíferos fraturados no Agreste Sergipano.

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Os aquíferos são influenciados pelos processos de infiltração, escoamento e acumulação da água subterrânea e pelas características intrínsecas das rochas, como permeabilidade primária e secundária. A permeabilidade secundária forma-se pelo processo de dissolução de rochas calcárias e pelo fraturamento das rochas ígneas e metamórficas (AZEVEDO; ALBUQUERQUE FILHO, 2013), originando os aquíferos cársticos e fraturados, respectivamente. O armazenamento de água subterrânea nas rochas cristalinas depende da porosidade e permeabilidade secundárias formadas pela intensidade de fraturamento (REBOUÇAS, 1975). Esta é interpretada, em produtos sensoriados remotamente, pela densidade de lineações de relevo e drenagem.

A maior capacidade de captação de águas subterrâneas em aquíferos fraturados está condicionada a maior densidade do fraturamento nas rochas cristalinas (NASCIMENTO, 2016). As feições geológicas lineares e curvilíneas de relevo e drenagem representam sistemas de fraturamento e são facilmente identificadas nas imagens de satélite de sensores ópticos e de radares, como por exemplo, SPOT, Landsat, ALOS e IRS (GUSTAFSSON, 1994; MABEE *et al.*, 1994; ROEHE, P. A.; SANDER *et al.*, 1996; MEIJERINK, 2009; AHLERT, 2011; PREEJA *et al.*, 2011; NAG; GHOSH, 2011). Após a identificação e extração dessas feições geológicas nos dados de sensoriamento remoto, por interpretação visual ou processos automáticos, são interpretadas como lineamentos estruturais.

Os lineamentos estruturais são alinhamentos geológicos unidimensionais (O'LEARY *et al.*, 1976) e são comumente avaliados com relação à sua densidade e comprimento, e interpretados como áreas de infiltração, percolação e armazenamento de água subterrânea em rochas cristalinas (SANDER, 1997). Em hidrogeologia, esses sistemas são interpretados como pseudoporosidades penetrativas, isto é, possuem uma continuidade em profundidade, que permitem a infiltração das águas pluviais, podendo formar reservatórios de águas subterrâneas (aquíferos fraturados).

Os lineamentos representam as respostas das rochas aos processos endógenos e exógenos a que foram submetidas (NASCIMENTO *et al.*, 2008). A análise dessa geodinâmica reflete a maior ou a menor probabilidade de infiltração e escoamento da água precipitada e seu provável acúmulo no interior do sistema de fraturas, formando os aquíferos fraturados. Parte-se do pressuposto que a partir do final do Jurássico, os processos tectônicos de magnitudes apreciáveis resultaram em falhamentos e fraturamentos de abertura crustal (CAMPOS, 2004), originando fraturas apropriadas para infiltração, percolação e acumulação de água subterrânea em terrenos geológicos cristalinos.

As feições lineares retilíneas representam sistemas de fraturas verticais em subsuperfície e representam linhas de fraqueza crustal proterozoicas, reativadas por processos tectônicos e neotectônicos distensivos. Desta forma, esses

processos formaram descontinuidades nas rochas cristalinas (SINGHAL; GUPTA, 2010), facilmente identificáveis em produtos sensoriados remotamente pelos alinhamentos ou lineamentos geológicos. Por outro lado, as feições ligeiramente a medianamente curvilíneas representam a intersecção de planos de fraturas com médios a baixos mergulhos, por efeito erosivo, e normalmente resultam de deformação localizada, como dobras flexurais. Nesse caso, comprometem a definição de antigas linhas de fraqueza reativadas (ARAÚJO *et al.*, 2003).

O fluxo e o armazenamento de águas subterrâneas por porosidade fissural são resultantes das estruturas planares (FEIJÓ; CAMPOS, 2016), que representam sistemas de fraturamento verticais que se estendem por até centenas de quilômetros e representam linhas de fraqueza crustal reativadas por processos distensivos (MADRUCCI *et al.*, 2003). Dessa forma, as condições de infiltração, percolação e acumulação de água subterrânea são inferidas segundo prioridades da densidade de lineamentos estruturais ou alinhamentos geológicos (VENEZIANI; ROCIO, 1991). A densidade de lineamentos estruturais podem ser espacializados pelo estimador Kernel.

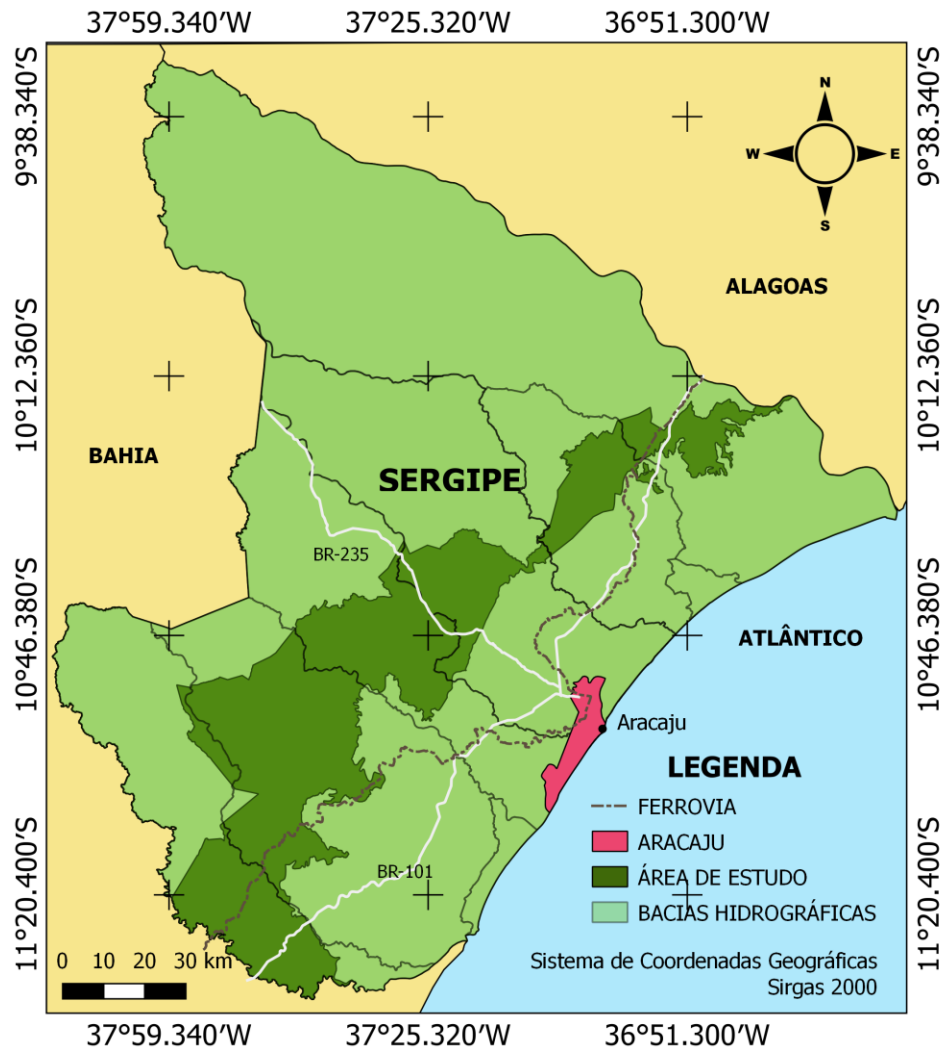
O estimador Kernel é um interpolador que possibilita estimar o evento em toda a área, mesmo onde o processo não tenha gerado nenhuma ocorrência. A estimativa de densidade Kernel é uma forma não-paramétrica para estimar a função de probabilidade de uma variável aleatória (WAND; JONES, 1995). As linhas dos lineamentos são transformadas em intensidades pontuais que definem curvas de isovalores ponderados pela distância em relação a um valor central. A estatística não paramétrica, por meio da função núcleo, é um interpolador em valor de intensidade para cada célula de uma grade (BARBOSA *et al.*, 2014), em função do valor do comprimento de um alinhamento geológico (LANDIM, 2003). Assim, as lineações de relevo e drenagem linhas dos lineamentos são transformadas em intensidades pontuais que definem curvas de isovalores ponderados pela distância em relação a um valor central.

NASCIMENTO *et al.* (2017) empregaram o interpolador Kernel para espacializar a densidade de lineamentos de drenagem e relevo para definir o grau de fraturamento das rochas cristalinas no semiárido do estado de Sergipe. Os autores constataram que rochas cristalinas estão fortemente, medianamente e fracamente fraturadas, indicando diferentes probabilidades de ocorrência de acumulação de águas subterrâneas.

## ÁREA DE ESTUDO

O Agreste Sergipano, área de estudo desse trabalho, está localizado entre os paralelos 10°15'24" e 11°28'36" de latitude Sul e meridianos 36°40'18" e 37°58'32" de longitude Oeste (Figura 1). O principal acesso à área a partir da capital Aracaju é pela BR-235.

Figura 1 - Mapa de localização e acesso à área de estudo



Fonte: Autoria própria (2019).

A região Agreste Sergipana é classificada como zona climática Tropical Sub-úmido ou de Transição Semiárida, limitada a leste e oeste pelas zonas climáticas Tropical Úmido e Semiárido, respectivamente (ESTADO DE SERGIPE, 2014). No Agreste Sergipano, a taxa média anual de precipitação é a metade da taxa média anual de evaporação (1.000mm/ano e 2.000mm/ano), apresentando uma estação de inverno chuvosa entre os meses de março e agosto. A temperatura média anual é de 25°C com temperatura mínima de 20°C e máxima de 32°C, e taxa de umidade de aproximadamente 70% (SANTOS *et al.*, 2014). Prevalece a influência de ventos alísios, brisas marinhas e frentes vindas do Sudeste, acrescidos dos ventos barostróficos, resultantes de presença de maiores elevações, como as áreas serranas (PINTO; AGUIAR NETO, 2008).

A forma de relevo predominante é a transição entre o Tabuleiro Costeiro e Pediplano Sertanejo, composto por uma variedade de solos (Neossolo Quartzareno, Neossolo Litólico e Neossolo Flúvico, Planossolo Nátrico, Chernossolo, Argissolo e Luvisolo, com presença de resquícios de florestas caducifólias caatinga hipoxerófila (arbustiva arbórea) e hiperxerófila (arbustiva) (EMBRAPA, 2009; INCRA, 2017).

A geologia do Agreste Sergipano abrange as províncias tectônicas Cráton do São Francisco e Borborema (ALMEIDA *et al.*, 1977), representadas pelo Embasamento Gnáissico do Arqueano-Paleoproterozoico, constituído por aquíferos de natureza fissural de reduzida potencialidade hídrica e pela Faixa de Dobramentos Sergipana do Mesoproterozóico-Neoproterozóico, respectivamente (OLIVEIRA *et al.*, 2010), composto por aquíferos livres de natureza fissural similar aos aquíferos cristalinos. Diferenciam-se destes, entretanto, por vazões mais elevadas e por menor salinização de suas águas (RESENDE *et al.*, 2009).

O Embasamento Gnáissico é compartimentado pelo Cráton do São Francisco abrangendo: (i) o Complexo Gnáissico-migmatítico formado por Augen-gnaisses de composição granítica, biotita-ortognaisses tonalíticos, granodioríticos, associação ortognáissica ácido-básica migmatítica e lentes de quartzitos; (ii) o Complexo Granulítico constituído por ortognaisses charnoenderbíticos e charnockíticos, kinzigitos, rochas calcissilicáticas e metanoritos; e o Vulcanismo de Arauá representado por diques de riolitos e dacitos e subordinadamente de basaltos/diabásios e traquitos; e (iii) o Complexo Gnáissico-migmatítico dos Domos de Itabaiana e Simão Dias compostos por ortognaisses e gnaisses bandados granítico-granodioríticos, migmatitos e localmente anfíbolitos e gabros, retrabalhados no Neoproterozóico (SANTOS *et al.*, 2001).

A Faixa de Dobramentos Sergipana constitui-se numa região orogênica subdividida em seis domínios litotectônicos denominados de Estância, Vaza-Barris, Macururé, Marancó, Poço Redondo e Canindé (DEL'REY SILVA, 1995; UHLEIN *et al.*, 2011). O Domínio Estância, composto por sedimentos predominantemente psamíticos. O Domínio Vaza-Barris, da base para o topo, compõe-se de metassedimentos dos Grupos Miaba, Simão Dias e Vaza-Barris. O Domínio Macururé é formado pelo Grupo Macururé composto por seis litofácies (micaxistos, metassiltitos, metagrauvas, metarenitos, metarritmitos e metavulcanitos). O Domínio Marancó compreende variados litótipos subdivididos nas Unidades Monte Azul (metassiltitos e filitos), Monte Alegre (metarritmitos, metavulcanitos andesíticos e dacíticos), Morro do Bugi (metaconglomerados milonitizados) e Minuim (metarritmitos, metarriolitos e metaultramafitos). O Domínio Poço Redondo é formado por uma sequência de ortognaisses tonalito-granodioríticos migmatizados (Complexo Migmatítico de Poço Redondo). O Domínio Canindé é constituído por rochas metavulcano-sedimentares do Complexo Canindé, individualizado nas Unidades Gentiliza (metavulcanitos milonitizados), Novo Gosto (metabasaltos) e Mulungu (ultramafitos) e pela Suíte Intrusiva Canindé (SANTOS *et al.*, 2001).

## MATERIAL E MÉTODO

Os materiais necessários para o desenvolvimento desse trabalho foram os dados digitais nos formatos vetoriais (mapas da rede de drenagem, bacias hidrográficas, divisão climática e de geologia, este na escala 1:250.000 e os demais na escala 1:100.000) e matriciais (Imagens dos satélites Landsat-8 e SPOT-5 e Modelo Digital de Elevação, que representa as elevações da superfície do terreno) do Estado de Sergipe, disponibilizados gratuitamente no Banco de Dados Georreferenciados do Atlas Digital Sobre Recursos Hídricos de Sergipe (SEMARH, 2014); e os programas computacionais de geoprocessamento Sistema de Processamento de Informações Geo-referenciadas (SPRING) do Instituto Nacional

de Pesquisas Espaciais (INPE) e o QGIS da *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo). Os procedimentos de edição e digitalização vetorial foram realizados no SPRING e a interpolação por Kernel e confecção dos mapas, no QGIS.

O primeiro procedimento foi definir o esquema conceitual associado às entidades do Banco de Dados Geográficos (BDG) no SPRING, ou seja, as representações geométricas associadas aos modelos de dados, pois a estruturação do banco precede a entrada dos dados. Essa forma de organização permite o armazenamento e recuperação eficiente dos dados. Nessa etapa define-se o sistema de projeção cartográfica, no caso: Projeção UTM/SIRGAS-2000/FUSO-24. Realizada essa etapa, os dados foram importados para o BDG e delimitou-se a área de estudo, cruzando o limite do Agreste Sergipano em terrenos de rochas cristalinas com as bacias hidrográficas dos rios Piauí, Real, Vaza Barris, Sergipe, Japarutuba e São Francisco. Na delimitação da área de estudo, foram realizados ajustes vetoriais entre os mapas de geologia e divisão climática para englobar as rochas cristalinas com o agreste sergipano, pois neste último há porções do Grupo Barreiras, rocha sedimentar arenítica formadora de aquífero granular, fora do escopo desse trabalho.

O segundo procedimento consistiu na análise visual de imagens (VENEZIANI; ANJOS, 1982), ou seja, na identificação/mapeamento e na consecutiva extração das lineações de relevo e de drenagem, pelas quebras positivas (altitudes altas) e negativas (altitudes baixas) do Modelo Digital de Elevação (MDE) e das redes de drenagens das bacias hidrográficas supracitadas. Este procedimento pode ser realizado por extração automática de feições lineares, no entanto, optou-se pela vetorização manual, visto que as feições ocorrem de forma complexa. Nesse sentido, foi possível obter o máximo possível de lineações sem mascarar ou evidenciar determinados lineamentos, limitações típicas de extração automática.

Findada a extração das lineações de relevo e drenagem, o produto gerado foi avaliado qualitativamente pela interpretação visual (VENEZIANI; ANJOS, 1982). Após a avaliação visual, o número de total de lineações e a área de estudo foram computados automaticamente. Em sequência, calculou-se a área de cada bacia hidrográfica e o total de lineações por bacia hidrográfica do agreste sergipano. Esses cálculos são procedimentos usuais em geoprocessamento. A partir desses resultados, as densidades de lineações por bacias hidrográficas foram determinadas pela razão entre o comprimento das lineações de relevo e drenagem das bacias hidrográficas e a área de cada bacia.

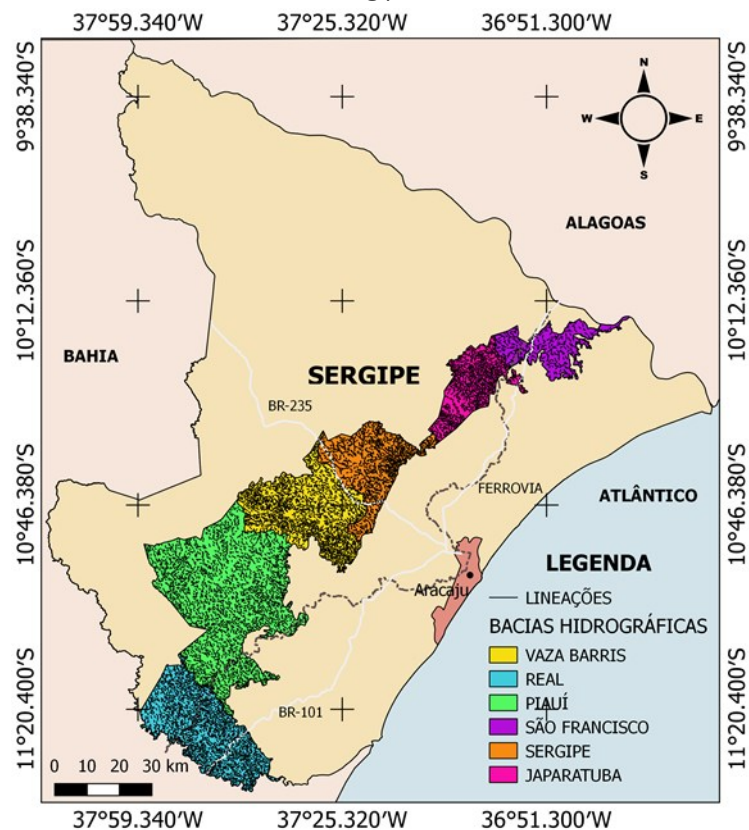
Os dados de lineamentos geológicos foram exportados do SPRING em formato *shapefile* e importados para o QGIS, visando espacializar as densidades de lineações de drenagem e relevo (fotointerpretação) pelo interpolador Kernel e elaborar o leiaute dos mapas temáticos. Dentre as funções e rotinas do QGIS, destacam-se a facilidade, rapidez e acurácia para realizar o modelo estatístico de estimação de curvas de densidades por Kernel. Este fato decorre porque o estimador Kernel é um interpolador que possibilita estimar o evento em toda a área, mesmo onde o processo não tenha gerado nenhuma ocorrência. Dessa forma, o estimador generaliza a ideia de média móvel local ao supor que a densidade do fenômeno varia localmente de forma suave, sem “picos” nem “descontinuidades”, sendo mais precisos de fenômenos naturais (CÂMARA; MEDEIROS, 1996).



## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O número total de lineações de relevo e drenagem, extraído por vetorização manual, foi de 10.502 lineações e sua distribuição não foi uniforme em uma área de 4.240,90km<sup>2</sup>. Pela análise visual das lineações de drenagem e relevo (Figura 2), nota-se a diversidade na distribuição das lineações ao longo das áreas das bacias, com regiões apresentando grande intensidade de lineações até regiões praticamente vazias. Os parâmetros qualitativos avaliados visualmente (densidade relativa) e os valores quantitativos da densidade de lineações podem ser vistos nas tabelas 1 e 2. Na área de estudo, o valor da densidade de lineações foi de 2,476. As bacias hidrográficas dos rios Japarutuba e Sergipe apresentaram as maiores densidades, 5,246 e 3,586, respectivamente; em oposição nas bacias dos rios São Francisco e Piauí (2,070 e 1,567). As bacias dos rios Vaz Barris e Real apresentaram as densidades de lineações intermediárias, 2,423 e 2,476, respectivamente. Como a densidade de lineações indica o sistema de fraturamento e este, a potencialidade de infiltração da água subterrânea, é notória a heterogeneidade da capacidade de armazenar água subterrânea na área de estudo, indicando um ambiente geológico anisotrópico de recarga de água subterrânea.

Figura 2 - Mapa de lineações de relevo e drenagem das bacias hidrográficas do Agreste Sergipano



Fonte: Autoria própria (2019).

Pela análise qualitativa, a bacia hidrográfica que apresenta menor quantidade de lineações é a Bacia do Rio São Francisco, por outro lado, a bacia que apresenta uma maior quantidade de lineações concentrada é a Bacia do Rio Japarutuba. As porções leste e sudoeste das bacias dos rios Sergipe e Vaza Barris também



apresentam maiores densidades de lineações que as bacias dos rios Piauí e Sergipe. A variedade litológica das bacias hidrográficas gerou uma anisotropia rúptil, ou seja, as diferentes rochas absorveram os esforços tectônicos distensivos de forma desigual, conforme suas características intrínsecas. Inicialmente a anisotropia foi verificada pela densidade relativa (análise visual) de lineações de drenagem e relevo (Tabela 1) por bacia hidrográfica, possibilitando inferir uma classificação visual (critério subjetivo) da densidade de lineações em baixa, média e alta. Os critérios dessa classificação foram baseados nos fundamentos de comparação visual preconizado por Veneziani e Anjos (1982) para definir as zonas homólogas. Dessa forma, baixa densidade de drenagem indica pequena potencialidade de acumulação de água subterrânea. Em oposição, a alta densidade de drenagem indica grande potencialidade, pois de acordo com a premissa básica citada na metodologia, o sistema de fraturamento é de abertura crustal, possibilitando a infiltração, escoamento e armazenamento de água.

Tabela 1 - Densidade relativa de lineações e potencialidade relativa de armazenamento de água subterrânea por bacia hidrográfica da Região Agreste do Estado de Sergipe

Bacia Hidrográfica	Densidade relativa (km)	Potencialidade relativa (km/km <sup>2</sup> )
São Francisco (BHSF)	Baixa	Pequena
Japarutuba (BHJ)	Alta	Grande
Sergipe (BHS)	Alta	Grande
Vaza Barris (BHVB)	Média	Intermediária
Piauí (BHP)	Baixa	Pequena
Real (BHR)	Média	Intermediária

Fonte: Autoria própria (2019).

A extração de lineações estruturais geológicas e o cálculo da densidade dessas lineações conduzem a análise e delimitação de diferentes zonas de permeabilidade. As densidades de lineações avaliadas quantitativamente por bacias hidrográficas, visou obter um retrato numérico das probabilidades de infiltração e acumulação de águas subterrâneas na área de estudo (Tabela 2).

Tabela 2 - Densidade relativa de lineações e potencialidade relativa de armazenamento de água subterrânea por bacia hidrográfica da Região Agreste do Estado de Sergipe

Bacia Hidrográfica	Área (km <sup>2</sup> )	Comprimento das lineações (km)	Densidade de lineações (km <sup>2</sup> )
BHSF	307,73	637	2,070
BHJ	363,34	1.906	5,246
BHS	510,35	1.830	3,586
BHVB	763,01	1.849	2,423
BHP	1.547,03	2.424	1,567
BHR	749,40	1.856	2,476
Total	4.240,90	10.502	2,476

Fonte: Autoria própria (2019).

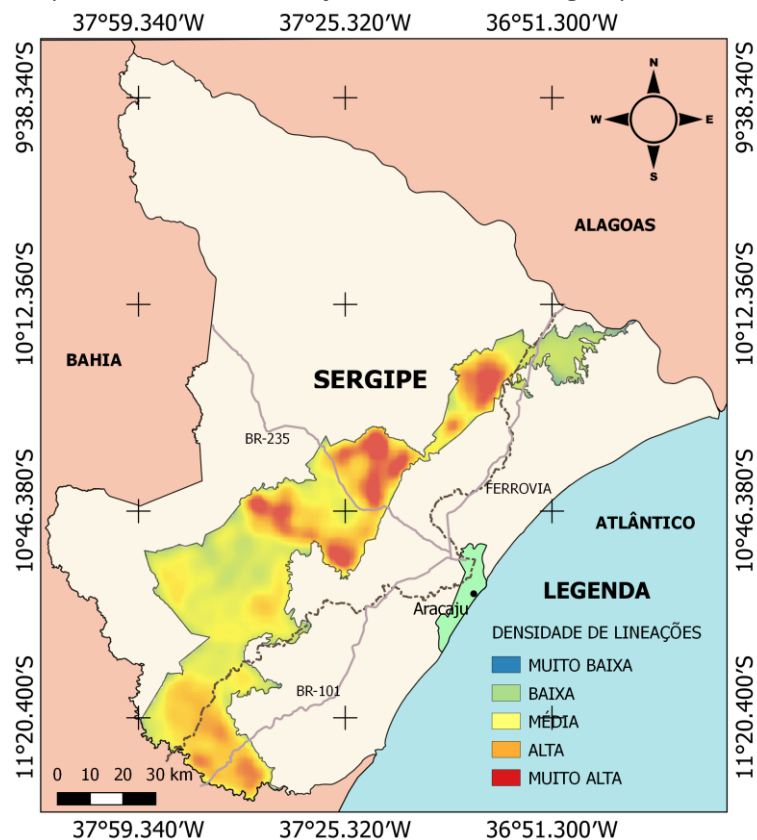
É notória a similaridade entre as tabelas 1 e 2, indicando a existência de aquíferos fraturados distintos na área de estudo. Estes são o reflexo do sistema de fraturamento, aqui analisado pela densidade de lineações de relevo e drenagem. Nesse sentido, as maiores áreas não implicam, necessariamente, em uma maior

quantidade de lineações, já que estas feições são decorrentes de estruturas geológicas lineares positiva (relevo) e negativa (drenagem), interpretadas por produtos e técnicas de sensoriamento remoto, e representam o sistema de ruptura das rochas passíveis de permitir a infiltração, percolação e acumulação da água subterrânea.

Assim, uma área de aproximadamente 363 km<sup>2</sup>, uma das menores, a bacia de Japaratuba tem expressiva quantidade de lineações (1.906 km), abaixo apenas da bacia do Piauí, que possui 2.424 km em uma área quatro vezes maior, 1.547 km<sup>2</sup>. As bacias do São Francisco, Vaza Barris e Real foram as que mais se aproximaram do valor médio de densidade de lineações (2,476). Japaratuba e Sergipe ultrapassaram esse valor e a Bacia do Piauí ficou muito abaixo da média.

Pode-se, dessa forma, classificar três tipos de aquíferos fraturados em ordem crescente da potencialidade de acumular água subterrânea: aquíferos fracamente fraturados (BHP e BHSF), aquíferos medianamente fraturados (BHVB e BHR) e aquíferos fortemente fraturados (BHS e BHJ). Entretanto, por meio da aplicação do método de Kernel, tornou-se possível a identificação mais precisa das áreas de maior densidade de lineações, indicando o maior grau de fraturamento e potencialidade de infiltração, escoamento e acúmulo de água subterrânea (Figura 3).

Figura 3 - Mapa de densidade de lineações de relevo e drenagem pelo método de Kernel



Fonte: Autoria própria (2019).

A aplicação da técnica de interpolação Kernel foi possível a identificar com maior precisão e detalhe as isorregiões de densidades de lineações de relevo e drenagem. Foram interpolados 10.502 pontos, os quais representam o

comprimento vetorial de cada lineação de relevo e drenagem. Dessa forma, foram geradas isolinhas de diferentes potencialidades de armazenamento de águas subterrânea, possibilitando a espacialização e a compartimentação de cinco classes de densidade de lineações, a saber: muita baixa, baixa, média, alta e muita alta densidade de lineações. Essas classes indicam, em ordem crescente, a potencialidade de armazenamento de água subterrânea nos aquíferos fraturados das bacias hidrográficas no Agreste Sergipano.

De acordo com o resultado obtido pelo método de interpolação de Kernel, o Agreste Sergipano possui cinco tipos de aquíferos fraturados, desde fracamente fraturados a intensamente fraturados. Constatou-se que as características hidrogeológicas são heterogêneas tanto no interior de cada bacia hidrográfica como entre elas. Os aquíferos intensamente fraturados concentram-se, principalmente, nas bacias hidrográficas dos rios Japaratuba, Sergipe e Vaza Barris; os aquíferos medianamente fraturados estão concentrados nas bacias dos rios Piauí e Real, este apresentando maior grau de fraturamento; por sua vez, a Bacia do Rio São Francisco apresentou a menor densidade de lineações.

Dessa forma, a distribuição espacial das lineações possibilitou a identificação de diferentes porosidades e permeabilidades secundárias, oriundas do sistema de fraturamento das rochas cristalinas, indicando a heterogeneidade quanto aos processos de infiltração, percolação e armazenamento de águas subterrâneas. A heterogeneidade é decorrente das diferentes litologias e processos endógenos ocorridos nas variedades de rochas cristalinas. Desse modo, a gestão hídrica deve estar condicionada às características intrínsecas dos aquíferos fraturados. O sucesso em perfurações dos poços tubulares depende da avaliação precisa dos condicionantes geológicos dos aquíferos fraturados.

## CONCLUSÕES

A área de estudo apresenta cinco classes de densidades de lineações de relevo e drenagem distribuídas heterogeneamente na área de estudo, indicando diferentes potencialidades de armazenamento de água subterrânea nos aquíferos fraturados dos terrenos cristalinos do Agreste sergipano. Dessa forma, o objetivo da pesquisa foi alcançado pela interpolação Kernel das densidades de lineações de relevo e drenagem. As bacias hidrográficas dos rios Japaratuba, Sergipe e Vaza Barris apresentaram as maiores densidades de lineações e, conseqüentemente, as maiores potencialidades de armazenamento de águas subterrâneas. As diferentes porosidades e permeabilidades secundárias oriundas do sistema de fraturamento das rochas cristalinas indicam a presença de aquíferos intensamente a fracamente fraturados.

O grau de fraturamento está condicionado às condições estruturais e geológicas do terreno e determinam a maior ou menor facilidade de infiltração, percolação e acumulação de água subterrânea. A extração de lineações estruturais geológicas e o cálculo da densidade dessas delineações conduzem a análise e delimitação de permeabilidade. Dessa forma, as diferentes zonas de fraturamento desempenham um papel significativo e particular no fluxo das águas subterrâneas em rochas cristalinas, a partir de uma rede ou matriz complexa. Nesse sentido, as características hidrogeológicas heterogêneas, na área de estudo, são decorrentes da variedade de rochas cristalinas e distintos comportamentos rúpteis.

O sucesso em perfurações dos poços tubulares depende da avaliação precisa dos condicionantes geológicos dos aquíferos fraturados. Assim, o resultado dessa pesquisa é um instrumento técnico orientador do investimento em pesquisas detalhadas para o adequado investimento de recursos financeiros públicos tanto na execução de poços tubulares como na prevenção de contaminação das áreas de recarga de aquíferos fraturados na área de estudo.

# Application of remote sensing and spatial analysis in geological alignments as an indicator of the potential for groundwater accumulation

## ABSTRACT

The geological alignments represent fracture systems that allow the infiltration, percolation and accumulation of groundwater in crystalline terrains, originating the fractured aquifers. The exploitation of groundwater in these aquifers is conditioned to the fracture density of the crystalline rocks, as in the case of Agreste Sergipano. The objective of the present work was to identify areas suitable for the storage of groundwater through geological alignment spatialization to define the potential for groundwater accumulation in the fractured aquifers of Agreste Sergipano. The relief and drainage geological alignments were extracted in the Digital Elevation Model (DEM) and in the drainage network of the study area basins; and the consecutive spatialization of the densities of these alignments by the kernel interpolator. The application of this interpolator allowed the spatialization of five classes of lineation density, indicating the greater or less potential of underground water storage in the fractured aquifers of the watersheds in the Sergipe Agreste. It was concluded that the hydrographic basins of the Japarutuba, Sergipe and Vaza Barris rivers presented the greatest hydrogeological potentialities than the basins of the Piauí, Real and São Francisco rivers in the crystalline terrains of the study area.

**KEYWORDS:** Fractured Aquifer. Digital Elevation Model. Kernel Interpolator. Lineament Density.

## AGRADECIMENTO

Os autores agradecem à Fundação de Apoio à Pesquisa e à Inovação Tecnológica do Estado de Sergipe (Fapitec) pela Bolsa de Iniciação Científica; à Coordenação de Pesquisa (COPEs) e Pós-Graduação e Pesquisa (POSGRAP) da Universidade Federal de Sergipe (UFS) e ao Laboratório de Geoprocessamento (LAGEO) do Departamento de Engenharia Ambiental (UFS).

## REFERÊNCIAS

AGBOTUI, P.; WEST, L.; BOTTRELL, S. Flow zone characterization in a fractured aquifer using SPRING and OPEN-WELL T and EC Monitoring. **Geophysical Research Abstract**, v. 19, p. 29. abr. 2017.

ALMEIDA, F. F. M.; BRITO NEVES, B. B. de; FUCK, R. A. Províncias estruturais brasileiras. SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 8., 1977, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: SBG, 1977. p. 363-391.

AL-MUQDADI, S. W.; MERKEL, B. J. Interpretation of groundwater flow into fractured aquifer. **International Journal of Geosciences**, v.3, p. 357-364, mai. 2012. <http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2012.32039>.

ANDRADE, R. Delineation of fractured aquifer using numerical analysis (factor) of resistivity data in a granite terrain. **International Journal of Geophysics**, v.201, p.1-8, 2014. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/585204>.

ARAÚJO, C. C.; YAMAMOTO, J. K.; MADRUCCI, V. Análise morfoestrutural em áreas de ocorrência de arenito asfáltico, Bacia do Paraná, São Paulo. **Revista do Instituto Geológico**, v. 24, n1. p. 25-41, 2003.

AZEVEDO, A. A.; ALBURQUERQUE FILHO, J. L. Águas subterrâneas. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO. S. N. A. **Geologia de engenharia**, São Paulo: ABGE, v. 3, p. 153-178p. 2013.

BARBOSA, N. F. M. STOSIC, B. D.; STOSIC, T.; LOPES, P. M. O.; MOURA, G. B. A; MELO, J. S. P. Kernel smoothing dos dados de chuva no Nordeste. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 18, n. 7, p. 742-747, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662014000700011>.

BRITO, F. B.; VASCO, A. N; PEREIRA, A. P.; MELLO JR., A. V. NOGUEIRA, L. C. Herbicidas no alto do rio Poxim, Sergipe e os riscos de contaminação dos recursos hídricos. **Revista Ciência Agronômica**, v. 49, n. 2, p. 390-398, abr/jun, 2012.



CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. **Geoprocessamento para projetos ambientais**. São José dos Campos: INPE, 1996. 139p.

CAMPOS, H. C. N. S. Águas subterrâneas na Bacia do Paraná. **Geosul**, v.19, n. 37, p.47-65, 2004.

CHUMA, C.; ORIMOOGUNTE, O. O. I.; HLATYMAYO, D. J.; AKINYEDE, J. O. Application of remote sensig and Geographical Information Systems in determining the groundwater potencial in the crystalline basement of Bulawayo Metropolitan Area, Zimbabwe. **Advances in Remote Sensing**, v.2, p. 149-161, 2013. <https://doi:10.4236/ars.2013.22019>.

D'EL-REY SILVA, L. J. H. Tectonic evolution of the Sergipano Belt, NE Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, v.25, p.315-332. 1995.

EDET, A. E.; OKEREKE, C. S.; TEME, S. C.; SEU, E. O. Application of remote-sensing data to groundwater exploration: a case study of the Cross River Satat, souteartern Nigeria. **Hidrology Journal**, v.6, n. 3, p. 399-404, oct. 1998. <https://doi.org/10.1007/s100400050162>.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado de Sergipe**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2009. 497p.

ESTADO DE SERGIPE. **Panorama Energético de Sergipe**. Aracaju: SUDEN, 2014, v.1, 83p.

FASHAE, O. A; TIJANI, M. N; TALABI, A. O.; ADEDEJI, O. I. Delineation of groundwater potential zones in the crystalline basement terrain of SW\_Nigeria: na integrated GIS and remote sensing approach. *Appllied Water Science*, v. 4, n. 1, p. 19-38, mar. 2014. <https://doi.org/10.1007/s13201-013-0127-9>.

FEIJÓ, R. T.; CAMPOS, J. E. G. Aquíferos com fluxos controlados simultaneamente por porosidade intergranular e planar: aplicação a rochas metassedimentares do Alto Paraguai, MT. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.21, n.1, p.11-24, jan/mar. 2016. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p11-24>.

GUSTAFSSON, P. Spot satellite data for exploration of fractured aquifers in a semi-arid area in southeastern Botswana. **Applied Hydrogeoly**, v. 2. n.2, p.9-18, fev. 1994. <https://doi.org/10.1007/s100400050246>.

INCRA. Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária. **Relatório de análise de risco de mercado de terra de Sergipe**. Aracaju: INCRA, 2007. 136p.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo: Editora UNESP, 2003. 253p.

MADRUCCI, V.; ARAÚJO, C. C.; TAIOLI, F. Sensoriamento remoto, aerogeofísica e geoprocessamento aplicados ao estudo de aquífero fraturado em terreno cristalino, leste do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 33, p.43-52, jun. 2003.

MABEE S.B., HARDCASTLE C.H., WISE D.U. A method of collecting and analyzing lineaments for regional scale fractured-bedrock aquifer studies. **Ground Water**, v.32, p. 884-894, nov. 1994. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1994.tb00928.x>.

MEIJERINK, A. M. J. Remote sensing applications to hidrology: groundwater. **Hidrological Sciences Journal**, v. 41, n. 4, p. 549-561, dec. 2009. <http://dx.doi.org/10.1080/02626669609491525>.

MEIJERINK, A. M. J.; BANNERT, D.; BATELAAN, O.; LUBCZYNNSKY, M. W.; POINTENT, T. **Remote sensing applications to groundwater**. Paris: UNESCO, 304p. 2007.

MORIN, R. H.; CARLETON, G. B.; POIRIER, S. Fractured-aquifer hidrogeology from geophysical log, the Passaic Formation, New Jersey. **Ground Water**, v, 5, n.2, p. 327-338, mar/abr. 1997.

NAG, S. K.; GHOSH, P. Delineation of groundwater potencial zone in Chhatna Block, Dankura Disctrict, West Bengal, Indian using remote sensing and GIS techniques. **Environmental Earth Sciences**, v. 70, n. 5, p. 2115-2127. Fev. 2011. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1713-0>.

NASCIMENTO, P. S. R. Geoprocessamento aplicado à gestão de aquíferos fissurais: uma proposta metodológica para o semiárido sergipano. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 13, Aracaju. **Anais...** Aracaju: ABRH, 2016, p.1-10.

NASCIMENTO, P. S. R.; NASCIMENTO FILHO, J. C. B.; MENDONÇA, A. K. F.; WALLACUELLA, G. J. Análise da capacidade de armazenamento de águas subterrâneas em aquíferos fissurais por técnicas de sensoriamento remoto. In: SEABRA, G. **Educação ambiental: sustentabilidade dos ambientes rurais e urbanos**. Ed. Barlavento, Ituiutaba-SP, p. 724-735, 2017.

NASCIMENTO, P. S. R.; PETTA, R. A.; GARCIA, G. J. Confecção do mapa de densidade de drenagem através de geotecnologias visando definir a vulnerabilidade aos

processos erosivos na Sub-bacia do Baixo Piracicaba (SP). **Estudos Geográficos**, v.6, n.1, p. 19-35, ago. 2008.

O'LEARY, D. W.; FRIEDMAN, J. D.; POHN, H. A. Lineament, linear, lineation: some proposed new standards for old terms. **Geological Society of America Bulletin**, v.87, n. 10, p.1463-1469, out. 1976. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1976\)87<1463:LLLSPN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1976)87<1463:LLLSPN>2.0.CO;2).

OLIVEIRA E. P., WINDLEY, B.F., ARAÚJO, M.N.C. The neoproterozoic sergipano orogenic belt, NE Brazil: a complete plate tectonic cycle in western Gondwana. **Precambrian Research**, v.181, p.64-84. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2010.05.014>

PINTO, J. E. S. S., AGUIAR NETTO, A. O. **Clima, geografia e agrometeorologia: uma abordagem interdisciplinar**. Aracaju: UFS, 2008. 221p.

PREEJA, K. A.; JOSEPH, S.; THOMAS, T.; VITITH, H. Identification of groundwater potencial zonas of a Tropical Basin River (Kerala, India) using remote sensing and GIS techniques. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 39, n.1, p. 83-94, mar. 2011. <https://doi.org/10.1007/s12524-011-0075-5>.

REBOUÇAS, A. C. Algumas considerações sobre a hidrogeologia nos terrenos cristalinos do Nordeste Brasileiro. **Recursos Naturais**, v.3, p.163-184, 1975.

RESENDE, R. S.; CRUZ, M. A. S.; AMORIM, J. R. A. Atlas de qualidade da água subterrânea no Estado de Sergipe com fins de irrigação. Aracaju: EMBRAPA, 46p, 2009.

ROCHA, J. C. S.; LESSA, P. Avaliação preliminar das reservas reguladoras subterrâneas no Estado de Sergipe. In: ENCONTRO DE RECURSOS HÍDRICOS EM SERGIPE, 3, Aracaju. **Anais...** Aracaju: SRH, p. 1-4, 2010.

ROEHE, P. A.; AHLERT, R. S. Uso de imagens de radar na identificação de lineamentos e caracterização de aquíferos fraturados associados à formação Serra Geral, na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15, 2011. Curitiba. **Anais...** Curitiba: INPE, p.3582-3588. 2011.

RUSHTON, K. R.; WELLER, J. Response to pumping of a weathered-fractured granite aquifer. **Journal of Hidrology**, v. 80, p. 299-309, out. 1985. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(85\)90123-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(85)90123-4).

SANDER, P. Water-well sitting in hard-rock areas: identifying promising targets using a probabilistic approach. **Hydrogeology Journal**, v.5, n. 3, p. 32-43, mar. 1997. <https://doi.org/10.1007/s100400050109>.

SANDER, P.; CHESLEY, M.M.; MINOR T. B. Groundwater assessment using remote sensing and GIS in a rural groundwater project in Ghana: lessons learned. **Hydrogeology Journal**, v.4, n. 3, p. 40-49, mar. 1996. <https://doi.org/10.1007/s100400050086>.

SANTOS, R.A., MARTINS A.A., NEVES J.P., LEAL R.A. **Geologia e Recursos Minerais do Estado de Sergipe**. Texto Explicativo do Mapa Geológico do Estado de Sergipe. Brasília: CPRM, 156 p. 2001.

SANTOS, G. B.; SOUZA, I. F.; BRITO. C. O.; SANTOS, V. S.; BARBOSA, R. J.; SOARES, S. C. Bioclimatic study for broiler production and posture in the of coastal, agreste and semi arid regions of Sergipe state, Brazil. **Ciência Rural**, v.44, n.1, p.123-128, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782013005000148>.

SEMARH. Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Atlas Digital Sobre Recursos Hídricos de Sergipe**. Aracaju: SRH. 2014. (DVD).

SINGHAL, B. B. S.; GUPTA, R. P. **Applied hydrogeology of fractured rocks**. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2010. 401 p.

UHLEIN, A.; SUCKAU, G. L.; SANGLARD, J. C. D.; CAXITO, F. A. Estratigrafia e evolução sedimentar de diamictitos e carbonatos Neoproterozóicos no Dominio Vaza-Barris, Faixa de Dobramentos Sergipana, Nordeste do Brasil. **Revista Geonomos**, Belo Horizonte, v.19, n.1, p. 1-9, 2011.

VENEZIANI, P.; ANJOS, C. E. Metodologia de interpretação de dados de sensoriamento e aplicações em geologia. São José dos Campos: INPE, 1982, 161p

VENEZIANI, P.; ROCIO, M. A. R. Critérios de prospecção de água subterrânea com o emprego de dados de sensores remotos na região de Paraibuna-Taubaté-Jambeiro (São Paulo). In: SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HIDRÍCOS, 5, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, p. 27-41, 1991.

WAND, M. P.; JONES, M. C. **Kernel smoothing**. New York: Chapman&Hall/CRC, 39p., 1995.

ZAWAWI, M. A. M; TORIDI, N. M.; WAYAYOK, A. Detection of fractured aquifer using combination of resistivity and induced polarization analysis. **Journal Teknologi**, v. 76, n.15, p. 119-124. 2015. <https://doi.org/10.11113/jt.v76.5962>.

**Recebido:** 22 mar. 2019

**Aprovado:** 01 out. 2019

**DOI:** 10.3895/rbgeo.v7n4.9879

**Como citar:** NASCIMENTO, P. S. R.; SILVA, N. P. C.. Aplicação de sensoriamento remoto e análise espacial em alinhamentos geológicos como indicador da potencialidade de acumulação de águas subterrâneas. **R. bras. Geom.**, Curitiba, v. 7, n. 4, p. 204-222, out/dez. 2019. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo>>. Acesso em: XXX.

**Correspondência:**

Paulo Sérgio de Rezende Nascimento

Avenida Marechal Rondon, S/N, Jardim Rosa Elze, CEP 49100-000, São Cristóvão, Sergipe, Brasil.

**Direito autoral:** Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

