

**Extração automática de lineamentos na exploração de aquíferos fissurais:
uma revisão****Automatic extraction of lineaments in groundwater exploration of fissural
aquifers: a review**

DOI:10.34117/bjdv6n12-700

Recebimento dos originais: 20/11/2020

Aceitação para publicação: 28/12/2020

Hernan Sales Barreiro

Mestre em Geologia

Instituição: Universidade Federal do Pará / Universidade Federal da Bahia

Endereço: Rua Horacio Gomes de Andrade, 441, 1º andar. Bairro: São Cristóvão, Serra
Talhada -PE, CEP: 56903-330.

E-mail: hernanssa@hotmail.com

Natanael da Silva Barbosa

Doutor em Geologia, Universidade Federal da Bahia

Instituição: Departamento de Geologia, Universidade Federal da Bahia

Endereço: Rua Dr. Alberto Pondé. 320. Apt 603. Ed. Jardim do Candeal. Candeal, Salvador -
BA, CEP: 40296-250

E-mail: ndbarbosa@ufba.br

Josimar André da Silva

Bacharel em Geologia, Universidade Federal da Bahia

Instituição: Programa de Pós Graduação em Geologia, Universidade Federal da Bahia.

Endereço: Rua Dionisio Cerqueira, 27, Barris, Salvador - BA, CEP: 40070-215

E-mail: josimar.geologar@gmail.com

RESUMO

Atualmente o estudo da água subterrânea assume grande importância como um instrumento capaz de prover solução para os problemas hídricos associados aos usos e necessidades básicas das atividades humanas. Nesse sentido, as técnicas de exploração e avaliação de águas subterrâneas estão sempre em desenvolvimento, visando a elevação da assertividade na locação de poços tubulares e o posterior aumento nas vazões exploradas. Dessa forma, esse trabalho objetiva a realização de uma síntese do estado da arte acerca das técnicas de extração automática de lineamentos na prospecção hidrogeológica de aquíferos fissurais. Esta técnica consiste na identificação e vetorização de feições lineares a partir de produtos de sensoriamento remoto pré processadas. O processamento ocorre a partir de algoritmos, que utilizam a detecção de bordas, limiarização e extração da curva. Os lineamentos resultantes podem ser utilizados na caracterização e prospecção de água subterrânea em aquíferos fissurais. Por conseguinte, é possível realizar uma análise quantitativa e qualitativa dos lineamentos extraídos e as possíveis relações com parâmetros hidrogeológicos e uma análise multicritério em ambiente SIG entre os lineamentos e outros fatores (i.e., litologia, drenagem, relevo). Em síntese, a aplicação da extração automática de lineamentos na prospecção hidrogeológica representa um método robusto e de elevado potencial de otimização da locação de poços tubulares em aquíferos fissurais.

Palavras-chave: Prospecção Hidrogeológica; Sensoriamento Remoto; Lineamentos Estruturais.

ABSTRACT

Currently, the study of groundwater is of great importance as an instrument capable of providing a solution to water problems associated with the basic uses and needs of human activities. In this sense, groundwater exploration and assessment techniques are always under development, aiming to increase assertiveness in the location of tubular wells and the subsequent increase in exploited flows. Thus, this work aims to carry out a synthesis of the state of the art about the techniques of automatic extraction of lineaments in hydrogeological prospecting. This technique consists in the identification and vectoring of linear features from pre-processed remote sensing products. Processing takes place using algorithms, which use edge detection, thresholding and curve extraction. The resulting lineaments can be used in the characterization and prospecting of groundwater in fissural aquifers. Therefore, it is possible to carry out a quantitative and qualitative analysis of the extracted lines and the possible relationships with hydrogeological parameters and a multicriteria analysis in a GIS environment between the lines and other factors (i.e., lithology, drainage, relief). In summary, the application of automatic extraction of lineaments in hydrogeological prospecting represents a robust method with a high potential for optimizing the location of tubular wells in fissural aquifers.

Keywords: Hydrogeological Prospection; Remote sensing; Structural Lineaments.

1 INTRODUÇÃO

Originalmente restrita às suas raízes geológicas e aos seus experimentos hidráulicos, a Hidrogeologia, nos últimos 150 anos, apresenta uma crescente abrangência interdisciplinar e cada vez mais se consolida como uma ciência ambiental, assumindo, por isso, importância decisiva, principalmente por se tratar de um bem vital - a água (FEITOSA *et al.*, 2008).

Apesar da abundância desse recurso, apenas 2,5% das reservas hídricas correspondem a água doce, sendo que 70% encontra-se indisponível, pois ocorre na forma sólida nas geleiras e calotas polares. Nesse sentido, as águas subterrâneas merecem destaque e atenção por constituírem o maior volume de água doce que ocorre na Terra na forma líquida, que segundo Rebouças (2008) é da ordem de 10,3 milhões km³, enquanto que os rios e lagos acumulam apenas 104 mil km³.

Assim, o aproveitamento da água subterrânea apresenta-se como fator essencial para o desenvolvimento e continuidade das atividades humanas e enfrenta pelo menos três desafios, no tocante à necessidade de conhecimento científico. O primeiro, na hidrogeologia de exploração, avaliação e exploração. O segundo, nos domínios da proteção e da conservação. O terceiro desafio, portanto, é um corolário dos dois primeiros e está associado à necessidade de

conhecimentos para bem planejar e administrar, tanto os diversos usos quanto a proteção da água subterrânea (FEITOSA *et al.*, 2008).

No âmbito da exploração, avaliação e exploração dos recursos hídricos subterrâneos, é preciso estar atento às particularidades dos terrenos hidrogeológicos. No Brasil, a maior parte do território é formado por rochas metamórficas e eruptivas, quase todas de idade pré-cambriana, de modo a conferir aos aquíferos fissurais uma elevada relevância no contexto hidrogeológico nacional.

É nesse ambiente hidrogeológico que o Sensoriamento Remoto surge como uma ferramenta auxiliar na prospecção de águas subterrâneas. Em aquíferos fissurais, a percolação e acumulação de água são controladas por fraturas e outras discontinuidades do maciço rochoso. Segundo Jardim de Sá *et al.* (2008) em função de sua dimensão, o reconhecimento de estruturas rúpteis exige a análise de imagens de satélites e de fotografias aéreas.

A fotointerpretação era amplamente utilizada na prospecção hidrogeológica de aquíferos fissurais, a partir da localização de estruturas favoráveis, em especial, as zonas fraturadas. Entretanto, a obsolescência das fotografias aéreas, a subjetividade inerente à delimitação dos lineamentos, e o tempo demandado na interpretação, demandaram a criação de novas técnicas.

Assim, a extração automática de feições lineares a partir de técnicas de processamento digital de imagens surge como uma técnica com ampla possibilidade de uso na prospecção hidrogeológica, permitindo a interpretação de lineamentos e reconhecimento de padrões em dados geofísicos e imagens de satélite. O método visa transformar feições lineares contidas nas imagens ou dados geofísicos em um segmento vetorial de forma automática, de forma a acelerar o processo de extração e reduzir a subjetividade inerente ao método manual.

Portanto, o objetivo desse trabalho é realizar uma revisão do estado da arte acerca da extração automática de lineamentos e das possibilidades de aplicação dessa técnica na prospecção hidrogeológica de aquíferos fissurais.

2 EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DE LINEAMENTOS

Os lineamentos são estruturas geológicas que ocorrem na superfície da Terra como resultado da atuação dos esforços tectônicos na crosta terrestre. Em geral, representam zonas favoráveis para percolação de fluidos mineralizadores, fluxo das águas subterrâneas, desastres geológicos, armadilhas de petróleo e gás, etc. Desse modo, estudos acerca da extração de lineamentos apresentam grande relevância científica e socioeconômica.

Desde meados do Século XX, os geólogos utilizam a interpretação de fotografias aéreas como uma ferramenta auxiliar no mapeamento geológico, a partir da identificação de domínios lito-estruturais e/ou de lineamentos estruturais. Esses métodos tradicionais, possibilitaram uma noção prévia do contexto geológico e do arranjo cinemático de uma determinada área. Já a partir da década de 1970, a utilização do sensoriamento remoto ampliou as possibilidades de observações, principalmente em relação à resolução espacial e à abrangência da área analisada. Atualmente, a aplicação de imagens multiescalares na delimitação de feições geológicas ocorre de modo mais prático e rápido.

Outro avanço tecnológico relevante foi a obtenção de dados da superfície terrestre por sensores remotos, possibilitando praticamente toda a sua cobertura através de levantamentos topográficos e imagens de diferentes resoluções espaciais, temporais, espectrais e radiométricas. Essa ampla cobertura permite a identificação e a análise de deformações crustais em qualquer ponto do planeta (QUEIROZ *et al.*, 2014).

Apesar dos avanços e do rápido desenvolvimento no processamento de imagens digitais, a técnica tradicional de extração manual de lineamentos estruturais ainda é amplamente utilizada, o que resulta em uma menor precisão na análise e demanda mais tempo no tratamento dos dados estruturais azimutais e plotagem em diagramas de rosetas. Nesse contexto, a extração automática de lineamentos apresenta-se como um método inovador e eficiente na delimitação das anisotropias geológicas, de modo a reduzir a subjetividade no reconhecimento de lineamentos estruturais (Hardcastle, 1995; Henriksen & Braathen, 2005; Mallast *et al.*, 2011; Vaz *et al.*, 2012; Vasuki *et al.*, 2014; Lobatskaya & Strelchenko, 2016).

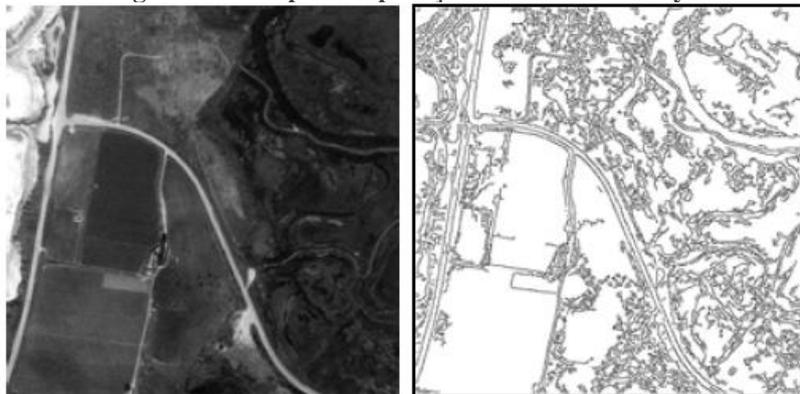
A utilização desse método só é possível devido às variações de brilho que os lineamentos apresentam em dados de sensoriamento remoto. Nesses dados, os lineamentos associados a quebras positivas (relacionadas a cristas de serras, escarpas, crateras) são delineados por pixels de tonalidade clara enquanto os lineamentos relativos às quebras negativas (referentes a juntas, falhas, zonas de cisalhamento, drenagem) aparecem na imagem como pixels alinhados de tons escuros (ABDULLAH *et al.*, 2010). Dessa forma, os lineamentos representam uma sequência de pontos de uma imagem digital em que a intensidade luminosa (brilho) muda repentinamente, ou seja, lineamentos estão associados às bordas em imagens de sensoriamento remoto. Essa característica possibilita a extração automática de lineamentos a partir de três etapas: i) detecção das bordas (Canny, 1987; Perona & Malik, 1990; Zhang *et al.*, 2013); ii) limiarização (Otsu 1979; Liu & Jezek 2004); e iii) extração da curva (Karnieli *et al.*, 1996; Paravolidakis *et al.*, 2018).

Adicionalmente, para a obtenção de melhores resultados na detecção de bordas, é necessária a aplicação de técnicas de pré-processamento de dados. Essa etapa é importante na redução efetiva do ruído e afeta a distribuição dos resultados finais devido às diferenças no nível de tons de cinza, intensidade de iluminação e azimute do sensor entre os dados do Modelo Digital de Elevação e das imagens de sensoriamento remoto (HAN *et al.*, 2018)

A partir da imagem pré processada, é iniciada a detecção de bordas. Essa técnica é utilizada para enfatizar ou desvalorizar a frequência espacial na imagem, uma das principais características das imagens de satélite, definida como o número de alterações no valor de brilho por unidade de distância para qualquer parte da imagem. Quando a região analisada tem baixa frequência, o brilho varia pouco em uma determinada área. Já quando apresenta alta frequência, os valores de brilho mudam drasticamente em um curto espaço. Em síntese, a filtragem irá ressaltar as altas frequências (descontinuidades) relacionadas à presença de lineamentos e suprimir as baixas frequências (ruídos).

A filtragem a partir do filtro de Canny é amplamente utilizada na detecção de bordas em processos de extração automática de lineamentos. Em geral têm as seguintes características: (i) baixas taxas de erro, ou seja, as bordas são detectadas o mais próximo possível dos contornos verdadeiros; (ii) os pontos das bordas devem estar bem localizados, isto é, a distância entre uma borda e o seu centro verdadeiro deve ser mínima e; (iii) resposta de um único ponto sem identificação de múltiplos pixels de borda. (Vale *et al.*, 2004). Na Figura 1 é possível observar um exemplo de aplicação do filtro de Canny em uma imagem de satélite.

Figura 1: Exemplo de aplicação do filtro de Canny.



Fonte: Vale *et al.*, 2004.

A filtragem a partir do filtro de Canny ocorre em três subetapas. Na primeira, a imagem é filtrada com uma função gaussiana, cujo raio é fornecido pelo usuário, sendo que quanto maior o valor do raio, menos detalhes serão detectados e também menos ruído. Então é calculado um

valor de gradiente a partir da imagem filtrada. Por fim, os pixels cujos gradientes são inferiores aos obtidos na imagem filtrada são suprimidos.

Posterior à filtragem é realizado o processo de limiarização, que tem por objetivo a divisão de duas modas dominantes da imagem. É realizado a partir da determinação de um limiar L (estabelecido pelo usuário) que separa essas modas. Assim, um ponto pertence ao objeto se $f(x, y) < L$. Caso contrário, é um ponto pertencente ao fundo. A imagem de $f(x, y)$ binarizada é definida como:

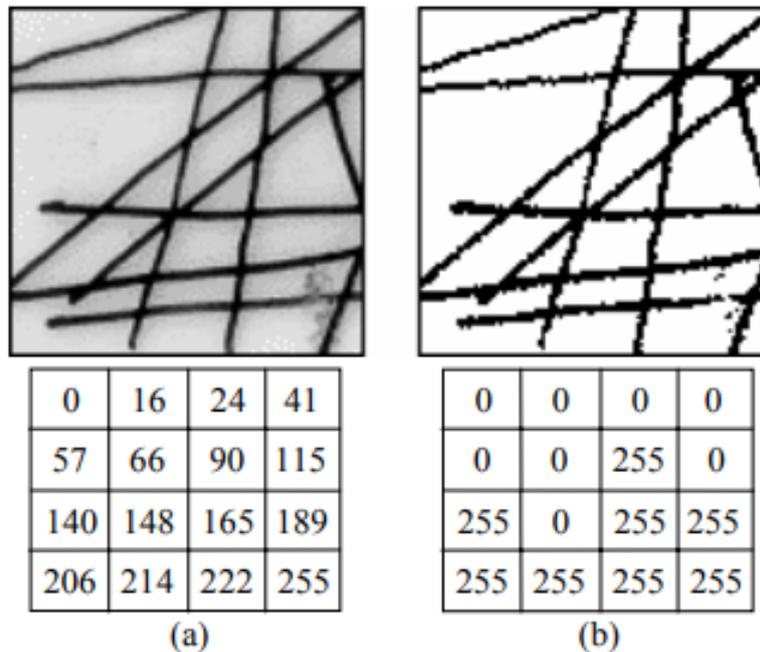
$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{se } f(x, y) > L \\ 0 & \text{se } f(x, y) \leq L \end{cases}$$

Segundo Vieira (1998), a limiarização é global se for determinado um limiar L para toda imagem. Todo ponto da imagem é comparado com o mesmo limiar L . Assim sendo, se o valor for maior que L o ponto pertence ao fundo e dispõe-se branco. De outro modo, faz parte do objeto sendo mapeado para preto (Figura 2).

Na última etapa é realizada a extração da curva a partir da imagem binarizada. Seu desenvolvimento consiste na extração das curvas de pixels que estão acima do limiar “ L ”, sendo descartadas as curvas que apresentam número de pixels inferior ao determinado pelo usuário. Essas curvas são convertidas em vetor, com ajuste de segmentos de linha de acordo com um erro de ajuste máximo (determinado pelo usuário). Por fim, o algoritmo vincula pares de linhas onde dois segmentos de linhas são colineares (o ângulo entre os dois segmentos é menor do que o determinado pelo usuário); e os dois segmentos finais estão próximos um do outro (a distância entre os pontos finais é menor que o determinado pelo usuário) (PCI GEOMATICS, 2018).

A partir da compreensão e do domínio das técnicas de extração automática de lineamentos, diversos autores (e.g., Qari *et al.*, 2008; Abdullah *et al.*, 2009; Abdullah *et al.*, 2010; Muhammad & Awdal, 2012; Conceição & Silva, 2013) desenvolvendo pesquisas para com aplicações em diferentes terrenos geológicos nas mais variadas tipologias climáticas, comparando a eficácia da técnica em relação à extração manual e avaliando as diferenças de desempenho na geração de lineamentos a partir de diversos dados de sensoriamento remoto (i.e., PALSAR/ALOS, SPOT-5, ASTER, SRTM e LANDSAT)

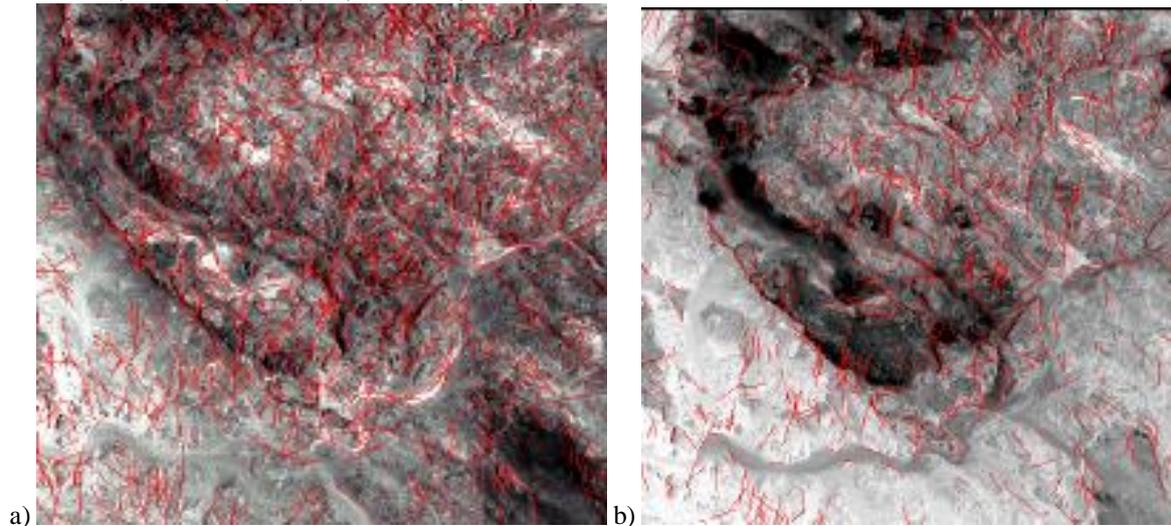
Figura 2: Segmentação da imagem pela seleção do objeto na tabela de cores. (a) Imagem antes da modificação da tabela de cores (b) Imagem segmentada a partir da nova tabela de cores.



Fonte: Vieira, 1998.

A partir de imagens Landsat TM, Madani (2001) realizou dois estudos de caso em terrenos ígneos no Deserto Ocidental (East Gabal Nuqra e Gaziret Khashm Natash) no Egito. O autor concluiu que: i) as bandas visíveis (1, 2 e 3) produziram maior número de lineamentos em comparação com bandas SWIR (5 e 7), conforme é possível visualizar na Figura 3; ii) o padrão regional dos lineamentos extraídos é caracterizado por um alto grau de orientação preferencial; e iii) os dados obtidos de forma automática coincidem amplamente com as estruturas mapeadas por outros autores.

Figura 3: Comparação visual entre lineamentos extraídos de forma automática a partir de imagens do satélite Landsat-5: a) banda 1 (visível) e b) banda 5 (SWIR).

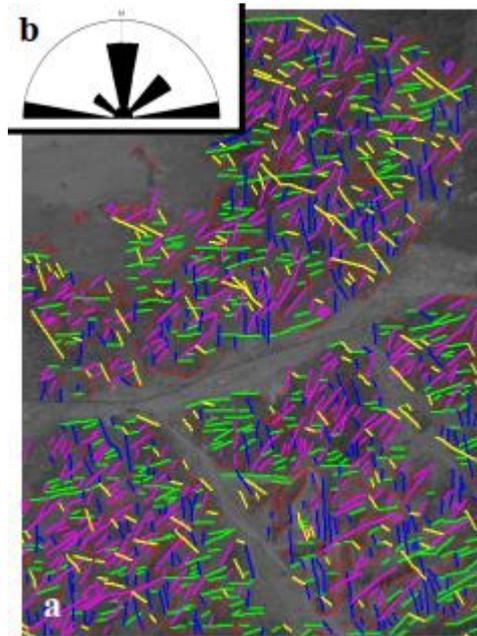


Fonte: Madani (2001).

Coriolano (2002) utilizou imagens Landsat 5-TM e de radar SRTM para extrair lineamentos nas regiões de Santo Antônio e Santa Cruz – RN, Brasil, cujas litologias predominantes eram ortognaisses, que por vezes apresentavam intrusões de granitos. A autora concluiu que os dados obtidos a partir de imagens SRTM apresentam-se mais confiáveis, devido a menor interferência atmosférica e antrópica (i.e., cercas, fios, estradas, etc.).

Qari (2008) utilizou imagens Aster para caracterização geológica e imagens Landsat para extração automática de lineamentos. O trabalho foi desenvolvido na área de Arafat, Makkah Al-Mukarama, Arábia Saudita, região com ocorrência de rochas do embasamento neoproterozóico, tais como dioritos, granodioritos, leucogranitos e granitos pós-tectônicos. A extração automática de lineamentos a partir da banda pancromática do Landsat 8 resultou em lineamentos com tendências de direção de E-W, N-S e NE-SW, constituindo 31,4%, 30,0% e 26,1%, respectivamente (Figura 4). Visando a verificação desses dados obtidos de forma remota, o autor realizou sucessivas visitas a campo, de modo a confirmar a aderência ao contexto estrutural local.

Figura 4: a) Lineamentos extraídos de forma automática em Arafat, Arábia Saudita; b) Diagrama de Rosetas das principais direções dos lineamentos.

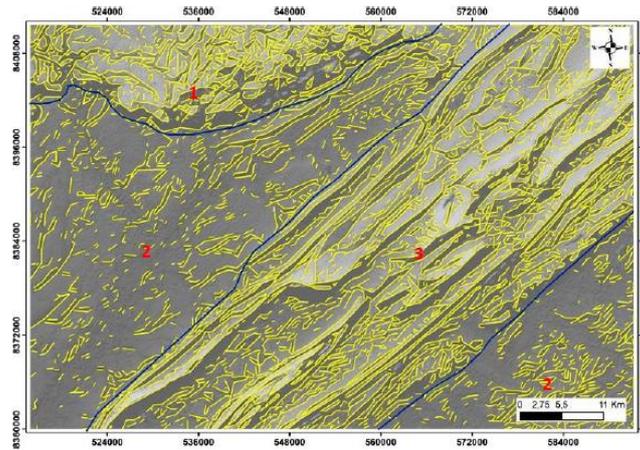


Fonte: Qari (2008).

Abdullah (2009) comparou bandas Landsat TM e imagens SPOT no mapeamento automático de lineamentos em um terreno de rochas sedimentares e granitoides intrusivos no leste da Malásia. A conclusão principal foi que a banda 4 do Landsat e a banda 3 do SPOT-5 foram mais eficientes na extração de lineamentos em áreas tropicais.

Conceição & Silva (2013) realizaram a extração automática de lineamentos na região de Nobres-MT, cuja geologia é caracterizada por rochas sedimentares do Grupo Alto Paraguai (pelitos siltitos e arenitos), Grupo Araras (dolomitos, calcários e folhelhos) e Formação Puga (diamictitos e siltitos). Os autores propuseram valores para os parâmetros do algoritmo LINE de acordo com as características geológicas da área e utilizaram imagens de LANDSAT ETM+, PALSAR/ALOS e SRTM na extração de lineamentos. Ao fim, realizaram uma comparação dos resultados obtidos e concluíram que apesar dos sensores empregados na missão SRTM captarem sinais de radar refletidos, as imagens sombreadas de relevo derivadas do modelo digital de superfície são mais eficientes na extração de lineamentos geológicos (Figura 5).

Figura 5: Extração de lineamentos gerada a partir de imagem SRTM com iluminação azimutal 330° e elevação de 45°



Fonte: Conceição & Silva (2013).

Diante do exposto, os diferentes resultados obtidos sugerem que não existe uma solução padrão para a extração de lineamentos. Desse modo, a escolha dos dados de entrada deve ser testada e ajustada às características geológicas e fisiográficas da área de estudo. Adicionalmente, existem feições naturais que podem ocultar os lineamentos das imagens ópticas e/ou de radar, tais como: vegetação de grande porte, coberturas detríticas, regolitos, interferências eletromagnéticas, etc.

3 SENSORIAMENTO REMOTO E PROSPECÇÃO DE AQUIFEROS FISSURAIIS

A determinação dos locais propícios a exploração de aquíferos cristalinos é uma tarefa complexa devido às discontinuidades, heterogeneidades e anisotropias que ocorrem no material geológico. Dessa forma, a permeabilidade se relaciona com a abertura efetiva, rugosidade, intercomunicação, densidade e extensão das superfícies destas discontinuidades e as entradas de água nos poços podem ocorrer em vários níveis (CORIOLANO, 2002).

Assim, o uso do sensoriamento remoto é de grande importância na prospecção de água subterrânea em aquíferos fissurais. Os sensores ópticos possibilitam a detecção e análise de diversas variáveis e feições (i.e., variação da vegetação, litologia, variação de umidade) em terrenos cristalinos. Em especial a identificação de lineamentos regionais, feições geológicas de maior interesse hidrogeológico.

Ao longo da evolução do sensoriamento remoto, a prospecção hidrogeológica foi se adaptando, de modo a utilizar os dados disponíveis no aprimoramento da delimitação de lineamentos estruturais. No Século XX, as fotografias aéreas foram amplamente utilizadas como ferramenta auxiliar na prospecção hidrogeológica. Setzer (1965) utilizou fotografias aéreas para análise de fraturas relacionadas à captação de água subterrânea no Estado de São

Paulo, concluindo que os poços mais produtivos estavam situados junto a zonas de fraturas fotointerpretadas.

Com o advento do SRTM, as imagens de Radar tornaram-se mais acessíveis, e foram introduzidas na hidrogeologia. IBGE (1999) realizou um amplo levantamento do Potencial de Recursos Hídricos em diversas regiões do país. Nesse sentido, realizou a integração de imagens de Radar/SLAR, cartas topográficas e mapas diversos (geologia, solos, geomorfologia) na caracterização de faturamentos, a fim de determinar o comportamento físico-espacial dos aquíferos fissurais e orientar a prospecção de Recursos Hídricos Subterrâneos, assim como na tomada de decisão.

Horta (2000) utilizou a cartografia digital e imagens do Landsat 7 na construção de mapas temáticos para definição de áreas com maior potencial hídrico subterrâneo no município de Ituiutaba, MG. Siqueira *et al.* (2002) identificaram áreas potenciais para a locação de poços e captação de água subterrânea através do produto obtido a partir do processamento das imagens Landsat.

Chavez-Kus & Eduardo Salamuni (2008) realizaram estudos de intersecção de fraturas para o Aquífero Atuba, em Curitiba-PR, a partir de lineamentos extraídos anteriormente de um modelo digital de terreno. A análise principal indicou que a intersecção das fraturas conjugadas e híbridas coincidem com os valores altos de capacidade específica e vazão dos poços tubulares profundos.

Coriolano (2002) realizou a extração automática de lineamentos em terrenos cristalinos no Rio Grande do Norte visando a locação de poços. Entretanto, aponta a complexidade de correlacionar os produtos obtidos através dessa ferramenta com a locação de poços devido à diferença de escalas, tendo em vista que as estruturas observadas na escala de locação do poço podem não necessariamente corresponder aos lineamentos de maior tamanho extraídos na imagem.

Elewa & Qaddah (2010) a partir de imagens Landsat ETM+ em um ambiente SIG associado a sistemas de modelagem baseados em bacias hidrográficas, integraram oito camadas temáticas (chuva, recarga subterrânea, litologia ou infiltração, densidade de lineamentos, declividade, densidade de drenagem, profundidade das águas subterrâneas e qualidade da água) para a identificação de áreas de potencial subterrâneo na Península do Sinai, Egito.

Elmahdy & Mohamed (2014) utilizaram dados de lineamentos estruturais, declividade, drenagem e relevo, extraídos a partir de imagens Landsat e de modelo digital de elevação, para

elaborar um mapa de zonas potenciais de água subterrânea em Al Dhaid, Emirados Árabes Unidos.

Em síntese, a relação entre sensoriamento remoto e hidrogeologia dos aquíferos fissurais está intimamente relacionado a identificação de lineamentos estruturais. Nesse contexto, a extração automática de lineamentos se apresenta como uma ferramenta capaz de aumentar a produtividade na classificação de lineamentos. Entretanto, para a obtenção de melhores resultados, a prospecção hidrogeológica necessita da verificação em campo, a fim de confirmar as informações extraídas por sensoriamento remoto.

4 CONCLUSÕES

A extração automática de lineamentos é uma técnica em ascensão nas geociências, devido a ampla gama de possibilidades de aplicação e à possibilidade de aumento da eficiência na identificação de lineamentos. A técnica consiste na transformação de feições lineares contidas dados geofísicos e imagens de satélite em um segmento vetorial de forma automática, a partir de três etapas básicas: i) detecção de bordas; ii) limiarização; e iii) extração da curva. Esses processos visam o aumento da produtividade e a diminuição da subjetividade na classificação de lineamentos.

A técnica apresenta um grande potencial de utilização na hidrogeologia de aquíferos fissurais pois, existe uma relação intrínseca entre os lineamentos estruturais e os parâmetros hidrogeológicos (i.e., vazão, capacidade específica, etc.). Desse modo, a aplicação da extração automática de lineamentos na prospecção hidrogeológica possibilitará maior assertividade e eficiência, de modo a impactar positivamente na sociedade.

REFERÊNCIAS

ABDULLAH, A.; AKHIR, J. M.; ABDULLAH, I. A Comparison of Landsat TM and SPOT Data for Lineament Mapping in Hulu Lepar Area, Pahang, Malaysia. **European Journal of Scientific Research**, v.34, n. 3, p. 406-415, 2009.

ABDULLAH, A.; AKHIR, J. M.; ABDULLAH, I. Automatic Mapping of Lineaments Using Shaded Relief Images Derived from Digital Elevation Model (DEMs) in the Maran-Sungai Lembing Area, Malaysia. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v.15, p. 949-957, 2010.

CANNY, J. A. Computational Approach to Edge Detection. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. PAMI-8, n. 6, p. 679-698, 1987.

CHAVES-KUS, L.; SALAMUNI, E. Determinação do parâmetro de intersecção de fraturas para o Aquífero Atuba. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 38, n. 2, p. 455-466, 2008.

CONCEIÇÃO, R. A. C.; SILVA, Q. S. Extração automática de lineamentos utilizando imagens SRTM, Landsat ETM+ e ALOS PALSAR na região de Nobres, MT. In: **XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, p. 3688-3695, 2013.

CORIOLOANO, A. C. F. **Reavaliação de Critérios Estruturais na Hidrogeologia de Terrenos Cristalinos, com Ênfase na Neotectônica e Sensoriamento Remoto**. 2002. 199 f. Tese (Doutorado) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2002.

ELEWA, H. H.; QADDAH A. A. Groundwater potentiality mapping in the Sinai Peninsula, Egypt, using remote sensing and GIS-watershed-based modeling. **Hydrogeology Journal**, v. 19, p. 613–628, 2010

ELMAHDY, S. I.; MOHAMED, M. M. Groundwater potential modelling using remote sensing and GIS: a case study of the Al Dhaid area, United Arab Emirates. **Geocarto International**, v. 29, n. 4, p. 433–450, 2014.

FEITOSA, E. C.; FEITOSA, F. A. C. Metodologia básica de pesquisa de água subterrânea. In: FEITOSA F.A.C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. (Org.).

Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM, LABHID, 2008, p.179-206.

HAN, L.; LIU, Z.; NING, Y.; ZHAO, Z. Extraction and analysis of geological lineaments combining a DEM and remote sensing images from the northern Baoji loess area. **Advances in Space Research Internacional**, v. 62, p. 2480–2493, 2018.

HARDCASTLE, K. C. Photolineament factor: a new computer-aided method for remotely sensing the degree to which the bedrock is fractured. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 61, n. 6, p. 739–747, 1995.

HENRIKSEN, H.; BRAATHEN, A. Effects of fracture lineaments and in situ rock stresses on groundwater flow in hard rocks: a case study from Sunnfjord, Western Norway. Hydrogeology Journal, v. 14, p. 444–461, 2005.

HORTA, F. M. **Definição de áreas potenciais para captação de água subterrânea através de sensoriamento remoto e geoprocessamento, exemplo de aplicação em Ituiutaba-MG.** 2000. 25 f. Monografia (Especialização em Geoprocessamento) - Departamento de Cartografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2000.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Folha SD.24 Salvador: potencial dos recursos hídricos/IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais.** Rio de Janeiro: IBGE, 1999. 236 p.

JARDIM DE SÁ, E. F.; SILVA, C. C. N.; CORIOLANO, A. C. F.; MEDEIROS, W. E. Conceitos de análise estrutural aplicados à hidrogeologia de terrenos cristalinos. In: FEITOSA F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. (Org.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações.** 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM, LABHID, 2008, p. 97–120.

KARNIELE, A.; MEISELS, A.; FISHER, L.; ARKIN, Y. Automatic extraction and evaluation of geological linear features from digital remote sensing data using a hough transform. **Photogrammetry Engineering & Remote Sensing**, v.62, n. 5, p. 525-531, 1996.

LIU, H.; JEZEK, K. Automated extraction of coastline from satellite imagery by integrating canny edge detection and locally adaptive thresholding methods. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, p. 937–958, 2004.

LOBATSKAYA, R. M.; STRELCHENKO, I. P. GIS-based analysis of fault patterns in urban areas: a case study of Irkutsk city, Russia. **Geoscience Frontiers**, v. 7, p. 285–297, 2016.

MADANI, A. A. Selection of the optimum Landsat Thematic Mapper bands for automatic lineaments extraction, Wadi Natash area, south eastern desert, Egypt. In: **Proceedings of the 22nd Asian Conference on Remote Sensing**, 2001.

MALLAST, U.; GLOAGUEN, R.; GEYER, S.; RODIGER, T.; SIEBERT, C. Derivation of groundwater flow-paths based on semi-automatic extraction of lineaments from remote sensing data. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, p. 2665–2678, 2011.

MENTE, A. A água subterrânea no Brasil. In: Hidrogeologia: conceitos e aplicações. In: FEITOSA F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. (Org.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM, LABHID, 2008, p. 97–120.

MUHAMMAD, M. M.; AWDAL, A. H. Automatic Mapping of Lineaments Using Shaded Relief Images Derived from Digital Elevation Model (DEM) in Erbil-Kurdistan, Northeast Iraq. **Advances in Natural and Applied Sciences**, v. 6, n. 2, p. 38-146, 2012.

OTSU, N. A. threshold selection method from gray-level histograms. **IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics**, v. 9, n.1, p. 62–66, 1979.

PARAVOLIDAKIS, V.; RAGIA, L.; MOIROGIORGOU, K.; ZERVAKIS, M. E. Automatic Coastline Extraction Using Edge Detection and Optimization Procedures. **Geosciences**, v. 8, n. 11, p. 62-66, 2018.

PERONA, P.; MALIK, J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 12, n. 7, p. 629–639, 1990.

PCI GEOMATIC. **Manual do Software – Algoritmo LINE**. 2018. Disponível em <<https://urless.in/dGBQq>> Acesso em 11 de dez. de 2018.

QARI, M. H. T.; MADANI, A. A; MATSAH, M. I. M; HAMIMI, Z. Utilization of Aster and Landsat Data in Geologic Mapping of basement rocks of Arafat Area, Saudi Arabia. **The Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 33, n. 1C, p. 99-116, 2008.

QUEIROZ G. L., SALAMUNI E., NASCIMENTO E. R. do. AzimuthFinder: ferramenta para a extração de dados e apoio na análise estrutural. **Revista do Instituto de Geociências Geol. USP, Série Científica**. v. 14, n. 1, p. 69- 80, 2014.

REBOUÇAS, A. C. Importância da Água Subterrânea. In: FEITOSA F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. (Org.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM, LABHID, 2008, p. 20-22.

SETZER, J. *Significação Tectônica das Fraturas Fotogeológicas*. **Simpósio Brasileiro sobre Fotografias Aéreas**, 1965.

SIQUEIRA, J. B.; CAVALCANTE, I. N., REIS, A. V. G. Aplicação do Sensoriamento Remoto para Locação de Poços Tubulares. **Revista de Geologia**, v. 15, p. 141- 150, 2002.

VALE, G. M.; GALVANIN, E. A. S.; DAL POZ, A. P. O. Detector de Canny-EDP: Uma Combinação entre as Teorias de Canny e de Difusão Anisotrópica Não Linear. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 56, n. 2, p. 156- 168, 2004.

VAZ, D. A.; ACHILLE, G. D.; BARATA, M. T.; ALVES, E. I. Tectonic lineament mapping of the Thaumasia Plateau, Mars: comparing results from photointerpretation and a semi-automatic approach. **Computers & Geosciences**, v. 48, p. 162–172, 2012.

VASUKI, Y.; HOLDEN, E.; KPVESI. P.; MICKLETHWAITE, S. Semi-automatic mapping of geological structures using UAV-based photogrammetric data: an image. Analysis Approach. **Computers & Geosciences**, v.69, p. 22-32, 2014.

VIEIRA, M. B. **Vetorização e Análise de Tendência de Cartas de Lineamentos Geológicos**. 1998. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1998.

ZHANG, T.; YANG, X.; HU, S.; SU, F. Extraction of Coastline in Aquaculture Coast from Multispectral Remote Sensing Images: Object-Based Region Growing Integrating Edge Detection. **Remote Sensing**, v. 5, p. 4470–4487, 2013.