

Extração Automática de Lineamentos na Exploração de Água Subterrânea: Caso dos Aquíferos Metassedimentares da Chapada Diamantina Centro-Setentrional

Automatic Extraction of Lineaments in Groundwater Exploration: a Case Study of Metasedimentary Aquifers of the Northern-Central Chapada Diamantina

Hernan Sales Barreiro¹  & Natanael Da Silva Barbosa^{1,2} 

¹ Programa de Pós Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, Brasil

² Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, Brasil

E-mails: hernanssa@hotmail.com; nlsb2@yahoo.com.br

Resumo

Este artigo apresenta uma aplicação da técnica de extração automática de lineamentos nos estudos de águas subterrâneas. Seu objetivo é identificar feições estruturais, definir seu papel na hidrodinâmica dos aquíferos metassedimentares da Chapada Diamantina Centro-Setentrional e estabelecer uma relação entre os sistemas de fraturas e a prospecção hidrogeológica. A metodologia consiste em produzir um mapa de lineamentos obtidos através do processamento dos dados de modelo digital de elevação do SRTM, sobreposição de imagens sombreadas e produção de duas imagens de iluminação multidirecionais A e B (azimutes 0°, 45°, 90°, 135° e 180°, 225°, 270°, 315° respectivamente) utilizadas na extração automática das estruturas. Destas, a Imagem Multidirecional A apresentou uma menor variância nos dados, sendo utilizada nas interpretações hidrogeológicas a partir das orientações preferenciais dos lineamentos extraídos. A análise estatística em um conjunto com 2.370 lineamentos indica a predominância de três famílias: NNW-SSE (26,5%), NW-SE (23,0 %) e N-S (22,5%). Em geral, interpretou-se que o campo de tensão principal está associado aos lineamentos NNW-SSE, que correspondem às fraturas extensionais de partição (tipo T). As demais, tem relação com sistemas de pares conjugados de cisalhamento de NW-SE (antitético, tipo R') e N-S (sintético, tipo R). Esse padrão se relaciona com a evolução tectono-estrutural rúptil e com a geometria das rochas em anticlinais e sinclinais com eixos concordantes com a orientação N-S. Assim, as maiores densidades e interseções das fraturas principais (T, R e R') ocorrem nos locais de máxima curvatura dos anticlinais e sinclinais nas porções sudeste, nordeste e noroeste da área. Essas características implicam em uma maior favorabilidade para circulação e armazenamento de água subterrânea, com ocorrência de poços produtores com vazões entre 40,1 a 203,0 m³/h em oposição das demais regiões que são praticamente desprovidas de concentrações e interseções significativas de lineamentos.

Palavras-chave: Extração automática de lineamentos; Chapada Diamantina Centro-Setentrional; Prospecção hidrogeológica

Abstract

This article presents an application of the automatic line extraction technique in groundwater studies. Its objective is to identify structural features, define its role in the hydrodynamics of the metasedimentary aquifers of Chapada Diamantina Centro-Norte and establish a relationship between fracture systems and hydrogeological prospecting. The methodology consists of producing a map of the lines obtained by processing the digital elevation model data from the SRTM, superimposing shaded images and producing two multidirectional lighting images A and B (azimuth 0°, 45°, 90°, 135° and 180°, 225°, 270°, 315° respectively) used in the automatic extraction of the structures.. Of these, Multidirectional Image A showed a lower variance of data being used in hydrogeological interpretations from the preferred orientations of the extracted lines. The statistical analysis of a total of 2,370 lineaments indicates the predominance of three families NNW-SSE (26.5%), NW-SE (23.0%) and N-S (22.5%). In general, the interpretation of the main stress field is associated with the NNW-SSE that correspond to the extension fractures of partition (type T). The others are related to NW-SE (antithetical, type R') and N-S (synthetic, type R) shear pair systems. This pattern is related to the brittle tectonic-structural evolution and the geometry of the rocks in anticlines and synclines with axes in agreement with the N-S orientation. Thus, the highest densities and intersections of the main fractures (T, R and R') occur at the sites of maximum curvature of the anticlines and synclines in the southeast, northeast and northwest of the area. These characteristics imply greater favorability for underground water circulation and storage, with production wells with flow rates between 40.1 to 203.0 m³ / h in opposition to the other regions that are practically devoid of significant concentrations and intersections of lineaments.

Keywords: Automatic extraction of lineaments; Chapada Diamantina Central-Northern; Hydrogeological prospecting

1 Introdução

O mapeamento de lineamentos (i.e., descontinuidades, falhas, juntas, acamamentos e foliações) através de dados de sensoriamento remoto foi parte integrante de muitos programas de exploração de água subterrânea em terrenos metassedimentares e cristalinos. Nesses locais, as rochas apresentam uma porosidade primária baixa ou nula de forma que a interseção das estruturas secundárias é crucial na produtividade dos poços tubulares. Muitos trabalhos têm investigado dados de lineamentos estruturais em relação ao potencial hidrogeológico com ênfase em áreas semiáridas (Yin & Brook 1992; Meijerink 1996; Hoffmann & Sander 2006; Odeh et al. 2009). Nesse contexto, as características superficiais podem ser usadas como indicadores de fraturamento e intemperismo subsuperficial, essenciais na identificação de aquíferos produtivos.

Nos últimos anos, a aplicação dos produtos de sensoriamento remoto, juntamente com o desenvolvimento progressivo de técnicas de processamento de imagem, proporcionou uma maneira rápida e relativamente barata de coletar informações que complementam a geologia de campo clássica. Assim, a correlação entre as estruturas mapeadas em campo e o uso do sensoriamento remoto permite que os lineamentos sejam considerados representativos da manifestação tectono-estrutural de uma área específica (Morelli & Piana 2006). Adicionalmente é uma técnica recomendada para estudos de prospecção hidrogeológica, na detecção de estruturas geológicas que têm uma ligação direta com o fluxo da água subterrânea e na exploração e gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos (Amadi & Olasehinde 2010; Mogaji, Aboyej. & Omosuyi 2011; Akinluyi, Olorunfemi & Bayowa 2018; Mehdaoui & Mili 2019).

O sensoriamento óptico remoto, com a disponibilidade de desenvolvimento multiespectral e progressivo nas técnicas de processamento de imagem e a extração automática de feições lineares, corresponde a uma técnica com elevado potencial de aplicação na prospecção hidrogeológica através da cartografia precisa dos lineamentos estruturais. Em geral, a ampla cobertura de solos e a alta resolução das imagens de satélite em relação à escala possibilitam análises de lineamentos locais e regionais (Masoud & Koike 2006; Jensen 2009; Adiat, Nawawi. & Abdullah 2012; Dasho et al. 2017). Em síntese, a técnica visa a transformação automática das feições lineares contidas nas imagens em um segmento vetorial, como um ativo na detecção e interpretação de lineamentos, de modo a acelerar o processo de extração e reduzir a subjetividade inerente ao método manual (Hardcastle 1995; Henriksen &

Braathen 2005; Jensen 2009; Mallast et al. 2011; Vaz et al. 2012; Vasuki et al. 2014; Lobatskaya & Strelchenko 2016).

A área de estudo se enquadra no domínio hidrogeológico metassedimentar Centro-Setentrional da Chapada Diamantina. Perfaz unidades litoestratigráficas mesoproterozoicas (i.e., Formações Tombador e Caboclo), meso-neoproterozoicas (i.e., Formação Morro do Chapéu) e neoproterozoicas (i.e., Formação Bebedouro) (Schobbenhaus 1996; Pedreira 1997; Souza et al. 2019). Nesse contexto, as águas subterrâneas ocorrem em rochas sedimentares com metamorfismo incipiente muitas vezes silicificadas e fraturadas que compõe um sistema de dupla porosidade (Bai, Elsworth & Roegiers 1993; Altinörs & Önder 2008). Assim, o armazenamento e a circulação da água estão intimamente relacionados à existência das descontinuidades estruturais.

A pesquisa se concentra na aplicação da metodologia de sensoriamento remoto e sistemas de informação geográfica (SIG) na delimitação de lineamentos estruturais e na compreensão dos sistemas de fluxo das águas subterrâneas para auxiliar a prospecção hidrogeológica. Este estudo é importante pois, nas imagens de satélite de escala moderada (e.g., *Shuttle Radar Topography Mission - SRTM*, Landsat 8 e Alos Palsar), o ruído causado pelas informações fornecidas pela fotografia aérea pode desaparecer (Arlegui & Soriano 1998). Em síntese, os objetivos deste estudo são: (i) produzir um mapa de lineamentos estruturais a partir de dados de sensoriamento remoto; (ii) determinar a implicação hidrogeológica dos lineamentos, integrando-os aos modelos digital de elevação e aos mapas geológicos; (iii) analisar a distribuição das tendências dos lineamentos utilizando mapas de densidade e de interseção de lineamentos e diagrama de rosetas. A essência da pesquisa é fornecer um conjunto de informações que apontem para áreas onde os recursos hídricos inexplorados possam ser localizados no futuro. Isso resultará no reconhecimento e delimitação de áreas preferenciais para a prospecção hidrogeológica.

2 Caracterização Geológica e da Área de Estudo

A Chapada Diamantina Centro-Setentrional é um domínio fisiográfico situado na região centro norte do Cráton do São Francisco (Figura 1A). Compreende as latitudes 11°20' e 12°10'S e as longitudes 40°45' e 41°35'W e uma área de aproximadamente 5.150 km². O clima é variável, sendo predominantemente do tipo tropical de altitude com verões brandos (i.e., elevações superiores a 1.000 m) a quentes (i.e., entre 800 a 1000 m) e tropical subúmido (i.e., menores que 800 m) (Köppen 1948). Nesses

regimes climáticos, precipitações médias anuais são baixas (i.e., entre 700 e 750 mm), indicadores de uma tendência a semiaridez, e as alturas pluviométricas crescem para leste (i.e., 800 a 1.200 mm) devido às chuvas orográficas na região de piemonte (Rocha & Costa 1995). Em geral, as variações climáticas conferem períodos de déficits hídricos (Figura 1B) que interferem na regularidade dos regimes fluviais e na recarga dos aquíferos (Figura 1C).

Geologicamente, compreende a evolução da cobertura sedimentar meso-neoproterozoica do Cráton de São Francisco formada através de um regime extensional intracratônico estateriano, que promoveu uma bacia tipo rift-sag e um subseqüente conjunto de vulcanismo bimodal seguida de uma sedimentação continental psamítica (Magalhães et al. 2016; Souza et al. 2019). A área de estudo é constituída por um embasamento gnáissico-migmatítico paleoarqueano representado pelo Complexo Mairi. Sobrejacente têm-se o Grupo Chapada Diamantina com unidades metassedimentares mesoperoterozoicas representadas por conglomerados, arenitos e pelitos da Formação Tombador depositados em sistemas de leques aluviais e de rios entrelaçados, por vezes retrabalhados pelo vento e siltitos, arenitos e pelitos intercalados com laminitos algais, calcarenitos e estromatólitos colunares subordinados da Formação Caboclo, depositados em ambientes transicionais a marinho de águas rasas com períodos de exposição subaérea e ação de tempestades. Unidades meso-neoproterozoicas caracterizados por conglomerados basais sobrepostos a arenitos finos e raras intercalações pelíticas sedimentados em sistemas fluvio-estuarinos com depósitos inter a submaré (Battilani, Gomes & Guerra 1997; Rocha 2003) e unidades neoproterozoicas do Grupo Una representado por diamictitos, arenitos e lamitos com dropstones da Formação Bebedouro depositados em um ambiente glaciomarinho (Karfunkel & Hoppe 1988; Guimarães 1996; Figueiredo et al. 2009) e calcissiltitos, calcarenitos e laminitos algais marinhos da Formação Salitre em condições sub, inter e supramaré (Figura 1A) (Misi & Veizer 1998; Sial et al. 2016).

A área de estudo foi submetida a deformações compressivas de pequena magnitude desenvolvida em níveis superiores da crosta continental. Nela, dois eventos estruturais brasileiros são importantes: (i) sistema de dobramentos e empurrões orientados NNW-SSE através de um campo de tensão e decréscimo da magnitude deformacional de WSW-ENE, responsável pela inversão da bacia; (ii) sistema de fraturas de cisalhamento nos arenitos do Grupo Chapada Diamantina. Têm como feição principal o anticlinal de Morro do Chapéu orientado N-S e formada por compressão E-W e deslizamento flexural associado ao primeiro evento deformacional. Falhas contracionais de

baixo ângulo com geometria duplexes e sigmodal e fraturas com direções predominantemente N-S e NW-SE são outras feições associadas e frequentes nas rochas da Formação Morro do Chapéu e Caboclo (Rocha & Costa 1995; Rocha 2003).

Na região, as águas subterrâneas fluem em rochas sedimentares com metamorfismo incipiente, muitas vezes bem silicificadas e fraturadas, que se comportam como aquíferos fissurais. A recarga das águas subterrâneas ocorre principalmente pela infiltração direta das águas das chuvas nas porções orientais da área de estudo. Nesses locais as cotas topográficas das unidades litoestratigráficas e as alturas pluviométricas são maiores. Em geral, as águas tendem a convergir para os cursos de água superficiais, com significativas reposições em curtos períodos de tempo (i.e., meses de dezembro a fevereiro) e déficits nos outros meses (Figuras 1B e C). Nesse sistema, o armazenamento está associado à presença de fraturas, juntas e cavidade e o fluxo subterrâneo ocorre de maneira disseminada com preferência para as porções centrais da bacia hidrogeológica. Já as zonas de descarga compreendem os principais sistemas de drenagem que apresentam regimes intermitentes. (Barreiro 2018).

3 Extração Automática de Lineamentos

Na projeção de um algoritmo para a extração automática dos lineamentos, devem ser considerados as características espaciais (e.g., linhas retas), espectrais (e.g., e estruturas com alto contraste com o ambiente circundante) e radiométricas (e.g., variação de altitude) dos lineamentos. Em modelos digitais de elevação e imagens de sensoriamento remoto, os lineamentos associados às quebras positivas representam cristas de serras, escarpas, etc., enquanto que os lineamentos relativos às quebras negativas referem-se a juntas, falhas e drenagens (Abdullah, Akhir & Abdullah 2009). Assim, as estruturas correspondem a uma seqüência de pontos de uma imagem digital na qual a intensidade luminosa é sistematicamente modificada, ou seja, representam bordas em imagens de sensoriamento remoto. Essa característica possibilita sua extração automática 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).

Não obstante, a aplicação de técnicas de pré-processamento de imagem é necessária para a otimização dos resultados. Esse procedimento é importante devido à redução efetiva do ruído e por afetar a distribuição dos lineamentos extraídos associado às diferenças nos tons de cinza, a intensidade de iluminação e o azimute dos dados

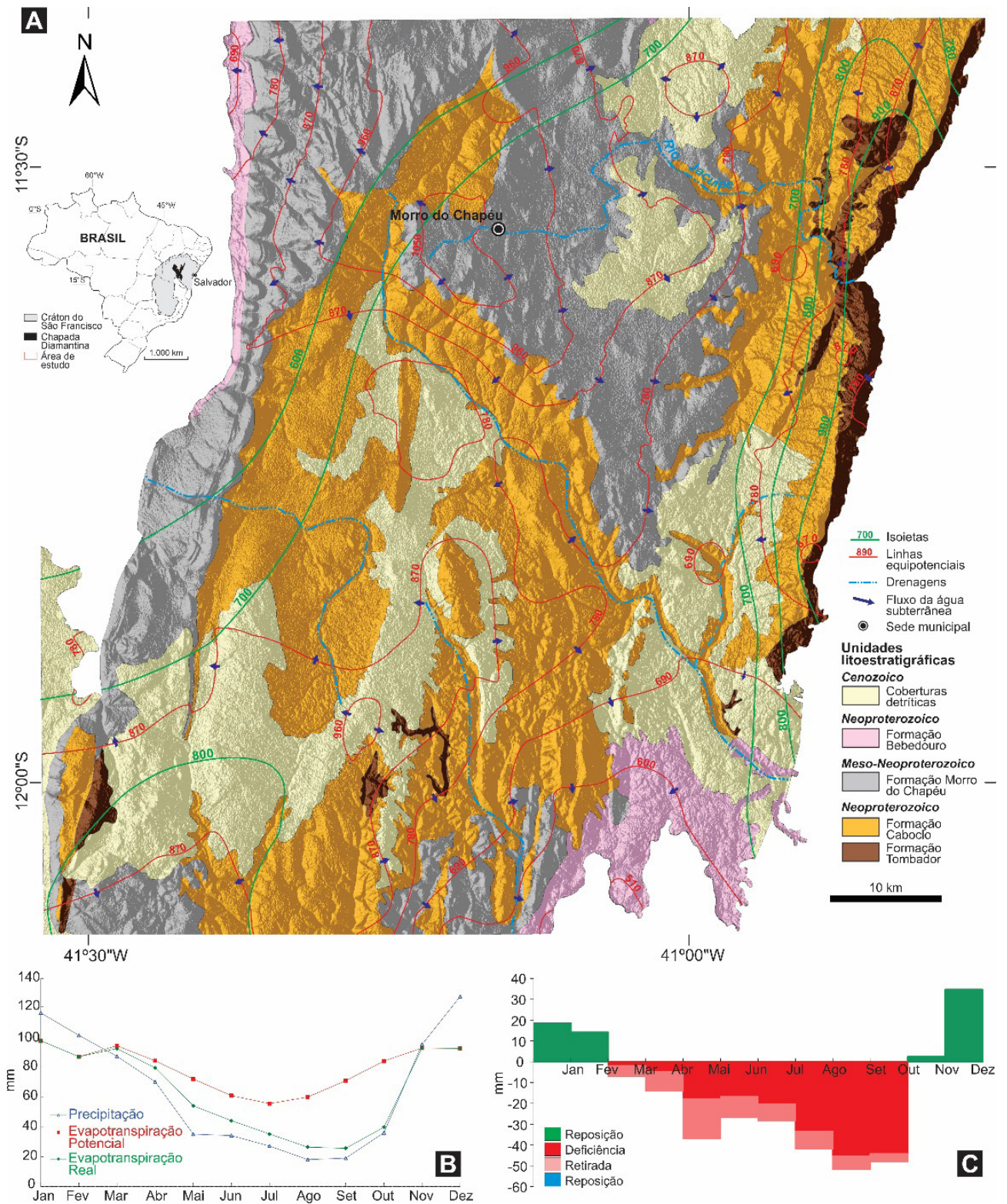


Figura 1 A. Mapa geológico e de fluxo das águas subterrâneas da área de estudo (Souza, Melo & Kosin 2003); B. Balanço hídrico da estação de Morro do Chapéu nos últimos 30 anos; C. Componentes do balanço hídrico (déficit e excedente hídrico, reposição e retirada da água do solo).

utilizados (Han et al. 2018). Em sequência têm-se a detecção das bordas através da técnica de filtragem que é utilizada para ressaltar ou ocultar a frequência espacial na imagem (Paravolidakis et al. 2018).

A frequência espacial corresponde ao número de alterações no valor do brilho por unidade de distância. Em geral, baixas frequências são caracterizadas por pequenas variações no brilho em uma determinada área. Já quando ocorrem modificações bruscas têm-se as altas frequências. Em síntese, a técnica de filtragem irá suprimir as baixas frequências e ressaltar as altas frequências (i.e., descontinuidades), que podem estar associados a presença de lineamentos (Schwengerdt 1980). O filtro de Canny é o mais utilizado na detecção de bordas em processos de extração automática de lineamentos (Canny 1987). Corresponde a um filtro de convolução que combina um operador diferencial com um filtro Gaussiano e localiza as bordas através da primeira derivada e da suavização do ruído (Alazzawi et al. 2015)

Em sequência, têm-se o processo de limiarização, que consiste na divisão de duas modas dominantes da imagem (i.e., branco e preto) através da determinação de um limiar L determinado para a imagem, que corresponde a quantidade de níveis de cinza em cada ponto. Portanto, um ponto perfaz o fundo quando o seu nível de cinza supera o valor L , sendo registrado na cor branca. Em contrapartida, o ponto pertence ao objeto (i.e., lineamentos), sendo delimitado na cor preta, quando o seu nível de cinza for inferior a L . (Vieira 1998).

A extração da curva a partir da imagem binária corresponde a última etapa de processamento da imagem. Essa técnica é subdividida em duas etapas: (i) extração das curvas de pixels que estão acima do limiar “ L ” e a eliminação das curvas que possuem número de pixels inferior à pré-estabelecida pelo usuário, sendo convertidas em vetor de acordo com um erro de ajuste máximo indicado pelo usuário; (ii) associação de pares de linhas obedecendo os critérios de colinearidade entre os segmentos de linhas (i.e., o ângulo entre os dois segmentos é menor do que o determinado pelo usuário) e proximidade entre os segmentos finais (i.e., a distância entre os pontos finais é menor que o definido pelo usuário) (PCI Geomatics 2012). A técnica de extração automática de lineamentos vem sendo difundida nos últimos anos por vários autores (e.g., Qari et al. 2008; Abdullah, Akhir & Abdullah 2009; Abdullah, Akhir & Abdullah 2010; Muhammad & Awdal 2012; Conceição & Silva 2013) através de pesquisas desenvolvidas para estabelecer qual tipo de imagem possui uma maior qualidade na obtenção de lineamentos.

4 Materiais e Métodos

Os dados detectados remotamente por radar têm sido amplamente utilizados como fonte de informação para o mapeamento de estruturas rúpteis. Na extração automática dos lineamentos estruturais foram utilizados dados de modelo digital de elevação obtidos do SRTM (*Shuttle Rader Topographic Mission*), com resolução espacial de 30 m, coletados através da interface Earth Explorer, do *United States Geological Survey* (USGS). Para uma melhor visualização e identificação dessas estruturas, foram produzidas oito imagens de relevo sombreadas a partir do *Software* QGIS 3.4 e utilizados como parâmetros o ângulo vertical de 30° e o exagero vertical (fator Z) de 1,0. Ademais, a aplicação de oito azimutes distintos (i.e., 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° e 315°) teve como finalidade a obtenção de imagens com diferentes fontes de iluminação. A partir das imagens de relevo sombreadas, uma sobreposição foi realizada a partir da álgebra de mapas do tipo soma no QGIS 3.4. Dessa forma, duas imagens com multidireções de iluminação foram produzidas, com as direções de 0°, 45°, 90° e 135° (Imagem Multidirecional A) e 180°, 225°, 270° e 315° (Imagem Multidirecional B).

As imagens multidirecionais foram utilizadas para a extração automática de lineamentos através do algoritmo Line do software PCI Geomatics. O processamento das imagens a partir da detecção de bordas, limiarização e extração de curvas, foi realizado através da aplicação dos seguintes parâmetros: (i) o raio de filtro de detecção de borda, em pixels, que determina o nível que o algoritmo detecta a informação como um lineamento; (ii) o limite de gradiente de borda, responsável por identificar o nível de gradiente mínimo de um pixel de borda para obtenção de uma imagem binária; (iii) o limite do comprimento da curva, que especifica o comprimento mínimo de curva, em pixels, para ser considerado como lineamento; (iv) o limite de erro de ajuste de linha, que indica, em pixels, o erro máximo permitido ao sobrepor uma linha sobre uma curva; (v) o limite de diferença angular, capaz de determinar o ângulo máximo, em graus, entre segmentos de uma linha; (vi) o limite de distância de conexão, que categoriza a distância mínima, em pixels, entre os pontos finais de dois vetores a serem ligados. Nessa pesquisa foram atribuídos os valores padrões de 10, 100, 30, 3, 30 e 20, respectivamente (PCI Geomatica 2012).

Esse processamento teve como resultado dois arquivos vetoriais com os lineamentos estruturais extraídos de forma automática, uma estatística dos dados e uma distribuição das orientações dos lineamentos através dos diagramas de roseta elaborados pelo *software* Oriana 4. Não obstante, devido a semelhança das dimensões e distribuição

dos lineamentos obtidos a partir das duas imagens com multidireções de iluminação foi estabelecido que os dados obtidos da Imagem Multidirecional A seriam utilizados nas etapas posteriores. Ademais, a aplicação da estimativa de densidade de Kernel resultou na confecção de mapas de interseção da distribuição dos lineamentos através do *software* QGIS 3.4.

Os dados hidrogeológicos de 147 poços (e.g., profundidade, nível estático, nível dinâmico, vazão), obtidos do banco de dados da Companhia de Engenharia Hídrica

e de Saneamento da Bahia (CERB), foram interpretados e integrados aos dados de lineamentos estruturais extraídos automaticamente. Adicionalmente, as cotas altimétricas foram extraídas através do modelo digital de elevação do SRTM. A partir destas, foram determinadas e extrapoladas as alturas potenciométricas e os principais sistemas de interseção de lineamentos e fluxo hídrico subterrâneo com ênfase na potencialidade hidrogeológica. Em síntese, a sequência metodológica utilizada está representada no fluxograma da Figura 2.

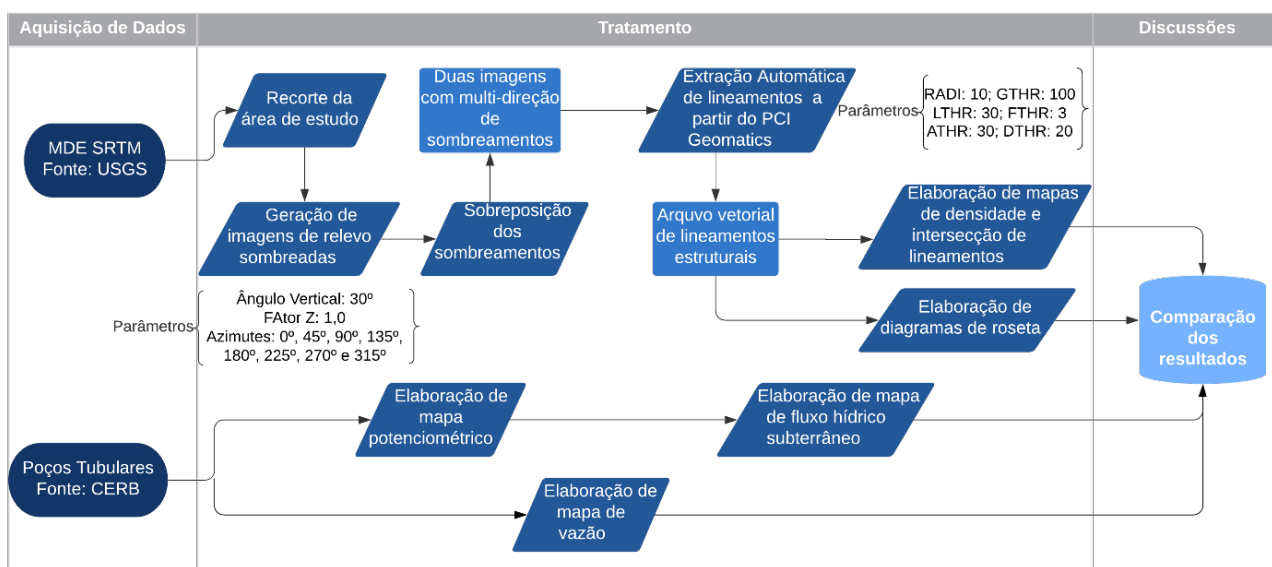


Figura 2 Fluxograma das etapas metodológicas da técnica de extração automática de lineamentos.

5 Resultados e Discussões

5.1 Análise Estatística dos Lineamentos

A elaboração de modelos digitais de elevação a partir de imagens SRTM teve como resultado duas imagens com multidireções de iluminação. A extração automática de lineamentos a partir das Imagens Multidirecionais A e B identificaram um total de 2.370 e 2.366 lineamentos estruturais com comprimentos mínimos e máximos variando de 0,91 a 11,24 e 0,91 a 14,07 km, respectivamente (Tabela 1). Em ambas imagens, os lineamentos apresentam um comprimento médio de 1,9 km e medida de tendência central de 1,51, e 1,52 respectivamente.

A distribuição das frequências apresenta uma assimetria positiva e atesta a ocorrência de uma maior quantidade de dados abaixo da média. Já a variância, é utilizada para demonstrar a dispersão dos dados em relação

à média. As imagens supracitadas apresentam valores de 1,21 e 1,32, respectivamente. Desse modo, têm-se que a Imagem Multidirecional A possui um menor grau de incerteza sendo, portanto, utilizada na interpretação dos dados hidrogeológicos.

O mapa final resultante da extração automática (Figura 3) mostra as principais orientações preferenciais, ou seja, as NNW-SSE são dominantes em 26,5% e 27,1%, as NW-SE com predominância de 23,0 % e 21,9% e àquelas N-S ocorrem em 22,5% e 22,6%, para as imagens multidirecionais A e B, respectivamente (Tabela 2). Em geral, a dispersão nos azimutes dos lineamentos se deve à história policíclica e à natureza rúptil das rochas metassedimentares que compõe a área de estudo.

A análise da densidade de lineamentos é uma medida da frequência de estruturas lineares por unidade de área (Edet et al. 1998). A distribuição espacial, comprimentos e orientações dos lineamentos obtidos através do diagrama de

Tabela 1 Caracterização quantitativa dos comprimentos dos lineamentos obtidos a partir das Imagens Multidirecionais A e B

Parâmetros	Lineamentos extraídos a partir da Imagem Multidirecional A	Lineamentos extraídos a partir da Imagem Multidirecional B
Número total de lineamentos	2.370	2.366
Comprimento (km)	Mínimo	0,91
	Máximo	11,20
	Médio	1,88
	Mediana	1,51
	Desvio padrão	1,10
	Variância	1,21
	Total	4.475,7



Figura 3 Distribuição espacial dos lineamentos e diagramas de rosetas obtidos a partir da Imagem Multidirecional A (A) e B (B).

Tabela 2 Porcentagem das direções dos lineamentos extraídas na área de estudo

Direção de lineamentos	Lineamentos extraídos a partir da Imagem Multidirecional A	Lineamentos extraídos a partir da Imagem Multidirecional B
N-S	22,5%	22,6%
NNE-SSW	11,4%	11,1%
NE-SW	1,3%	1,4%
ENE-WSW	0,3%	0,4%
E-W	2,1%	2,2%
ESE-WNW	13,0%	13,3%
NW-SE	23,0%	21,9%
NNW-SSE	26,5%	27,1%

rosetas das imagens multidirecionais A e B são relativamente semelhantes (Figura 3). Via de regra, mostram uma orientação preferencial N162 e N156, respectivamente. Em síntese, as direções NNW-SSE, NW-SE e N-S dos lineamentos desempenham um papel fundamental no sistema de fluxo das águas subterrâneas na área de estudo.

5.2 Relação Hidrogeológica entre os Lineamentos e o Fluxo Subterrâneo

A extração automática dos lineamentos resultou em um mapa com as concentrações dos lineamentos e suas interseções (Figura 4). A partir disto, observa-se que as regiões Sudeste, Nordeste e Noroeste concentram os locais com alta densidade de interseção de lineamentos. Em geral, apresentam as menores cotas potenciométricas e são regiões de convergência e descarga do fluxo subterrâneo. Correspondem aos locais mais viáveis para a acumulação e prospecção de água subterrânea em um terreno de rocha metassedimentar com interseções de lineamentos

e exemplos de poços produtores com vazões entre 40,1 a 203,0 m³/h na porção noroeste da área de estudo.

Já as porções Centrais e Sudoeste são praticamente isentas de densidades e interseções de lineamentos significativos (Figura 4). Apesar disto, a porção centro-norte apresenta elevada concentração de poços produtivos, fato que está relacionado com a proximidade da sede do município de Morro do Chapéu, onde demanda maior precisão na locação dos poços. Em síntese, a probabilidade de ocorrência de poços produtores é intimamente relacionada com a concentração e interseção de lineamentos. Via de regra, apenas 2% dos poços possuem vazões inferiores à 0,5 m³/h.

A análise dos lineamentos obtidos após os tratamentos da imagem SRTM evidencia a existência de determinadas orientações preferenciais dos lineamentos. A alta densidade de descontinuidades possui uma relação com a superposição de dois eventos geotectônicos de deformação compressiva e baixa magnitude que afetaram as unidades estratigráficas ao longo do tempo geológico.

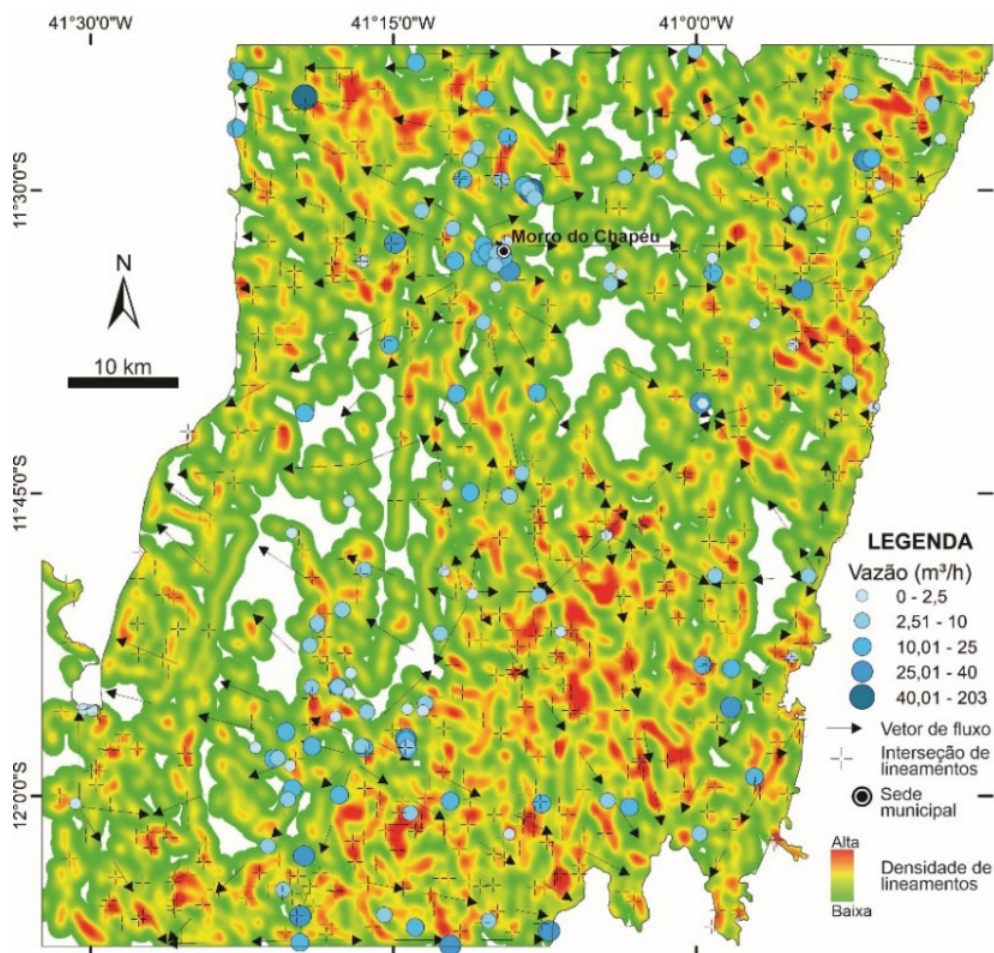


Figura 4 Mapa de potencialidade hidrogeológica e de fluxo das águas subterrâneas em relação a densidade e intersecções de lineamentos.

A Figura 5 ilustra a configuração estrutural esquemática da área de estudo com as orientações das estruturas resultantes da superposição dos esforços tectônicos. Inicialmente têm-se esforços compressivos W-S, implantação de falhas reversas N-S e inversão estrutural da bacia. Posteriormente, tensões NNW-ESE produziram um sistema de fraturas extensionais de partição (Tipo T) predominantes na área de estudo, sendo paralelas ao esforço principal e fraturas de cisalhamento (sintético R e antitético R') de orientação N-S e NW-SE, respectivamente. Adicionalmente, fraturas NNE-SSW paralelas a zona de

cisalhamento principal (Tipo Y=D) e E-W antitética (Tipo X), são menos expressivas.

O modelo estrutural idealizado para a área de estudo indica que as regiões de maior potencialidade hidrogeológica se relacionam intimamente com as principais interseções dos lineamentos. Nela, os eixos das dobras correspondem às principais regiões onde se concentram a deformação e o armazenamento das águas subterrâneas, relacionados à interseção das fraturas abertas do tipo T (NNW-ESE) com as de cisalhamento do tipo R e R', de orientação N-S e NW-SE, respectivamente.

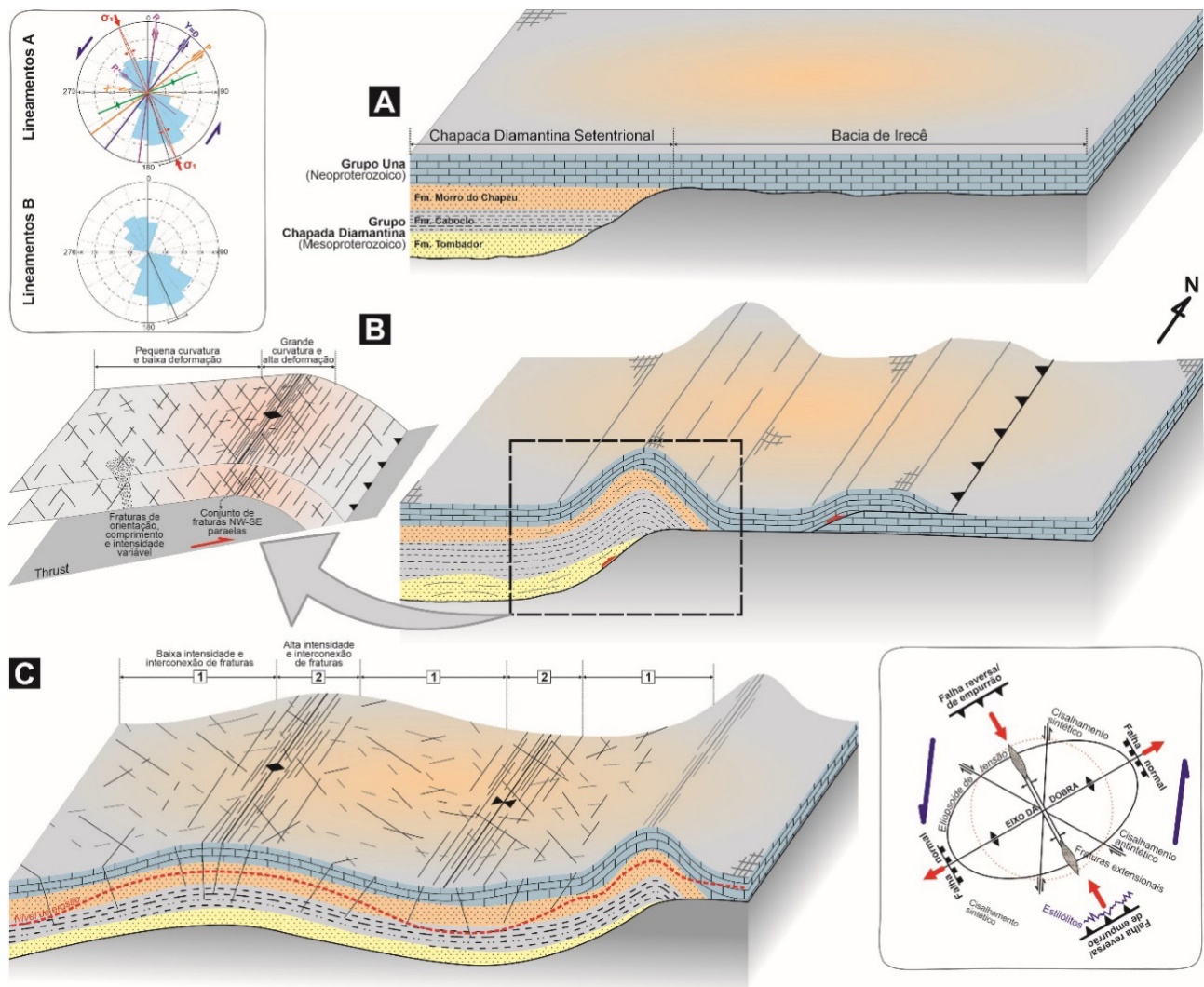


Figura 5 Modelo estrutural esquemático dos aquíferos metassedimentares da Chapada Diamantina Centro-Setentrional na condição pré-deformacional (A), dos esforços compressivos W-S e implantação de falhas reversas N-S (B) e da ação de tensões NNW-ESE que produziram um sistema de fraturas tensionais (Tipo T), fraturas de cisalhamento (sintético R e antitético R') de orientação N-S e NW-SE.

6 Conclusões

A técnica de extração automática a partir de imagens SRTM possibilitou a delimitação dos principais lineamentos estruturais da Chapada Diamantina Centro-Setentrional. As principais interpretações hidrogeológicas foram realizadas a partir da análise estatística da Imagem Multidirecional A que apresenta uma menor variância dos dados e demonstra a existência das orientações preferenciais dos lineamentos. Um total de 2.370 lineamentos foram extraídos com comprimento médio de 1,9 km e variação de 0,91 a 11,34 km. A análise estatística dos lineamentos indicou como direções preferenciais as orientações NNW-SSE, NW-SE e N-S, respectivamente. Assim, esses padrões de lineamentos se relacionam com a evolução tectono-estrutural rúptil e com a geometria das rochas em anticlinais e sinclinais com eixos concordantes com a orientação N-S.

A interpretação dos lineamentos extraídos indicou que a direção NNW-SSE é predominante (26,5%) e concordante com o campo de tensão do último evento deformacional que afetou as unidades litoestratigráficas. Resulta em fraturas extensionais de partição (tipo T). Adicionalmente, pares conjugados de fraturas de cisalhamento de NW-SE (antitético, tipo R') e N-S (sintético, tipo R) e ocorrem de modo significativo, representando 23,0% e 22,5% dos lineamentos, respectivamente.

Como resultado, têm-se um sistema de fraturas que possui maiores densidades e interseções dos tipos principais (T, R e R') nos locais de máxima curvatura dos anticlinais e sinclinais nas porções sudeste, nordeste e noroeste da área. Essas características implicam em uma maior favorabilidade para o armazenamento e a prospecção de água subterrânea com ocorrência de poços produtores com vazões entre 40,1 a 203,0 m³/h em oposição as demais regiões que são praticamente desprovidos de concentrações e interseções significativos de lineamentos.

7 Referências

- Abdullah, A., Akhir, J.M. & Abdullah, I. 2009, 'A Comparison of Landsat TM and SPOT Data for Lineament Mapping in Hulu Lepar Area, Pahang, Malaysia', *European Journal of Scientific Research*, vol.34, no. 3, pp. 406-15.
- Abdullah, A., Akhir, J.M. & Abdullah, I. 2010, '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*, vol. 15, pp. 949-57.
- Adiat, K., Nawawi, M. & Abdullah, K. 2012, 'Assessing the accuracy of GIS-based elementary multi criteria decision analysis as a spatial prediction tool. A case of predicting potential zones of suitable ground water resources', *J. Hydrology*, vol. 440-1, pp.75-89. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.03.028>.
- Akinluyi, F.O., Olorunfemi, M.O. & Bayowa, O.G. 2018, 'Investigation of the influence of lineaments, lineament intersections and geology on groundwater yield in the basement complex terrain of Ondo State, Southwestern Nigeria', *Applied Water Science*, vol. 8, no. 49, pp. 1-13. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0686-x>.
- Alazzawi, A., Alsaadi, H., Shallal, A. & Albwi, S. 2015, 'Edge Detection Application of (First and Second) Order Derivate Ative in Image Processing', *Diyala Journal of Engineering Sciences*, vol. 8, no. 4, pp. 430-40.
- Altinörs, A. & Önder, H. 2008, 'A double-porosity model for a fractured aquifer with non-Darcian flow in fractures', *Hydrological Sciences-Journal*, vol. 53, no. 4, pp. 868-82. <https://doi.org/10.1623/hysj.53.4.868>.
- Amadi, A.N. & Olasehinde, P.I. 2010, 'Application of remote sensing techniques in hydrogeological mapping of parts of Bosso area, Minna, north-Central Nigeria', *Int J Phys Sci.*, vol. 5, no. 9, pp. 1465-74.
- Arlegui, L.E. & Soriano, M.A. 1998, 'Characterizing lineaments from satellite images and field studies in the central Ebro basin (NE Spain)', *Int. J. Rem. Sens.*, vol. 19, pp. 3169-85. <https://doi.org/10.1080/014311698214244>.
- Bai, M., Elsworth, D. & Roegiers, J.C. 1993, 'Multiporosity/multipermeability approach to the simulation of naturally fractured reservoirs', *Water Resour. Res.*, vol. 29, no. 6, pp. 1621-33. <https://doi.org/10.1029/92WR02746>
- Barreiro, H.S. 2018, 'Hidrogeologia do Domínio Metassedimentar na Chapada Diamantina Centro-Setentrional: Sistemas de Fluxo e Métodos de Prospecção'. Trabalho Final de Graduação, Curso de Graduação em Geologia, Universidade Federal da Bahia.
- Battilani, G.A., Gomes, N.S. & Guerra, W.J. 1997, 'Evolução diagenética dos arenitos da Formação Morro do Chapéu, Grupo Chapada Diamantina, na região de Morro do Chapéu, Bahia', *Geonomos*, vol. 4, no. 2, pp. 81-9. <https://doi.org/10.18285/geonomos.v4i2.203>
- Canny, J.A. 1987, 'Computational approach to edge detection', *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 8, pp. 679-98. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.1986.4767851>.
- Conceição, R.A.C. & Silva, A.Q. 2013, 'Extração automática de lineamentos utilizando imagens SRTM, Landsat ETM+ e ALOS PALSAR na região de Nobres, MT', *XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, pp. 3688-95.
- Dasho, O.A., Ariyibi, E.A., Akinluyi, F.O., Awoyemi, M.O. & Adebayo, A.S. 2017, 'Application of satellite remote sensing to groundwater potential modelling in Ejigbo area, Southwestern Nigeria', *Model Earth Syst Environ*, vol. 3, no 2, pp. 615-33. <https://doi.org/10.1007/s40808-017-0322-z>.
- Edet A.E., Okereke C.S., Teme S.C. & Esu E.O. 1998, 'Application of remote-sensing data to groundwater exploration: a case study of the Cross River State, Southeastern Nigeria', *Hydrogeol J.*, vol. 6, pp. 394-404. <https://doi.org/10.1007/s100400050162>.
- Figueiredo, F.T., Almeida, R.P., Tohver, E., Babinski, M., Liu, D. & Fanning, C.M. 2009, 'Neoproterozoic glacial dynamics revealed by provenance of diamictites of the Bebedouro Formation, São Francisco Craton, Central Eastern Brazil',

- Terra Nova*, vol. 21, no. 5, pp. 375–85. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2009.00893.x>.
- Guimarães, J.T. 1996, 'A Formação Bebedouro no Estado da Bahia: Faciologia, estratigrafia e ambientes de sedimentação', Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia.
- Han, L., Liu, Z., Ning, Y & Zhao, Z. 2018, 'Extraction and analysis of geological lineaments combining a DEM and remote sensing images from the northern Baoji loess area', *Advances in Space Research Int.*, vol. 62, pp. 2480–93. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.07.030>.
- Hardcastle, K.C. 1995, 'Photolineament factor: a new computer-aided method for remotely sensing the degree to which the bedrock is fractured', *Photogrammetric Eng Remote Sens.*, vol. 61, pp. 739–47. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(96\)81851-1](https://doi.org/10.1016/0148-9062(96)81851-1).
- Henriksen, H. & Braathen, A. 2005, 'Effects of fracture lineaments and in situ rock stresses on groundwater flow in hard rocks: a case study from Sunnfjord, Western Norway', *Hydrogeol J.*, vol. 14, pp. 444–61. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-2001-5>.
- Hoffmann, J. & Sander, P. 2006, 'Remote sensing and GIS in hydrogeology', *Hydrogeology Journal*, vol. 15, no. 1 pp. 1-3. <https://doi.org/10.1007/s10040-006-0140-2>.
- Jensen, J.R. 2009, *Sensoriamento remoto do ambiente: Uma perspectiva em recursos terrestre*, Editora Parentese, São José dos Campos, São Paulo.
- Karfunkel, J. & Hoppe, A. 1988, 'Late Proterozoic glaciation in central-eastern Brazil: synthesis and model', *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, vol. 65, pp. 1–21. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(88\)90108-3](https://doi.org/10.1016/0031-0182(88)90108-3).
- Karnieli, A., Meisels A., Fisher, L. & Arkin, Y. 1996, 'Automatic extraction and evaluation of geological linear features from digital remote sensing data using a hough transform', *Photogrammetry Engineering & Remote Sensing*, vol. 62, no. 5, pp. 525-31.
- Köppen, W. 1948, 'Klassifikation der klimate nach temperatur, niederschlag und jahreslauf', *Petermanns Geographische Mitteilungen*, vol. 64, pp. 193-203.
- Liu, H. & Jezek, K. 2004, 'Automated extraction of coastline from satellite imagery by integrating canny edge detection and locally adaptive thresholding methods', *Int. J. Remote Sens.*, vol. 25, pp. 937–58. <https://doi.org/10.1080/0143116031000139890>.
- Lobatskaya, R.M. & Strelchenko, I.P. 2016, 'GIS-based analysis of fault patterns in urban areas: a case study of Irkutsk city, Russia', *Geosci Front.*, vol. 7, pp. 285–97. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.07.004>.
- Magalhães, A.J.C., Raja Gabaglia, G.P., Scherer, C.M.S., Bállico, M.B., Guadagnin, F., Bento Freire, E., Silva Born L.R. & Catuneanu, O. 2016, 'Sequence hierarchy in a Mesoproterozoic interior sag basin: from basin fill to reservoir scale, the Tombador Formation, Chapada Diamantina Basin, Brazil', *Basin Research*, vol. 28, no. 3, pp. 393-432. <https://doi.org/10.1111/bre.12117>.
- Mallast, U., Gloaguen, R., Geyer, S., Rodiger, T. & Siebert, C. 2011, 'Derivation of groundwater flow-paths based on semi-automatic extraction of lineaments from remote sensing data', *Hydrol Earth Syst Sci*, vol. 15, pp. 2665–78. <https://doi.org/10.5194/hess-15-2665-2011>.
- Masoud, A. & Koike, K. 2006, 'Tectonic architecture through Landsat-7 ETM +/SRTM DEM-derived lineaments and relationship to the hydrogeologic setting in Siwa region, NW Egypt', *J Afr Earth Sci*, vol. 45, pp. 467–77. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2006.04.005>.
- Meijerink, A.M.J. 1996, 'Remote sensing applications to hydrology: groundwater', *Hydrological Sciences Journal*, vol. 41, no. 4, pp. 549-61. <https://doi.org/10.1080/02626669609491525>.
- Mehdaoui, R. & Mili, E.M. 2019, 'Combined use of remote sensing and GIS in the extraction of structural lineaments in the Cretaceous basin of Errachidia-Boudnib (south-east Morocco), hydrological implication', *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, vol. 8, no. 5, pp. 216-20.
- Misi, A. & Veizer, J. 1998, 'Neoproterozoic sequences of the Una Group, Irecê Basin, Brazil: chemostratigraphy, age and correlations', *Precambrian Research*, vol. 89, pp. 87-100. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(97\)00073-9](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(97)00073-9).
- Mogaji, K.A., Aboyeji, O.S. & Omosuyi, G.O. 2011, 'Mapping of lineaments for groundwater targeting in the basement complex region of Ondo State, Nigeria, using remote sensing and geographic information system (GIS) techniques', *Int. J. Water. Resour. Environ Eng*, vol. 3, no. 7, pp. 150–60.
- Morelli, M. & Piana, F. 2006, 'Comparison between remotely sensed lineaments and geological structures in intensively cultivated hills (Monferrato and Langhe domains, NW Italy)', *Int. J. Rem. Sens.*, vol. 27, no. 20, pp. 4471-93. <https://doi.org/10.1080/01431160600784200>.
- Muhammad, M.M. & Awdal, A.H. 2012, '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*, vol. 6, no. 2, pp. 38-146.
- Odeh, T., Salameh, E., Schirmer, M. & Strauch, G. 2009, 'Structural control of groundwater flow regimes and groundwater chemistry along the lower reaches of the Zerka River, West Jordan, using remote sensing, GIS, and field methods', *Environ Geol.*, vol. 58, no. 8, pp. 1797-810.
- Otsu, N. 1979, 'A threshold selection method from gray-level histograms', *IEEE Trans. Syst. Man Cybern*, vol. 9, no. 1, pp. 62–6. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>.
- Paravolidakis, V., Ragia, L., Moirogiorgou, K. & Zervakis, M.E. 2018, 'Automatic Coastline Extraction Using Edge Detection and Optimization Procedures', *Geosciences*, vol. 8, no. 407, pp. 1-19. <https://doi.org/10.3390/geosciences8110407>.
- PCI Geomatica. Manual do Software – Algoritmo LINE. 2012, acesso em 11 dezembro 2019, < http://www.pcigeomatics.com/geomatica-help/references/pciFunction_r/python/P_line.html>.
- Pedreira, A.J. 1997, 'Sistemas deposicionais da Chapada Diamantina Centro-Oriental, Bahia', *Revista Brasileira de Geociências*, vol. 27, no. 3, pp. 229-40.
- Perona, P. & Malik, J. 1990. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 12, pp. 629–39. <https://doi.org/10.1109/34.56205>.

- Qari, M.H.T., Madani, A.A, Matsah, M.I.M & Hamimi, Z. 2008, 'Utilization of Aster and Landsat Data in Geologic Mapping of basement rocks of Arafat Area, Saudi Arabia', *The Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 33, no. 1, pp. 99-116.
- Rocha, A.J.D. & Costa, I.V.G. 1995, 'Município de Morro do Chapéu (BA): Informações básicas para o planejamento e administração do meio físico', Projeto Mapas Municipais, Salvador, CPRM.
- Rocha, A.J.D., 2003, 'Geologia (Folha Morro do Chapéu)', Programa Levantamentos Geológicos Básico do Brasil - Morro do Chapéu (Folha SC.YC-V) - Estado da Bahia – escala 1:100.000, Brasília, CPRM.
- Schobbenhaus, C. 1996, 'As tafrogêneses superpostas Espinhaço e Santo Onofre, estado da Bahia: Revisão e novas propostas', *Brazilian Journal of Geology*, vol. 26, pp. 265–76.
- Schwengerdt, R.A. 1980, 'Reconstruction of Multispatial, Multispectral Image Data Using Spatial Frequency Content', *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 46, no. 10, pp. 1325-34.
- Sial, A.N., Gaucher, C., Misi, A., Boggiani, P.C., Alvarenga, C.J.S., Ferreira, V.P., Pimentel, M.M., Pedreira, J.A., Warren, L.V., Fernández-Ramírez, R., Geraldés, M., Pereira, N.S., Chiglino, L. & Cezario W.S. 2016, 'Correlations of some Neoproterozoic carbonate-dominated successions in South America based on high-resolution chemostratigraphy', *Brazilian Journal of Geology*, vol. 46, no. 3, pp. 439-88. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201620160079>.
- Souza, J.D., Melo, R.C. & Kosin, M. 2003 'Mapa geológico do estado da Bahia'. Escala 1:1.000.000.
- Souza, E.G., Scherer, C.M.S., Reis, A.D., Bállico, M.B., Ferronato, J.P.F., Bofill, L.M. & Kifumbi, C. 2019, 'Sequence stratigraphy of the mixed wave-tidal-dominated Mesoproterozoic sedimentary succession in Chapada Diamantina Basin, Espinhaço supergroup– Ne/Brazil', *Precambrian Research*, vol. 327, pp.103–20. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.03.007>.
- Vasuki, Y., Holden, E., Kovesi, P. & Micklethwaite, S. 2014, 'Semi-automatic mapping of geological structures using UAV-based photogrammetric data: an image', *Analysis Approach*, vol. 69, pp. 22-32. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.04.012>.
- Vaz, D.A., Achille, G.D., Barata, M.T. & Alves, E.I. 2012, 'Tectonic lineament mapping of the Thaumasia Plateau, Mars: comparing results from photointerpretation and a semi-automatic approach', *Comput Geosci*, vol. 48, pp. 162–72. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.05.008>
- Vieira, M.B. 1998, 'Vetorização e Análise de Tendência de Cartas de Lineamentos Geológicos', Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Yin, Z.Y. & Brook, G.A. 1992, 'The topographic approach to locating high yield wells in crystalline rocks; does it work?', *Ground Water*, vol. 30, no. 1, pp. 96-102.
- Zhang, T., Yang, X., Hu, S. & Su, F. 2013, 'Extraction of Coastline in Aquaculture Coast from Multispectral Remote Sensing Images: Object-Based Region Growing Integrating Edge Detection', *Remote Sens.*, vol. 5, pp. 4470–87. <https://doi.org/10.3390/rs5094470>.

Recebido em: 28/10/2020

Aprovado em: 16/03/2021

Como citar:

Barreiro, H.S. & Barbosa, N.S. 2021, 'Extração Automática de Lineamentos na Exploração de Água Subterrânea: Caso dos Aquíferos Metassedimentares da Chapada Diamantina Centro-Setentrional', *Anuário do Instituto de Geociências*, vol. 44: 39227. https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_39227