

Mapeamento virtual de fraturas para análise estrutural quantitativa em análogo de reservatório carbonático

Virtual fracture mapping for quantitative structural analysis in carbonate reservoir analog

Luana Sousa da Silva¹, Vincenzo La Bruna¹, Renata Emily Brito de Araújo¹, Francisco Hilário Rego Bezerra¹, Walter Eugênio Medeiros^{1,2}

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Caixa Postal 1596, CEP: 59078-970, Natal, RN, BR. (ls.luanasilv4@gmail.com; vincenzolabruna@gmail.com; renataaa.brito@gmail.com; hilario.bezerra@ufrn.br; walter.medeiros@ufrn.br)

² Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Geofísica do Petróleo (INCT-GP/CNPq/CAPES). Natal, RN, BR.

Recebido em 27 de setembro de 2023; aceito em 9 de abril de 2024.

RESUMO

Os reservatórios carbonáticos representam entre 50 e 60 % das reservas mundiais de hidrocarbonetos. Diante da presença de fraturas e processos de dissolução, as rochas podem ter suas propriedades petrofísicas alteradas. No presente estudo, utilizaram-se rochas carbonáticas fraturadas e carstificadas, da Formação Jandaíra – Bacia Potiguar, como um análogo deste tipo de reservatório, e foram selecionados três afloramentos localizados no Lajedo Arapuá, em Felipe Guerra/RN, doravante designados Arapuá I, II e III. Os objetivos da pesquisa consistem em: caracterizar os atributos das fraturas mapeadas; identificar a possível influência de estruturas pré-existentes no desenvolvimento destas fraturas e discutir as implicações destes atributos nas propriedades de armazenamento e migração de fluidos dos reservatórios carbonáticos. Os objetivos foram alcançados por meio dos seguintes métodos: imageamento com Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), aquisições de linhas de varredura (*scanlines*) e áreas de varredura (*scanareas*). Os dados estruturais coletados foram processados para a obtenção dos valores de P20 (intensidade), P21 (densidade) e P10 (frequência) e, realização de estudos estatísticos e topológicos. Foi identificada uma variação nos parâmetros citados em relação aos setores do lajedo, e a proximidade da charneira da dobra Apodi, disposta paralelamente a um corredor de fraturas NE-SW. É possível verificar um aumento no grau de deformação e conectividade entre os elementos estruturais com a proximidade da zona da charneira, ocorrendo agrupamento (*clusters*) de fraturas associadas aos sets N-S e NW-SE. As características identificadas, associadas a estudos anteriores na região, ressaltam o expressivo controle exercido pelos elementos estruturais sobre as propriedades petrofísicas destas rochas, demonstrando a presença de uma zona de alta permeabilidade próxima à charneira e ao corredor de fraturas.

Palavras-chave: Zona de alta permeabilidade; Análise estrutural quantitativa; P20, P21 e P10; Lei de potência e lei exponencial; Topologia.

ABSTRACT

Carbonate reservoirs represent between 50 and 60% of the world's hydrocarbon reserves. Due to the presence of fractures and dissolution processes, their petrophysical properties may change. The present study used fractured and karstified carbonate rocks from the Jandaíra Formation – Potiguar Basin, as an analogue of this type of reservoir. Three outcrops located in Lajedo Arapuá, in Felipe Guerra/RN, hereinafter referred to as Arapuá I, II and III, were selected. The research objectives consisted of: characterizing the attributes of the mapped fractures; identify the possible influence of pre-existing structures on the development of these fractures; and discuss the implications of these attributes on the fluid storage and migration properties of carbonate reservoirs. These objectives were achieved through the following methods: imaging with an Unmanned Aerial Vehicle (UAV), acquisition of scanlines and scanareas. The structural data collected were processed to obtain the values of P20 (intensity),

P21 (density) and P10 (frequency), and to carry out statistical and topological studies. A variation in the aforementioned parameters was identified in relation to the slab sectors, and the proximity of the Apodi fold hinge, arranged parallel to a NE-SW fracture corridor. It is possible to verify an increase in the degree of deformation and connectivity between the structural elements with the proximity of the hinge zone, with clusters of fractures associated with the N-S and NW-SE sets occurring. The identified characteristics, associated with previous studies in the region, highlight the significant control exercised by structural elements over the petrophysical properties of these rocks, demonstrating the presence of a high-permeability zone close to the hinge and the fracture corridor.

Keywords: High-permeability zones; Quantitative structural analysis; P20, P21 e P10; Power law and exponential law; Topology.

INTRODUÇÃO

Os reservatórios carbonáticos são complexos e heterogêneos. Suas propriedades petrofísicas estão diretamente relacionadas à presença de elementos estruturais, principalmente em escala subsísmica (<50 m), como juntas, estilólitos e corredores de fraturas (e.g., Roehl e Choquette, 2012; Panza et al., 2018; Giuffrida et al., 2019; La Bruna et al., 2021). As fraturas (juntas e falhas) são capazes de atuar como selante ou conduto e ultrapassar zonas do reservatório, em diferentes níveis estratigráficos (Questiaux et al., 2010). Por sua vez, os corredores de fraturas podem desenvolver zonas de alta permeabilidade (*super-k zones*) (La Bruna et al., 2021; Lopes et al., 2022, 2023).

A compreensão do arranjo espacial, bem como dos padrões de desenvolvimento destes elementos estruturais, é essencial na construção de modelos de reservatórios mais fidedignos (Gholipour et al., 2016; Xu et al., 2017). A escala de investigação é um desafio relacionado a esta caracterização, uma vez que os métodos tradicionais utilizados, sísmica e poços, geralmente não permitem o reconhecimento das feições subsísmicas (Giuffrida et al., 2019; Furtado et al., 2022). Por outro lado, ferramentas como o Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) têm se destacado por permitir a aquisição de um grande volume de dados, em alta resolução espacial, através de imagens aéreas.

O presente estudo utilizou afloramentos de rochas carbonáticas fraturadas e carstificadas como um análogo de reservatório. A área está localizada no Lajedo Arapuá, no município de Felipe Guerra/RN, litologicamente representado pela Formação Jandaíra (Figura 1). A região é caracterizada pela presença de um corredor de fraturas NE-SW, paralelo à charneira da dobra Apodi, e a um trecho do rio Apodi-Mossoró (Bagni et al., 2020).

O objetivo da pesquisa consiste em caracterizar, quantificar e interpretar, os atributos das fraturas mapeadas na área de estudo, a fim de compreender qual a relação entre os estilos estruturais identificados e o contexto geológico regional, assim como elaborar considerações sobre as propriedades petrofísicas das rochas, e como a

presença destas estruturas influenciam no armazenamento e fluxo de fluidos. Para essa pesquisa foram selecionados três (03) afloramentos:

- Arapuá I
(14,59 m x 16,68 m) – (5°31'47.49"S; 37°36'52.24"O);
- Arapuá II
(16,6 m x 16,76 m) – (5°32'9.41"S; 37°38'18.97"O); e
- Arapuá III
(19,09 m x 16,84 m) – (5°31'57.75"S; 37°38'25.23"O).

A aquisição de dados contou com uma análise estrutural qualitativa em campo, e a análise quantitativa realizada através de imagens aéreas obtidas com VANT. O processamento das imagens aéreas permitiu realizar a identificação, qualificação e quantificação das descontinuidades presentes, obtenção das medidas de intensidade, densidade e frequência do fraturamento (P20, P21 e P10) (Dershowitz e Herda, 1992), assim como o estudo da relação e distribuição espacial entre as estruturas (topologia e estatística) (Sanderson e Nixon, 2015). A integração dos dados permitiu caracterizar o fraturamento em relação à distância da charneira da dobra. O estudo está apresentando um conjunto de análises estruturais, em alta resolução, fundamentais no estudo de análogo de reservatórios carbonáticos fraturados e carstificados. O fluxo de fluidos em rochas fraturadas depende tanto do sistema de fraturamento (comprimento, orientação, abertura e conectividade), quanto da textura da rocha (porosidade e permeabilidade).

GEOLOGIA REGIONAL

A Bacia Potiguar está localizada no extremo NE do Brasil, na Margem Equatorial. Seu desenvolvimento teve início no fim do Jurássico, há aproximadamente 200 Ma, e está associado à sucessões de eventos tectônicos que foram responsáveis pela separação dos continentes sul-americano e africano, e conseqüentemente a formação do Oceano Atlântico (Matos, 1992). A evolução tectônica e o preenchimento da bacia se deram por meio de três estágios entre o Neocomiano e o Quaternário, denominados Rife, Pós-rife e Drifte (Pessoa Neto et al., 2007). Os diferentes

estágios foram relacionados a significativas alterações na geometria da bacia, assim como nos sistemas deposicionais desenvolvidos.

A área de estudo compreende as rochas da Formação Jandaíra (Figura 1B), unidade associada à sequência transgressiva da fase Drifte, durante o desenvolvimento da Bacia Potiguar (Córdoba et al., 2001). A porção emersa da bacia inclui larga exposição da unidade, onde são visualizados os efeitos da intensa carstificação e baixa inclinação de mergulho em direção ao Oceano Atlântico (Pessoa Neto et al., 2007).

No período de sua deposição e pós-deposição, a unidade carbonática foi influenciada por episódios de soerguimento, relacionados principalmente a dois campos de tensão instalados ao fim do Cretáceo (Bezerra et al., 2008, 2019). Os episódios foram responsáveis pela exposição subaérea das rochas e sua consequente erosão, tendo como produto um intenso processo de carstificação epigênica (Xavier Neto et al., 2008).

O período Maastrichtiano é associado a eventos de resfriamento crustal, indicando soerguimento e denudação, reativação de falhas, inversão tectônica e desenvolvimento

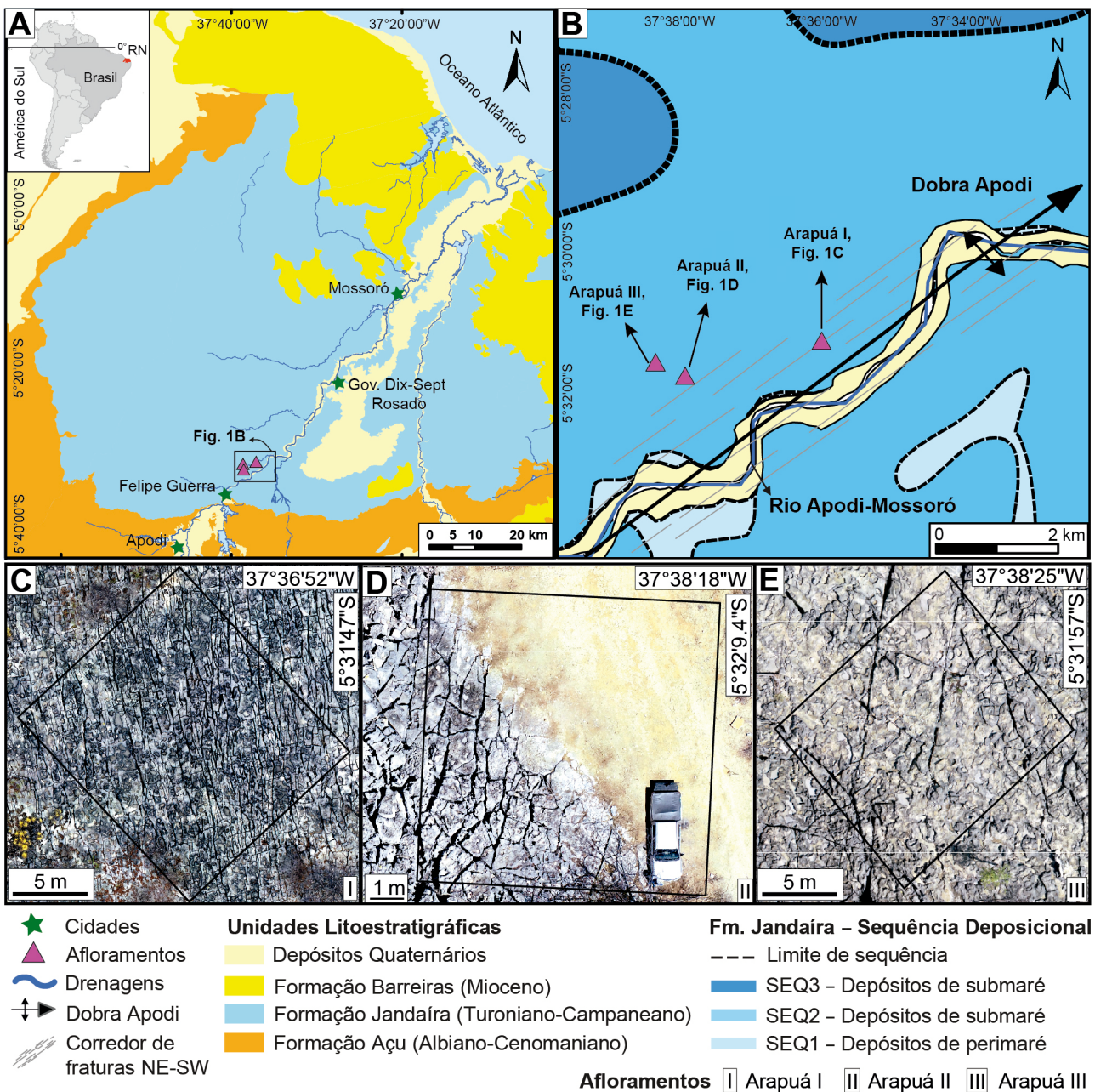


Figura 1. (A) Mapa geológico regional simplificado destacando a localização da área de estudo no município de Felipe Guerra/RN, inserida na Fm. Jandaíra. Base de Dados: Serviço Geológico do Brasil (Angelim et al., 2006). (B) Mapa geológico local evidenciando a localização dos afloramentos em relação à dobra anticlinal Apodi, ao corredor de fraturas paralelo ao eixo da dobra (NE-SW), e ao rio Apodi-Mossoró (modificado de Bagni et al., 2022). (C), (D) e (E) Imagens aéreas obtidas com VANT dos afloramentos Arapua I, II e III, respectivamente.

de dobras nas formações Açú e Jandaíra (Françolin e Szatimari, 1987; Lima Neto, 1994; Pessoa Neto et al., 2007). Estudos recentes (Bezerra et al., 2019) estabeleceram a existência de dois campos de tensões principais, desde o Cretáceo Superior até o período atual. O campo de tensão inicial (SF-1) é caracterizado por uma compressão de orientação N-S, de baixo ângulo, e uma extensão E-W, que se prolonga até o Mioceno Médio. Como produto, houve a instalação de um *set* de fraturas N-S, apresentando veios de calcita, e o desenvolvimento de estilólitos de direção E-W (Bertotti et al., 2017; Bezerra et al., 2019).

O segundo estágio de deformação (SF-2) teve início no Mioceno Médio, foi responsável por moldar o relevo da bacia e provocar a reativação e inversão de falhas NE-SW desenvolvidas durante o *rift*, com dobras secundárias relacionadas. É definido por uma compressão de orientação E-W a NW-SE, sub-horizontal, integrada a uma extensão sub-horizontal N-S e NE-SW. A compressão durante esse estágio foi acomodada por falhas transcorrentes e inversas, e o desenvolvimento de dobras (Bezerra et al., 2019). A dobra Apodi (Figura 1B) foi originada ao longo de uma falha distensional invertida durante o evento SF-2, possuindo cerca de 10 km de largura e 20 km de comprimento, com direção NE-SW e caimento da charneira para NE, orientação paralela ao rio Apodi-Mossoró e ao corredor de fraturas (Bagni et al., 2020).

METODOLOGIA

A atividade de campo contou com a descrição qualitativa dos aspectos geológicos e estruturais nos afloramentos Arapuá I, II e III. A pesquisa foi desenvolvida a partir do levantamento dos dados estruturais quantitativos obtidos por meio da análise virtual de imagens aéreas (VANT). Tal análise contou com o mapeamento das estruturas a partir da vetorização das fraturas nas três áreas, com a utilização do *software* Adobe Illustrator CC 2019. Em seguida, os dados levantados foram processados com o auxílio do *software* Fracture Analyser 5.32 (Borghini et al., 2024), desenvolvido por pesquisadores da Universidade de Parma – Itália. O uso do Fracture Analyser possibilitou a identificação da geometria e orientação das fraturas, assim como analisar a intensidade linear (P10), e a intensidade (P20) e densidade (P21) do fraturamento nas áreas de estudo (Dershowitz e Herda, 1992; Nixon et al., 2012; Sanderson e Nixon, 2015). Foram interpretadas seis (6) *scanlines* em cada área, utilizadas para compreender a distribuição espacial das fraturas por meio de análise estatística. Por fim, foi realizado um estudo da topologia (Sanderson e Nixon, 2015, 2018) nos três afloramentos (Figura 2).

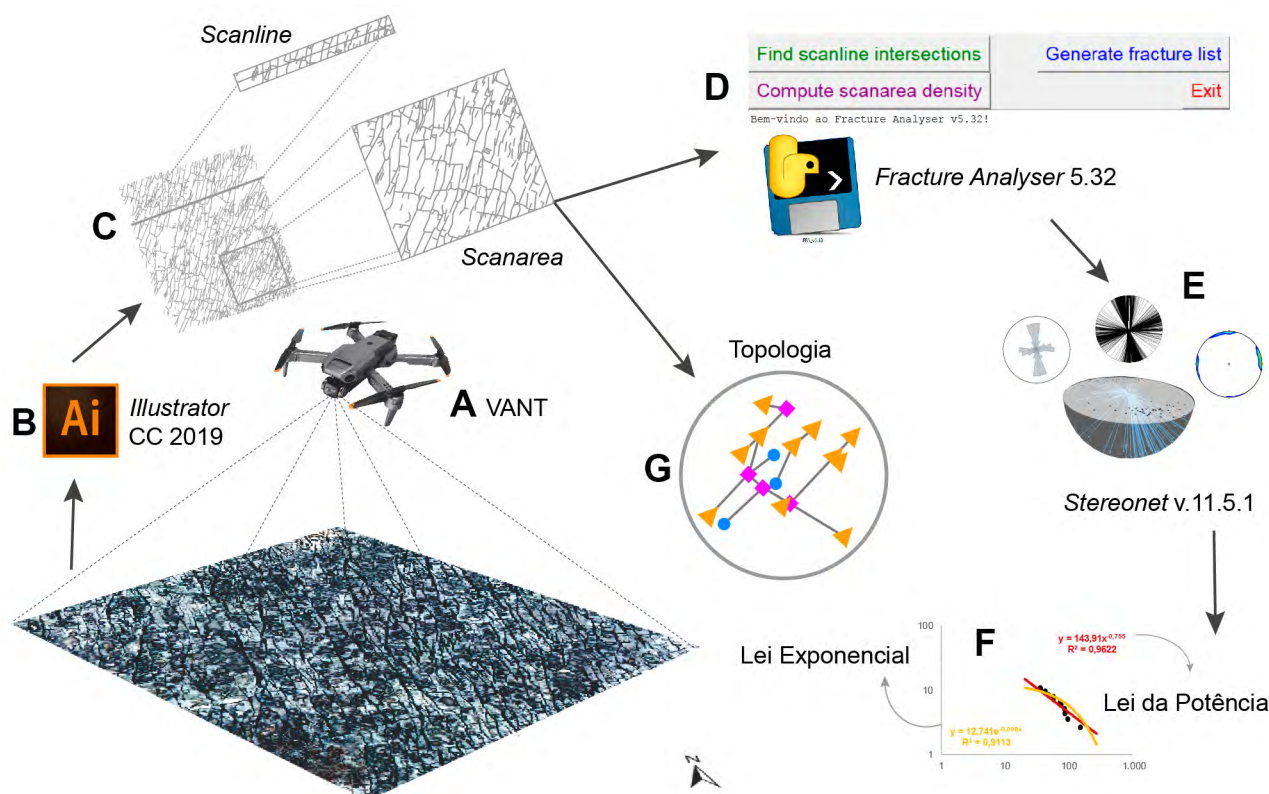


Figura 2. Síntese da metodologia do trabalho. (A) Imageamento com Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT). (B) Inserção dos dados no Adobe Illustrator CC 2019. (C) Interpretação de fraturas nas áreas, e em *scanlines* e *scanareas* selecionadas. (D) Inserção das fraturas interpretadas no FFA 5.32 para obtenção de P20, P21 e P10. (E) Projeção dos dados para seleção de *sets* a serem analisados estatisticamente. (F) Análise estatística dos *sets* selecionados. (G) Estudo topológico a partir das *scanareas* para estudar a relação de contato entre as fraturas e seu grau de conectividade.

Dados de Campo

Imagens aéreas (VANT)

As imagens aéreas foram obtidas nas três áreas de estudo a partir de um Veículo Aéreo Não Tripulado (Figura 2A) modelo DJI Phantom 4 Pro que possui uma resolução de imagem de 20 megapixels. O levantamento foi realizado a uma altitude de 20 m a partir da superfície do terreno, com sobreposições longitudinais e laterais de 85% entre as faixas de voo. Dessa forma, o voo a uma altura de 20 m permitiu uma resolução espacial de 0,5 cm/pixel. Os ortomosaicos foram utilizados para a identificação dos principais *sets*, bem como a obtenção dos parâmetros geométricos e topológicos.

Análise Virtual

Nesta etapa foram utilizadas duas tipologias de análise, *scanlines* e *scanareas*. A medida de intensidade do fraturamento é obtida a partir da razão entre o número de fraturas identificadas e o comprimento ou área da *scanline* ou *scanarea* (Dershowitz e Herda, 1992; Sanderson e Nixon, 2015; Giuffrida et al., 2019).

P10, P20 e P21

A intensidade linear de fraturamento ou frequência 1D (P10) é obtida por meio da razão entre o número de fraturas (NL) e o comprimento da linha de varredura (L), representada por L^{-1} ou f/m (fratura/metro). Por sua vez, o cálculo da intensidade ou frequência de fraturamento 2D (P20) é realizado pela razão entre o número de fraturas (NL) e a área medida (L^2), com dimensões L^{-2} ou f/m². E por fim, a densidade de fraturas (P21) é adquirida por meio da equação $NL/LC/A$, onde NL é o número de fraturas, LC é o comprimento médio dos traços (dado por $\sum L/NL$), e A é a área de amostragem (L^2), a unidade que representa P21 é L^{-1} ou f/m (Sanderson e Nixon, 2015; Giuffrida et al., 2019; Mesquita, 2022).

Os valores para estes atributos de fraturas foram alcançados a partir da inserção da fotointerpretação do Adobe Illustrator no *software* Fracture Analyser 5.32, por meio dos seguintes passos:

- (I) interpretação das fraturas com a ferramenta de caneta do Adobe Illustrator em uma camada nomeada “*fractures*”;
- (II) inserção dos limites da área na camada “*scanarea*”, para calcular P20 e P21, ou “*scanline*” para calcular P10, sendo o polígono ou linha confeccionado com a ferramenta de caneta;
- (III) adição da escala na camada “*scale*”, sendo representada por uma linha desenhada com a ferramenta de caneta, e numeral único representando o valor equivalente em metro (exemplo 5);
- (IV) exportação dos arquivos no formato .svg, único aceito no Fracture Analyser 5.32;
- (V) inserção do arquivo .svg no Fracture Analyser 5.32 a partir da ferramenta “*compute scanarea density*”, para P20 e P21, ou “*find scanline intersections*”, para P10;
- (VI) conversão do arquivo de saída, .txt contendo valores de P20 e P21 ou P10, comprimento e orientações das fraturas, em arquivo Excel para edição e posterior adição no *Stereonet* 11.4.

Todas as camadas precisam estar com letras minúsculas, e todos os objetos precisam ser confeccionados com a ferramenta de caneta do Adobe Illustrator. O polígono da área precisa estar totalmente fechado.

Análise estatística

Estatisticamente, existem dois métodos principais para analisar a distribuição espacial de fraturas: o coeficiente de variação (CV) e a análise de curvas de potência e exponencial (Cox e Lewis, 1966; Davy, 1993; Odling et al., 1999). O coeficiente de variação é uma medida da dispersão dos dados em torno da média, obtido a partir da razão entre o desvio padrão e o espaçamento médio, $CV = \sigma/\mu$ (Cox e Lewis, 1966). Para estruturas dispostas de forma aleatória, o CV é igual a 1. Se as fraturas estão propagadas de forma regular, o CV é menor que 1. Se os traços estão agrupados (*clusters*), o CV é maior que 1 (Odling et al., 1999). A análise das curvas de potência e exponencial é baseada na compreensão de que as falhas seguem uma evolução dinâmica (Davy, 1993). Para esta análise, são projetadas curvas para avaliar qual padrão de distribuição o conjunto de dados irá seguir, por exemplo, uma Lei de Potência. O coeficiente de determinação (R^2) é obtido para avaliar o ajuste do modelo.

Os dados estruturais, obtidos com as *scanlines* a partir da ferramenta “*find scanline intersections*” no Fracture Analyser 5.32, foram projetados no *Stereonet* 11.4. O recurso “*lasso select*” permitiu identificar e filtrar os principais *sets* de fraturas. Em seguida, com o auxílio do Excel, foi averiguada se a distribuição do conjunto de dados ocorre de acordo com a Lei Exponencial Negativa, ou de acordo com a Lei de Potência.

Topologia

Os padrões de fraturamento possuem algumas propriedades importantes mais intimamente relacionadas à topologia do que à geometria. Do ponto de vista bidimensional, um arranjo de fraturas é basicamente um sistema de ramificações e nós, que podem ser utilizados para avaliar a conectividade da rede (Sanderson e Nixon, 2015).

Para tanto, são quantificadas as proporções dos nós, que podem ser definidos como o ponto de interseção entre duas fraturas. Os nós são basicamente de três tipos:

- isolados (I) – o ponto onde termina uma única fratura;
- adjacentes (Y) – apenas uma terminação encontra uma segunda fratura; e
- cruzados (X) – quando as duas terminações cruzam outras estruturas.

Através da quantificação dos nós, é possível a classificação das ramificações, definida como uma linha limitada por nós em cada extremidade. Os ramos podem ser de três tipos: ramos isolados (I-I), ramos conectados individualmente (C-I), ou ramos duplamente conectados (C-C) (Sanderson e Nixon, 2015; Balsamo et al., 2019).

O reconhecimento da distribuição do arranjo espacial das fraturas, e o seu grau de conectividade, foi realizado a partir do estudo da topologia nas fraturas interpretadas nas imagens aéreas das 03 (três) áreas de estudo, por meio do Adobe Illustrator CC 2019. Para as áreas Arapué I e III foram definidas quatro (04) *scanareas* de 7,27 m x 8,34 m e 9,54 m x 8,42 m, respectivamente. No afloramento Arapué II só foi possível delimitar uma (01) *scanarea* de 8,3 m x 8,38 m, em função da proximidade com uma estrada.

RESULTADOS

Análise qualitativa

O Lajedo Arapué consiste em uma larga exposição da Formação Jandaíra. As rochas carbonáticas apresentam um expressivo fraturamento relacionado aos eventos deformacionais SF-1 e SF-2 (Bezerra et al., 2008, 2019; Bagni et al., 2020), assim como evidente processo de carstificação epigênica, produto da dissolução carbonática (Pereira Gomes et al., 2019; Bagni et al., 2022; Lopes et al., 2022; Araújo et al., 2023).

A área é marcada ainda pela proximidade com a dobra Apodi. A dobra anticlinal é classificada como suave, apresenta mergulho dos flancos entre 2° e 6°, para NW e SE. A estrutura é produto do evento SF-2, descrito como uma compressão sub-horizontal NW-SE durante o Mioceno (Bezerra et al., 2019). A estrutura possui 10 km de largura e 20 km de comprimento, com sua zona de charneira NE-SW com cerca de 1,5 km de largura e 20 km de extensão. Paralelo à charneira ocorreu o desenvolvimento de um corredor de fraturas de mesma geometria, a partir da reativação de estruturas pré-existentes. Na superfície do terreno a região central destes elementos é marcada pela presença de uma drenagem do rio Apodi-Mossoró (Bagni et al., 2020).

Os afloramentos estudados foram nomeados Arapué I (14,59 m x 16,68 m), Arapué II (16,6 m x 16,76 m), e Arapué III (19,09 m x 16,84 m). Foram mapeados 4 *sets* de fraturas, possuindo orientações N-S, E-W, NE-SW e NW-SE (Figura 3).

A área Arapué I é a mais próxima ao eixo da dobra, distando 800 m, na região NE do lajedo. O fraturamento é muito expressivo, se dispondo de forma contínua, possuindo estruturas com extensão métrica e padrão ortogonal, representado principalmente por juntas sub-verticais

e secundariamente por veios e estilólitos (Figuras 3C, 3E e 3F). As estruturas mapeadas variam entre 9 cm e 16,1 m quanto ao comprimento e apresentam alta rugosidade, influenciada pelos processos de dissolução. Foram observados quatro *sets* de fraturas, com dois *sets* principais: N-S e NW-SE (Figura 3). Foi identificada a presença predominante de grainstones suportados pelos grãos, localmente foi observado processo de recristalização.

O afloramento Arapué II está localizado na porção SW do lajedo, a 1,4 km de distância do trecho central da charneira da dobra, marcada pela presença do rio Apodi-Mossoró. Possui principalmente fraturas N-S e E-W, que variam desde 7 cm até 6,3 m de extensão (Figura 3D), com padrão ortogonal. Constituem juntas sub-verticais, com pontuais ocorrências de veios. A litologia é composta por packstones e grainstones com cimentação carbonática. Nas proximidades da área foram identificadas zonas muito carstificadas, com juntas sub-verticais de profundidade maior que 1 m (Figuras 3A, 3B).

Por sua vez, o afloramento Arapué III está a 1,8 km de distância da charneira, na porção NW do Lajedo Arapué, sendo a área mais distante da zona principalmente fraturada. As rochas da área são packstones e grainstones. A orientação principal das fraturas é NE-SW, seguido de E-W à WNW-ESE. Nesse afloramento as juntas se mostram mais dispersas, se dispondo com padrão ortogonal. As estruturas variam entre 14,0 cm e 15,3 m, com mergulho sub-vertical.

Análise quantitativa

A análise estrutural quantitativa foi realizada nos três afloramentos a partir do mapeamento virtual em imagens aéreas de VANT, e com a utilização dos *softwares* especificados na seção correspondente à metodologia.

Arapué I

A interpretação estrutural permitiu identificar 1010 fraturas no afloramento Arapué I, N-S (283), E-W (130), NE-SW (209) e NW-SE (388), com orientações preferenciais N-S e NW-SE. O cálculo da densidade (P20) e intensidade (P21) resultou em 2,420 f/m² e 2,314 f/m, respectivamente. Os valores de P20 e P21 obtidos nas *scanareas* apresentaram uma variação entre 2,993 e 5,238 f/m² para P20, e 2,337 e 3,233 f/m para P21 (Figura 4). A análise da frequência do fraturamento (P10) realizada nas seis (6) *scanlines* mostrou variação entre 2,69 e 3,56 f/m (Figura 4 e Tabela 1). Os resultados identificados demonstraram valores elevados em relação aos outros afloramentos, o que significa que a área I apresenta maior grau de fraturamento.

Outro parâmetro mensurado foi a distribuição espacial entre as fraturas. O cálculo do coeficiente de variação (CV) resultou em valores entre: 1,0 e 1,56 para o *set* N-S; 0,42 e 0,99 para E-W; 0,73 e 0,75 para NE-SW; e 1,0 e 1,33 para NW-SE. Em alguns *sets* não foram identificadas fraturas suficientes para o cálculo do CV. Os *sets* N-S e NW-SE apresentaram principalmente valores



Figura 3. Fotos dos afloramentos estudados. (A), (B) e (D) Arapuaí II com grande variação no tamanho e profundidade das fraturas, com zonas muito carstificadas. (C), (E) e (F) Arapuaí I com juntas e veios preferencialmente N-S e NW-SE, sub-verticais, e casualmente sub-horizontais. (G) Arapuaí III apresentando menos fraturas, mais dispersas, extensas, de orientação E-W.

de CV acima de 1 (Tabela 2), o que indica a presença de agrupamento de fraturas (*clusters*).

A análise do espaçamento das fraturas no afloramento I correlacionou o conjunto de dados com as curvas exponencial e de potência, o que caracterizou os *sets* N-S e NW-

-SE por uma distribuição de potência, documentada a partir dos valores de R^2 potencial maiores que o R^2 exponencial (Figura 5), corroborando com os valores do CV, destacando a ocorrência de *clusters*. Os *sets* E-W e NE-SW mostraram uma distribuição ao longo da Lei Exponencial.

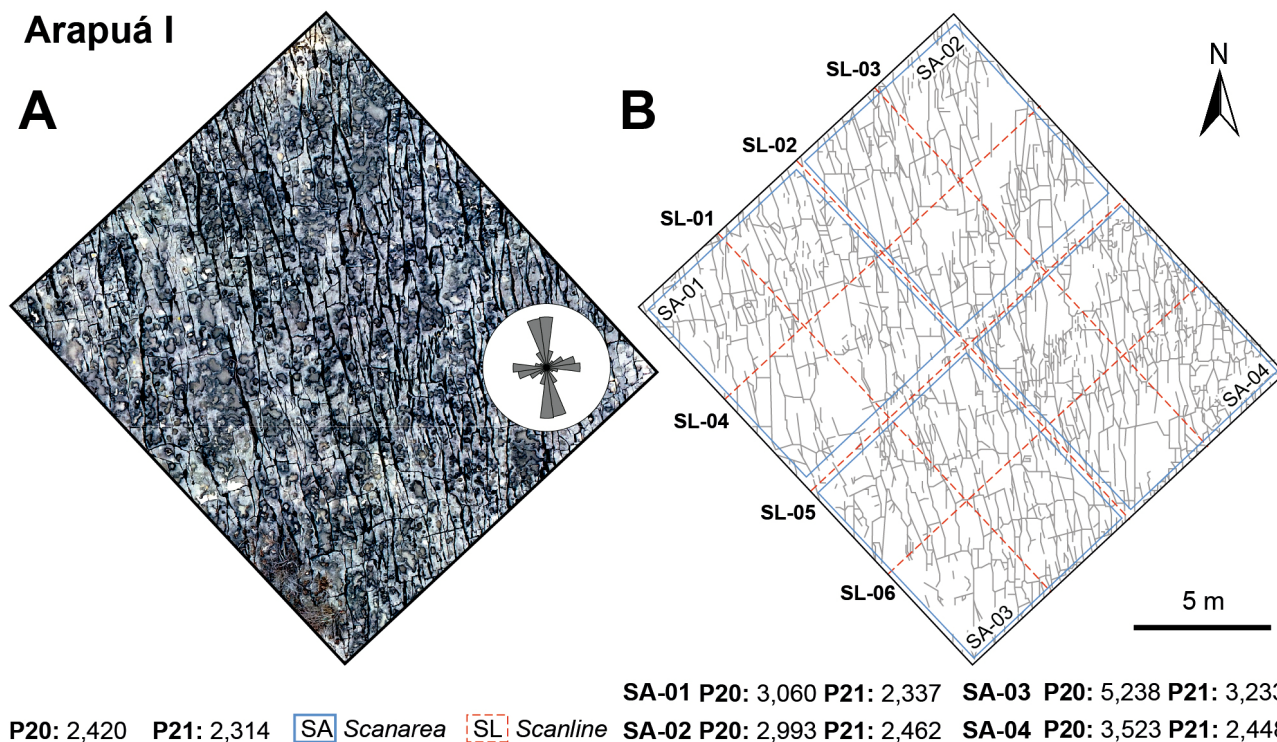


Figura 4. (A) Imageamento com VANT, Arapuá I. (B) Interpretação de fraturas utilizada para calcular P20 e P21 na área. As *scanareas* em azul foram também utilizadas para calcular P20 e P21, e o estudo topológico. As linhas tracejadas em vermelho são as *scanlines* utilizadas para a obtenção do P10.

Tabela 1. Informações sobre a orientação e tamanho das *scanlines* obtidas no afloramento Arapuá I, número de fraturas identificadas e o valor de P10 calculado (Dershowitz e Herda, 1992).

Arapuá I				
Scanlines	Orientação	Comprimento (m)	Nº de Fraturas	P10 (f/m)
SL01	137°	16,42	51	3,10
SL02	137°	16,69	48	2,87
SL03	137°	16,69	45	2,69
SL04	47°	14,67	50	3,40
SL05	47°	14,63	46	3,15
SL06	47°	14,61	52	3,56

A análise topológica no afloramento Arapuá I foi realizada em quatro (4) *scanareas* (Figura 6, Tabela 3) e permitiu observar a predominância dos nós do tipo Y, com um total de 1.906 (58,6%) ocorrências, seguido do tipo I, com 903 (27,7%), e o X com 441 (13,7%), sendo o menos frequente. Quanto à análise das ramificações, há predominância do tipo C-C, ocorrendo 2.636 vezes (76%), seguido do tipo C-I, contendo 756 (22%), e o menos frequente o tipo I-I, com 73 (2%) ocorrências (Figura 6). O estudo revelou uma boa conectividade para o afloramento Arapuá I, evidenciada pela concentração de nós do tipo Y e ramificações tipo C-C (Figura 6).

Arapuá II

O mapeamento virtual no afloramento Arapuá II permitiu identificar 555 fraturas, com orientações N-S (164), E-W (90), NE-SW (198) e NW-SE (104). A análise de densidade (P20) e intensidade (P21) do fraturamento na área forneceu os valores de 1,713 f/m² e 0,899 f/m, respectivamente. Tais parâmetros também foram mensurados na *scanarea* SA-01 delimitada no interior do afloramento, que forneceu 1,166 f/m² para P20 e 0,831 f/m para P21 (Figura 7). A partir das seis (6) *scanlines* levantadas, a frequência de fraturamento (P10) variou entre 1,00 e 2,85 f/m (Figura 7 e Tabela 4).

O grau de fraturamento na área II foi classificado como intermediário em relação aos outros afloramentos, e diminuiu em relação à área I, sugerindo uma influência da zona central da charneira, e do corredor de fraturas sobre os padrões de desenvolvimento das estruturas levantadas. A quantidade de fraturas documentadas nesta área com as *scanlines* não permitiu desenvolver uma análise estatística.

O grau de conectividade entre as fraturas foi mensurado a partir das interpretações das imagens aéreas. A análise topológica no afloramento II foi realizada em uma (01) *scanarea* e permitiu observar a predominância dos nós do tipo I, com 589 ocorrências (53,5%), seguido do tipo Y com 434 (39,5%), e o X com 77 (7%), sendo o menos frequente. Quanto à análise das ramificações, há predominância do tipo C-C, ocorrendo 474 vezes (49,6%), seguido do tipo C-I contendo 376 (39,4%), e o menos frequente o tipo I-I, com 105

Tabela 2. Coeficiente de variação para cada set identificado nas 06 scanlines do afloramento I.

Arapuá I									
Sets	N-S		E-W		NE-SW		NW-SE		Total de fraturas por scanline
Scanlines	CV	Fraturas por set	CV	Fraturas por set	CV	Fraturas por set	CV	Fraturas por set	
SL01	1,08	17	0,97	8	0,75	9	1,11	10	51
SL02	1,18	14	0,86	6	-	3	1,04	11	48
SL03	1,56	18	0,84	10	0,73	7	1,33	8	45
SL04	1,00	17	0,99	10	-	1	1,03	17	50
SL05	1,01	19	0,42	5	-	1	1,02	15	46
SL06	1,10	22	-	3	-	0	1,00	17	52

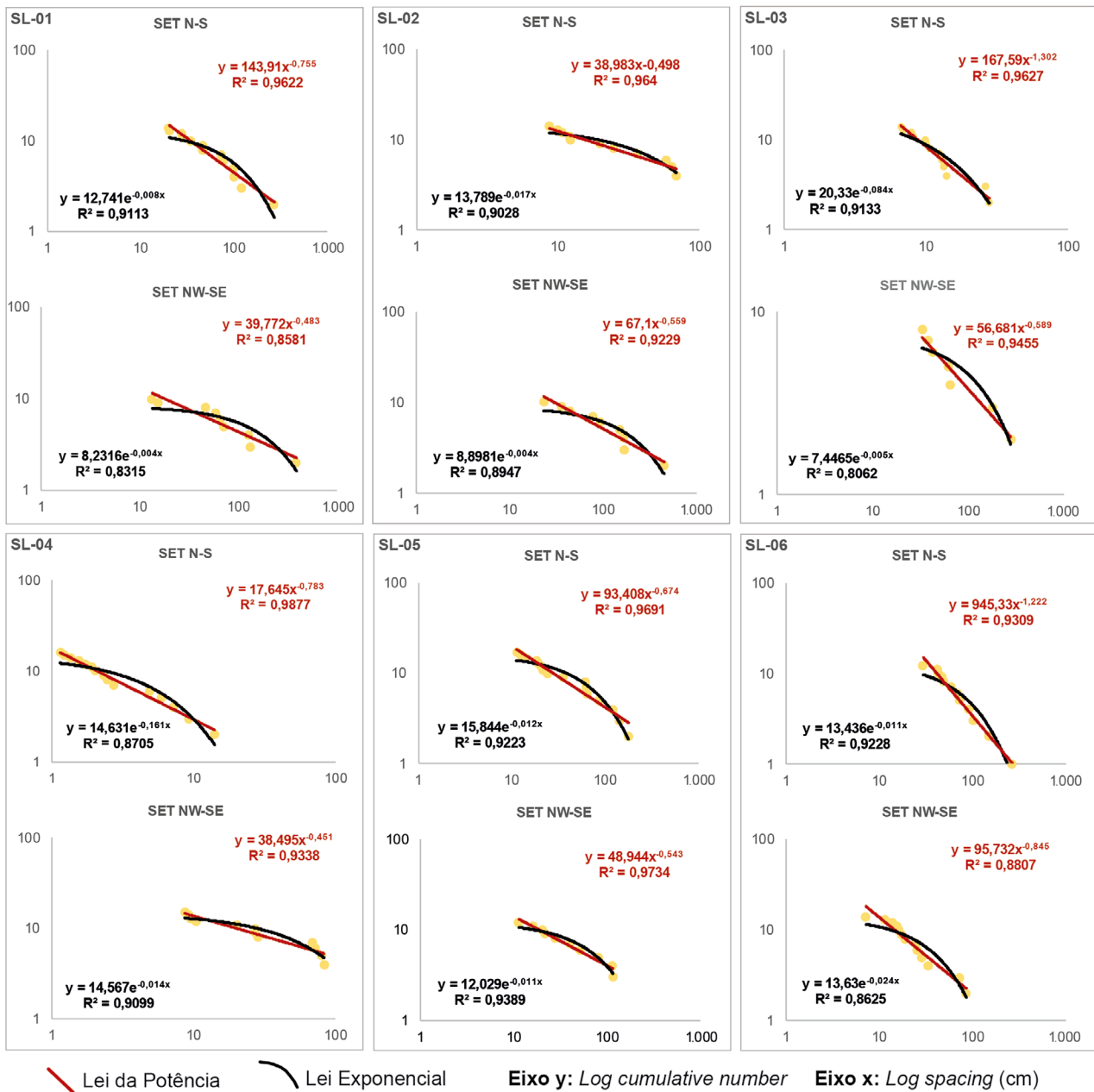


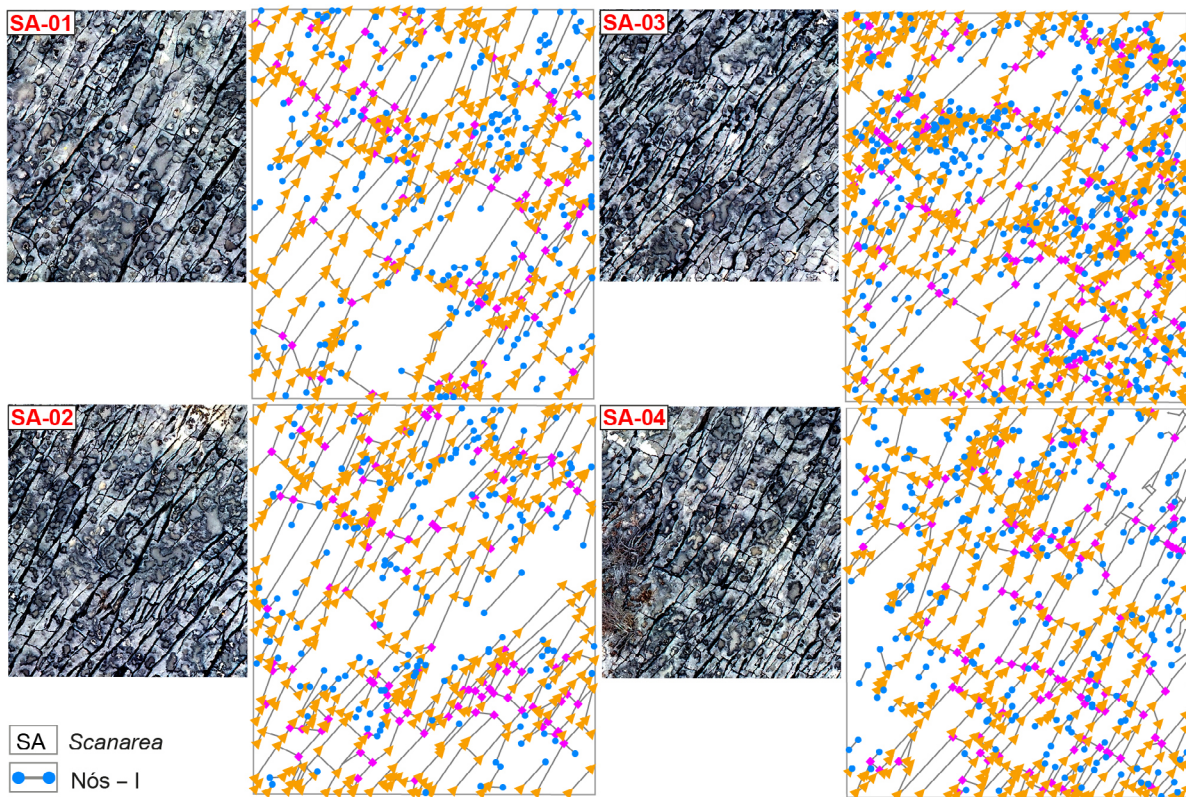
Figura 5. Gráfico log-log, no eixo das abscissas (x) o número cumulativo de fraturas, e no eixo das ordenadas (y) o espaçamento das fraturas em centímetros (cm). A curva em laranja representa a Lei Exponencial, enquanto a curva em vermelho representa a Lei de Potência. Calculado para o afloramento Arapuá I.

Tabela 3. Resultado da análise topológica realizada no afloramento Arapuá I informando a quantidade de nós e ramificações identificadas em cada *scanarea*.

Arapuá I				
Scanarea	SA-01	SA-02	SA-03	SA-04
Nós				
I	199	158	330	216
Y	403	392	691	420
X	83	98	154	106
Ramificações				
I-I	21	12	26	14
C-I	157	134	278	187
C-C	527	560	911	638

Tabela 4. *Scanlines* interpretadas para o cálculo de P10.

Arapuá II				
Scanlines	Orientação	Comprimento (m)	Nº de Fraturas	P10 (f/m)
SL01	138°	5,96	17	2,85
SL02	138°	11,87	24	2,02
SL03	138°	17,90	25	1,39
SL04	31°	5,60	14	2,50
SL05	47°	11,90	12	1,00
SL06	45°	7,72	13	1,68



- SA Scanarea
- Nós - I
- Nós - Y
- Nós - X

- Ramo Isolado (I-I)
- Ramo unicamente conectado (C-I)
- Ramo duplamente conectado (C-C)

- SA-01
- SA-02
- SA-03
- SA-04

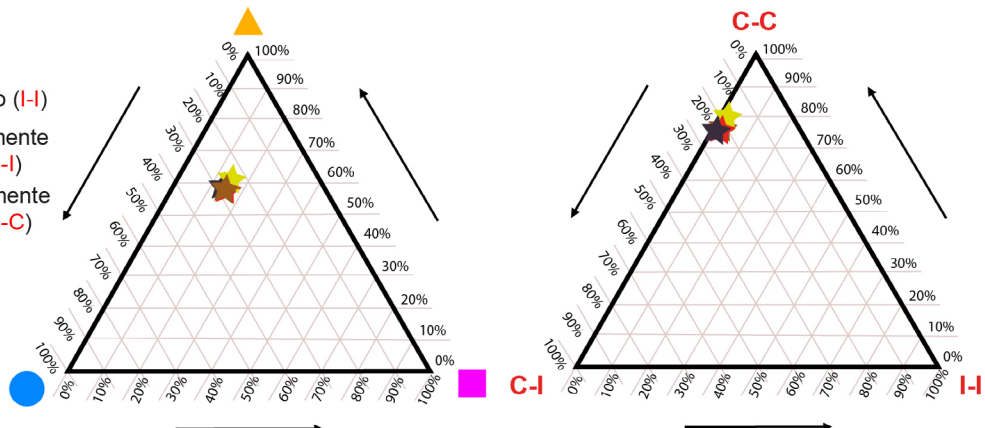


Figura 6. Análise da topologia do afloramento Arapuá I. As ramificações foram plotadas no gráfico a direita, os dados não foram apresentados na figura para melhorar a visualização dos nós.

ocorrências (11%) (Figura 8). O domínio de nós tipo I (Figura 8), ocorrendo em proporção semelhante aos tipos Y, denota uma conectividade menor em relação à área I, mas não caracteriza necessariamente uma baixa conectividade, uma vez que as ramificações predominantes foram do tipo C-C.

Arapuá III

No afloramento Arapuá III foram mapeadas 566 fraturas, N-S (235), E-W (101), NE-SW (163) e NW-SE (67), com sets preferenciais N-S e NE-SW (Figura 9). O valor obtido para P20 foi 0,962 f/m², e para P21 de 0,996 f/m. O levantamento da densidade e intensidade de fraturamento no interior das *scanareas* variou entre 1,006 e 1,376 f/m² para P20, e entre 0,720 e 1,014 f/m para P21. A frequência do fraturamento obtida nas *scanlines* apresentou uma pequena variação, observado por valores de P10 entre 1,19 e 1,90 f/m (Tabela 5). A área III evidenciou o menor grau de fraturamento, o que demonstra uma variação na distribuição das estruturas em função da proximidade da charneira da dobra Apodi.

A análise espacial estatística forneceu valores de CV entre 0,68 e 0,88 para o set N-S, entre 0,62 e 0,78 para E-W, entre 0,58 e 0,87 para NE-SW, e entre 0,63 e 0,97 para NW-SE. Todos os sets mapeados apresentaram principalmente CV menor que 1 (Tabela 6), o que significa um fraturamento mais difuso e regular nessa área. A correlação dos dados com as curvas exponencial e de potência caracterizou a distribuição espacial da área segundo a Lei Exponencial Negativa, com R² exponencial maior que R²

potencial (Figura 10), reiterando o fraturamento difuso.

A análise dos nós e ramificações no afloramento Arapuá III contou com a interpretação de quatro (4) *scanareas*, localizadas de acordo com a Figura 9. Foi visualizada a predominância de nós do tipo Y, com um total de 932 (49,8%) ocorrências, seguido do tipo I, surgindo 834 (44,6%) vezes, e o menos frequente o tipo X, com 106 (5,6%) ocorrências no total das quatro (4) *scanareas*. Quanto às ramificações, há predominância do tipo C-C, com 865 (54,4%) ocorrências, seguido de C-I com 612 (38,5%), e I-I com 112 (7,1%) vezes (Figura 11 e Tabela 7). O grau de conectividade apresentou comportamento

Tabela 5. Informações sobre a orientação e tamanho das *scanlines* adquiridas no afloramento III, bem como resultados obtidos após o processamento dos dados, tais quais o número de fraturas identificadas, e o valor de P10 calculado.

Arapuá III				
Scanlines	Orientação	Comprimento (m)	Nº de Fraturas	P10 (f/m)
SL01	139°	16,8	32	1,90
SL02	139°	16,8	22	1,30
SL03	139°	16,8	26	1,66
SL04	49°	19,2	28	1,45
SL05	49°	19,2	23	1,19
SL06	49°	19,2	23	1,19

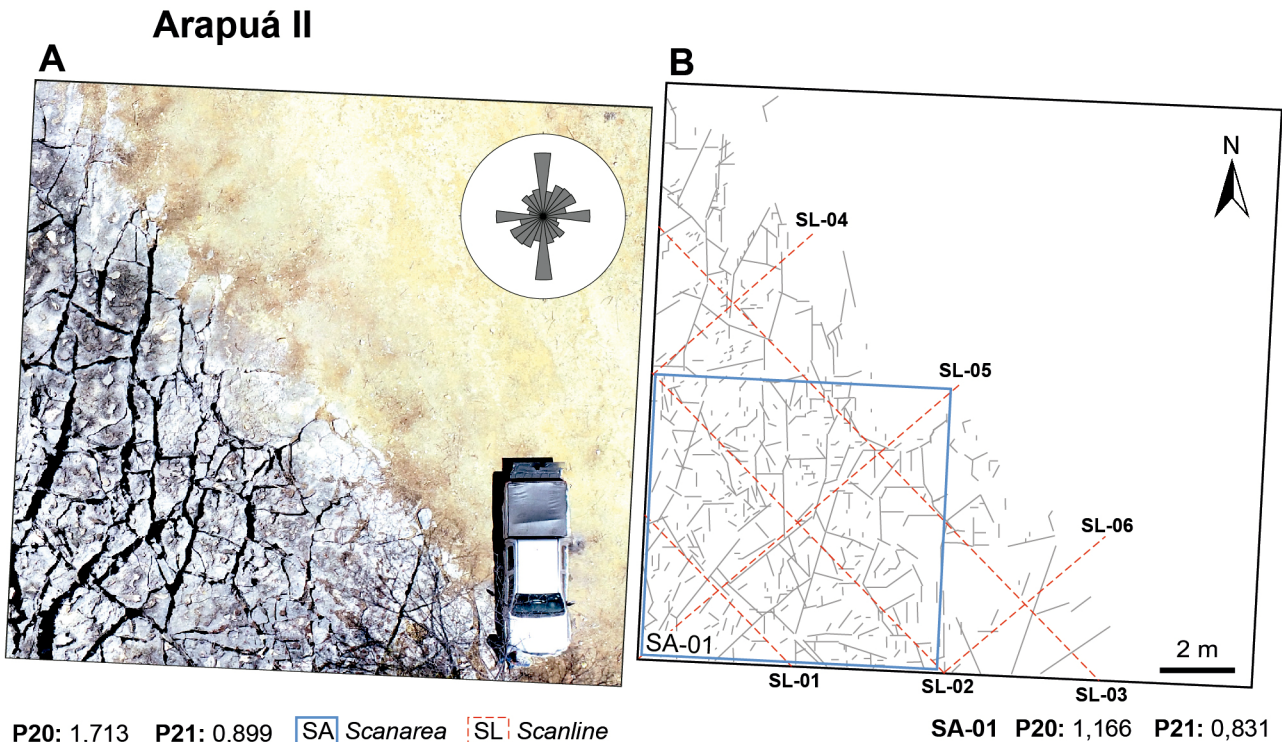


Figura 7. (A) Imagem aérea do afloramento Arapuá II. (B) Fraturas interpretadas nas imagens. Em azul, a *scanarea* utilizada para calcular P20 e P21 e a topologia. Em vermelho, *scanlines* utilizadas para o cálculo de P10.

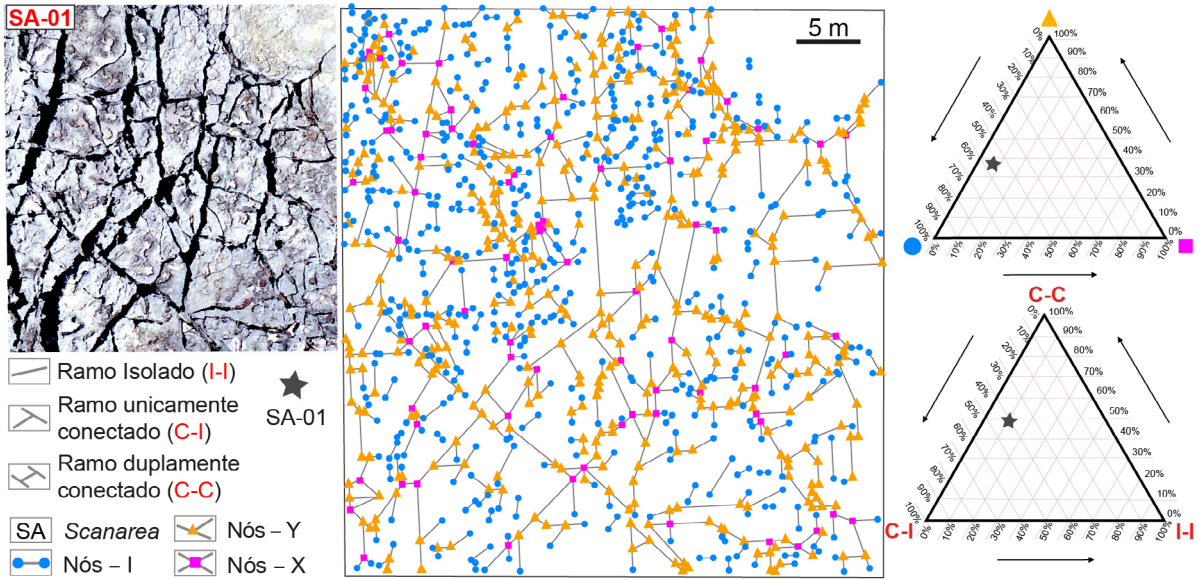
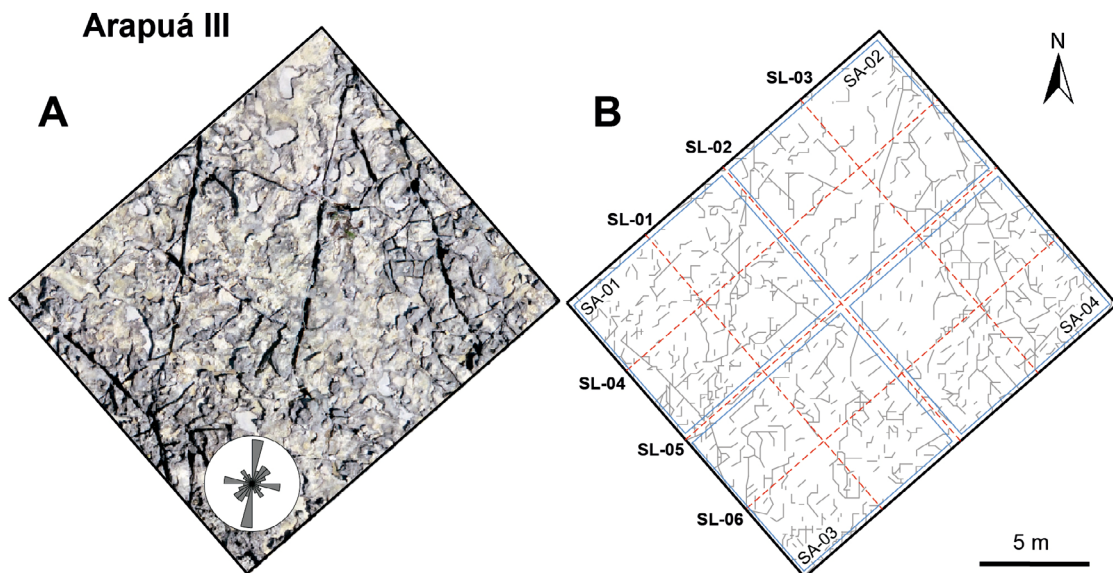


Figura 8: Análise da topologia no afloramento Arapua II. Nós e ramificações foram plotadas nos gráficos ternários à direita.

Tabela 6. Valores do coeficiente de variação obtidos para cada set identificado nas 06 scanlines do afloramento III.

Arapua III									
Sets	N-S		E-W		NE-SW		NW-SE		Total de fraturas por scanline
Scanlines	CV	Fraturas por set	CV	Fraturas por set	CV	Fraturas por set	CV	Fraturas por set	
SL01	0,74	10	0,75	9	0,58	7	-	1	32
SL02	0,78	10	0,19	7	0,85	4	-	1	22
SL03	0,68	11	0,78	5	0,87	5	-	2	26
SL04	0,75	13	0,62	6	-	1	0,63	5	28
SL05	0,69	12	-	3	-	2	-	1	23
SL06	0,88	9	-	3	-	2	0,97	8	23



SA-01 P20: 1,376 P21: 0,922 SA-03 P20: 1,345 P21: 1,014

P20: 0,962 P21: 0,996 SA Scanarea SL Scanline SA-02 P20: 1,006 P21: 0,720 SA-04 P20: 1,234 P21: 0,916

Figura 9: (A) Imageamento de VANT, Arapua III. (B) Interpretação de fraturas utilizada para calcular P20 e P21 da área. As scanareas em vermelho foram também utilizadas para as análises de P20 e P21, e o estudo topológico. As linhas tracejadas são as scanlines utilizadas para a obtenção do P10.

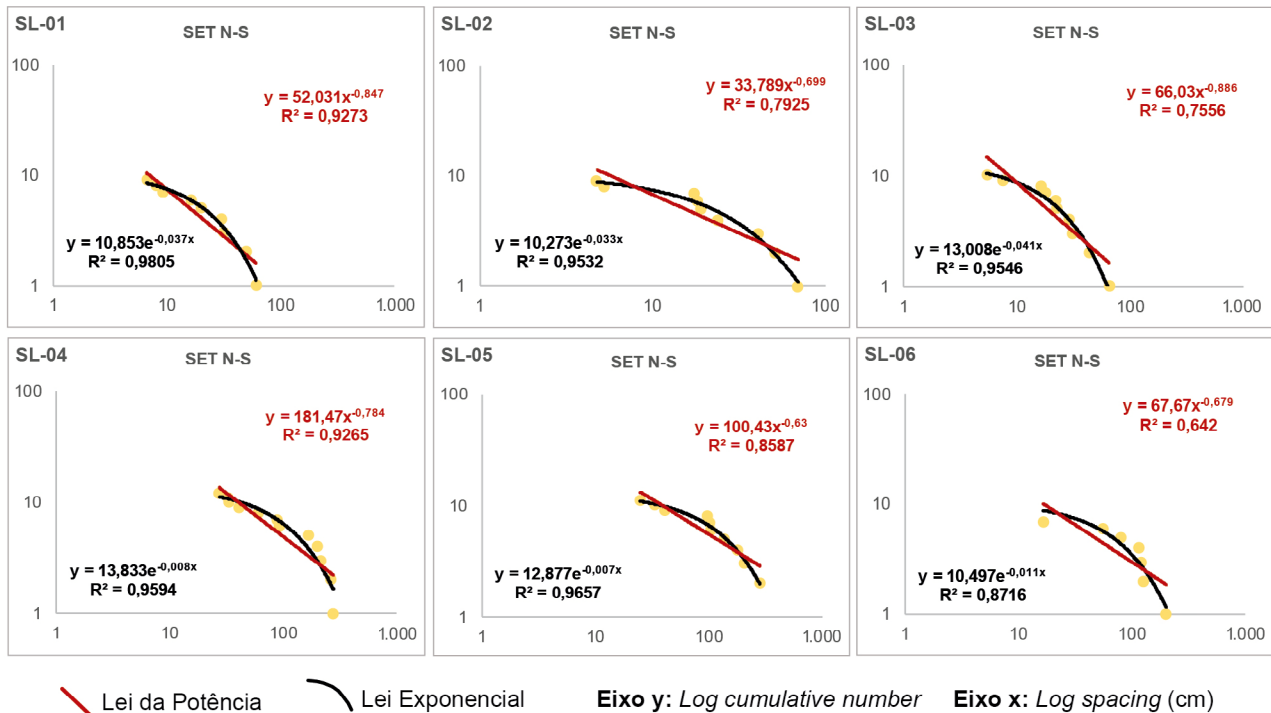


Figura 10: Gráfico *log-log*. No eixo das abscissas (x) o número cumulativo de fraturas, e no eixo das ordenadas (y) o espaçamento das fraturas em centímetros (cm). A curva em laranja representa a Lei Exponencial, enquanto a curva em vermelho representa a Lei de Potência. Calculado para o afloramento Arapuá III.

Tabela 7. Resultado da análise topológica realizada no afloramento Arapuá III informando a quantidade de nós e ramificações identificadas em cada *scanarea*.

Arapuá III				
<i>Scanarea</i>	SA-01	SA-02	SA-03	SA-04
Nós				
I	246	146	210	232
Y	276	181	236	239
X	32	17	32	25
Ramificações				
H-I	27	17	31	37
C-I	193	112	149	158
C-C	262	163	220	220

semelhante à área II, contendo tipos de nós preferencialmente Y, com uma proporção semelhante aos nós tipo I, e ramificações tipo C-C (Figura 11), o que o define como menos conectado em relação à área I.

DISCUSSÕES

Os métodos tradicionais empregados para caracterização dos reservatórios de hidrocarbonetos, tais como, a perfuração de poços e o método sísmico, abrangem escalas de investigação que podem limitar a identificação de estruturas entre 1,0 e 50,0 m (Giuffrida et al., 2019; La Bruna et al., 2021; Furtado et al., 2022). O estudo de afloramentos análogos, principal-

mente em reservatórios carbonáticos, auxilia na compreensão dos efeitos da presença de estruturas subsísmicas (fraturas, carste) nas propriedades de armazenamento e migração de fluidos nestes reservatórios (e.g., Cazarin et al., 2019; Araújo et al., 2021; Bagni et al., 2020; La Bruna et al., 2021; Furtado et al., 2022; Lopes et al., 2022, 2023).

Os corredores de fraturas podem ocorrer associados a zonas de crista relacionadas às dobras, como na área do presente estudo. As fraturas N-S e estilólitos E-W, relacionados ao evento SF-01, foram reativados durante a atuação do campo de tensão SF-02 (Bezerra et al., 2019), caracterizado por uma compressão sub-horizontal NW-SE com extensão NE-SW, e a origem da dobra anticlinal Apodi (Figura 12). No estágio denominado “pré-dobramento” foram desenvolvidas fraturas NW-SE, perpendiculares ao plano axial (Bagni et al., 2020). O início do dobramento é marcado pela formação de um corredor de fraturas NE-SW, paralelo ao plano axial, o que representa uma característica comum das dobras, as quais concentram valores mais elevados de *strain* nas zonas de charneira (Cosgrove, 2015), onde o espaçamento de fraturas diminui com o aumento da deformação (Ortega et al., 2006; Watkins et al., 2015). O corredor é composto principalmente por fraturas subsísmicas (< 50 m), com orientações preferenciais NW-SE e NE-SW. O estágio final deste evento é relacionado ao soerguimento regional de até 500 m (Bertotti et al., 2017), o que favoreceu o alargamento do vale do rio Apodi, e o avanço da carstificação ao longo do vale e suas margens.

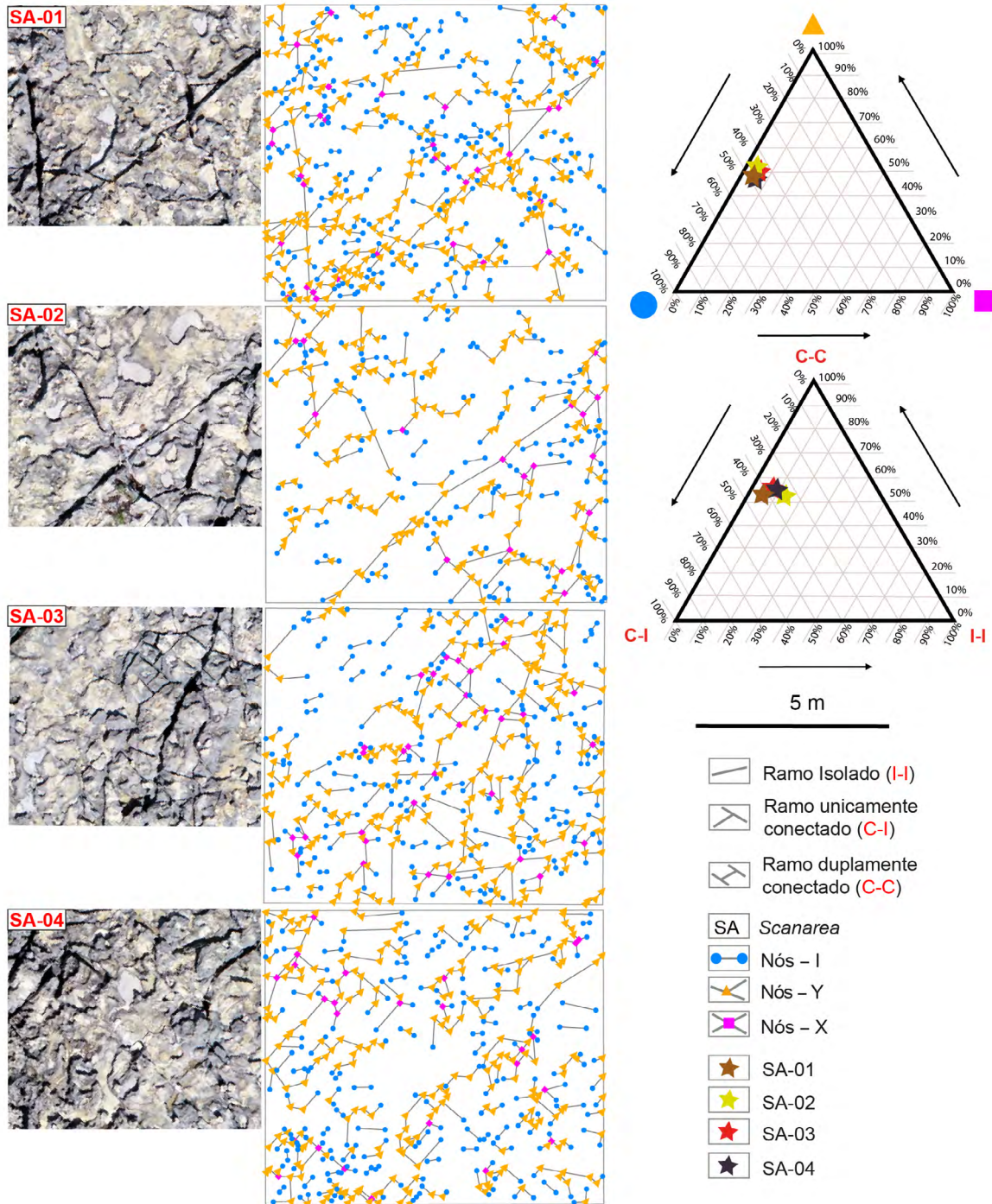


Figura 11: Análise da topologia do afloramento Arapuá III. À esquerda, as *scanareas* na imagem aérea, e à direita as interpretações. Os diferentes tipos de nós estão representados por círculos (I), triângulos (Y) e quadrados (X), de cores azul, laranja e rosa, respectivamente. As ramificações não foram ilustradas em função da escala de visualização, contudo os dados foram projetados no gráfico ternário.

Os afloramentos selecionados para a pesquisa estão localizados no flanco W da dobra, em diferentes distâncias em relação à zona da charneira. O afloramento III é o mais distante, localizado a aproximadamente 1,8 km do trecho do rio Apodi-Mossoró (Figuras 1, 9, 12. Tabela 5), demonstrando uma baixa influência da zona de maior dano, representada pelo corredor de fraturas, se compa-

rado com o Arapuá I, localizado a cerca de 800 m desta zona (Figura 12). Este último, por sua vez, apresenta maior intensidade e densidade de fraturamento (Figuras 4, 12. Tabela 1), demonstrando uma forte influência da proximidade do corredor de fraturas. No Arapuá I, os dois *sets* preferenciais são o N-S e NW-SE, acompanhando os padrões de fraturas associados ao evento

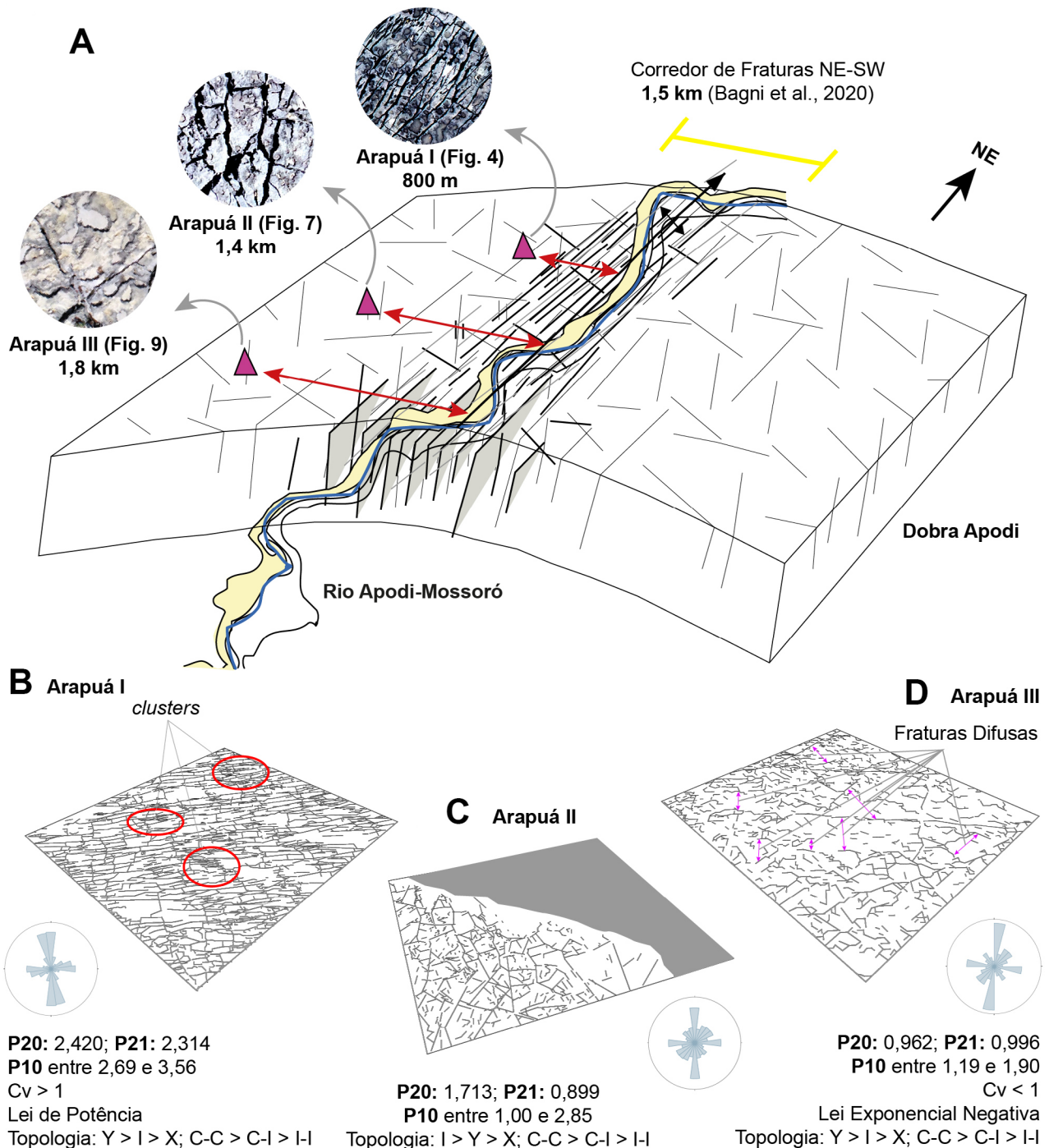


Figura 12: Mapa conceitual ilustrando a variação nos estilos estruturais e grau de deformação no Lajedo Arapuá em relação a proximidade com a dobra Apodi e ao corredor de fraturas paralelo ao seu eixo (NE-SW). (A) Modelo simplificado do anticlinal Apodi, ilustrando a zona mais fraturada e um trecho do rio Apodi-Mossoró (modificado de Bagni et al., 2020). Destaque para a localização das áreas de estudo em relação a essas estruturas, e a variação da morfologia dos afloramentos. (B), (C) e (D) síntese dos resultados obtidos para as áreas I, II e III.

SF-2 (Bezerra et al., 2019), oriundos da reativação de estruturas pretéritas e da atuação da compressão NW-SE, responsável por um campo distensional NE-SW.

O predomínio de fraturas do tipo dilatantes (modo I), as juntas, é a característica essencial para estabelecer uma zona de alta permeabilidade na área, uma vez que são responsáveis pela abertura de espaço, o que permite

o fluxo de fluidos. Apesar da natureza *strata-bound* das juntas, o que pode limitar a migração de hidrocarbonetos verticalmente, quando estas possuem abertura, comprimento, espaçamento, conectividade e distribuição, suficientes, podem contribuir significativamente na permeabilidade do reservatório e na produção de hidrocarbonetos (Aydin, 2000). Um exemplo pode ser observado na bacia

de Piceance, Colorado, EUA, onde um conjunto de juntas presentes na superfície, detectadas em um reservatório de arenito, aumenta a permeabilidade das rochas reservatório detríticas em $10 - 10^4$ vezes em relação à permeabilidade da matriz (Lorenz et al., 1989).

As fraturas se relacionam entre si e alteram mecanicamente a matriz da rocha, o que modifica as propriedades físicas dos pacotes, essa interação pode ser analisada a partir da topologia (Sanderson e Nixon, 2015). Compreender o grau de conectividade das fraturas é muito importante, uma vez que as fraturas podem aumentar significativamente a permeabilidade equivalente em um reservatório. Quando as fraturas estão conectadas, compondo um sistema interligado, são capazes de proporcionar vias de fluxo preferenciais, desempenhando um papel crucial na condução e armazenamento de hidrocarbonetos.

O grau de conectividade dos elementos estruturais documentados no afloramento Arapuí I, localizado perto do eixo da dobra Apodi, evidencia valores maiores em comparação aos dados computados pelo afloramento III, mais distante do ponto de máxima curvatura da dobra. No entanto, o predomínio dos nós do tipo Y nas duas áreas, que sugere uma boa conectividade do fraturamento, pode estar relacionado tanto ao tipo de fraturamento característico da dobra, quanto ao elevado grau de dissolução expresso na região. Na área de estudo, o aumento dos nós está diretamente relacionado ao aumento da permeabilidade no corredor de fraturas. Entretanto, outros estudos demonstram que esta relação pode ser inversa, como documentado no arquipélago de Malta, onde as fraturas estão cimentadas, e o aumento no número de nós significa uma redução na permeabilidade do sistema (Dimmen et al., 2017).

Os resultados da pesquisa corroboram com os modelos de Bezerra et al. (2019) e Bagni et al. (2020) a respeito da distribuição da deformação frágil em relação à dobra Apodi e ao corredor de fraturas (Figura 12). As orientações das estruturas seguem os padrões regionais (Bezerra et al., 2019). Os dados permitiram avaliar a variação da densidade e intensidade do fraturamento, o grau de conectividade das fraturas mapeadas e o arranjo espacial das estruturas em relação aos elementos de escala regional. A ocorrência de *clusters* está associada a concentrações locais de *strain*, o que modifica as propriedades petrofísicas do reservatório (e.g., De Jossineau e Aydin 2007; Giuffrida et al., 2019). Por sua vez, a localização de *clusters* de fraturas em proximidade à charneira da dobra Apodi está relacionada a reativações em cisalhamento dos elementos estruturais antecedentes.

A presença de variações nas distribuições das fraturas influenciam diretamente na permeabilidade e heterogeneidade das rochas estudadas. Os elementos estruturais documentados auxiliam na migração de fluidos através das camadas, caracterizando uma zona de maior permeabilidade próximo à charneira. A presença de juntas, predominantes em toda a área, aumenta a porosidade

das rochas e permite a percolação de fluidos. Na região é possível verificar uma maior intensidade no processo de carstificação nas proximidades da zona de maior dano, influenciadas pelo maior grau de fraturamento e pelo regime hídrico na área.

Os resultados obtidos por meio das análises quantitativas demonstram que a distribuição dos elementos estruturais e a conectividade do sistema são fortemente influenciadas pela proximidade da charneira da dobra e do corredor de fraturas (Figura 12). Na área de estudo a presença desses elementos promove uma boa conectividade ao reservatório, e caracteriza uma zona de alta permeabilidade. No entanto, não pode ser ignorada a influência dos processos de dissolução associados ao carste epigênico que compõem o lajedo. Nos afloramentos foi possível identificar grandes fraturas alargadas pela dissolução (Figuras 3, 4, 7, 9), o que pode limitar a identificação e quantificação de alguns parâmetros estruturais e/ou topológicos, principalmente em análises virtuais. Estudos anteriores demonstram o impacto dos processos de dissolução localizados em zonas de influências de estruturas tectônicas (Lopes et al., 2022, 2023).

CONCLUSÕES

A presente pesquisa caracterizou os estilos estruturais em três diferentes setores do Lajedo Arapuí, nas rochas carbonáticas da Formação Jandaíra. Os resultados são discutidos em relação aos estudos anteriores e à distribuição das fraturas em relação a proximidade à charneira do anticlinal Apodi.

Foi verificado um contraste na concentração de fraturas e no grau de conectividade desses elementos. A região próxima à zona de maior dano, representada pelo afloramento Arapuí I, apresentou maiores valores de frequência, intensidade e densidade de fraturas, com os *sets* N-S e NW-SE indicando formação de *clusters* (agrupamentos). Este resultado foi determinado a partir das análises estatísticas, as quais evidenciaram uma distribuição espacial das fraturas do tipo potencial, cujo desenvolvimento dos elementos estruturais está relacionado à evolução da dobra Apodi, local em que as zonas de maior fraqueza, contendo estruturas pretéritas, foram aproveitadas.

Por outro lado, na região mais distante, representada pelo afloramento III, é possível observar uma deformação difusa, com menores valores de intensidade e densidade de fraturas, e apresentando um maior espaçamento entre si. O maior espaçamento das fraturas está demonstrado pela baixa ocorrência de *clusters* evidentes e por serem representados por uma distribuição exponencial negativa.

Os elementos estruturais identificados seguem os padrões regionais e possuem o seu desenvolvimento associado à evolução da dobra Apodi e à reativação de estruturas pretéritas. O grau de deformação variou em função da distância do eixo da dobra Apodi e do corredor de fraturas. As redes de fraturas mapeadas apresentam boa conectividade

tividade, reforçando a existência de uma zona de maior permeabilidade próximo à região central. Entretanto os dados ilustraram um contraste menor que o esperado, o que pode estar relacionado tanto ao tipo de fraturamento característico da dobra quanto ao elevado grau de dissolução expresso na região.

O estudo reforça a importância da utilização de ferramentas de investigação de alta resolução, de forma integrada aos métodos de análise estrutural tradicionais. Compreender a origem e o desenvolvimento de fraturas subsísmicas é essencial na construção de um modelo de reservatório mais preciso, principalmente em relação aos análogos de reservatórios carbonáticos fraturados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) pela oportunidade de realizar o presente trabalho, por meio do Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG). Ao Laboratório de Sismologia, pela infraestrutura. A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis do Brasil (ANP) pelo custeio à presente pesquisa, através do Projeto PRH 42 – Hidrocarbonetos, e o apoio financeiro por meio da concessão de bolsa de Mestrado institucional aos autores. Ao Prof. Dr. David Lopes de Castro, por todo o apoio durante a execução do trabalho. Os professores Francisco Hilário Rego Bezerra e Walter Eugênio Medeiros agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas de pesquisa PQ e auxílios associados.

REFERÊNCIAS

Angelim, L. A. A. (Org.) (2006). *Geologia e Recursos Mineiros do Estado do Rio Grande do Norte*. Escala 1:500.000. Recife: CPRM/FAPERN. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/10234>. Acesso em: 31 maio 2024.

Araújo, R. E., La Bruna, V., Rustichelli, A., Bezerra, F. H., Xavier, M. M., Audra, P., Antonino, A. C. (2021). Structural and sedimentary discontinuities control the generation of karst dissolution cavities in a carbonate sequence, Potiguar Basin, Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 123, 104753. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104753>

Araújo, R. E., La Bruna, V., Rustichelli, A., Xavier, M. M., Agosta, F., Bezerra, F. H., Antonino, A. C. (2023). Pore network characteristics as a function of diagenesis: Implications for epigenic karstification in shallow-water carbonates. *Marine and Petroleum Geology*, 149, 106094. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.106094>

Aydin, A. (2000). Fractures, faults, and hydrocarbon entrapment, migration and flow. *Marine and Petroleum Geology*, 17(7), 797-814. [https://doi.org/10.1016/S0264-8172\(00\)00020-9](https://doi.org/10.1016/S0264-8172(00)00020-9)

Bagni, F. L., Bezerra, F. H., Balsamo, F., Maia, R. P., Dall'Aglio, M. (2020). Karst dissolution along fracture corridors in an anticline hinge, Jandaíra Formation, Brazil: Implications for reservoir quality. *Marine and Petroleum Geology*, 115, 104249. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104249>

Bagni, F. L., Erthal, M. M., Tonietto, S. N., Maia, R. P., Bezerra, F. H., Balsamo, F., Fonseca, J. P. T. (2022). Karstified layers and caves formed by superposed epigenic dissolution along subaerial unconformities in carbonate rocks—Impact on reservoir-scale permeability. *Marine and Petroleum Geology*, 138, 105523. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.105523>

Balsamo, F., Clemenzi, L., Storti, F., Solum, J., Taberner, C. (2019). Tectonic control on vein attributes and deformation intensity in fault damage zones affecting Natih platform carbonates, Jabal Qusaybah, North Oman. *Journal of Structural Geology*, 122, 38-57. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2019.02.009>

Bertotti, G., Graaf, S., Bisdom, K., Oskam, B., Vonhof, H. B., Bezerra, F. H., Cazarin, C. L. (2017). Fracturing and fluid-flow during post-rift subsidence in carbonates of the Jandaíra Formation, Potiguar Basin, NE Brazil. *Basin Research*, 29(6), 836-853. <https://doi.org/10.1111/bre.12246>

Bezerra, F. H. R., Brito Neves, B. B., Corrêa, A. C. B., Barreto, A. M. F., Suguio, K. (2008). Late Pleistocene tectonic-geomorphological development within a passive margin – The Cariatá trough, northeastern Brazil. *Geomorphology* 97, 555-582. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.09.008>

Bezerra, F. H., Castro, D. L., Maia, R. P., Sousa, M. O., Moura-Lima, E. N., Rossetti, D. F., Nogueira, F. C. (2019). Postrift stress field inversion in the Potiguar Basin, Brazil—Implications for petroleum systems and evolution of the equatorial margin of South America. *Marine and Petroleum Geology*, 111, 88-104. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.08.001>

Borghini, L., Striglio, G., Bacchiani, G., La Bruna, V., Balsamo, F., Bonini, L., Bezerra, F. H. R. (2024). Fracture analyser: a Python toolbox for the 2D analysis of fracture patterns. *Italian Journal of Geosciences*, 143(2), 15p. <https://doi.org/10.3301/IJG.2024.16>

Cazarin, C. L., Bezerra, F. H., Borghi, L., Santos, R. V., Favoreto, J., Brod, J. A., Srivastava, N. K. (2019). The conduit-seal system of hypogene karst in Neoproterozoic carbonates in northeastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 101, 90-107. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.11.046>

Córdoba, V. C. (2001). *A evolução da plataforma carbonática Jandaíra durante o Neocretáceo na Bacia Potiguar: análise paleoambiental, diagenética e estratigráfica*. Tese (Doutorado). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas - UNESP.

- Cosgrove, J. W. (2015). The association of folds and fractures and the link between folding, fracturing and fluid flow during the evolution of a fold-thrust belt: a brief review. *Geological Society Publications*. (Spec. Publ.) 421, 41-68. <https://doi.org/10.1144/SP421.11>
- Cox, D. R., Lewis, P. A. (1966). *The statistical analysis of series of events*. Berlin: Springer Dordrecht.
- Davy, P. (1993). On the frequency-length distribution of the San Andreas fault system. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 98(B7), 12141-12151. <https://doi.org/10.1029/93JB00372>
- De Jossineau, G., Aydin, A. (2007). The evolution of the damage zone with fault growth in sandstone and its multiscale characteristics. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B12). <https://doi.org/10.1029/2006JB004711>
- Dershowitz, W. S., Herda, H. H. (1992). Interpretation of fracture spacing and intensity. In ARMA US *Rock Mechanics/Geomechanics Symposium* (pp. ARMA-92). ARMA.
- Dimmen, V., Rotevatn, A., Peacock, D. C., Nixon, C. W., Nærland, K. (2017). Quantifying structural controls on fluid flow: Insights from carbonate-hosted fault damage zones on the Maltese Islands. *Journal of Structural Geology*, 101, 43-57. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2017.05.012>
- Françolin, J. B. L., Szatmari, P. (1987). Mecanismo de riftamento da porção oriental da margem norte brasileira. *Revista Brasileira de Geociências*, 17(2), 196-207. Disponível em: <http://bjg.siteoficial.ws/1987/n2/francolin.pdf>. Acesso em: 31 maio 2024.
- Furtado, C. P., Medeiros, W. E., Borges, S. V., Lopes, J. A., Bezerra, F. H., Lima-Filho, F. P., Teixeira, W. L. (2022). The influence of subseismic-scale fracture interconnectivity on fluid flow in fracture corridors of the Brejões carbonate karst system, Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 141, 105689. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.105689>
- Gholipour, A. M., Cosgrove, J. W., Ala, M. (2016). New theoretical model for predicting and modelling fractures in folded fractured reservoirs. *Petroleum Geoscience*, 22(3), 257-280. <https://doi.org/10.1144/petgeo2013-055>
- Giuffrida, A., La Bruna, V., Castelluccio, P., Panza, E., Rustichelli, A., Tondi, E., Agosta, F. (2019). Fracture simulation parameters of fractured reservoirs: Analogy with outcropping carbonates of the Inner Apulian Platform, southern Italy. *Journal of Structural Geology*, 123, 18-41. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2019.02.007>
- La Bruna, V., Bezerra, F. H., Souza, V. H., Maia, R. P., Auler, A. S., Araujo, R. E., Sousa, M. O. (2021). High-permeability zones in folded and faulted silicified carbonate rocks—Implications for karstified carbonate reservoirs. *Marine and Petroleum Geology*, 128, 105046. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2021.105046>
- Lima Neto, F. F. (1994). *Geologia da Bacia Potiguar e de suas Acumulações de Petróleo*. PETROBRAS/DEBAR. (Relatório interno)
- Lopes, J. A., Medeiros, W. E., La Bruna, V., de Lima, A., Bezerra, F. H., Schiozer, D. J. (2022). Advancements towards DFKN modelling: Incorporating fracture enlargement resulting from karstic dissolution in discrete fracture networks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 209, 109944. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109944>
- Lopes, J. A., Medeiros, W. E., Oliveira, J. G., Santana, F. L., Araújo, R. E., La Bruna, V., Bezerra, F. H. (2023). Three-dimensional characterization of karstic dissolution zones, fracture networks, and lithostratigraphic interfaces using GPR cubes, core logs, and petrophysics: Implications for thief zones development in carbonate reservoirs. *Marine and Petroleum Geology*, 150, 106126. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2023.106126>
- Lorenz, J. C., Warpinski, N. R., Branagan, P. T., Settler, A. R. (1989). Fracture characteristics and reservoir behavior of stress-sensitive fracture systems in flat-lying lenticular formations. *Journal of Petroleum Technology*, 41(06), 615-622. <https://doi.org/10.2118/15244-PA>
- Matos, R. M. D. (1992). The northeast Brazilian rift system. *Tectonics*, 11(4), 766-791. <https://doi.org/10.1029/91TC03092>
- Mesquita, P. B. (2022). *Análise estatística do fluxo de água e da drenagem de maciços rochosos fraturados*. Dissertação (Mestrado). Brasília: Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Disponível em: <http://repositorio2.unb.br/jspui/handle/10482/45040>. Acesso em: 31 maio 2024.
- Nixon, C. W., Bull, J. M., Sanderson, D. J. (2012). The distribution of strain within a rifting fault network. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 2012, pp. T53C-2725).
- Odling, N. E., Gillespie, P., Bourguin, B., Castaing, C., Chiles, J. P., Christensen, N. P., Watterson, J. (1999). Variations in fracture system geometry and their implications for fluid flow in fractures hydrocarbon reservoirs. *Petroleum Geoscience*, 5(4), 373-384. <https://doi.org/10.1144/petgeo.5.4.373>
- Ortega, O. J., Marrett, R. A., Laubach, S. E. (2006). A scale-independent approach to fracture intensity and average spacing measurement. *AAPG bulletin*, 90(2), 193-208. <https://doi.org/10.1306/08250505059>
- Panza, E., Sessa, E., Agosta, F., Giorgioni, M. (2018). Discrete Fracture Network modelling of a hydrocarbon-bearing, oblique-slip fault zone: Inferences on fault-controlled fluid storage and migration properties of carbonate fault damage zones. *Marine and Petroleum Geology*, 89, 263-279. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.09.009>

- Pereira Gomes, I., Vieira Veríssimo, C. U., Rego Bezerra, F. H., Lima dos Santos, J., Freitas Câmara, J. R. (2019). Fraturas, carste e cavernas nos calcários Jandaíra em Felipe Guerra, Rio Grande do Norte. *Geologia USP. Série Científica*, 19(1). <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v19-149311>
- Pessoa Neto, O. C., Soares, U. M., Silva, J. G. F., Roesner, E. H., Florencio, C. P., Souza, C. A. V. (2007). Bacia potiguar. *Boletim Geociências Petrobras*, 15(2), 357-369.
- Questiaux, J. M., Couples, G. D., Ruby, N. (2010). Fractured reservoirs with fracture corridors. *Geophysical Prospecting*, 58(2), 279-295. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2009.00810.x>
- Roehl, P. O., Choquette, P. W. (Eds.). (2012). *Carbonate petroleum reservoirs*. New York: Springer Science & Business Media.
- Sanderson, D. J., Nixon, C. W. (2015). The use of topology in fracture network characterization. *Journal of Structural Geology*, 72, 55-66. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2015.01.005>
- Sanderson, D. J., Nixon, C. W. (2018). Topology, connectivity, and percolation in fracture networks. *Journal of Structural Geology*, 115, 167-177. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2018.07.011>
- Watkins, H., Bond, C. E., Healy, D., Butler, R. W. (2015). Appraisal of fracture sampling methods and a new workflow to characterise heterogeneous fracture networks at outcrop. *Journal of Structural Geology*, 72, 67-82. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2015.02.001>
- Xavier Neto, P., Bezerra, F. H. R., Silva, C. C. N., Cruz, J. B. (2008). O condicionamento estrutural do carste Jandaíra e da espeleogênese associada pela tectônica pós-campaniana da Bacia Potiguar. *XLIV Congresso Brasileiro De Geologia*, Anais... Curitiba: SBG.
- Xu, Y., Cavalcante Filho, J. S., Yu, W., Sepehrnoori, K. (2017). Discrete-fracture modeling of complex hydraulic-fracture geometries in reservoir simulators. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 20(02), 403-422. <https://doi.org/10.2118/183647-PA>