UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

ALINE MACRINA DA SILVA

ANÁLISE DE HETEROGENEIDADES DIAGENÉTICAS EM CALCÁRIOS LAMINADOS APTIANOS COM BASE EM DADOS DE GPR DE ALTA RESOLUÇÃO

Recife

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Silva, Aline Macrina da.
Análise de heterogeneidades diagenéticas em calcários laminados aptianos com base em dados de GPR de alta resolução / Aline Macrina da Silva. - Recife, 2023.
87 : il., tab.

Orientador(a): José Antônio Barbosa
Cooorientador(a): Virgínio Henrique de Miranda Lopes Neumann
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Geologia - Bacharelado, 2023.
Inclui referências, apêndices.

1. Análogos de reservatório. 2. Modelos geológicos. 3. Heterogeneidades diagenéticas. 4. Bacia do Araripe. 5. Discrete Fracture Network. I. Barbosa, José Antônio. (Orientação). II. Neumann, Virgínio Henrique de Miranda Lopes. (Coorientação). III. Título.

550 CDD (22.ed.)

ALINE MACRINA DA SILVA

ANÁLISE DE HETEROGENEIDADES DIAGENÉTICAS EM CALCÁRIOS LAMINADOS APTIANOS COM BASE EM DADOS DE GPR DE ALTA RESOLUÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. José Antônio Barbosa

Coorientador: Prof. Dr. Virgínio Henrique de Miranda Lopes Neumann

Recife

20

ALINE MACRINA DA SILVA

ANÁLISE DE HETEROGENEIDADES DIAGENÉTICAS EM CALCÁRIOS LAMINADOS APTIANOS COM BASE EM DADOS DE GPR DE ALTA RESOLUÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Geologia da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Apresentado em: 24/02/2023

BANCA EXAMINADORA

_____
Prof. Dr. Jefferson Tavares Cruz Oliveira (DGEO-UFPE)
Universidade Federal de Pernambuco

_____
Dr. José Osvaldo Correia Filho (Pós- doutorando PPGEOC-UFPE)
Universidade Federal de Pernambuco

_____
Prof. Dr. Tiago Siqueira de Miranda (DGEO-UFPE)
Universidade Federal de Pernambuco

Esse trabalho é dedicado à minha avó, Macrina Rodolfo, que hoje com certeza está em festa nos planos espirituais por ter sua primeira neta formada, e a minha mãe. Elas são as maiores incentivadoras dos meus sonhos, muito obrigada por todo amor, investimento e apoio incondicional, amo vocês.

.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais Flávia Ferreira e Alex Moreira, meu padrasto Maurício Muniz, minha tia Maria das Neves e minha Madrinha Daniela Serpa, que foram o alicerce para a minha formação. Desde sempre acreditaram nos meus sonhos e nunca mediram esforços para que eles fossem realizados, me proporcionando suporte emocional e todo investimento possível e necessário. Ao meu irmão, José Trajano Neto, que foi em busca dos seus sonhos em Lisboa e apesar da distância física, está sempre presente em minha vida, me apoiando de todas as maneiras possíveis. Amo muito todos vocês.

Ao Projeto de Extensão Portal, que foi onde tive meu primeiro contato com a Universidade Federal de Pernambuco, e a partir dele tive a certeza de que era onde faria minha graduação. Nesse projeto eu aprendi o quanto a educação é transformadora, e que quando inclusiva, ela liberta e é a chave para um mundo melhor. Lá, encontrei meus melhores amigos, que unidos pelo sonho de democratização da universidade pública, brilharam neste projeto e fizeram uma diferença enorme na minha vida acadêmica, profissional, pessoal e na vida de tantos outros que por ali passaram. Anthony Gianni, Antônio Soares, Bruno Manoel, Carolina Borba, Cleberson França, Deleon Nascimento, Dimas de Melo, Fabiano Ferreira, Isabella Serafim, Jasilane Ferreira, Jessica Cesário, João Marcos, Jonatas Oliveira, Leandro Cardoso, Maria Priscila Martins, Marivalda Amanda, Raphael Campos, Walter Nascimento, Welton dos Anjos e Wesley Xavier, vocês são importantes demais na minha trajetória.

Ao professor Virgínio Neumann, que me apoiou na transição de curso, obrigada por toda orientação durante minha trajetória e pela confiança no meu potencial desde o primeiro período da graduação. Todo seu suporte foi fundamental para que tenha sido mais leve a minha trajetória. Saiba que sou uma grande admiradora do seu trabalho e espero um dia conseguir passar para as pessoas meu conhecimento, da mesma maneira que recebi do senhor, com tanta leveza, maestria e humildade.

Agradeço ao professor e orientador Antônio Barbosa, que apenas no final da graduação tive o prazer de ser aluna, e neste pouco tempo agregou imensamente a minha trajetória. Aprender sobre energias e fazer parte da AAPG me fez crescer, e foi graças a isso que descobri a linha de pesquisa que quero seguir em minha carreira. Obrigada por me ajudar a finalizar o ciclo de graduação e aceitar me orientar também

neste novo ciclo, que se iniciará com o meu mestrado. Seu trabalho é incrível e sua dedicação é admirável, com certeza tenho muito o que aprender.

Agradeço a AAPG que me proporcionou a oportunidade de mergulhar no mundo do petróleo e energias. Desde o início da graduação foi uma área do meu interesse, e a partir do capítulo tive a oportunidade de estar próxima de profissionais maravilhosos, e receber capacitações importantes para o meu desenvolvimento pessoal e profissional. Muito obrigada ao professor Antônio Barbosa e a Germano Mário, pela confiança de me entregar a presidência deste capítulo estudantil, que é tão importante para a formação dos alunos, o suporte de vocês foi e é essencial. E a todos os integrantes que participam e fazem o capítulo crescer, apesar de todos os dilemas da graduação, vocês são incríveis.

Ao professor e coordenador do curso, Ricardo Pereira, agradeço a boa vontade de sempre tentar resolver os problemas do departamento da melhor maneira, pensando no melhor para todos. Mesmo com todas as adversidades e estresse que a sua função carrega, o departamento se tornou melhor com você.

Aos meus amigos Pedro Guedes, Rafael Pessanha, Roberta Samico e Vanessa Gomes, iniciamos o curso juntos e passamos por anos de muitas histórias boas e ruins. A companhia de vocês foi muito importante em minha construção como geóloga e como pessoa, esses anos juntos foram fundamentais para tornar meu caminho mais leve. Agradeço a todo apoio demonstrado ao longo de toda essa trajetória de aulas, campos e pesquisas.

A Petrobras pelo apoio financeiro e técnico concedido por meio dos convênios de pesquisa intitulados: Modelagem geológica/geomecânica de reservatório análogo naturalmente fraturado, Bacia do Araripe, NE Brasil (PT-120.60.10102), e, Análise Comparativa entre Modelos Geológicos de Sistemas Fraturados (Calcários Laminados), Executados com Base nos Métodos de Levantamento de Pseudopoços e de Varredura de Superfícies em Afloramentos Análogos (PT-120.60.10102), desenvolvidos em parceria com o DGEO-UFPE. Aos colegas, professores David de Castro e Francisco Pinheiro do Departamento de Geologia da UFRN, que realizaram a aquisição e o processamento original dos dados aqui apresentados.

E por fim, agradeço a assistência estudantil fornecida pela PROAES em grande parte da minha vida universitária, e foi de fundamental importância para a conclusão da minha graduação.

“O que é muito difícil, é você vencer a injustiça secular, que dilacera o Brasil em dois países distintos: o país dos privilegiados, e o país dos despossuídos.” (SUASSUNA, A., 2008).

RESUMO

Esta pesquisa apresenta a análise de dados de GPR (Ground Penetrating Radar) de alta resolução que foram levantados em uma frente de lavra de calcários laminados de idade aptiana da Bacia do Araripe, NE do Brasil. Estudos de caracterização anteriores foram realizados nessas rochas porque elas são consideradas como análogos dos reservatórios do pré-sal em bacias offshore no Brasil. O objetivo foi verificar a capacidade do método de detectar e discretizar planos verticais de fraturas preenchidas por calcita (veios) e outras heterogeneidades diagenéticas que causam variação na permeabilidade e na porosidade. Foram realizados levantamentos 2D e 3D com antenas de 900 MHz e de 2,6 GHz, o que permitiu a aquisição de dados até uma profundidade de cerca de 2,0 m. Nenhuma das duas frequências permitiu imagear os veios verticais de calcita, cuja abertura foi de aproximadamente 4 mm. A análise dos dados, que incluiu o pós-processamento com a aplicação de filtros e a extração de atributos, foi concentrada em 11 seções 2D e em um volume 3D adquiridos com a antena de 900MHz. O método permitiu caracterizar o efeito cíclico de alta frequência na variação dos laminitos criada por processos deposicionais e pela composição dos mesmos. Foi possível representar o padrão de acamamento, e a alternância de conjuntos de laminações com porosidade e densidade diferentes. Também foi possível imagear os níveis compostos por laminações convolutas e onduladas, e concreções criados pela cimentação precoce dos estratos. Esses apresentam alta continuidade lateral e podem influenciar o fluxo e processos de estimulação como o fraturamento hidráulico. O método também permitiu detectar a presença de *shear fractures*, e principalmente de juntas recentes que permitiram a passagem de água meteórica e a formação de zonas de dissolução nas laminações. O método é confiável para o estudo deste tipo de rocha e a produção de modelos para a distribuição das heterogeneidades mais significativas para os fenômenos de fluxo. Entretanto, a relação entre a resolução e o tamanho/volume do levantamento ainda representa uma dificuldade para a incorporação de estruturas de pequeno porte (sub-sísmica) em modelos na escala de reservatório.

Palavras-chave: Análogos de reservatório; Modelos geológicos; Heterogeneidades diagenéticas; Bacia do Araripe; Discrete fracture network.

ABSTRACT

This research focuses on the analysis of High-resolution Ground Penetrating Radar (GPR) surveys acquired in laminated limestone outcrops of the Araripe Basin, NE Brazil. Previous studies have been developed in these rocks because they are considered as analogs for facies of the pre-salt reservoirs found in offshore Brazilian basins. We aimed to test the method's capacity for the detection and discretization of vertical fracture planes filled with calcite and other diagenetic heterogeneities, which causes variation in permeability and porosity. We have produced 2D and 3D surveys using antennae of 900 MHz and 2,6 GHz, which allowed the acquisition of data to a depth of approximately 2,0 m. Neither of the two frequencies were capable of imaging the vertical calcite veins, which aperture was approximately 4 mm. The data analysis, which included the post-processing steps with the application of filters and attributes extraction and analysis, was concentrated in 11 2D sections, and a 3D image volume produced with the 900 MHz antenna. The method allowed the characterization of the high-frequency cyclic variation of the laminations created by depositional processes and the composition of the mudstone laminae. It was possible to image the bedding pattern and the alternation of sets of laminae with differences in porosity and density. The data also showed the occurrence and distribution of intervals composed of convolute and wavy laminations, and concretions, which were affected by early cementation. These intervals, which present an average thickness of 10 to 25 cm, present high lateral continuity, and they can influence the reservoir flow and stimulation processes like hydraulic fracturing. The method also detected the occurrence of shear fractures and mainly the vertical joints, which allowed the infiltration of meteoric water through the laminations and caused the formation of dissolution zones within the laminations. The method is reliable for studying this type of rock and producing models focused on the distribution of more significant heterogeneities for the flow phenomena. However, the relation between resolution and size/volume of the surveyed regions presents a challenge regarding the integration of small-scale structures (sub-seismic) in reservoir scale models.

Keywords: Reservoir analogues; Geological modeling; Diagentic heterogeneities; Araripe Basin; Discrete fracture network.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Fácies e microfácies de calcários (mudstones) com laminações incipientes e bem desenvolvidas encontradas na Formação Barra Velha, Pré-sal da Bacia de Santos. (A) Diferentes aspectos dos carbonatos laminares que compõem a fácies mostrada no referente trabalho; (B) Efeitos da compactação dos calcários; (C) Camadas com esferulitos e porosidade aparente; (D) Fácies altamente porosa, com alguns esferulitos recobertos e, na parte inferior da foto, um pouco da fácies arbustiva; (E) Presença de pequenos esferulitos, zonas silicificadas e baixa porosidade. (F) Alternância entre bandas não porosas escuras e argilosas fortemente afetada por dissolução. *23*

Figura 2- Arcabouço estratigráfico do intervalo Alagoas, sequência pós-rift I, da Bacia do Araripe, que é formado por três sequências deposicionais separadas por discordâncias. A Formação Crato contém seis horizontes de calcários laminados. *24*

Figura 3- Afloramento de calcários laminados em uma mineração na região de Nova Olinda, Ceará. As exposições existentes em minerações apresentam excelente qualidade para aquisição de dados em superfícies verticais e horizontais (exposição 3D). Em (A) temos o horizonte mais espesso de laminitos (C6) da Formação Crato. Em (B) temos margas e folhelhos da Formação Crato, que não pertencem ao nível C6. ..... *25*

Figura 4- Heterogeneidades presentes nos calcários laminados do intervalo C6 da Formação Crato. A) Estilólitos verticais, B) Nódulos de pirita, C) Concreção diagênese com silicificação precoce, d) Veio vertical de calcita, E) Veio de gipsita em destaque, apontado pela lapiseira amarela; F) Veio horizontal de gipsita. *26*

Figura 5- A) Diagrama de rosetas que mostram as direções das famílias de veios verticais e juntas encontradas nos laminitos do intervalo C6. B) Estereograma de polo dos veios. C) Junta aberta indicada a partir da seta presente na figura. D) Junta parcialmente preenchida por gipsita. E-F) Veios verticais de calcita indicados pelas setas pretas em destaque. *28*

Figura 6- Caracterização de sistemas de fraturas. a) bloco-diagrama mostrando um maciço rochoso com diversos tipos de estruturas (F-fraturas, Fz-zona de falha, Cl-cluster e fraturas), b) tipos de fraturas de extensão (v-veio, j-junta, Br-parcialmente fechada), c) exemplo de um veio de calcita (cc) em um testemunho de folhelho, d) Modelo DFN com aproximadamente 2km de extensão, contendo duas famílias de planos de fraturas. *29*

Figura 7– Classificação das relações entre planos de fraturas. Os tipos de conexões - topologia - definem o padrão de fluxo de fluídos em sistemas fraturados. Onde no círculo verde temos o exemplo de um ramo isolado desta fratura, no triângulo vermelho conexões da fratura em y, no losango azul são ramos em x, e no quadrado laranja temos a representação de um ramo em v. *29*

Figura 8- Esquema mostrando a forma de aquisição de informações de subsuperfície por meio do uso de GPR. A aquisição é realizada por meio da passagem do equipamento que contém uma antena emissora de sinais, e um receptor dos sinais refletidos sobre a região de interesse. As reflexões coerentes são processadas e transformadas em imagens 2D ou 3D do substrato raso. *31*

Figura 9– Mapa geológico da Bacia do Araripe. Em A temos o mapa do Brasil, com destaque em vermelho da área ampliada na figura B. A região de estudo é mostrada no retângulo branco em destaque, na borda norte da bacia. Nesta região, as unidades da fase pós-rifte ocorrem diretamente sobre as rochas paleozóicas da Fm. Cariri e sobre as rochas do embasamento. *33*

Figura 10- Imagem de satélite (Google Earth), mostrando a posição do local de levantamento dos dados de GPR (ponto vermelho), dentro da área da Mineração Três Irmãos, Nova Olinda, CE. Coordenadas do local UTM: 422996E / 9212592S. *34*

Figura 11- Levantamento de campo. a) visão geral da bancada, cuja superfície apresenta uma área aproximada de 7,5 por 5,5 m. As linhas azuis indicam a posição de veios de calcita, e a linha preta indica a posição de junta vertical. b) detalhe da malha (linhas vermelhas) utilizada para o levantamento das seções de GPR (setas pretas = junta). c) Bloco diagrama mostrando o posicionamento da malha de aquisição e das macro-estruturas observadas (linhas azuis - veio de calcita, linha preta - junta). d) vista da superfície vertical da bancada, onde foi realizado um mapeamento das heterogeneidades expostas. A posição do painel fotográfico frontal e da seção estratigráfica está marcada pelo polígono laranja (ver painel fotográfico na Fig. 13). *36*

Figura 12- Disposição dos levantamentos executados com GPR sobre o pavimento do afloramento escolhido para esta pesquisa. As linhas verdes indicam a localização das seções adquiridas com antena de 900 MHz e 2,6 GHz. A linha Lilás indica a seção 2D isolada que cruzou de forma perpendicular a junta vertical, e que foi adquirida com a antena de 900 MHz e 2,6 GHz. O retângulo laranja indica a localização do levantamento 3D que foi adquirido com antena de 900 MHz. *38*

Figura 13- Detalhe do painel fotográfico da superfície frontal da bancada onde foi realizado o levantamento de dados de GPR. A) imagem sem interpretação. B) Imagem com a interpretação das estruturas e feições sobrepostas, C) desenho esquemático das feições diagenéticas e estruturas rúpteis, D), perfil estratigráfico de detalhe feito dentro da superfície frontal (escalas em cm). *39*

Figura 14- Exemplo de estruturas na face vertical do afloramento de calcários laminados. A) falha sin-sedimentar (shear fracture) (foto esquerda - figura sem interpretação, foto direita - foto com interpretação) (linhas amarelas - planos de falhas, linhas vermelhas - laminações com dobras e loop bedding), B) Shear

Fractures - falhas sin-sedimentares (linhas amarelas), cortando um nível de laminações convolutas, C) Detalhe da deformação rúptil-dúctil produzida no sedimento inconsolidado, D) Ocorrência de uma microfalha afetando apenas algumas laminações (linha amarela)..... 40

Figura 15- Estruturas presentes na face vertical da bancada. A) Veio vertical preenchido por calcita, B) Nível de Laminações convolutas da parte superior, C) Nível de laminações convolutas e do tipo loop bedding na porção intermediárias, D) Nível mais espesso de laminações convolutas, dobras e estruturas do tipo loop bedding, E) Nível contendo nódulos centimétricos a milimétricos de pirita, formando agregados com aspecto botrioidal, F) nível contendo concreções carbonáticas, G) Nível contendo vúgulas de dissolução no acamamento, H) Fratura vertical aberta, vista no topo da bancada, cortada por um veio vertical (ver localização no desenho esquemático da Figura 7)..... 41

Figura 16- Fluxograma de tratamento dos dados migrados em tempo e profundidade. O plugin dip-steering foi aplicado aos dados 2D e 3D. Em seguida foi aplicado o Median Filter as seções 2D para a remoção de ruídos. Ao cubo de dados 3D foi aplicado o Median Filter, e a partir desse dado foram aplicados os atributos de energia, q-factor, frequência instantânea, fase instantânea, aceleração da fase instantânea e frequência dominante. Os retângulos azuis indicam as versões finais dos volumes 2D e 3D usados na interpretação desta pesquisa..... 43

Figura 17- Seção 2D 01 obtida a 40 cm da face vertical do afloramento (Fig. 12). Essa seção apresenta os valores de profundidades dos refletores em tempo (ns) e em profundidade (m), e demonstra o resultado dos dados processados do levantamento 2D. Estas seções apresentam 5,7 m de comprimento (Fig. 12)..... 44

Figura 18- Visualização do grid de seções GPR 2D obtidos com a antena de 900 MHz (11 linhas de 5,7m), mais uma linha isolada de 5 m, que foi posicionada de forma perpendicular à junta visível no pavimento da bancada (ver Fig. 12). A seção 01, mais próxima da face vertical do afloramento, e a seção localizada de forma perpendicular à fratura que está no pavimento da bancada estão mostradas no detalhe..... 45

Figura 19- Correlação do painel fotográfico da face vertical do afloramento. A), e de parte da seção 2D 01 B). Algumas feições identificadas no painel apresentaram resposta detectável na seção. (ver Figura 17). Os horizontes que comportam heterogeneidades foram numerados de 1 a 5, e serão descritos adiante. Os horizontes 2a e 3a formam a base de dois intervalos compostos com refletores plano-paralelos, e ondulados, respectivamente..... 46

Figura 20- Temos as linhas pretas finas indicando falhas, a linha fina verde escura indicando veios. As setas pretas indicam a presença de concreções calcárias. Os horizontes interpretados como 1, 2 e 3 indicam intervalos de laminações portadora de laminações convolutas, dobras e estruturas de escape de fluídos. A) Interpretação das seções de GPR 01 e B) Interpretação das seções de GPR 03. 48

Figura 21- A) Interpretação das seções de GPR 06 e em B) Interpretação das seções de GPR 09. Os intervalos portadores de laminações convolutas e concreções também foram identificados nestas seções..... 49

Figura 22- Em A temos a Interpretação das seções de GPR 11, e em B a seção de 5m de comprimento, adquirida sobre a junta observada na superfície horizontal do afloramento. Na interpretação as linhas de cor cinza demarcam a zona vertical de atenuação criada ao redor do plano de abertura da junta, embora não tenha sido possível observar a sua geometria. Também observa-se uma deformação aparente dos refletores dentro desta zona de atenuação. A linha verde marca a posição hipotética da junta que apresenta na superfície do afloramento uma abertura aproximada de 05 cm. 50

Figura 23- Aspecto do volume de imagem 3D produzido com a antena de 900 MHz, mostrando parte do volume e um slice (superior), e seções inline e crosline (em tempo). 51

Figura 24- Inline 95 do volume 3D. A) imagem do volume migrado sem filtros, onde as setas pretas indicam laminações convolutas, ondulações e concreções. E a azul um pocal onde é estimada a presença de um veio. B) Imagem pós-processada com o filtro de dip-steering. que melhorou a geometria dos estratos de laminitos plano paralelos, e que as setas pretas indicam os refletores nestes intervalos, que aparecem truncados e ondulados onde ocorrem laminações convolutas, ondulações e concreções. Já a seta azul, mostra o truncamento formado na região onde estima-se ter um veio..... 52

Figura 25- Crosline 3 com e sem pós-processamento DSMF. A) imagem do volume migrado sem filtros, B) Imagem pós-processada com o filtro de dip-steering. O filtro melhorou a geometria dos estratos de laminitos e foi possível observar descontinuidades e deformações nos estratos que podem ser shear fractures (linhas pretas). Os intervalos portadores de convoluções estão indicados com setas pretas..... 53

Figura 26- Interpretação de horizontes que apresentam alta continuidade e que delimitam intervalos com laminações convolutas e concreções (crossline 01 - DSMF). Abaixo são mostrados slices posicionados na profundidade dos intervalos identificados (amplitude do volume migrado). Os intervalos definidos entre os horizontes 2a-2b, 3-3a e 3b-4 delimitam intervalos com laminações convolutas, dobras, loop beddings e concreções calcárias. A linha preta marca a posição do trecho da junta que foi imageada pelo levantamento 3D..... 55

Figura 27- Atributos do volume 3D, extraídos do volume migrado (crossline 01). A) frequência instantânea, seção sem e com horizontes interpretados; B) fase instantânea, seção sem e com horizontes interpretados. . 56

Figura 28- Atributos do volume 3D, mostrados na crossline 01. A) Atributo de energia, seção limpa e seção com horizontes interpretados; B) Atributo de absorção local de energia, Q-factor, seção limpa e seção com horizontes interpretados..... 58

Figura 29- Atributos do volume 3D, mostrados na crossline 01. A) aceleração da fase instantânea, seção com e sem horizontes interpretados; B) atributo de pseudo-relief, seção com e sem os horizontes interpretados.. 60

Figura 30- A) Modelagem de destaque para os valores altos obtidos com o atributo de fase instantânea, que permitem ressaltar a continuidade das camadas, formadas por conjuntos de lâminas que compõem o laminito. B) Modelagem do atributo de frequência dominante com destaque para as zonas com maiores valores do espectro de frequência. A modelagem sugere a ocorrência de camadas com maior impacto no espectro de frequência, o que pode estar relacionado a características físicas das rochas como a densidade. As setas em amarelo, destacam a presença de heterogeneidades nas camadas..... 61

Figura 31- A) Modelagem de aceleração de fase instantânea que permitiu destacar a continuidade de intervalos portadores de laminações convolutas e concreções e que também pode ser segmentado devido aos valores mais elevados da relação de fase/frequência. Os intervalos destacados apresentam interações mais expressivas de frequências, possivelmente mais densas, e com menor porosidade. B) Modelagem do atributo de energia, destaca áreas isoladas ou clusterizadas com maior contraste de amplitudes e absorção do sinal. Isto revelou a ocorrência de zonas descontínuas, de geometria achatada, e que ocorrem com maior abundância na porção SE do volume 3D. A linha amarela indica a projeção da junta que passa pelo afloramento nesta região. As setas em amarelo, destacam a presença de heterogeneidades nas camadas..... 63

Figura 32- Modelagem do atributo de fator Q instantâneo (IQF), que permitiu ressaltar as zonas caracterizadas por altos valores de atenuação do sinal propagado. As zonas definidas apresentam possuem dimensões e apresentam-se descontínuas. Estas zonas apresentam maior abundância na região E-NE do cubo de dados. As geometrias ressaltadas também mostram forte correlação com as regiões ressaltadas pelo atributo de energia. A marcação em amarelo, destaca onde está localizada a fratura que corta a bancada.. 65

Figura 33- A) Gráfico de crossplot entre os atributos de energia e de Fator-Q (IQF). Algumas amostras se destacam porque apresentam altos valores para os atributos de energia e IQF (polígono preto). B) Atributo de energia exibido com transparência mostrando as zonas de alta amplitude das refletividades. Os pontos marcados por pequenas esferas amarelas indicam a posição das amostras selecionadas no gráfico mostrado em A. Estes pontos possivelmente indicam zonas com formação de cavidades de dissolução nos laminitos..... 67

Figura 34- Seção GPR 2D analisada por Silva (2003) executada na Mineração Caldas. O intervalo de laminitos C3 foi investigado e foi possível verificar intervalos dom refletores mais contínuos e refletores descontínuos e ondulados. A, B C e D foram identificados como refletores contínuos que demarcam intervalos

com fácies diferentes. S - Marca trechos com refletores convolutos que podem indicar deformação causada por tectonismo sin-deposicional. A linha preta tracejada indica a interpretação de uma fratura..... 73

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO **22**

1.1 APRESENTAÇÃO 22

1.2 OBJETIVOS 32

1.2.1 Objetivo Geral **32**

1.2.2 Objetivos Específicos **32**

1.3 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO 32

2. METODOLOGIA **35**

2.1 AQUISIÇÃO DE DADOS NO CAMPO 35

2.2 DADOS DE GPR MIGRADOS E PÓS PROCESSADOS 41

3. RESULTADOS **44**

4. DISCUSSÃO **68**

5. CONCLUSÃO **74**

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

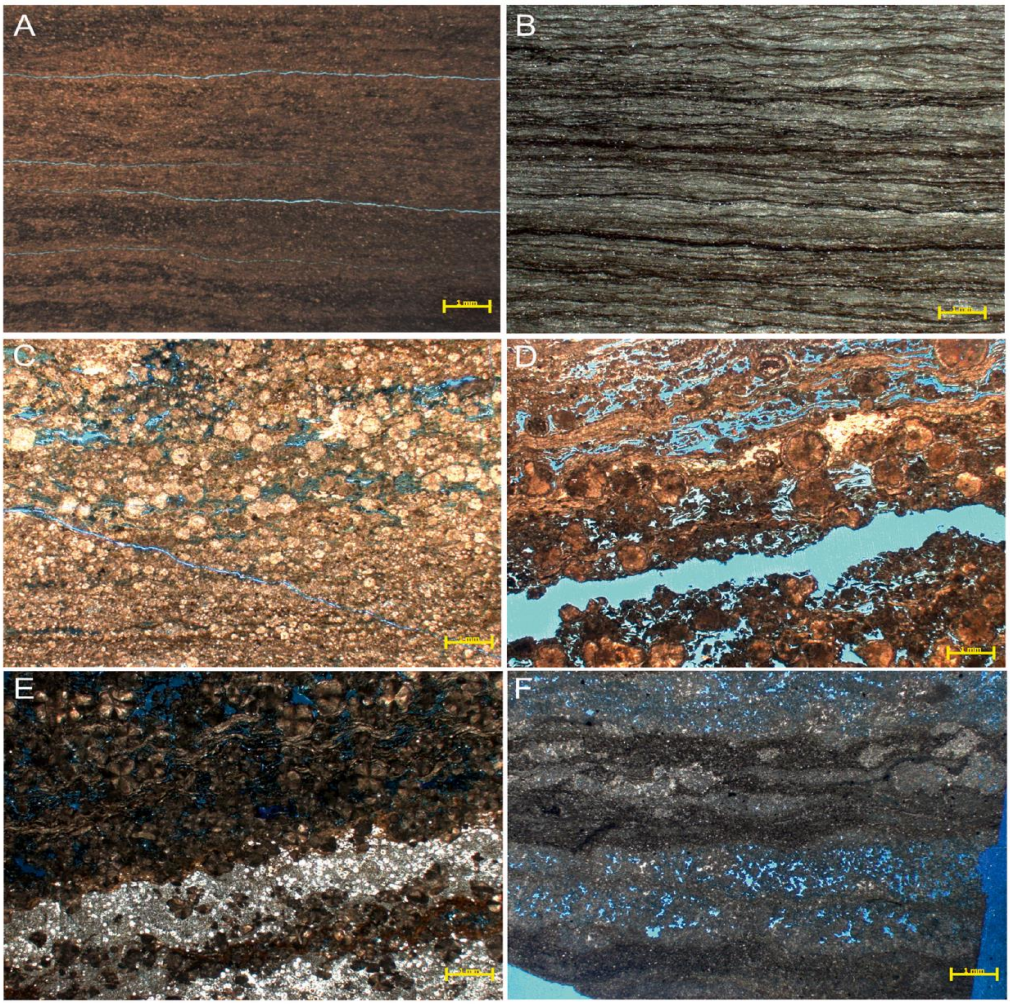
Nas duas últimas décadas, o interesse em reservatórios carbonáticos de óleo e gás tem aumentado. É estimado que cerca de 60% das reservas restantes de hidrocarbonetos convencionais estão contidas neste tipo de reservatório (BURCHETTE, 2012; GARLAND et al., 2012). As grandes descobertas de reserva ocorridas entre 2006 e 2015 envolvem reservatórios carbonáticos, como os que foram descobertos abaixo da camada de evaporitos Aptianos, cuja sucessão é conhecida como Pré-Sal na margem Sudeste do Brasil (AZÊREDO et al., 2021). Os reservatórios do pré-sal são principalmente compostos por três grandes grupos de rochas calcárias: laminitos, coquinas e biólitos (Fig. 1) (TERRA et al., 2010; MUNIZ; BOSENCE, 2015; JOHANN; MONTEIRO, 2016; AZÊREDO et al 2021).

Os reservatórios carbonáticos apresentam maior complexidade para o seu desenvolvimento devido principalmente à natureza reativa dessas rochas, e a forma como as heterogeneidades deposicionais e diagenéticas afetam seu sistema permo-poroso (EHRENBERG; NADEAU, 2005; BURCHETTE, 2012). Outro aspecto extremamente importante é a influência de sistemas de fraturas no desenvolvimento de fluxo em rochas carbonáticas (ENRENBERG; NADEAU, 2005; KARGARPOUR, 2020; LAUBACH et al., 2019). A complexidade criada pela relação entre porosidades de matriz e de fraturas (dual-porosity), bem como a ocorrência de macroporos formados por carstificação produz dificuldade adicional para a caracterização e a modelagem de reservatórios em rochas calcárias (LAUBACH et al., 2019; WANG et al., 2017).

A ocorrência de heterogeneidades em rochas reservatório não pode ser modelada com o uso de dados de sísmica de reflexão por causa da resolução espacial desse método, que é de no máximo algumas dezenas de metros. Por sua vez, os dados de poços podem fornecer dados com alta resolução, mas eles não permitem estabelecer relações de continuidade das feições sem incertezas (LAUBACH et al., 2019). Por isso, uma abordagem utilizada pela indústria é o estudo de afloramentos análogos, expostos na superfície, de rochas reservatório, que podem fornecer parâmetros de

arquitetura deposicional, distribuição de fácies, aspectos físicos e petrofísicos etc. (GEIGER; MATTHAI, 2014; GUERRIERO et al., 2010; HOWELL et al., 2014).

Figura 1- Fácies e microfácies de calcários (mudstones) com laminações incipientes e bem desenvolvidas encontradas na Formação Barra Velha, Pré-sal da Bacia de Santos. (A) Diferentes aspectos dos carbonatos laminares que compõem a fácies mostrada no referente trabalho; (B) Efeitos da compactação dos calcários; (C) Camadas com esferulitos e porosidade aparente; (D) Fácies altamente porosa, com alguns esferulitos recobertos e, na parte inferior da foto, um pouco da fácies arbustiva; (E) Presença de pequenos esferulitos, zonas silicificadas e baixa porosidade. (F) Alternância entre bandas não porosas escuras e argilosas fortemente afetada por dissolução.



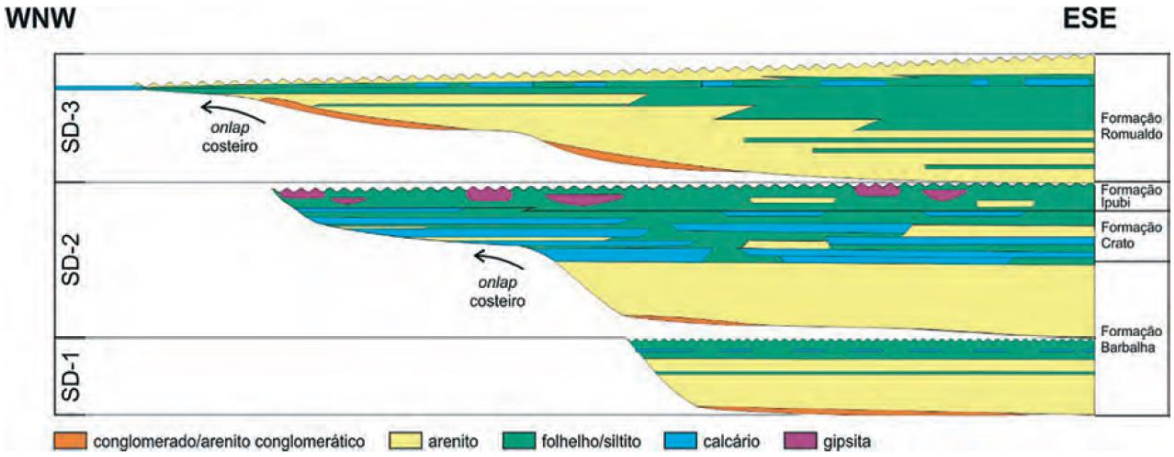
Fonte: (Azêredo et al., 2021, p.5)

Visando aprimorar os modelos desenvolvidos para os reservatórios do pré-sal alguns modelos têm sido propostos com base em formações carbonáticas no Brasil e em outros locais do planeta, como no caso das sucessões de coquinas (MIZUNO et al., 2018; THOMPSON et al., 2015).

Em relação às rochas calcárias laminadas (laminitos) do pré-sal, alguns estudos têm sido realizados com base nos calcários laminados que compõem o intervalo C6 de laminitos da Formação Crato. Estes depósitos fazem parte do intervalo pós-*rift* I da

Bacia do Araripe, no NE do Brasil (Fig. 2) (ASSINE et al., 2014). A unidade Crato é composta por camadas de folhelhos, calcários laminados, calcários margosos e siltitos calcíferos (MIRANDA et al., 2018). A unidade comporta seis horizontes formados por laminitos calcários (*mudstones*), intercalados com as demais litologias, denominados de C1 a C6 que apresentam incremento, da base da unidade para o seu topo, em espessura e distribuição espacial na bacia (NEUMANN, 1999; NEUMANN et al., 2003).

Figura 2- Arcabouço estratigráfico do intervalo Alagoas, sequência pós-rift I, da Bacia do Araripe, que é formado por três sequências deposicionais separadas por discordâncias. A Formação Crato contém seis horizontes de calcários laminados.



Fonte: (Assine et al., 2014, p. 8)

Estudos recentes propuseram a possibilidade de utilizar os depósitos que compõem o horizonte mais espesso de laminitos (C6) como um análogo físico para algumas fácies de laminitos do intervalo pré-sal (Formação Barra Velha) (CATTO *et al*., 2016; MIRANDA *et al*., 2018; SANTOS *et al*., 2016; ZIHMS *et al*., 2017).

Catto (2015) destacou a importância do estudo das rochas carbonáticas do andar Alagoas nas bacias sedimentares brasileiras para melhor compreensão dos carbonatos lacustres como os laminitos que ocorrem no contexto das bacias marginais. Em especial, o estudo destas rochas tem objetivado compreender o efeito dos sistemas de fraturas que nestas ocorrem (MIRANDA et al., 2018), e das heterogeneidades deposicionais e diagenéticas como estruturas que indicam processos de fluidização e escape de fluídos, silicificação precoce, formação de zonas de dissolução, e de concreções calcárias e silicosas (ALENCAR et al., 2021; ARAÚJO et al., 2020; RAMOS et al., 2020)

A unidade Crato apresenta um grande número de heterogeneidades físicas desenvolvidas nos laminitos como veios verticais/subverticais de calcita, veios horizontais de gipsita, *shear fractures* com escala de alguns centímetros a vários metros, zonas horizontalizadas de dissolução nas laminações, zonas de silicificação, concreções calcárias e silicosas e juntas abertas ou parcialmente preenchidas por calcita e gipsita formadas em etapa telodiagenética tardia (Fig. 3, 4 e 5) (ALENCAR et al., 2021; ARAÚJO et al., 2020; MIRANDA et al., 2018; RAMOS et al., 2020; SANTOS et al., 2016).

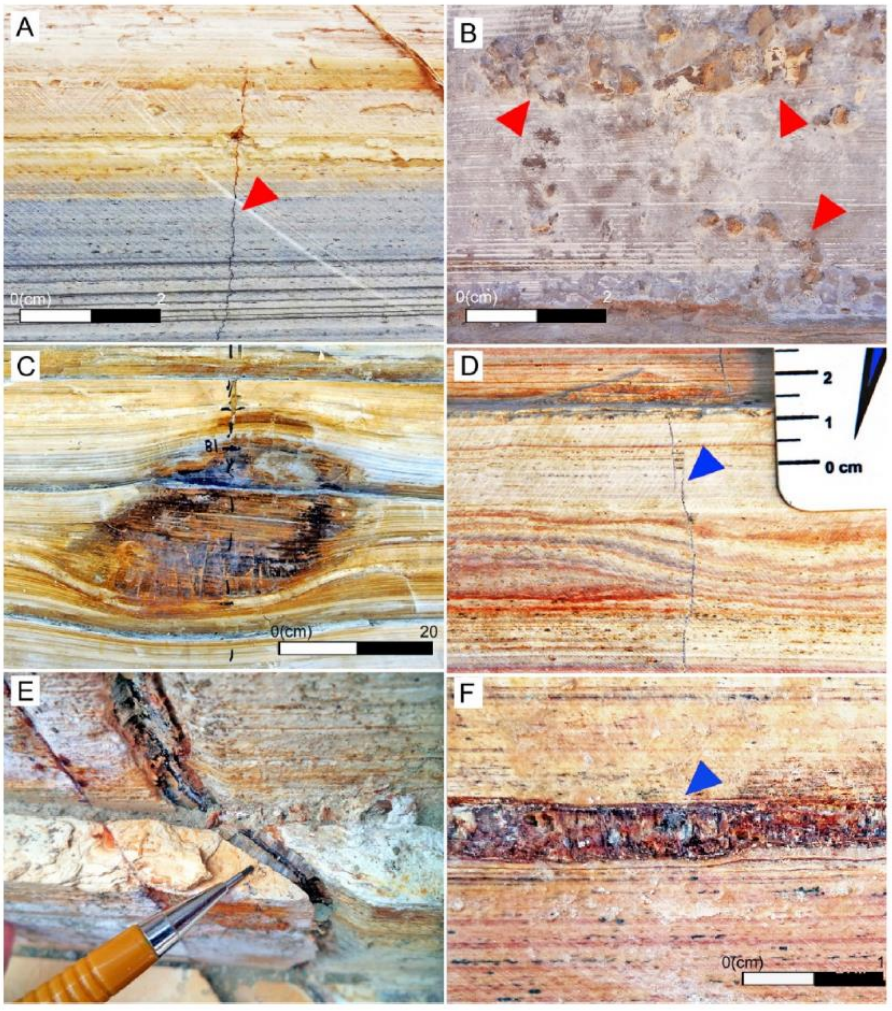
Os calcários laminados são compostos por finas laminações de micrito (calcita microcristalina), entre 3 e 5 mm de espessura (ARAÚJO et al., 2020; HEIMHOFER et al., 2010) e apresentam organização interna plano-paralela à paralela-ondulada (Fig. 4 e 5) (CATTO et al., 2016; NEUMANN, 1999). As laminações apresentam estruturas de deformação provocadas por sismicidade como convoluções *microslumps*, microfalhas e níveis de *loop beddings* (ALENCAR et al., 2021; NEUMANN, 1999; SILVA; NEUMANN, 2002; SILVA, 2003;) (heterogeneidades de origem sin-sedimentar).

Figura 3- Afloramento de calcários laminados em uma mineração na região de Nova Olinda, Ceará. As exposições existentes em minerações apresentam excelente qualidade para aquisição de dados em superfícies verticais e horizontais (exposição 3D). Em (A) temos o horizonte mais espesso de laminitos. (C6) da Formação Crato. Em (B) temos margas e folhelhos da Formação Crato, que não pertencem ao nível C6.

Fonte: A autora (2023)

Estudos mais recentes focados nos laminitos da Formação Crato tem tratado esses depósitos como um análogo para reservatórios do tipo *tight* fraturados (baixa permeabilidade de matriz e rede permoporosa atribuída a fraturas) (MIRANDA et al., 2018; NELSON, 2001). Esses estudos têm utilizado técnicas de quantificação estatística dos sistemas de fraturas baseados em varreduras das superfícies dos afloramentos (MIRANDA et al., 2018; SANTOS et al., 2016). Os estudos têm aproveitado a ótima preservação das estruturas encontradas nestes depósitos e o excelente nível de exposição encontrado em minerações semimecanizadas nas quais os laminitos são explorados como material de construção (Fig. 3) (MIRANDA et al., 2018).

Figura 4- Heterogeneidades presentes nos calcários laminados do intervalo C6 da Formação Crato. A) Estilólitos verticais, B) Nódulos de pirita, C) Concreção diagênese com silicificação precoce, d) Veio vertical de calcita, E) Veio de gipsita em destaque, apontado pela lapiseira amarela; F) Veio horizontal de gipsita.



Fonte: (Alencar et al., 2021, p.4)

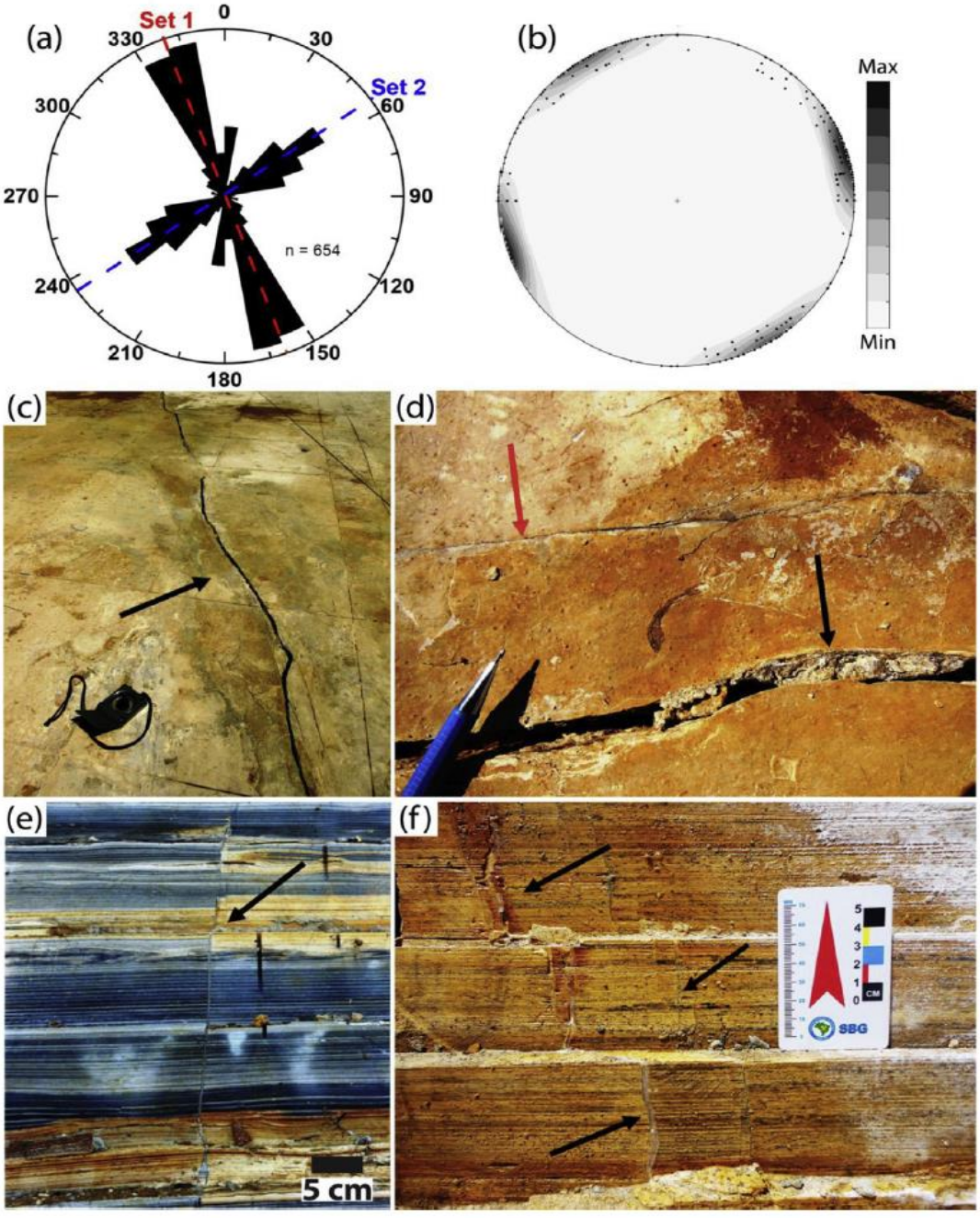
As estruturas utilizadas para os estudos de sistemas fraturados compõem os sistemas conjugados de veios verticais/subverticais de calcita (Fig. 5). Esses veios e juntas apresentam duas tendências principais (famílias) de orientação: NE-SW (set 1), e NW-SE (set 2) (MIRANDA et al., 2018). O estudo de sistemas de fraturas/falhas permite definir a influência dessas estruturas nos regimes de fluxo de reservatórios (ALVAREZ et al., 2021; LAUBACH et al., 2019). Os dados de frequência, tamanho, abertura e relações espaciais (topologia), permite obter uma equivalência da porosidade e permeabilidade das estruturas em relação às porosidades e permeabilidades da matriz da rocha saturada (ALVAREZ et al., 2021; SILVA et al., 2021). Como essas estruturas que ocorrem em grande quantidade nos reservatórios, em especial reservatórios calcários, e não podem ser discretizadas com apoio de dados geofísicos, a única abordagem possível é a integração de seu impacto por meio de abordagens numéricas que permitem homogeneizar esse impacto nas características da matriz da rocha de interesse (ALVAREZ et al., 2021; BISDOM et al., 2016; CHEN, 2020; GUERRIERO, 2012; LAUBACH et al., 2019; SILVA et al., 2021).

Essa incorporação de dados de sistemas de fraturas é realizada por meio da obtenção de um modelo estocástico de distribuição de fraturas, cujas variáveis são coletadas em afloramentos e poços (BISDON et al., 2016; LEI et al., 2017; LEPILLIER et al., 2020; LIU et al., 2015; MÄCKEL, 2007; SILVA et al., 2021) (Fig. 6). Estes modelos são chamados de DFN - *Discrete Fracture Network* (Fig. 6). Modelos DFNs representam reconstruções realísticas dos grupos de estruturas discretizadas em um volume 3D ou em uma superfície 2D (Fig. 6D).

A criação de DFNs (*Discrete Fracture Network*), permite incorporar o volume conectado ou não das fraturas em modelos numéricos, e a realização de simulações de fluxo (HE; AYDIN., 2018). De acordo com (JING; STEPHANSSON, 2007), o método DFN é uma abordagem discreta especial que considera o fluxo de fluido e os processos de transporte em maciços rochosos fraturados através de um sistema de fraturas conectadas. A técnica foi criada na década de 1980 para problemas 2D e 3D (ANDERSSON, 1984; ANDERSSON; DVERSTORP, 1987; DERSHOWITZ; EINSTEIN, 1987; ELSWORTH, 1986a; ELSWORTH, 1986b; ENDO, 1984; ENDO et al., 1984; LONG et al., 1982; LONG et al., 1985; ROBINSON, 1984; SMITH; SCHWARTZ, 1984), e foi continuamente desenvolvido posteriormente com muitas aplicações em engenharia civil, ambiental e de reservatórios, como também, em outros campos de geociência e geoengenharia. Grande parte, das pesquisas que

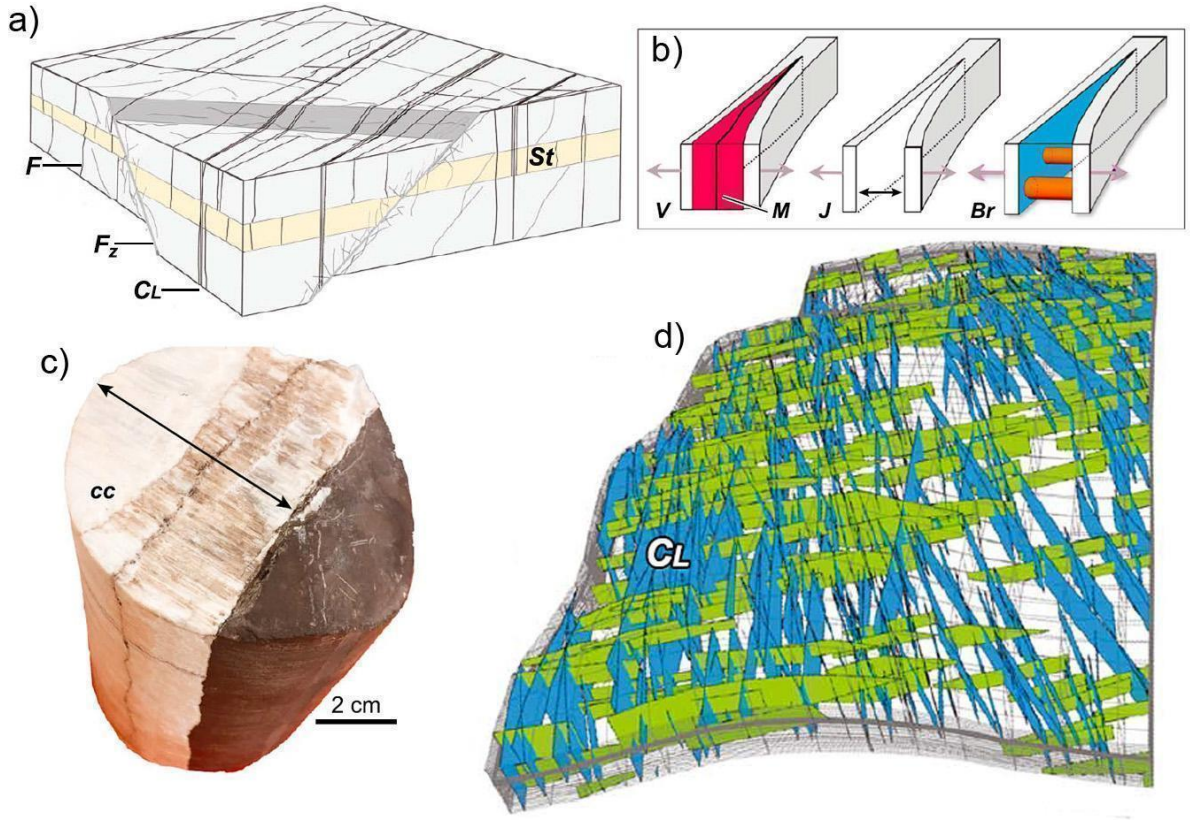
utilizam DFNs, buscam conhecer a relação entre os parâmetros dos sistemas de fraturas, em especial a distribuição das famílias de fraturas no espaço, e os valores de aberturas, de forma que os códigos computacionais possam fornecer, com base no tratamento estatístico, modelos tridimensionais dessa distribuição (DFNs) (Fig. 6D).

Figura 5- A) Diagrama de rosetas que mostram as direções das famílias de veios verticais e juntas encontradas nos laminitos do intervalo C6. B) Estereograma de polo dos veios. C) Junta aberta indicada a partir da seta presente na figura. D) Junta parcialmente preenchida por gipsita. E-F) Veios verticais de calcita indicados pelas setas pretas em destaque.



Fonte: (Miranda et al., 2018, p.15).

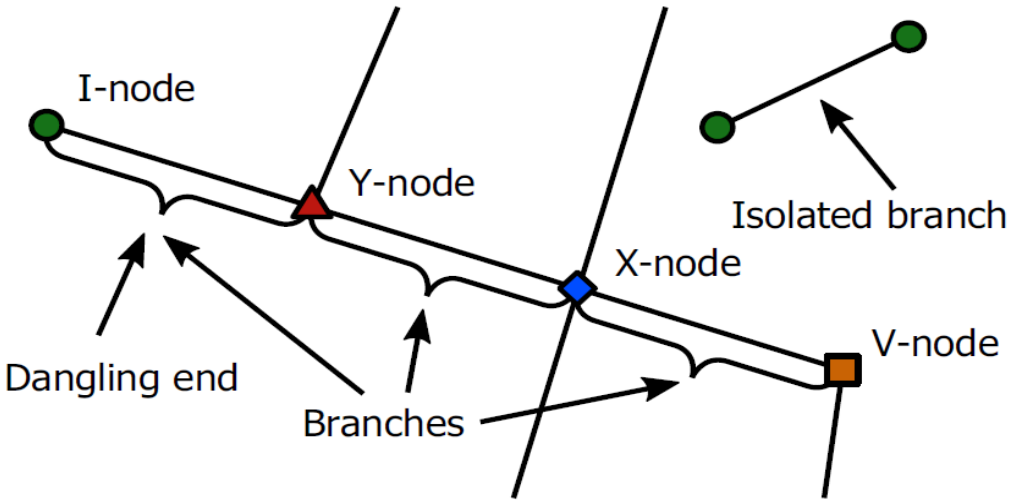
Figura 6- Caracterização de sistemas de fraturas. a) bloco-diagrama mostrando um maciço rochoso com diversos tipos de estruturas (F-fraturas, Fz-zona de falha, Cl-cluster e fraturas), b) tipos de fraturas de extensão (v-veio, j-junta, Br-parcialmente fechada), c) exemplo de um veio de calcita (cc) em um testemunho de folhelho, d) Modelo DFN com aproximadamente 2km de extensão, contendo duas famílias de planos de fraturas.



Fonte: (Modificado de Laubach et al., 2019, p. 1067).

Um aspecto importante do estudo de redes de fraturas naturais e modelagem de DFNs é a topologia dos planos (Fig. 7), que representa o efeito da conectividade de fraturas individuais em diferentes escalas (LAUBACH et al., 2019; LEI et al., 2017; SANDERSON; NIXON, 2015, 2018). A partir da coleta de dados de sistemas de fraturas (espaçamento, atitudes espaciais, abertura e topologia) em afloramentos ou poços, a modelagem de DFNs é realizada em códigos comerciais ou abertos (LAUBACH et al., 2019; SILVA et al., 2021).

Figura 7– Classificação das relações entre planos de fraturas. Os tipos de conexões - topologia - definem o padrão de fluxo de fluídos em sistemas fraturados. Onde no círculo verde temos o exemplo de um ramo isolado desta fratura, no triângulo vermelho conexões da fratura em y, no losango azul são ramos em x, e no quadrado laranja temos a representação de um ramo em v.

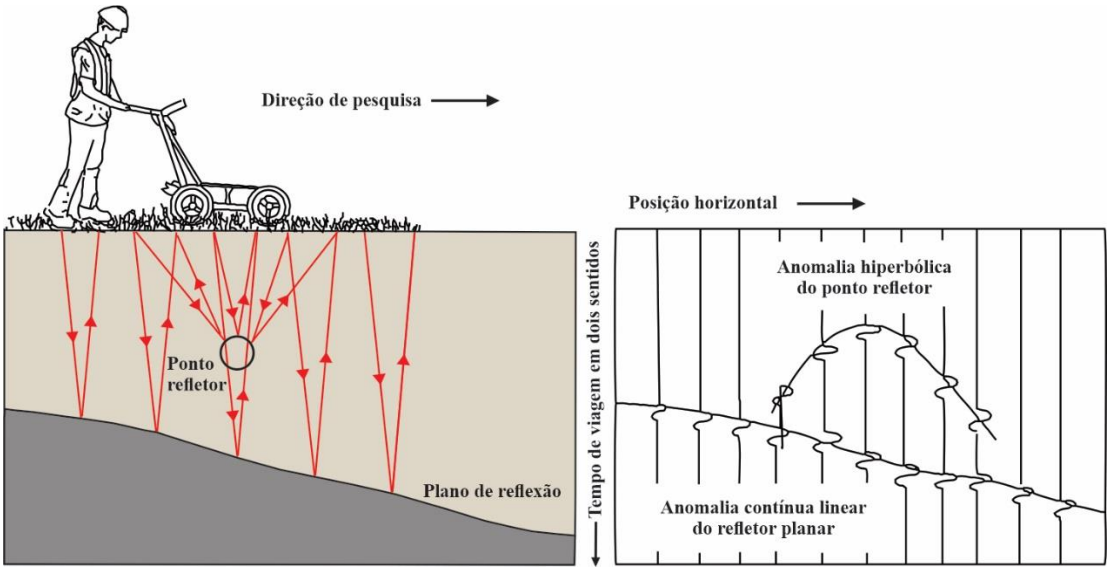


Fonte: (Adaptado de Sanderson e Nixon, 2015, p.56).

Conforme informações colocadas acima, o presente estudo teve como objetivo testar a capacidade do método *Ground Penetrating Radar* (GPR), que corresponde a um método de aquisição geofísica para estratos rasos, de detectar e analisar qualitativamente heterogeneidades existentes nos calcários laminados do intervalo C6. O método GPR é utilizado para obter imagens que permitem inferir o padrão geométrico de interfaces entre camadas geológicas e de estruturas sedimentares e artificiais rosas (MAGALHÃES et al., 2017). O GPR se baseia na emissão de ondas eletromagnéticas de alta frequência, e é amplamente utilizado para a investigação de intervalos rasos em subsuperfície, de alguns centímetros a algumas dezenas de metros. Ele tem fornecido importante arcabouço de informações para as áreas de geologia, engenharia, arqueologia, investigação forense e agronomia (BARONE; DI MAGGIO, 2019; BORKOWSKI et al 2022; CONTI et al., 2019; DE CASTRO et al., 2014; DE LIMA, et al., 2018; DE OLIVEIRA JR et al., 2020; DOS REIS JR et al., 2015; FERNANDES; PAIS, 2017; LIU et al 2016, 2018; LOPES et al., 2023; CONYERS, 2004; THAKUR; PRASHANT, 2016) (Fig. 8). A Figura 8 ilustra a forma de aquisição de levantamentos de GPR. O tempo de trânsito das reflexões depende da condutividade dos materiais na presença do sinal eletromagnético. O uso de frequências maiores (1,2 GHz, 2,6GHz) permite obter melhor resolução, porém limita a aquisição a apenas algumas dezenas de centímetros, o uso de frequências menores (400 MHz, 600 MHz, 900 MHZ) permite imagear profundidades de metros a dezenas de metros, mas com resolução espacial menor (ANNAN, 2005; ANNAN; COSWAY, 1992, 1994). Este fenômeno ocorre porque os materiais geológicos possuem

tendência de atenuação da energia que se propaga em altas frequências (BRISTOW; JOL, 2003).

Figura 8- Esquema mostrando a forma de aquisição de informações de subsuperfície por meio do uso de GPR. A aquisição é realizada por meio da passagem do equipamento que contém uma antena emissora de sinais, e um receptor dos sinais refletidos sobre a região de interesse. As reflexões coerentes são processadas e transformadas em imagens 2D ou 3D do substrato raso.



Fonte: Adaptada de About gpr. **IndiComet Geociências**, 2017. Disponível em: https://indicomet.com/about-gpr.html . Acesso em: 18 jan. 2023.

A hipótese da pesquisa é que a detecção do tamanho e orientação dos planos de fraturas permitiria construir modelos DFN mais realísticos dos sistemas de fraturas que poderiam ser utilizados para a execução de modelagens geológicas mais eficientes e precisas sobre a área e volume destas estruturas em um dado volume de rochas (LAUBACH ET AL., 2019; GIUFFRIDA et al., 2020) de formações análogas a formações reservatório. Isto permitiria criar dados de validação para modelos baseados nas informações coletadas apenas nas superfícies de afloramentos (ARAÚJO et al., 2020).

Como é possível extrair informações de faces verticais e horizontais dos afloramentos dos laminitos do intervalo C6 nas minerações estudadas, propôs-se que seria importante verificar se o método poderia detectar as a continuidade das estruturas mapeadas nas superfícies dentro do maciço rochoso, e também comparar e verificar a capacidade deste de identificar as estruturas contidas no interior do volume de rochas estudado.

O método de GPR tem sido utilizado para estudos em rochas calcárias, principalmente com o objetivo de detectar e caracterizar cavidades naturais como cavernas, *sinkholes*, descontinuidades estratais e estruturas como falhas e fraturas (ANHUELA et al. 2009; BARR, 1993; BECK; SAYED, 1991; BUURSINK, 1995; FERNANDES et al., 2015; MELLET, 1995; STEWART; PARKER, 1992), também para detecção de artefatos arqueológicos (CONYERS; GOODMAN, 1997; CONYERS, 2004; PIPAN et al., 1999; THAKUR; PRASHANT, 2016, VEGA et al., 2005; WEINSTEIN-EVRON et al., 2003), e ainda na investigação e mapeamento de heterogeneidades mecânicas e texturais (JEANNIN et al., 2006; JONES; HUDYMA, 2016; SAINTENOY et al., 2017; ZAJC et al., 2014).

O método já foi utilizado para o imageamento de estruturas rúpteis em rochas calcárias - falhas e fraturas - com bons resultados (CONTI et al., 2019; LOPES et al., 2023). Esse aspecto, além das demais considerações descritas acima, motivou a execução do presente estudo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo dessa pesquisa foi testar a capacidade de detecção e de quantificação de heterogeneidades deposicionais e diagenéticas presentes em calcários laminados do intervalo C6 da Formação Crato a partir de diferentes configurações de aquisição do método GPR.

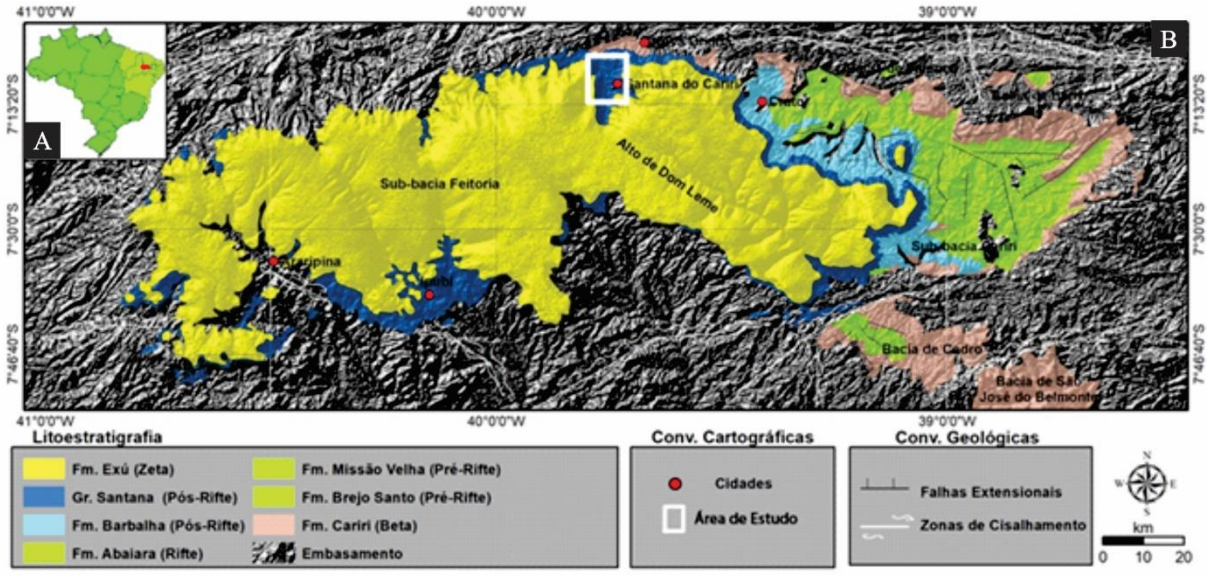
1.2.2 Objetivos Específicos

a) Estabelecer a efetividade das frequências testadas em relação ao objetivo de caracterizar as estruturas dentro do volume de rochas;
b) Analisar o padrão de distribuição das heterogeneidades, locais e de alta continuidade dentro do volume de rochas estudadas.

1.3 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Bacia do Araripe localiza-se no interior do nordeste brasileiro, possuindo aproximadamente 243 km de comprimento por 83 km de largura e uma área total com cerca de 12.200 km², abrangendo os estados de Pernambuco, Ceará e Piauí (ASSINE, 1992; ASSINE et al., 2014). Essa bacia está implantada em terrenos pré-cambrianos da Zona Transversal da Província Borborema (BRITO NEVES *et al*., 2000). A área de estudo (Fig. 9), e a exposição utilizada pela pesquisa, está localizada na Mineração Três Irmãos, próximo à cidade de Nova Olinda (CE) (Fig. 10).

Figura 9– Mapa geológico da Bacia do Araripe. Em A temos o mapa do Brasil, com destaque em vermelho da área ampliada na figura B. A região de estudo é mostrada no retângulo branco em destaque, na borda norte da bacia. Nesta região, as unidades da fase pós-rifte ocorrem diretamente sobre as rochas paleozóicas da Fm. Cariri e sobre as rochas do embasamento.



Fonte: (Modificado a partir de Assine et al., 2014 e Fabin et al., 2018, p. 2056).

Dentro da Bacia do Araripe a Formação Crato, juntamente com a Formação Ipubi, de idade Aptiano-Albiano, representa um interessante análogo em idade e em algumas características físicas as rochas que compõem o intervalo Pré-Sal localizado em bacias marginais do sudeste do Brasil. Essa unidade apresenta espessura entre 50 e 70 m e seus depósitos tiveram origem em um sistema lacustre e são compostos por camadas de margas, calcários laminados, calcários argilosos, siltitos calcíferos e folhelhos calcíferos (Fig. 2) (ASSINE, 1992; ASSINE et al., 2014; NEUMANN et al., 2003).

Figura 10- Imagem de satélite (Google Earth), mostrando a posição do local de levantamento dos dados de GPR (ponto vermelho), dentro da área da Mineração Três Irmãos, Nova Olinda, CE. Coordenadas do local UTM: 422996E / 9212592S.

Fonte: A autora (2023)

2. METODOLOGIA

O desenvolvimento da pesquisa foi constituído das seguintes etapas: 1) a escolha de uma exposição adequada com um pavimento limpo e uma das superfícies verticais limpa e bem preservada, onde fosse possível mapear em detalhe estruturas com alguma continuidade para dentro do volume de rochas (Fig. 11); 2) a marcação dos planos de levantamento na superfície do afloramento, o que permitiu repetir a passagem das antenas nos mesmos locais para aquisições sucessivas, e em seguida a aquisição dos dados com antenas diferentes em relação a frequência emitida, que foi realizada com a supervisão do Prof. Francisco Pinheiro, do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN); 3) o processamento dos dados foi realizado em parceria com colegas da UFRN, em especial o Prof. David de Castro do Departamento de Geologia, a partir da utilização do *software Reflexw*; 4) a interpretação e modelagem dos dados processados executou-se a partir do *software Opendtect*, no Departamento de Geologia da UFPE.

2.1 AQUISIÇÃO DE DADOS NO CAMPO

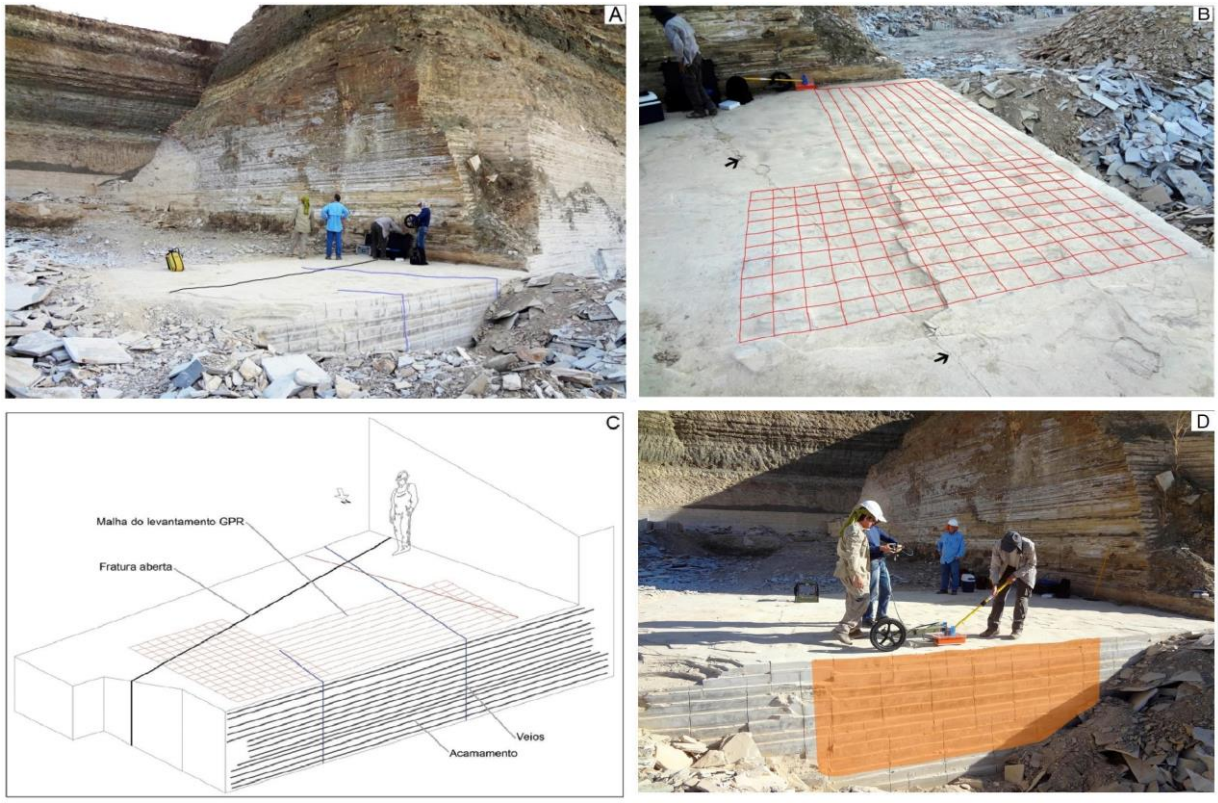
A exposição selecionada representa uma bancada de calcários laminados do nível C6 localizada dentro da área de extração de calcário da Mina Três Irmãos, região de Nova Olinda (coordenadas UTM: 422996E / 9212592S). Os pavimentos horizontal e vertical da bancada foram limpos de detritos e varridos para o estudo das heterogeneidades aparentes. Em seguida foram feitas marcações-guia para o deslocamento das antenas durante as fases de aquisição dos dados (Fig. 11A e 11B). A exposição selecionada possui cerca de 7,5 m de comprimento por 5,5 m de largura (área utilizada para o levantamento) (Fig. 11C). Na superfície horizontal existe uma fratura aberta (junta recente), e planos de fraturas preenchidas por calcita que se propagam pela superfície vertical (Fig. 11C). Desta forma, foi possível observar o plano mapeado na superfície vertical que continua dentro do maciço de rocha e que também foi seccionado pela superfície horizontal.

Um painel fotográfico foi realizado juntamente com uma descrição detalhada da superfície vertical para guiar a interpretação dos dados adquiridos com GPR no pavimento da bancada de calcários laminados (Fig. 11D e 12). Dessa forma, foi

possível observar na superfície vertical e verificar qual a representação delas nas imagens criadas pela passagem do sinal de GPR a partir do topo da bancada.

O instrumento utilizado para a aquisição dos dados foi um GPR do modelo SIR-3000, fabricado pela GSSI (*Geophysical Survey Systems Inc*). Foram empregadas duas antenas de 900 MHz e de 2,6 GHz, também fabricadas pela GSSI. Essas frequências foram escolhidas porque para rochas sedimentares elas permitem um range de aquisição efetiva de 0 a 1m, e 0 a 0,4m respectivamente (DE CASTRO et al., 2014). Como a bancada escolhida apresentava uma superfície vertical menor do que 2 m, optou-se por utilizar essas frequências, porque seriam suficientes para detectar feições dentro do volume de rochas escolhido para o estudo (Fig. 11A e 11B).

Figura 11- Levantamento de campo. a) visão geral da bancada, cuja superfície apresenta uma área aproximada de 7,5 por 5,5 m. As linhas azuis indicam a posição de veios de calcita, e a linha preta indica a posição de junta vertical. b) detalhe da malha (linhas vermelhas) utilizada para o levantamento das seções de GPR (setas pretas = junta). c) Bloco diagrama mostrando o posicionamento da malha de aquisição e das macro-estruturas observadas (linhas azuis - veio de calcita, linha preta - junta). d) vista da superfície vertical da bancada, onde foi realizado um mapeamento das heterogeneidades expostas. A posição do painel fotográfico frontal e da seção estratigráfica está marcada pelo polígono laranja (ver painel fotográfico na Fig. 13).



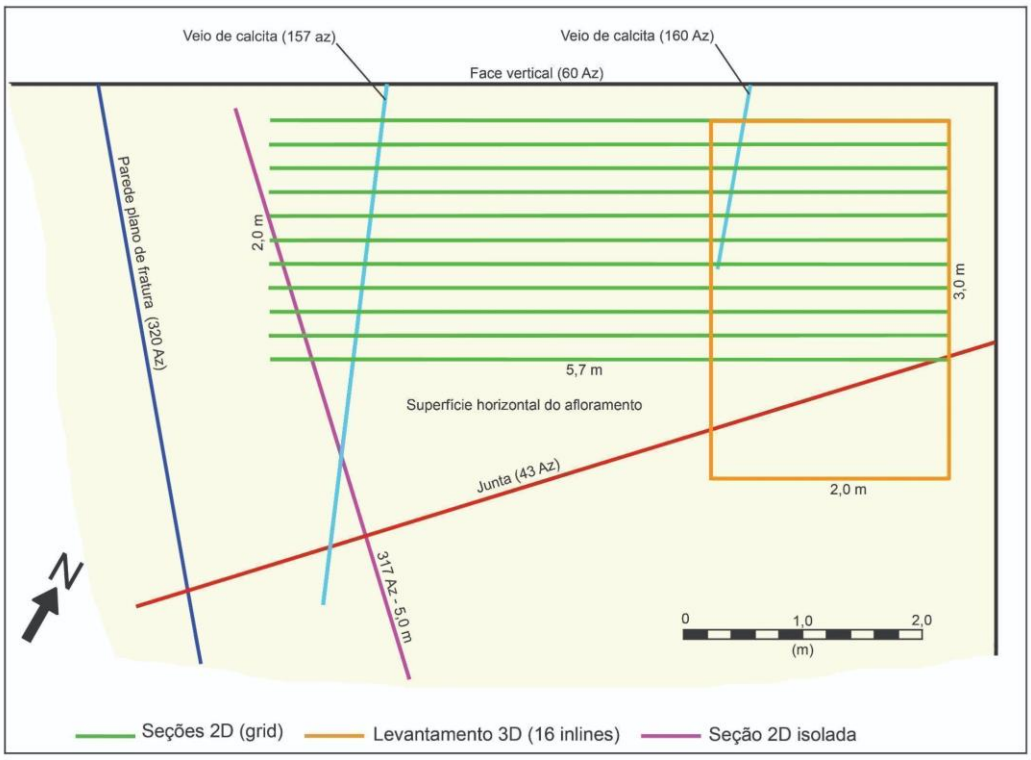
Fonte: A autora (2023)

O plano de levantamento das seções consistiu em quatro *surveys* compostos por seções 2D levantadas com antenas de 900 MHz e 2,6 GHz (Fig. 11), e com direção perpendicular à junta mapeada na superfície horizontal (direção da junta 42 Az). E ainda um survey 3D cujas 16 seções inline foram levantadas com a antena de 900 MHz (Fig. 11). A pesquisa adquiriu um total de 151 m de linhas GPR 2D, e 32 m de seções que compuseram o cubo de imagem 3D, com um espaçamento de 0,2 m entre as linhas. O espaçamento dos traços de GPR foi de 0,02 m, e cada traço contém 512 amostras distribuídas em um intervalo de tempo de 100 ns (DE CASTRO et al., 2014; CONTI et al., 2019). A aquisição dos dados com a antena de 900 MHz foi executada com o apoio de odômetro. As variações topográficas não foram consideradas porque a superfície horizontal do afloramento era razoavelmente plana (Fig. 11).

O processamento dos dados originais incluiu a edição dos traços, correção para zero *offset*, remoção de *background*, aplicação do filtro de *dewow* para reduzir a saturação do sinal, aplicação de filtro de ganho para equalizar o efeito de atenuação do sinal nas seções. Para a migração em profundidade de algumas seções foi utilizada uma velocidade de conversão de 0,1 m/ns. Esta é uma velocidade compatível com rochas calcárias (BAKER et al., 2007; LONGONI et al., 2012), e com o efeito de densidade dos laminitos que fica em torno de 2,69-2,70 gm/cm^3 (GURJÃO et al., 2013), e que as rochas estão secas (MOUNT; COMAS, 2014).

A Figura 12 mostra a disposição dos levantamentos executados no afloramento estudado, em relação a estruturas reconhecidas na superfície horizontal (pavimento da bancada). Esses incluíram 11 seções 2D que formam um grid com 5,7 m de comprimento, adquiridas com antenas de 900 MHz e 2,6 GHz. Também foi obtida uma seção 2D isolada com 5,0 m de comprimento que cruzou a junta de forma perpendicular tendo sua terminação NW passado pelo grid de seções 2D (Fig. 14). Na ponta NE da bancada foi executado um levantamento 3D com a antena de 900 MHz, e esse foi constituído de 16 seções *inline*.

Figura 12- Disposição dos levantamentos executados com GPR sobre o pavimento do afloramento escolhido para esta pesquisa. As linhas verdes indicam a localização das seções adquiridas com antena de 900 MHz e 2,6 GHz. A linha Lilás indica a seção 2D isolada que cruzou de forma perpendicular a junta vertical, e que foi adquirida com a antena de 900 MHz e 2,6 GHz. O retângulo laranja indica a localização do levantamento 3D que foi adquirido com antena de 900 MHz.

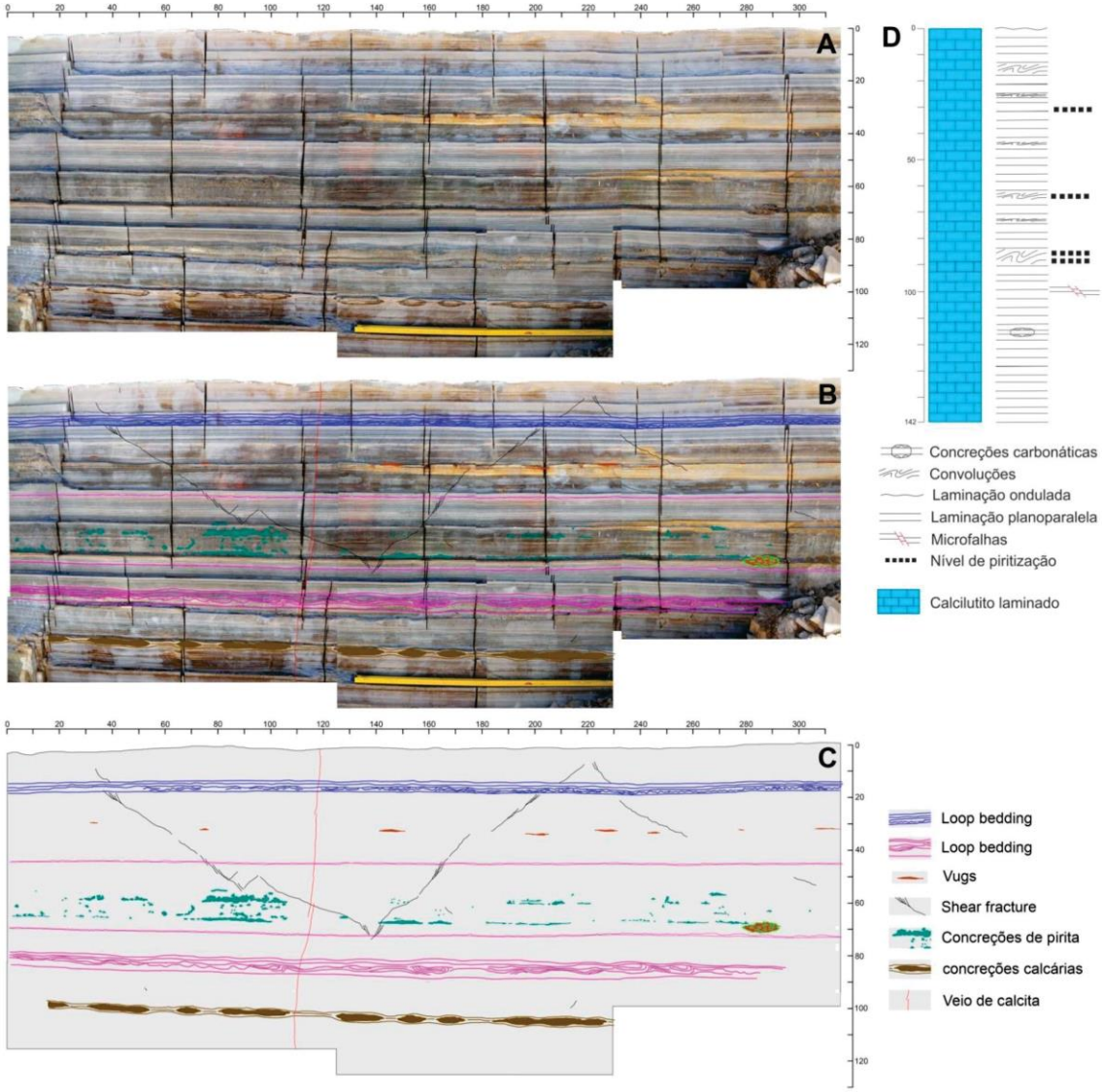


Fonte: A autora (2023).

Em relação ao mapeamento da superfície vertical foi possível identificar níveis portadores de *loop beddings*, veios verticais de calcita, níveis portadores de convoluções, horizontes com concentrações de pirita, níveis portadores de concreções calcárias e zonas de dissolução de calcita (Fig. 13). As estruturas de *loop bedding* e convoluções foram criadas por eventos de sismicidade, quando os estratos ainda apresentavam plasticidade e denotam a variação de saturação de água que tornava alguns intervalos de laminações menos coesos (ALENCAR et al., 2021). A instabilidade criada nestes horizontes produziu a ruptura dos estratos e deu origem às *shear fractures* observadas nos depósitos de laminitos da Formação Crato (MIRANDA et al., 2018; ALENCAR et al., 2021). Em termos de fluxo em meio poroso as *shear fractures* não apresentam potencial porque após a ruptura dos estratos estas evoluíram como planos de descontinuidade completamente cimentados. Alguns desses planos apresentam nas exposições zonas de dissolução ou reativação rúptil

que foram provocadas pelo efeito de exposição na telodiagênese (MIRANDA et al., 2018).

Figura 13- Detalhe do painel fotográfico da superfície frontal da bancada onde foi realizado o levantamento de dados de GPR. A) imagem sem interpretação. B) Imagem com a interpretação das estruturas e feições sobrepostas, C) desenho esquemático das feições diagenéticas e estruturas rúpteis, D), perfil estratigráfico de detalhe feito dentro da superfície frontal (escalas em cm).

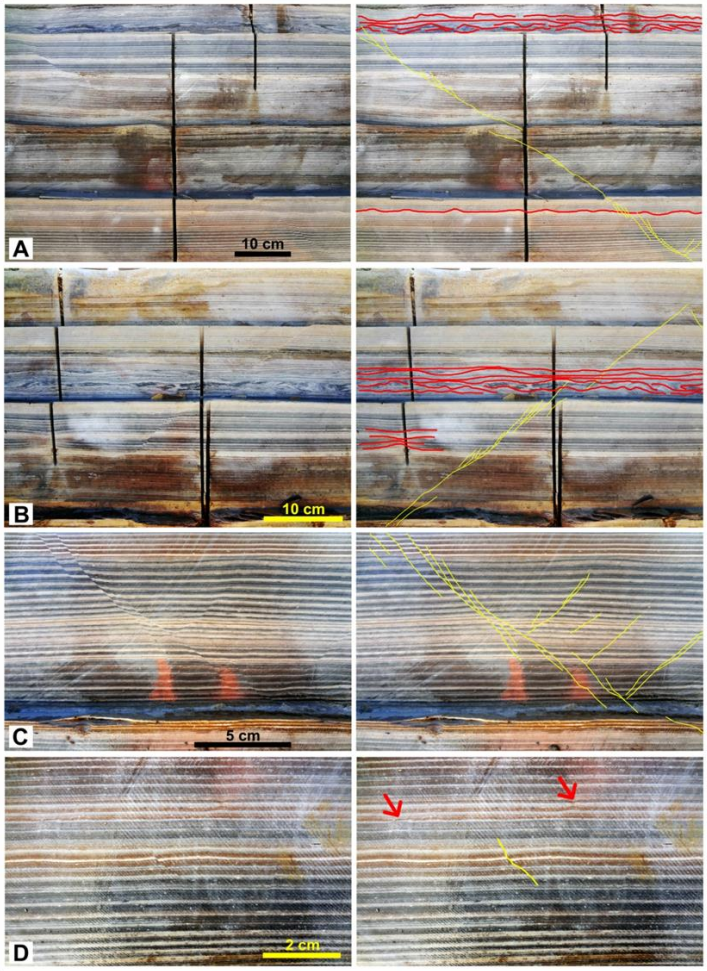


Fonte: A autora (2023).

As Figuras 14 e 15 mostram detalhes das heterogeneidades mapeadas na superfície vertical do afloramento estudado, que correspondem a níveis de laminações portadores de *loop beddings* (CALVO *et al*., 1998, RODRIGUEZ *et al*., 2000), convoluções (Fig. 13 e 14) (ALENCAR et al., 2021), *shear fractures* e microfalhas (Fig. 13 e 14). Um intervalo de laminações de aproximadamente 20 cm posicionado no centro do perfil possui abundante número de cristais de pirita (Fig. 13 e 15E). Na porção inferior existe um nível de concreções calcárias de origem diagenética

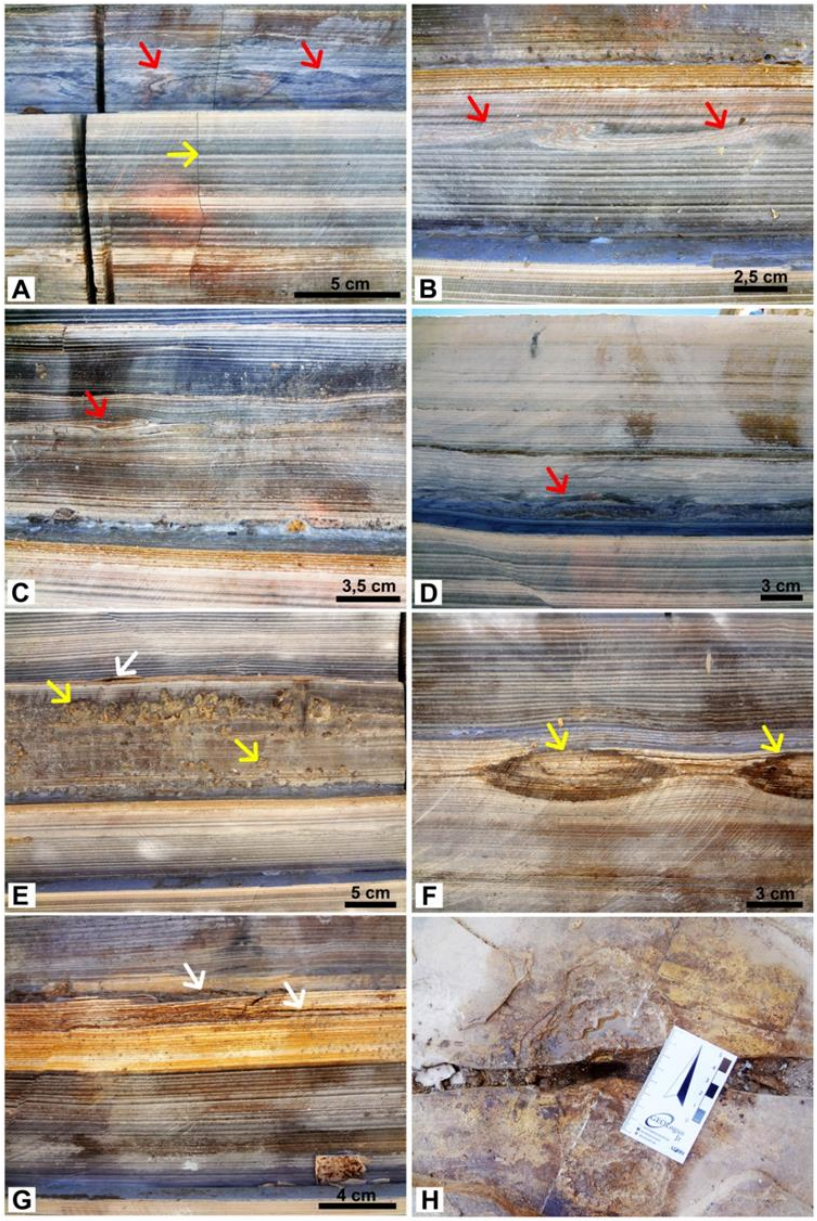
(RAMOS et al., 2020; ARAÚJO et al., 2020) cuja nucleação envolveu silicificação e cimentação com calcita em estágios precoces da diagênese (Fig. 13 e 15F). Foram identificados dois planos de shear fractures, que representam estruturas sin-sedimentares (MIRANDA *et al.*, 2018; ALENCAR et al., 2021) (Fig. 12 e 13). Também se caracterizou um veio vertical preenchido com calcita fibrosa (Fig. 12 e 13A). Um veio vertical exposto na face vertical e horizontal do afloramento não foi incluído no painel da face vertical (Fig. 11), e foi analisado na superfície horizontal do afloramento. Este também atravessa o plano da junta observada também no plano horizontal (Fig. 11B e 11C).

Figura 14- Exemplo de estruturas na face vertical do afloramento de calcários laminados. A) falha sin-sedimentar (*shear fracture*) (foto esquerda - figura sem interpretação, foto direita - foto com interpretação) (linhas amarelas - planos de falhas, linhas vermelhas - laminações com dobras e *loop bedding*), B) *Shear Fractures* - falhas sin-sedimentares (linhas amarelas), cortando um nível de laminações convolutas, C) Detalhe da deformação rúptil-dúctil produzida no sedimento inconsolidado, D) Ocorrência de uma microfalha afetando apenas algumas laminações (linha amarela).



Fonte: A autora (2023).

Figura 15- Estruturas presentes na face vertical da bancada. A) Veio vertical preenchido por calcita, B) Nível de Laminações convolutas da parte superior, C) Nível de laminações convolutas e do tipo *loop bedding* na porção intermediárias, D) Nível mais espesso de laminações convolutas, dobras e estruturas do tipo *loop bedding*, E) Nível contendo nódulos centimétricos a milimétricos de pirita, formando agregados com aspecto botrioidal, F) nível contendo concreções carbonáticas, G) Nível contendo vúgulas de dissolução no acamamento, H) Fratura vertical aberta, vista no topo da bancada, cortada por um veio vertical (ver localização no desenho esquemático da Figura 7).



Fonte: A autora (2023).

2.2 DADOS DE GPR MIGRADOS E PÓS PROCESSADOS

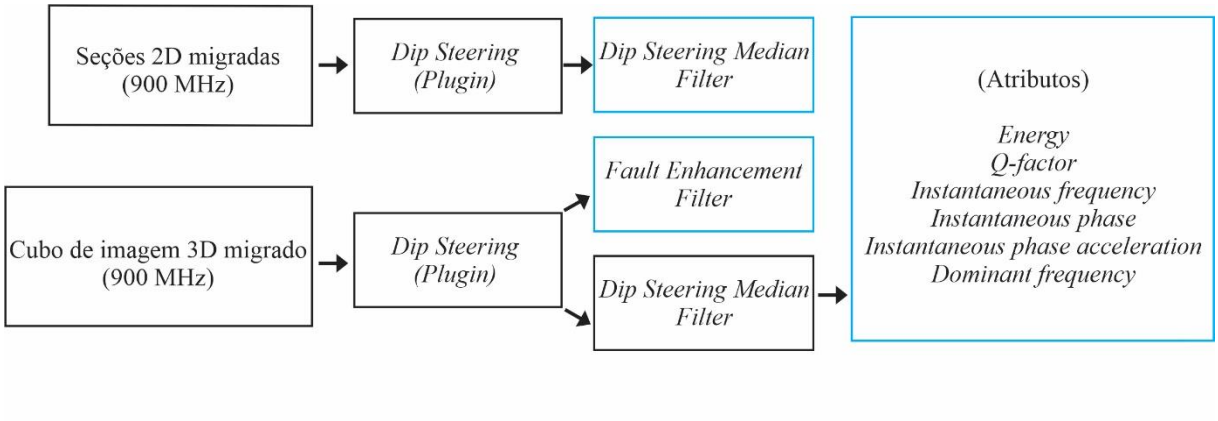
Atributos sísmicos representam propriedades mensuráveis dos dados obtidos por meio da execução de levantamentos de sísmica de reflexão (BARNES, 2001; TANER, 2001; HART et al., 2002; CHOPRA; MARFURT, 2006). Esses representam

qualquer propriedade que pode ser mensurada a partir dos traços sísmicos e reflexões registradas e permitem interpretar propriedades das rochas que afetam a propagação das ondas acústicas (litologia, porosidade, presença de fluídos, espessura de camadas, efeitos diagenéticos). Existem vários tipos de atributos: *prestack*, inversão, velocidade, horizonte, multicomponente, 4-D, e os tipos mais utilizados pela academia e pela indústria para o estudo de subsuperfície são os atributos derivados de dados convencionais empilhados (*stacked*). De fato, centenas de atributos foram criados desde o início de sua discussão na década de 1970 e incluem atributos que resultam da análise do traço sísmico complexo, intervalos estatísticos, correlações entre medições, análise da transformada de *Fourier*, análise tempo-frequência, análise da transformada de *wavelet*, componentes principais, entre outros (BARNES, 2001; HART et al., 2002). De fato, os atributos relacionados a análise da amplitude instantânea e a fase instantânea do traço sísmico apresentam várias aplicações em relação ao estudo de propriedades de rochas como a porosidade, faciologia, conteúdo de fluídos, continuidade e espessura de camadas a partir de suas propriedades (BARNES, 2001, 2007; TANER, 2001). Atributos relacionados a atenuação do sinal como energia e Q-*Factor* (*quality factor*) também são indicadores importantes do efeito da porosidade e presença de fluídos (CHOPRA; MARFURT, 2007). O atributo utilizado foi o *Absortion Q-Factor,* ou *Instantaneous Q-Factor*, que representa a razão entre a frequência instantânea e o dobro da largura de banda da frequência instantânea. O atributo de energia também aplicado representa um processamento pós-*stack* baseado no cálculo da soma das amplitudes ao quadrado dividido pelo número de amostras do dado dentro da janela de tempo/profundidade especificada pela operação. Esse fornece um indicativo da refletividade e é utilizado para ressaltar regiões porosas e saturadas por fluídos (OUMAROU et al., 2021).

A análise de atributos tem sido sistematicamente aplicada a dados de GPR porque permite de forma semelhante ao que se obtém com os dados de sísmica de reflexão definir propriedades como porosidade, aspectos litofaciológicos, efeito do conteúdo de fluídos, aspectos de fraturamento e carstificação. A análise de atributos tem sido utilizada de forma qualitativa e quantitativa no estudo de análogos de reservatórios de petróleo (KNOPH, 2009; MCMECHAN et al., 1997;), estudos arqueológicos (CONYERS, 2004; THAKUR; PRASHANT, 2016) e de engenharia (FERNANDES; PAIS, 2017; KRYSINSKI; SUDYKA, 2013; LOMBARDI et al., 2022). Para alcançar os objetivos propostos, além do processamento dos dados

mencionados brutos mencionados acima, os dados migrados (tempo e profundidade) passaram por outras etapas de pós-processamento. Com estas etapas objetivou-se melhorar a qualidade em termos de geometria dos refletores (*dip-steering*), e a extração de atributos para que fosse possível verificar de forma qualitativa a resposta das heterogeneidades ao sinal de GPR. O *plugin dip-steering* (DGB) permite criar um arquivo com os dados de *dip* e azimute de cada amostra dos dados sísmicos, e é utilizado para corrigir inconsistências relacionadas à fase dos refletores e a remoção de ruídos. Esse *plugin* é utilizado para melhorar a análise de atributos e de filtros ao longo de eventos estratigráficos.

Figura 16- Fluxograma de tratamento dos dados migrados em tempo e profundidade. O plugin dip-steering foi aplicado aos dados 2D e 3D. Em seguida foi aplicado o *Median Filter* as seções 2D para a remoção de ruídos. Ao cubo de dados 3D foi aplicado o *Median Filter*, e a partir desse dado foram aplicados os atributos de energia, *q-factor*, frequência instantânea, fase instantânea, aceleração da fase instantânea e frequência dominante. Os retângulos azuis indicam as versões finais dos volumes 2D e 3D usados na interpretação desta pesquisa.



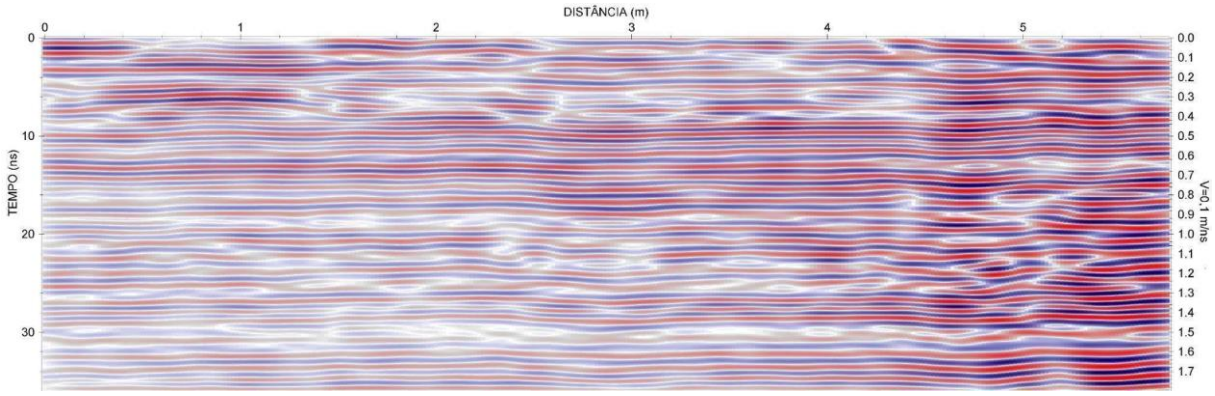
Fonte: A autora (2023).

3. RESULTADOS

A primeira etapa consistiu na conversão dos dados de tempo para profundidade. Conforme mencionado acima foi utilizada a velocidade de 1 m/ns. A partir da pré-análise dos dados migrados em tempo observou-se que as seções 2D obtidas com a antena de 2,6 GHz conseguiram produzir resultados coerentes até uma profundidade de cerca de 1,0 m. Entretanto, devido a sensibilidade da antena alguns artefatos produzidos por pequenas variações da superfície da bancada dificultaram a sua reconstrução. Além disso, devido à atenuação do sinal verificada na litologia em questão nestas seções não foi possível identificar as estruturas rúpteis (veios e *shear fractures*). Por esse motivo, optou-se por não incluir estas seções na análise deste estudo. Contudo, os resultados obtidos com sua aquisição têm proporcionado um teste importante em relação aos objetivos buscados pela pesquisa.

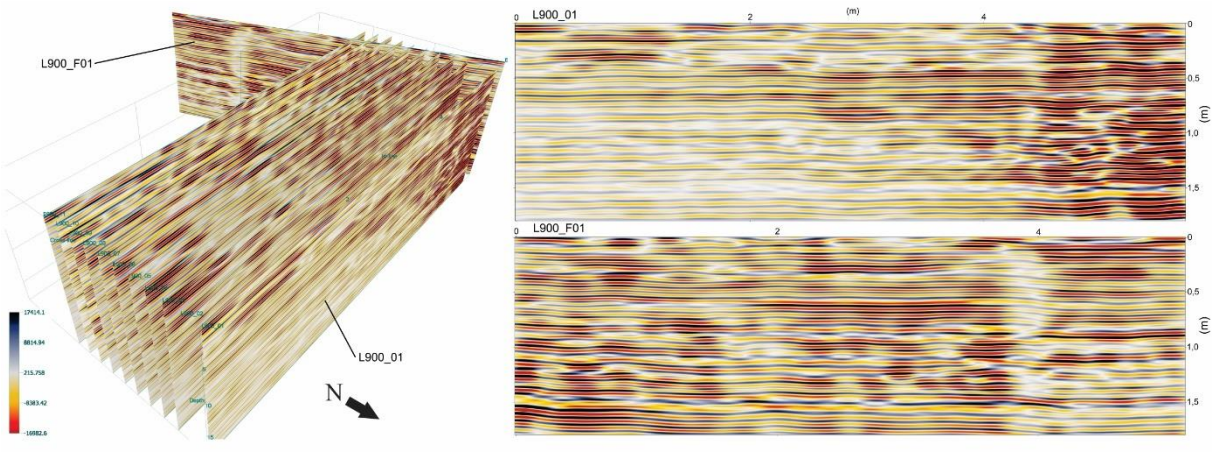
A Figura 17 mostra a seção 01, mais próxima da face vertical da bancada estudada, após o processamento e a migração para tempo e profundidade. A Figura 18 mostra as 11 seções 2D levantadas de forma paralela a face vertical do afloramento e a seção 2D que foi executada de forma perpendicular à junta (Fig. 12). A velocidade utilizada para a conversão em profundidade levou em conta as constantes dielétricas de rochas calcárias que variam entre 10.5 e 9.6 (MOUNT; COMAS, 2014).

Figura 17- Seção 2D 01 obtida a 40 cm da face vertical do afloramento (Fig. 12). Essa seção apresenta os valores de profundidades dos refletores em tempo (ns) e em profundidade (m), e demonstra o resultado dos dados processados do levantamento 2D. Estas seções apresentam 5,7 m de comprimento (Fig. 12).



Fonte: A autora (2023).

Figura 18- Visualização do grid de seções GPR 2D obtidos com a antena de 900 MHz (11 linhas de 5,7m), mais uma linha isolada de 5 m, que foi posicionada de forma perpendicular à junta visível no pavimento da bancada (ver Fig. 12). A seção 01, mais próxima da face vertical do afloramento, e a seção localizada de forma perpendicular à fratura que está no pavimento da bancada estão mostradas no detalhe.



Fonte: A autora (2023).

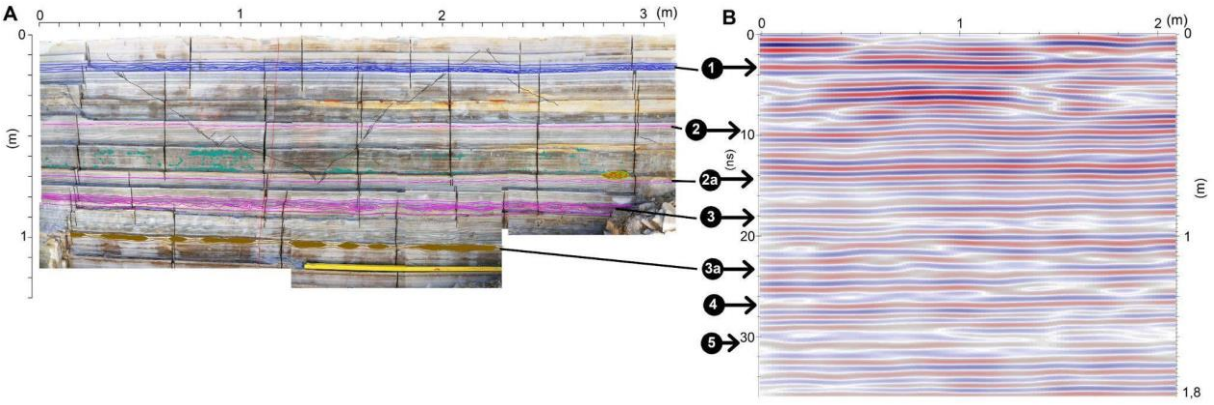
A Figura 19 mostra uma correlação entre o painel fotográfico obtido na face vertical do afloramento e a primeira seção 2D de GPR paralela ao painel. A seção foi posicionada a cerca de 40 cm da face vertical mapeada (Fig. 19). Essa correlação auxiliou a identificar as feições reconhecidas na face do afloramento e qual a sua representação nas imagens de GPR. Foram identificados cinco horizontes principais (1, 2, 3, 4, e 5) e dois horizontes secundários (2a e 3a) que estão associados a intervalos de laminações portadoras de convoluções e de concreções (Fig. 19).

Além da identificação dos intervalos portadores de laminações convolutas/*loop beddings* e concreções, não foi possível resolver a ocorrência dos veios verticais de calcita, e nem das *shear fractures* que apresentam *dip* subvertical. Alguns aspectos podem responder por esta dificuldade de imagear os veios: a resolução do método, uma vez que os veios apresentam abertura milimétrica (2 - 5 mm) (MIRANDA et al., 2018); o fato de que os veios são preenchidos por um material que apresenta similaridade mineralógica com a própria matriz da rocha que é um *mudstone* composto majoritariamente por calcita micrítica (NEUMANN et al., 2003). Neste caso ambos os materiais podem apresentar características similares em termos de permissividade dielétrica. Além disso, o fato do método se basear na emissão de um sinal vertical (*zero-offset*) implica em uma menor capacidade de interação com estruturas verticais ou subverticais, como no caso dos veios de calcita e *shear fractures*. No caso das *shear fractures*, existe ainda o aspecto de que sua formação sin-sedimentar não

permitiu a formação de um *gauge* ou preenchimento do plano de ruptura, e desta forma não ocorre contraste.

As fraturas afetadas por reativações recentes e juntas não apresentam preenchimento. Neste caso, observou-se que apesar de não ser possível imagear o plano da fratura, observou-se uma alteração dos refletores na zona próxima ao plano da fratura, como observado na parte direita da seção 900_F01 que cruzou a junta localizada no pavimento da bancada. Neste caso, observa-se uma zona de valores negativos, por causa da atenuação do sinal ao redor da junta (Fig. 18 e 22). Além disso, a deformação criada pelas *shear fractures* produziu uma alteração local no padrão horizontal do acamamento dos laminitos. Embora, seja necessário distinguir deformações da geometria criadas pela presença de estruturas rúpteis de modificações na geometria dos refletores criados pelo processamento dos dados.

Figura 19- Correlação do painel fotográfico da face vertical do afloramento. A), e de parte da seção 2D 01 B). Algumas feições identificadas no painel apresentaram resposta detectável na seção. (ver Figura 17). Os horizontes que comportam heterogeneidades foram numerados de 1 a 5, e serão descritos adiante. Os horizontes 2a e 3a formam a base de dois intervalos compostos com refletores plano-paralelos, e ondulados, respectivamente.



Fonte: A autora (2023).

Para a discussão da interpretação das seções 2D foram utilizadas as linhas 01, 03, 06 09 e 11 (Fig. 20, 21 e 22), do grid de seções levantados com a antena de 900MHz, além da linha 2D isolada L900_F01 (Fig. 18).

Nas seções 01 e 03 foram posicionados os veios e as falhas sin-deposicionais (*shear fractures*), conforme a projeção de sua localização na superfície do painel frontal da bancada (Fig. 13 e 19). Nas demais seções não foi possível definir claramente a presença dos veios ou *shear fractures*, com base na interpretação. A ocorrência de mudanças na geometria dos refletores observados em alguns trechos

das seções pode representar um aspecto do processamento dos dados e não implica necessariamente a presença de estruturas rúpteis. Uma vez que a frequência dos refletores observados na seção não coincide com a espessura das lâminas sedimentares (Fig. 20, 21 e 22) verifica-se que a mudança da intensidade na refletividade dos refletores, o aspecto ondulado ou plano-paralelo também são provocadas por mudanças nas propriedades físicas das laminações.

Na Figura 20 também foram posicionados os horizontes que marcam a posição de heterogeneidades diagenéticas como os intervalos de laminações portadores de laminações convolutas, *loop beddings* e de concreções calcárias. Os refletores associados às zonas convolutas mostram alta refletividade e uma excelente continuidade ao longo da área que foi investigada (Fig. 20, 21 e 22).

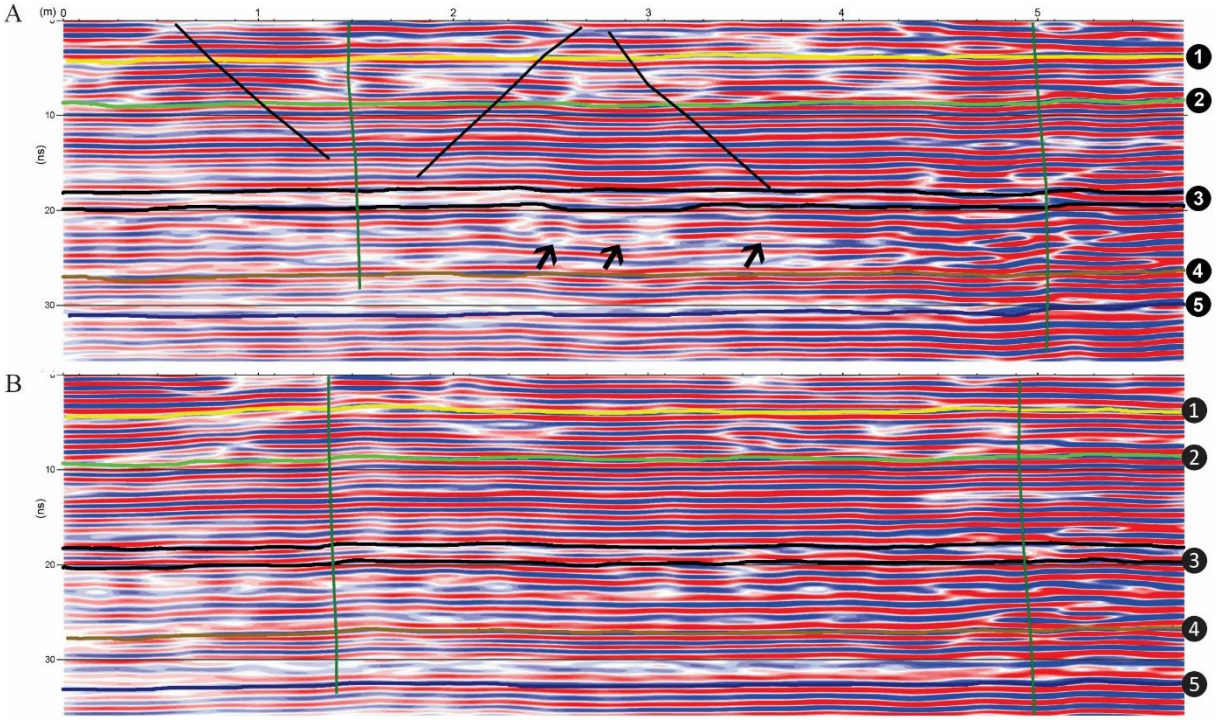
O intervalo portador de concreções mostra além da alta continuidade dos refletores a formação de espessamento local dos refletores que formam feições elípticas (setas pretas) (Fig. 20).

Foram utilizados 7 horizontes para assinalar os cinco intervalos interpretados como zonas de heterogeneidades contínuas planares. O primeiro intervalo é limitado entre o topo da seção e um refletor localizado a aproximadamente 0,4 ns de profundidade, marcado com o horizonte amarelo (Fig. 20). Esse horizonte coincide com um intervalo de laminações convolutas e do tipo *loop bedding* (Fig. 13 e 19). O segundo intervalo é limitado no topo pelo horizonte amarelo e na base por um outro refletor contínuo (horizonte verde) (Fig. 20), que também coincide com outro nível de laminações convolutas (Fig. 13 e 19).

Estes dois intervalos mostram refletores subparalelos à ondulados, e moderadamente contínuos com amplitude forte a moderada. O terceiro intervalo é marcado no topo pelo horizonte verde e na base por um refletor contínuo (primeiro horizonte preto). Esse intervalo não apresenta níveis de laminações convolutas, nem concreções, apresenta menor abundância de estruturas do tipo *loop bedding*, isoladas (Fig. 20) e apresenta refletores paralelos a subparalelos, alta amplitude e boa continuidade. O quarto intervalo é limitado no topo pelo primeiro horizonte preto e na base pelo segundo horizonte preto. Esse intervalo corresponde ao nível mais espesso de laminações convolutas e dobradas (Fig. 13 e 19). Esse intervalo delgado é caracterizado por refletores pouco contínuos, subparalelos e amplitudes baixas a moderadas (Fig. 20). O quinto intervalo é limitado no topo pelo 2° horizonte preto, e na base pelo horizonte marrom. Este intervalo é caracterizado pela ocorrência de

concreções calcárias na sua porção mediana (Fig. 9F). Embora o imageamento das concreções não seja tão evidente, é possível observar ondulações nos refletores, que criam pequenas formas lenticulares (setas pretas), que foram interpretadas como a assinatura das concreções (Fig. 20). O sexto intervalo é limitado no topo por um refletor contínuo, horizonte marrom, e na base por um horizonte azul escuro, marcado sobre outro refletor com alta amplitude e boa continuidade. Este intervalo possui na sua porção superior refletores paralelos e contínuos com moderada amplitude. A base desse intervalo é formada por refletores com baixa amplitude descontínuos. O sétimo intervalo é limitado no topo pelo refletor azul escuro, e na base pelo limite definido para a aquisição das sessões, em tempo. Este intervalo é caracterizado por refletores contínuos, paralelos e de forte amplitude. Para os intervalos 6 e 7 não foi possível estabelecer uma correlação com níveis de heterogeneidades observados no painel vertical do afloramento. O painel fotográfico, e a seção colunar, não contemplou essa profundidade do perfil, que estava encoberta (Fig. 13 e 19). Entretanto, com base no que foi descrito e nos padrões observados, estes dois intervalos estão relacionados a outros níveis portadores de laminações convolutas e concreções.

Figura 20- Temos as linhas pretas finas indicando falhas, a linha fina verde escura indicando veios. As setas pretas indicam a presença de concreções calcárias. Os horizontes interpretados como 1, 2 e 3 indicam intervalos de laminações portadora de laminações convolutas, dobras e estruturas de escape de fluídos. A) Interpretação das seções de GPR 01 e B) Interpretação das seções de GPR 03.

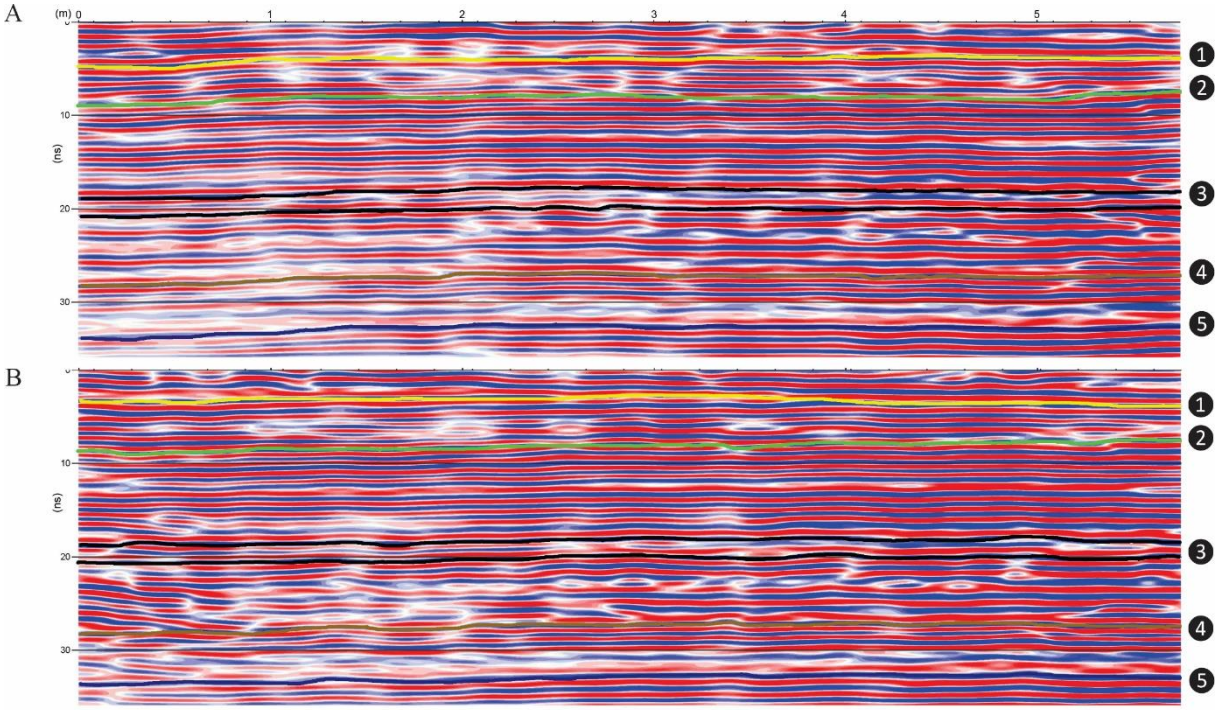


Fonte: A autora (2023).

Observou-se que o nível onde ocorreu intensa formação de pirita, formando agregados de cristais (Fig. 13 e 19) não causou, aparentemente, nenhum tipo de contraste no levantamento de GPR. Conforme observado na correlação do painel fotográfico, o intervalo com maior ocorrência de pirita foi o intervalo 3, limitado pelos horizontes verde e 1° horizonte preto (Fig. 20, 21 e 22). Este intervalo apresenta refletores paralelos e contínuos, com poucos pontos de atenuação (Fig. 20, 21 e 22).

As seções 06 e 09 (Fig. 21) mostram a continuidade dos padrões observados nas seções anteriormente descritas. A Figura 22 mostra a seção 11 e nesta também aparecem os intervalos identificados nas demais seções evidenciando a boa continuidade das heterogeneidades.

Figura 21- A) Interpretação das seções de GPR 06 e em B) Interpretação das seções de GPR 09. Os intervalos portadores de laminações convolutas e concreções também foram identificados nestas seções.

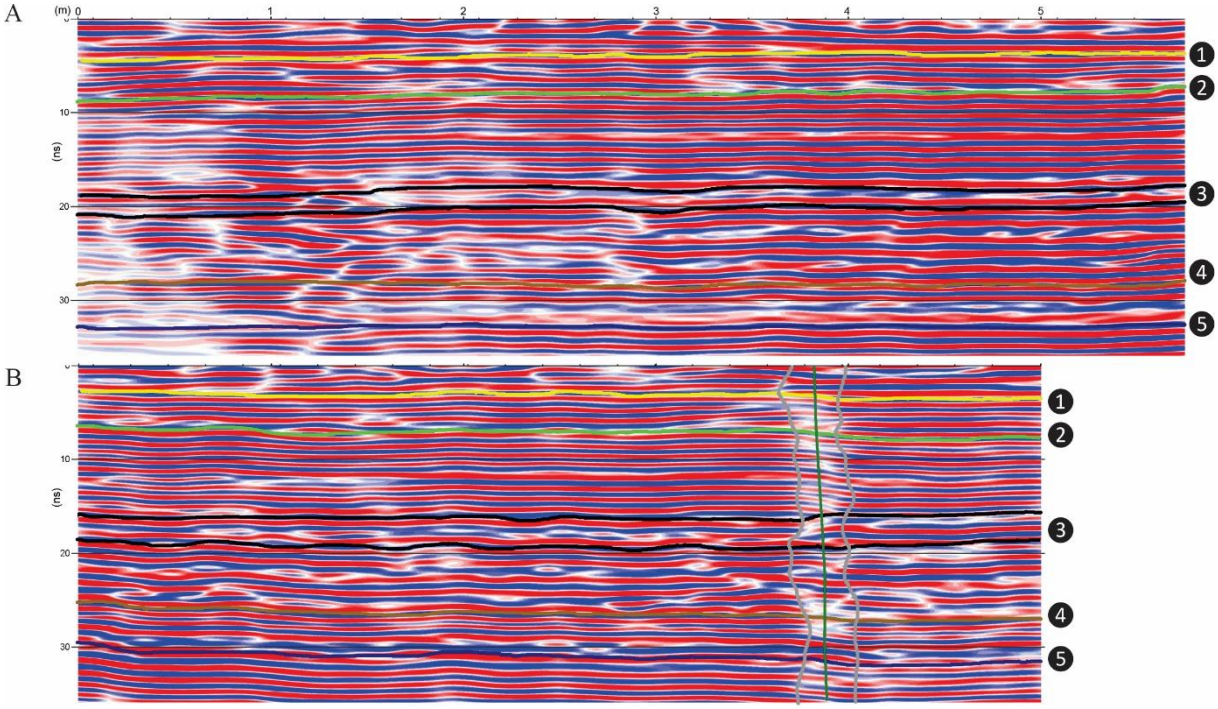


Fonte: A autora (2023).

A Figura 22 também mostra a seção 2D executada sobre a junta observada no pavimento horizontal do afloramento. A seção mostra a continuidade dos refletores para além da zona onde foram levantadas as 11 seções 2D paralelas à face vertical do afloramento. Nesta seção também não foi possível observar os contornos da junta

vertical. Entretanto, no local onde está localizada a junta observa-se uma deformação dos refletores e uma zona de atenuação que possivelmente evidenciam a região de alteração das rochas em torno do plano de ruptura da junta. Esta zona de atenuação de amplitudes possivelmente representa uma zona de alteração dos estratos provocado pela exposição e meteorização dos depósitos (carstificação), associada a abertura da fratura. Essa zona também pode ser reconhecida pela deformação dos refletores na mesma região onde as amplitudes são atenuadas (Fig. 22).

Figura 22- Em A temos a Interpretação das seções de GPR 11, e em B a seção de 5m de comprimento, adquirida sobre a junta observada na superfície horizontal do afloramento. Na interpretação as linhas de cor cinza demarcam a zona vertical de atenuação criada ao redor do plano de abertura da junta, embora não tenha sido possível observar a sua geometria. Também observa-se uma deformação aparente dos refletores dentro desta zona de atenuação. A linha verde marca a posição hipotética da junta que apresenta na superfície do afloramento uma abertura aproximada de 05 cm.

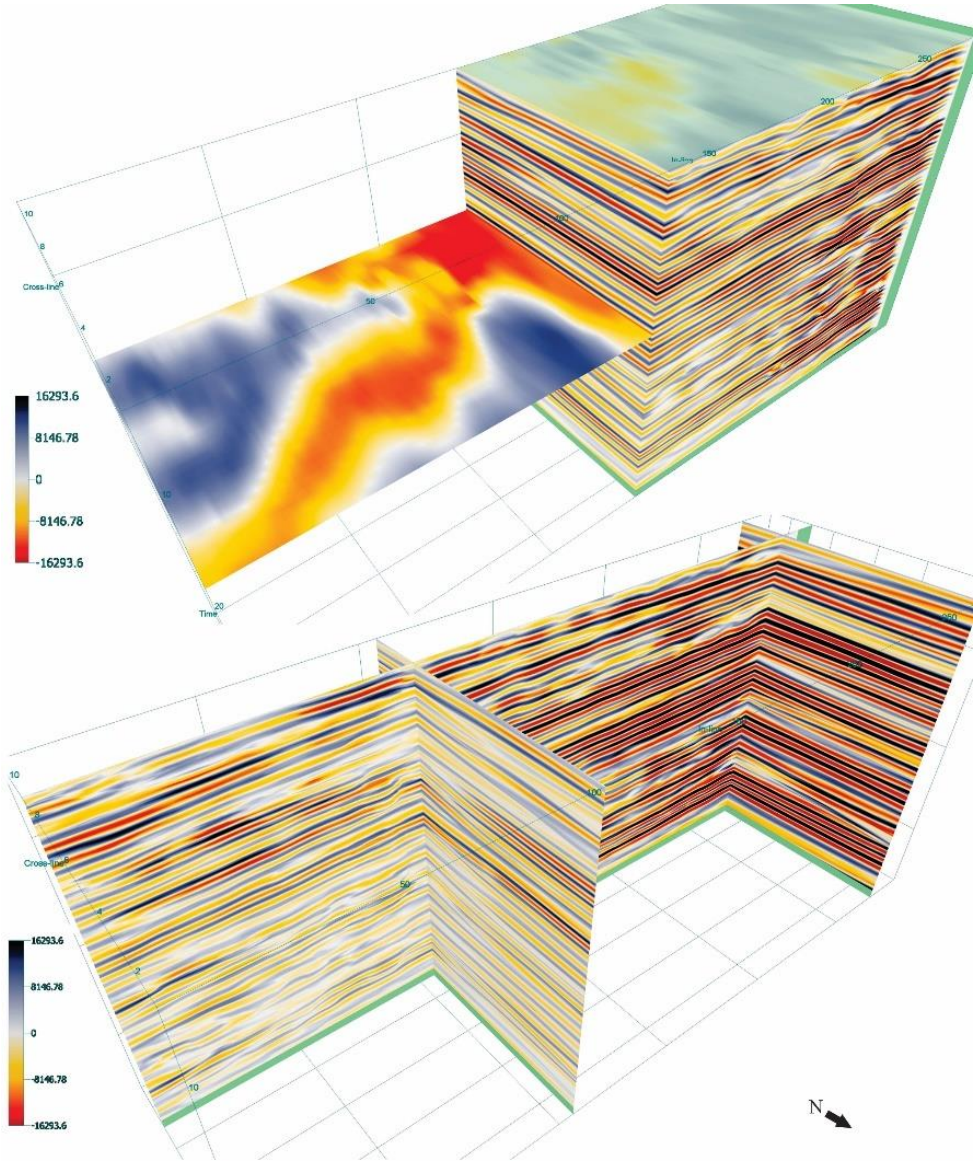


Fonte: A autora (2023).

O volume de imagem 3D resultante da aquisição com antena de 900 MHz está mostrado na Figura 23. Este dado recobriu uma região de 2,0 x 2,0 m da área imageada com as seções 2D (Fig. 12), e foi composto pela interpolação de 16 seções com comprimento de 2,0 m espaçadas a 20 cm, totalizando uma área coberta de 6 m^2 (291 *inlines* x 11 *crosslines*). O processamento multitraço no volume 3D permitiu obter resultados melhores a partir da aplicação do *plugin dip-steering*, dos filtros (*Median Filter e Fault Enhancement Filter*) e dos atributos. Entretanto, devido ao espaçamento

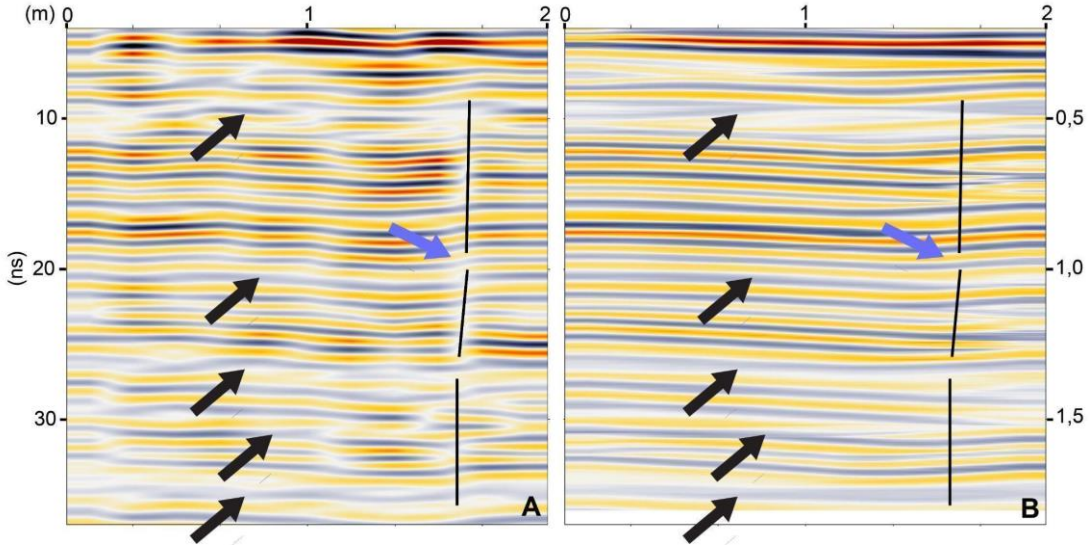
das amostras que constituem os dados, o resultado da aplicação do filtro apresenta problemas em relação aos locais onde a mudança nas atitudes dos refletores é mais acentuada em relação ao padrão de acamamento praticamente horizontal (Fig. 24). A Figura 24 mostra a *inline* 95 do volume 3D e é possível observar que a aplicação do filtro DMSF melhorou a geometria dos estratos de laminitos plano paralelos, e que nos horizontes onde ocorrem laminações convolutas, ondulações e concreções os refletores nestes intervalos aparece truncados e ondulados.

Figura 23- Aspecto do volume de imagem 3D produzido com a antena de 900 MHz, mostrando parte do volume e um slice (superior), e seções inline e crosline (em tempo).



Fonte: A autora (2023).

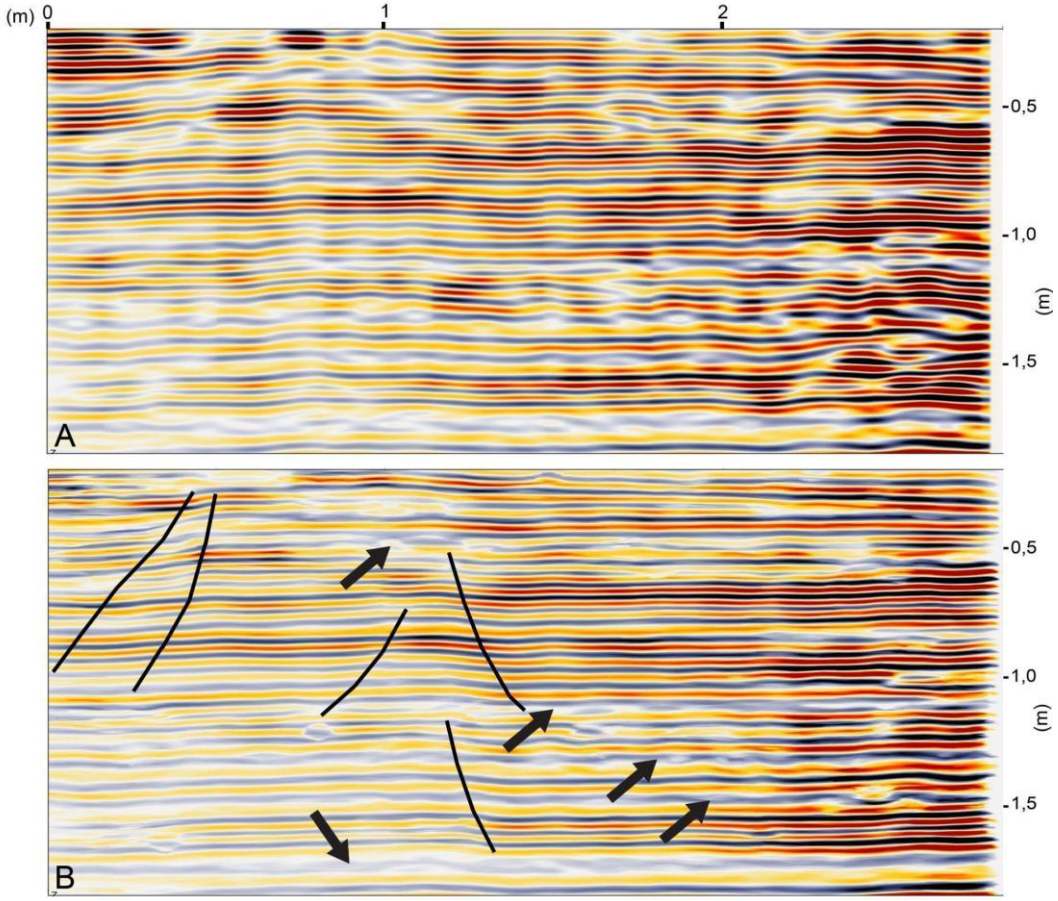
Figura 24- Inline 95 do volume 3D. A) imagem do volume migrado sem filtros, onde as setas pretas indicam laminações convolutas, ondulações e concreções. E a azul um pocal onde é estimada a presença de um veio. B) Imagem pós-processada com o filtro de *dip-steering.* que melhorou a geometria dos estratos de laminitos plano paralelos, e que as setas pretas indicam os refletores nestes intervalos, que aparecem truncados e ondulados onde ocorrem laminações convolutas, ondulações e concreções. Já a seta azul, mostra o truncamento formado na região onde estima-se ter um veio.



Fonte: A autora (2023).

A Figura 25 mostra a *crosline* 3 do volume 3D e nesta é possível observar que após a melhoria na geometria dos refletores é possível observar algumas zonas indicativas da presença de *shear fractures* com padrão sub-vertical. Também que os intervalos com laminações convolutas e concreções apresentam truncamentos, mas o efeito é bem melhor do que o que foi observado nas *inlines*. Como o filtro opera a partir das informações de *dip-azimut* das amostras nas quatro direções, na direção das *croslines* existe mais informação para corrigir os refletores, e possivelmente o efeito é melhor.

Figura 25- Crosline 3 com e sem pós-processamento DSMF. A) imagem do volume migrado sem filtros, B) Imagem pós-processada com o filtro de *dip-steering.* O filtro melhorou a geometria dos estratos laminitos e foi possível observar descontinuidades e deformações nos estratos que podem ser *shear fractures* (linhas pretas). Os intervalos portadores de convoluções estão indicados com setas pretas.



Fonte: A autora (2023).

A análise do cubo 3D permitiu interpretar e modelar de forma mais clara os intervalos associados a refletores com boa continuidade que separam intervalos com reflexões internas características (radar fácies). Em especial foram delineados horizontes que marcam intervalos portadores de laminações convolutas e dobras, assim como concreções calcárias (Fig. 26). Os intervalos entre os horizontes 2a – 2b, 3 – 3a, e 3b - 4, coincidem com intervalos marcados pela ocorrência de laminações convolutas e concreções calcárias (Fig. 26).

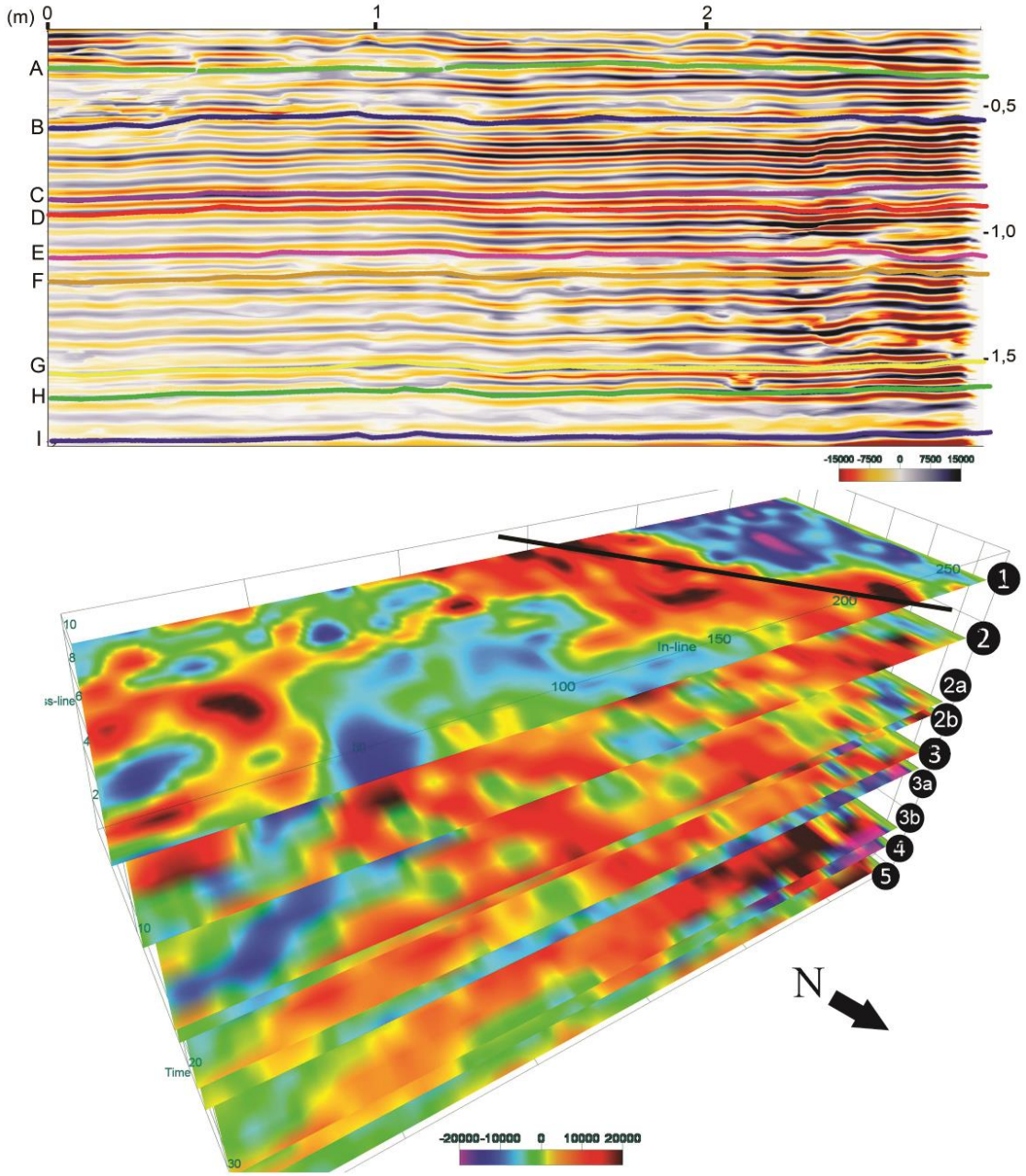
Os horizontes interpretados na Figura 26 mostra que estes exibem boa continuidade lateral, e que o sinal de amplitude indica uma maior ocorrência de amplitudes altas na porção direita da *crosline* 01 (Fig. 26). Certamente o contraste maior de amplitude nas camadas está relacionado a variação de algum parâmetro de condutividade/permissividade elétrica das rochas. Dada a informação de que os

laminitos apresentam baixo conteúdo de argilominerais, e o fato de as zonas de intensa formação de pirita não apresentarem contraste expressivo, o contraste se deve à presença de umidade, ou ao aumento de porosidade nos laminitos. A Figura 26 também mostra a posição da junta mapeada na superfície do afloramento que passa por uma das extremidades do volume 3D. É possível perceber no *slice* do horizonte A, que esta região mostra um alinhamento de amplitudes de alto valor demarcadas pela geometria do plano vertical da junta.

Os atributos extraídos e analisados a partir do volume 3D original foram: energia, que ressalta o efeito de amplitudes elevadas, e permite a detecção de feições contrastantes (LI et al., 2016); fator de absorção (*Q-factor*) (LI et al., 2016; CLAIRMONT et al., 2021), que permite indicar a presença de fluídos, e a absorção de energia relativa em camadas e feições locais; frequência instantânea, que ressalta a média dos espectros de amplitude, e permite definir o contato de camadas e espessura de camadas com propriedades similares (MATHENEY; NOWACK, 1995). Também pode identificar zonas fraturadas, que respondem como zonas de baixa frequência; fase instantânea, que opera com o componente de fase da onda, e representa uma boa ferramenta para definição de continuidade de camadas; aceleração de fase instantânea, que ressalta a variação de propriedades entre camadas, e pode ser utilizado como um indicador de propriedades elásticas das camadas; frequência dominante, que permite definir os componentes dominantes do espectro de frequências e pode auxiliar na definição de camadas com propriedades diferentes, bem como a continuidade lateral das camadas (Fig. 16, 17 e 18) (WHITE, 1991; BARNES, 1993, 2007; MEYER et al., 2001).

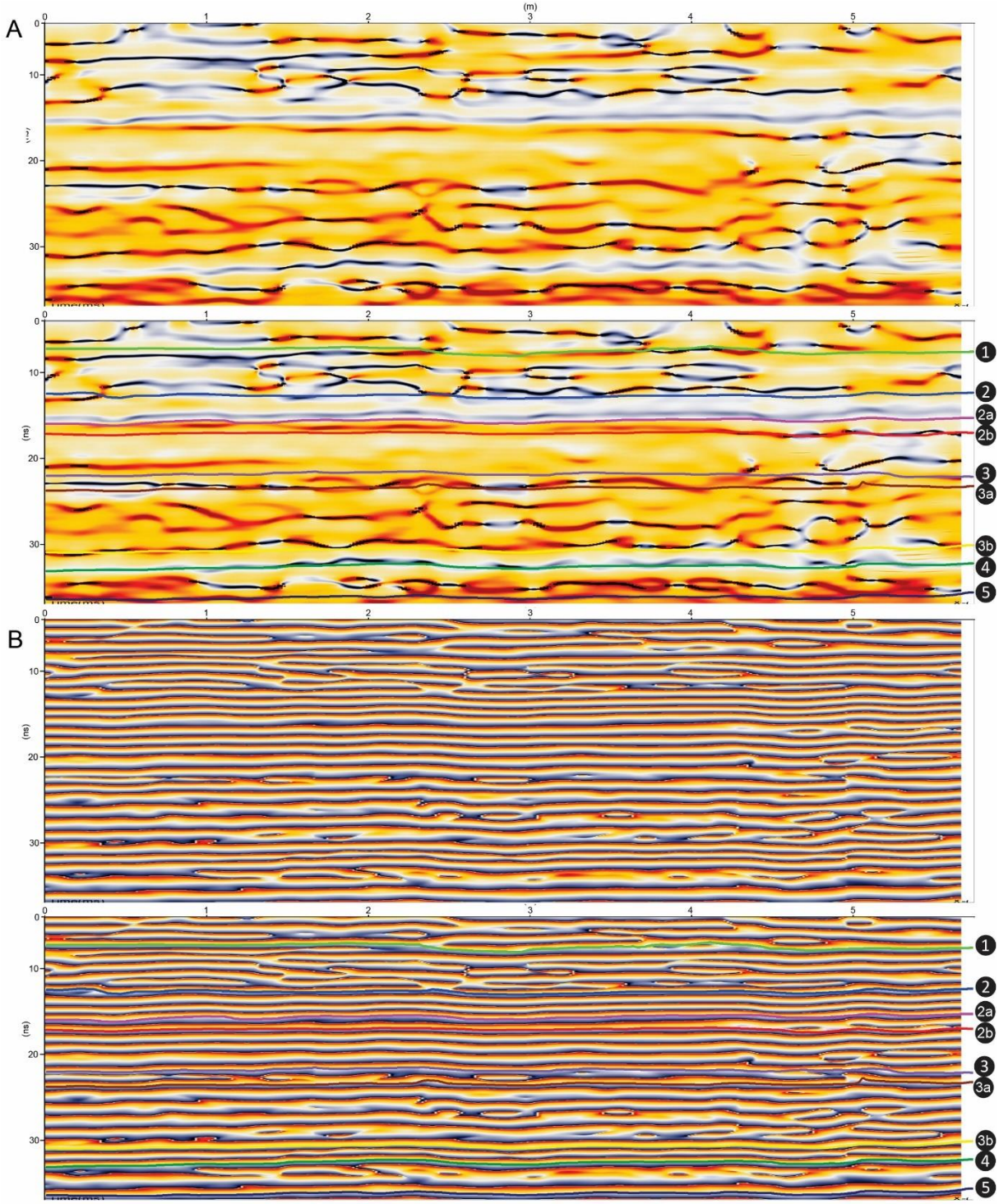
O atributo de fase instantânea mostrou a alta continuidade das camadas em intervalos de maior espessura, e intervalos que apresentam descontinuidade das propriedades devido a ocorrência de heterogeneidades. O atributo de fase instantânea revelou que o nível entre os horizontes 2b - 3, que contém abundância de pirita, apresenta homogeneidade e baixos valores de frequência (Fig. 27). Os intervalos entre os horizontes 2 – 2a e 3b - 4 mostram valores de frequência elevados e geometrias lenticulares (Fig. 27). A análise de propriedades mecânicas revelou que os níveis portadores de laminações convolutas e concreções calcárias apresenta maior resistência mecânica porque estes passaram por uma cimentação precoce envolvendo sílica microcristalina (ARAÚJO et al., 2020; RAMOS et al., 2020).

Figura 26- Interpretação de horizontes que apresentam alta continuidade e que delimitam intervalos com laminações convolutas e concreções (crossline 01 - DSMF). Abaixo são mostrados *slices* posicionados na profundidade dos intervalos identificados (amplitude do volume migrado). Os intervalos definidos entre os horizontes 2a-2b, 3-3a e 3b-4 delimitam intervalos com laminações convolutas, dobras, *loop beddings* e concreções calcárias. A linha preta marca a posição do trecho da junta que foi imageada pelo levantamento 3D.



Fonte: A autora (2023)

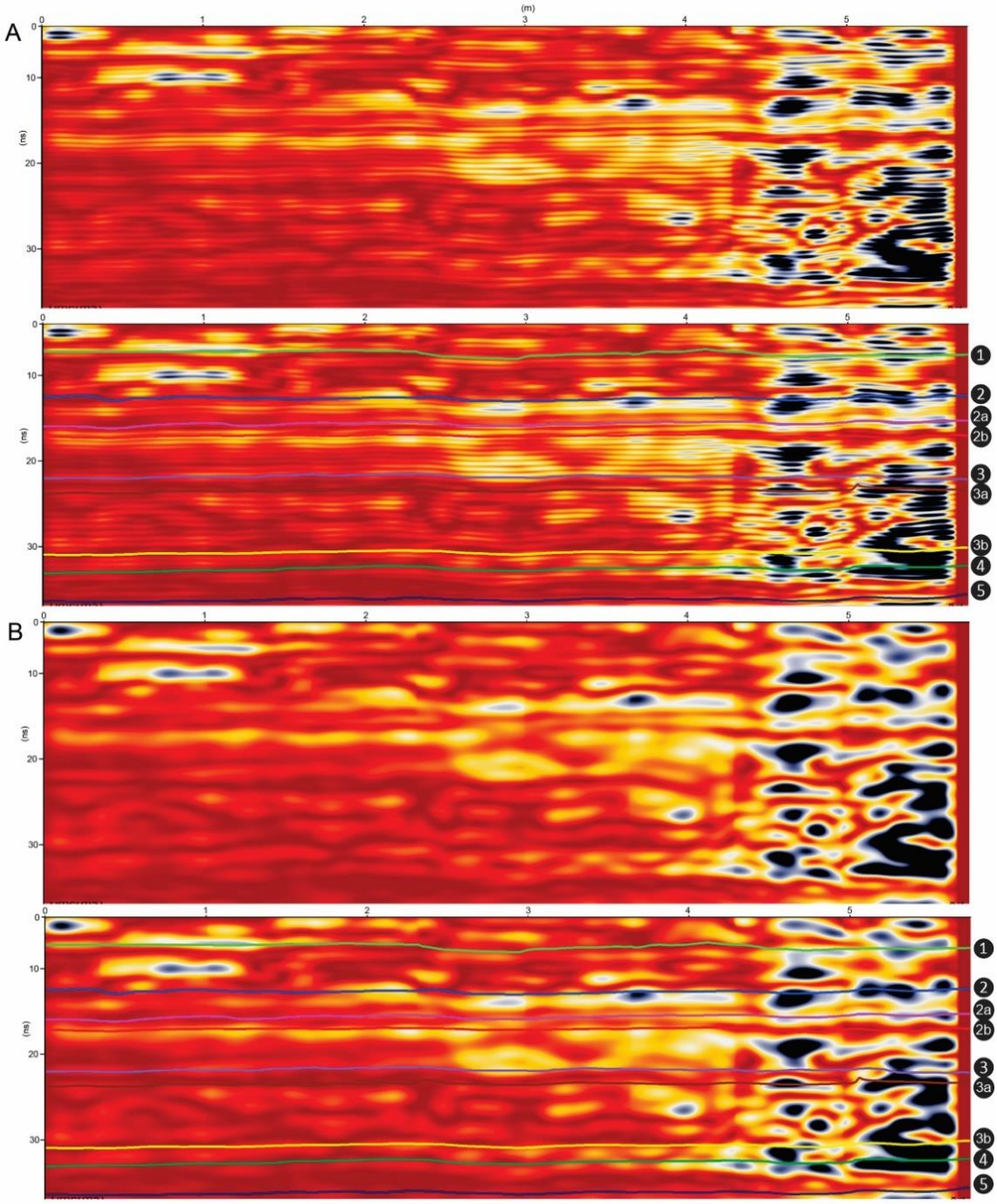
Figura 27- Atributos do volume 3D, extraídos do volume migrado (crossline 01). A) frequência instantânea, seção sem e com horizontes interpretados; B) fase instantânea, seção sem e com horizontes interpretados.



Fonte: A autora (2023).

O atributo de energia (*Q-factor*), ressaltou a ocorrência de zonas de forte contraste das propriedades dielétricas dos materiais, o que permitiu ressaltar a ocorrência de amplitudes anômalas na porção SE do cubo de dados por onde passa a junta (Fig. 28A). Isto pode indicar que apesar da boa continuidade das camadas, a distribuição de propriedades físicas apresenta zonas bem diferenciadas. O intervalo entre os horizontes 2b-3 apresenta valores médios a baixos para o contraste de energia. O atributo de absorção de energia (*Q-factor*), também mostrou zonas de alto contraste, em relação a absorção do sinal, na porção SE do volume 3D (Fig. 28B). Considerando as possíveis causas de atenuação do sinal eletromagnético, é possível inferir que esta região apresenta porosidade, e esta porosidade pode conter inclusive alguma umidade devido a infiltração de água meteórica em fraturas e zonas de dissolução

Figura 28- Atributos do volume 3D, mostrados na crossline 01. A) Atributo de energia, seção limpa e seção com horizontes interpretados; B) Atributo de absorção local de energia, Q-*factor*, seção limpa e seção com horizontes interpretados.



Fonte: A autora (2023).

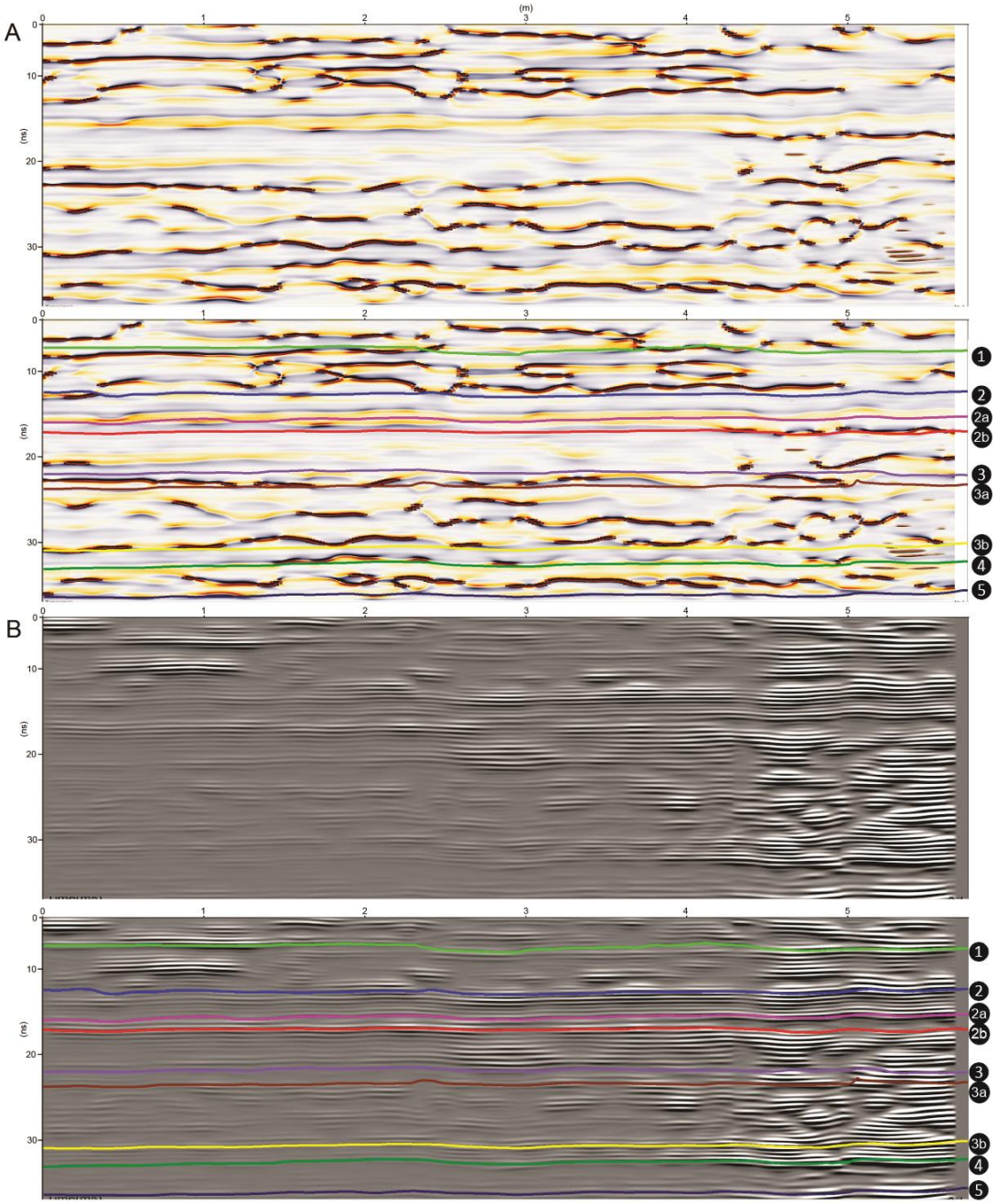
O atributo de aceleração instantânea revelou que os intervalos 2a - 2b, 3 - 3a e 3b - 4, portadores de lâminas convolutas, dobras e concreções calcárias, apresentam valores elevados, o que indica que estas apresentam propriedades elásticas diferentes das camadas adjacentes. Entretanto, este atributo mostrou que o intervalo portador de pirita, 2b - 3, também apresenta valores elevados (Fig. 29A). O

atributo de *Pseudo-relief* permitiu ressaltar as zonas de amplitudes anômalas, no lado SE do volume 3D (Fig. 29B).

A modelagem tridimensional dos atributos permitiu verificar a relação destes com a detecção de zonas que aparentam possuir propriedades físicas diferentes, bem como a configuração geral das propriedades físicas e geométricas dos depósitos. A Figura 30A mostra o atributo de fase instantânea a partir do qual foram destacadas as zonas de alto valor associadas ao contraste gerado pelas camadas. É possível notar que a configuração geral dos conjuntos de lâminas é plano-paralela e possui ótima continuidade lateral. Isto mostra que existe uma ciclicidade marcante entre intervalos com propriedades diferentes, e a modelagem do atributo permitiu mostrar a forte continuidade dos intervalos de laminações e que absorção do sinal varia revelando o contraste de sua constituição. Como mostrado na Figura 27, alguns intervalos apresentam maior continuidade e outros exibem geometrias lenticulares, ou descontínuas, ocasionadas pela ocorrência de níveis com concreções e camadas convolutas (setas amarelas).

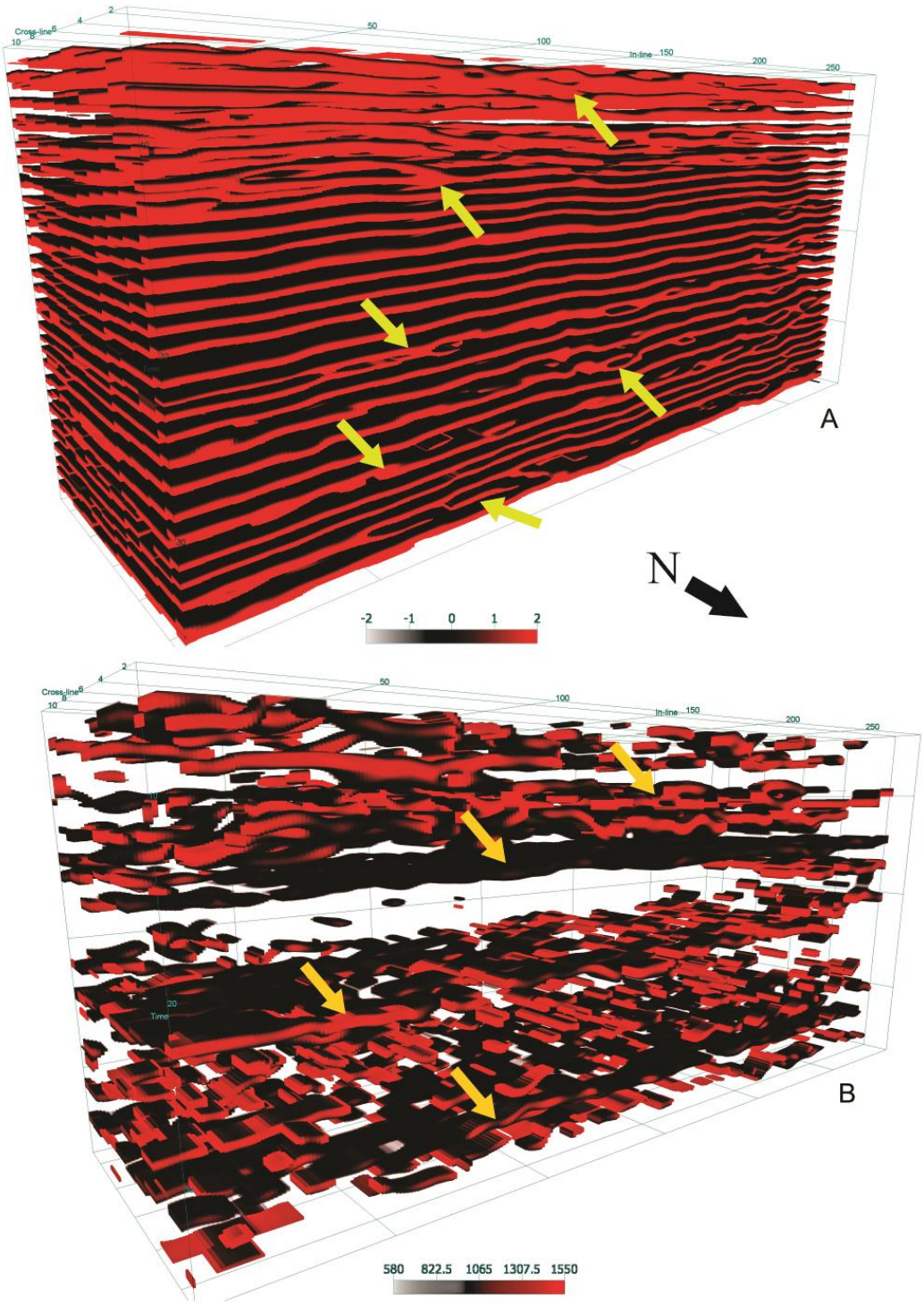
A análise da modelagem do atributo de frequência dominante possibilitou a definição de camadas cuja continuidade está relacionada com a espessura, como os intervalos formados por zonas de laminações convolutas que apresentam espessura maior do que os conjuntos de laminações que não apresentam o efeito de silicificação (ARAÚJO et al., 2020; RAMOS et al., 2020) (Fig. 30B). É possível que as regiões destacadas representam intervalos com maior densidade e rigidez mecânica, devido a cimentação precoce e isso resultou em um *tuning* das frequências nesses intervalos (Fig. 30B).

Figura 29- Atributos do volume 3D, mostrados na crossline 01. A) aceleração da fase instantânea, seção com e sem horizontes interpretados; B) atributo de *pseudo-relief,* seção com e sem os horizontes interpretados.



Fonte: A autora (2023).

Figura 30- A) Modelagem de destaque para os valores altos obtidos com o atributo de fase instantânea, que permitem ressaltar a continuidade das camadas, formadas por conjuntos de lâminas que compõem o laminito. B) Modelagem do atributo de frequência dominante com destaque para as zonas com maiores valores do espectro de frequência. A modelagem sugere a ocorrência de camadas com maior impacto no espectro de frequência, o que pode estar relacionado a características físicas das rochas como a densidade. As setas em amarelo, destacam a presença de heterogeneidades nas camadas.

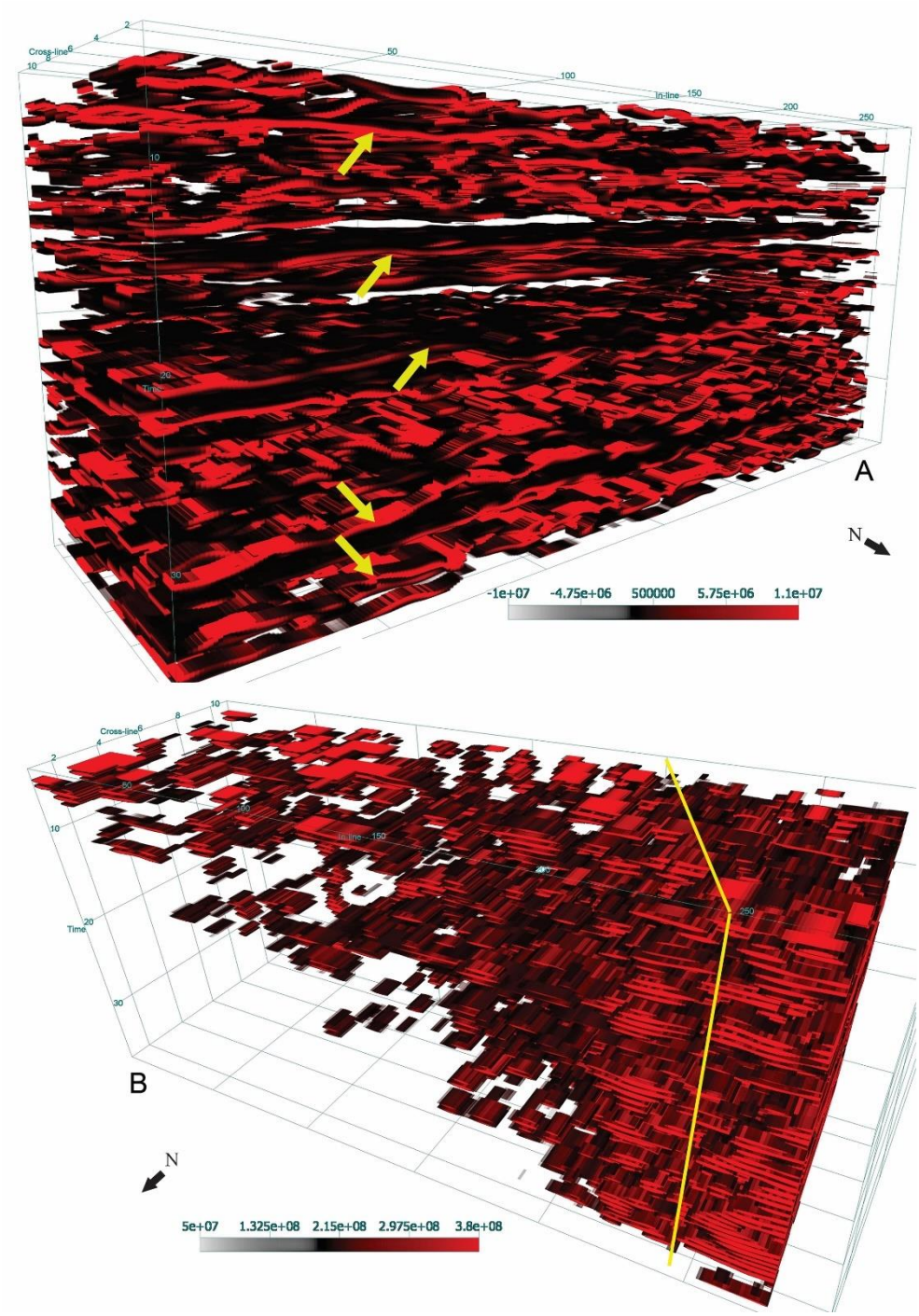


Fonte: A autora (2023).

A Figura 31A mostra a modelagem do atributo de aceleração da fase instantânea. Este atributo é obtido a partir da análise do comportamento da fase (ressalta variações fortes na frequência), e por isso não está relacionado com a amplitude do sinal. Este é importante para detectar mudanças físicas nas camadas, e é utilizado para indicar variação de propriedades elásticas, quando aplicado a dados sísmicos. Assim como observado com o atributo de frequência dominante, o atributo de aceleração da fase instantânea, permitiu destacar camadas com altos valores de variação, ou mudanças fortes na frequência (Fig. 31A). E conforme mencionado anteriormente, esta variação coincide com camadas identificadas como portadoras de lâminas convolutas, concreções calcárias e dobras.

A modelagem do atributo de energia permitiu o delineamento de outras feições dentro do volume 3D (Fig. 31B). O atributo de energia possibilitou ressaltar e definir a ocorrência de feições relacionadas a eventos de alta amplitude, e maior atenuação do sinal, criados por variações abruptas nas propriedades das camadas (variação de propriedades elétricas, no caso do dado estudado). A análise revelou áreas de altas amplitudes na região SE do volume de dados. Estas áreas apresentam corpos com geometrias achatadas de pouca continuidade. Estes corpos ocorrem de forma mais isolada ou clusterizada formando interligações. A maior intensidade de sua ocorrência está exatamente nas proximidades da junta vertical que passa pelo afloramento na região SE do volume 3D (linha amarela na Figura 31B). Os corpos isolados ocorrem com o distanciamento do plano da junta. Estas feições foram interpretadas como zonas de dissolução nos planos de laminação devido a percolação de fluidos meteóricos através da junta (Fig. 31B).

Figura 31- A) Modelagem de aceleração de fase instantânea que permitiu destacar a continuidade de intervalos portadores de laminações convolutas e concreções e que também pode ser segmentado devido aos valores mais elevados da relação de fase/frequência. Os intervalos destacados apresentam interações mais expressivas de frequências, possivelmente mais densas, e com menor porosidade. B) Modelagem do atributo de energia, destaca áreas isoladas ou clusterizadas com maior contraste de amplitudes e absorção do sinal. Isto revelou a ocorrência de zonas descontínuas, de geometria achatada, e que ocorrem com maior abundância na porção SE do volume 3D. A linha amarela indica a projeção da junta que passa pelo afloramento nesta região. As setas em amarelo, destacam a presença de heterogeneidades nas camadas.

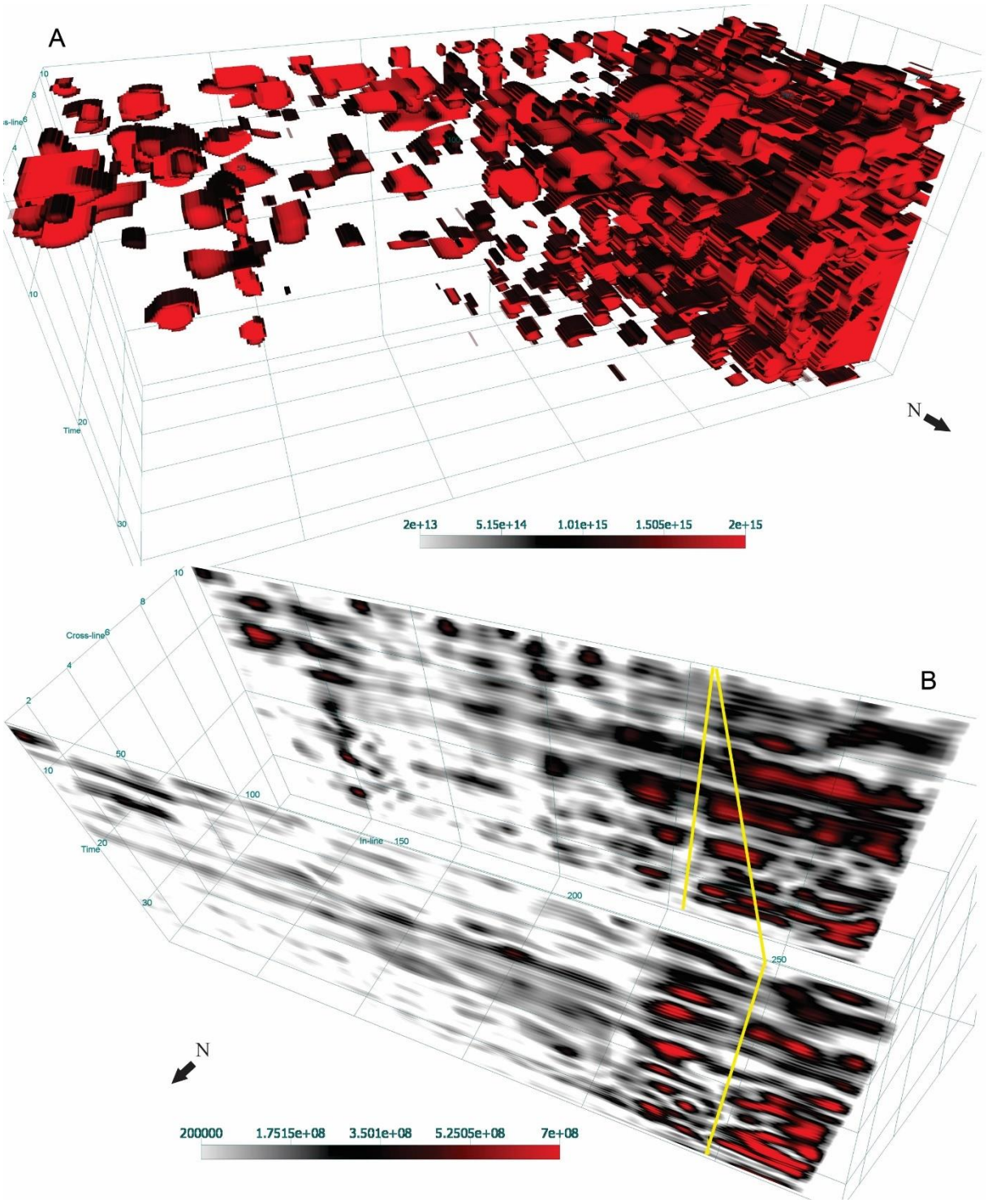


Fonte: A autora (2023).

A modelagem do atributo de absorção Q-*factor* (*instataneous quality factor*), foi utilizada para investigar propriedades físicas das rochas, e permitiu definir zonas com redução da propagação do sinal por efeito de atenuação, que pode ocorrer por absorção, ou espalhamento, devido a variação de porosidade (Fig. 32A). O estudo desse atributo obtido a partir de dados sísmicos de reflexão mostram que esse apresenta forte contraste positivo com o aumento da porosidade e da saturação por fluídos, assim como com o aumento da pressão e da velocidade. Esse é um atributo que possui forte correlação com a porosidade, permeabilidade e a presença de fraturas. Esse pode ser utilizado para detectar zonas fraturadas, e zonas que apresentam maior resistência mecânica. LUO et al (2017) utilizaram com sucesso este atributo para a detecção e imageamento de cavernas em rochas calcárias a partir de dados sísmicos de reflexão. O resultado obtido mostra zonas com altos valores de atenuação formando regiões isoladas e descontínuas (Fig. 32A), e essas mostram correlação com as zonas identificadas pelo atributo de energia (Fig. 31B). Este aspecto é importante pois as zonas de alto contraste de propriedades, identificadas no atributo de energia, representam zonas de atenuação do sinal propagado. Embora não seja possível definir de forma direta a correlação destas variações com as propriedades físicas e elétricas das rochas, é possível sugerir que estas zonas representam zonas mais porosas, e com menor resistência mecânica. Essas zonas não mostram correlação direta com os intervalos destacados pelos atributos de frequência dominante e aceleração da fase instantânea (Fig. 30B e 31A). O que demonstra que os atributos permitiram definir características físicas diferentes das rochas com base na interação do sinal (amplitude, frequência da energia propagada).

A Figura 32b mostra duas seções *crossline* renderizadas com o atributo de energia, e é possível ver a concentração de zonas de alto contraste do sinal na porção SE do volume de imagem. A linha amarela nesta imagem mostra a região do plano da junta vertical que passa por esta área. Observa-se que as anomalias de amplitude de reflexão mostradas pelo atributo de energia se posicionam dos lados do plano da junta, indicando que estas são zonas afetadas por dissolução dos planos de laminação devido a percolação de água meteórica pelo plano da junta (Fig. 32b). Embora não tenha sido possível delinear o plano da junta perfeitamente, é possível observar variações bruscas dos refletores que indicam a presença de uma zona vertical estreita bem marcada.

Figura 32- Modelagem do atributo de fator Q instantâneo (IQF), que permitiu ressaltar as zonas caracterizadas por altos valores de atenuação do sinal propagado. As zonas definidas apresentam possuem dimensões e apresentam-se descontínuas. Estas zonas apresentam maior abundância na região E-NE do cubo de dados. As geometrias ressaltadas também mostram forte correlação com as regiões ressaltadas pelo atributo de energia. A marcação em amarelo, destaca onde está localizada a fratura que corta a bancada.

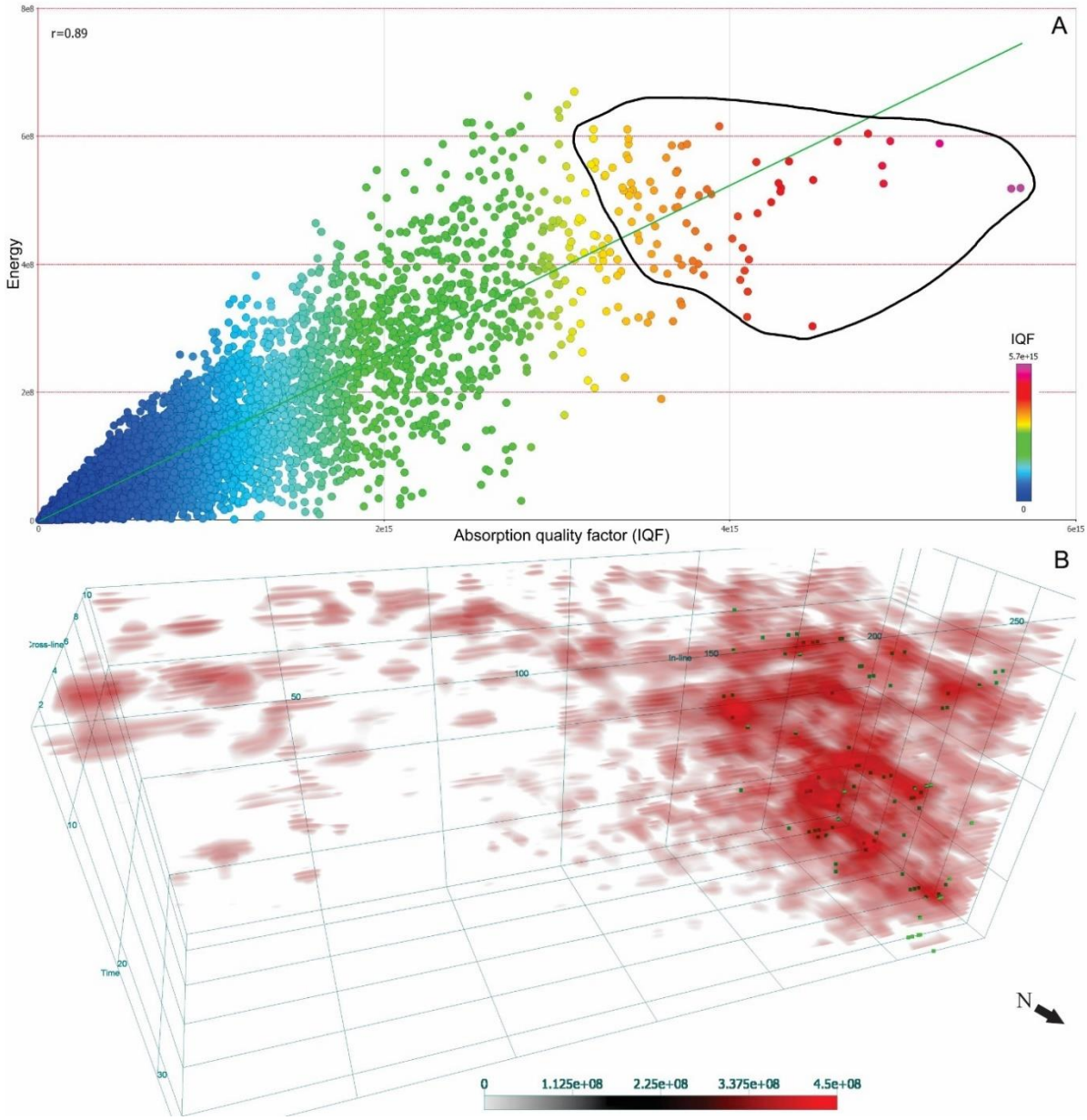


Fonte: A autora (2023).

A correlação das áreas delineadas por altos valores de atenuação (IQF), e altos valores de amplitude (Energia), foi feita por meio de ferramenta de *crossplot* de amostras dos dois cubos de atributos (Fig. 33a). A correlação mostrou que existem amostras que apresentam altos valores de amplitude de reflexão e altos valores associados com a atenuação do sinal de IQF (Fig. 33A). Possivelmente as amostras que apresentam baixos valores para os dois atributos estão relacionadas com laminitos que apresentam maior densidade devido ao processo de cimentação precoce, maior resistência mecânica e maior conteúdo de sílica e pirita (ARAÚJO et al., 2020; RAMOS, et al., 2020), que apresentam uma coloração cinza nos afloramentos de calcários laminados. Os laminitos de coloração amarela apresentam menor conteúdo de sílica e menor densidade, e são mais suscetíveis a processos de dissolução e carstificação.

O gráfico de *crossplot* da Figura 33A apresenta 10.000 amostras coletadas de forma aleatória no volume 3D. As amostras do dado que apresentaram maiores valores dos atributos de energia e IQF foram selecionadas (polígono preto no gráfico da figura 33a) e foram plotadas sobre o volume 3D que exibe o atributo de energia modelado para mostras as zonas de altos valores de amplitude (Fig. 33B). É possível que os pontos indicados, localizados na região de maior concentração das áreas com altas amplitudes e maior atenuação (IQF) indiquem pontos com maior porosidade criada pelo processo de dissolução da rocha e carstificação. Sugere-se aqui que estes locais indicam zonas com possível aumento da porosidade e formação de pequenas cavidades devido à dissolução ao longo de planos da laminação, conforme observado em amostras e nos afloramentos de laminitos.

Figura 33- A) Gráfico de crossplot entre os atributos de energia e de Fator-Q (IQF). Algumas amostras se destacam porque apresentam altos valores para os atributos de energia e IQF (polígono preto). B) Atributo de energia exibido com transparência mostrando as zonas de alta amplitude das refletividades. Os pontos marcados por pequenas esferas amarelas indicam a posição das amostras selecionadas no gráfico mostrado em A. Estes pontos possivelmente indicam zonas com formação de cavidades de dissolução nos laminitos.



Fonte: A autora (2023).

4. DISCUSSÃO

Foi realizada uma análise de dados de GPR incluindo seções 2D e um volume de imagem 3D migrados em tempo e em profundidade. O estudo foi apoiado pelo reconhecimento de feições geológicas mapeadas em uma superfície vertical paralela ao local de aquisição dos dados. O estudo das seções 2D foi principalmente baseado na interpretação de da geometria e aspectos de fácies das reflexões nas migradas. De forma geral, a análise das seções 2D adquiridas com a antena de 900 MHz se mostrou pouco eficaz para detectar e imagear a ocorrência das estruturas rúpteis de pequeno porte - falhas seladas (*shear fractures*), fraturas preenchidas (veios de calcita e gipsita) (MIRANDA et al., 2018). O fato das estruturas serem em sua maioria verticais, apresentarem pequena abertura, dimensões inferiores ao limite de resolução da antena utilizada, e de serem preenchidas por material de propriedades elétricas e físicas similares ao da matriz certamente influenciaram a dificuldade de detecção e imageamento destas estruturas.

No entanto, em relação à junta vertical, com abertura centimétrica, presente no afloramento, foi possível detectar uma zona de atenuação do sinal associada a alteração causada pela exposição e meteorização dos estratos ao longo da mesma. O fato desta estrutura permanecer aberta preenchida por ar e umidade, além de poucos detritos, criou um contraste importante em termos de propagação do sinal. A atenuação observada é um efeito característico produzido pelo imageamento de cavidades não preenchidas em subsuperfície (ANCHUELA et al., 2009; CERU et al., 2018). Entretanto, o trabalho de pós-processamento das seções 2D com os filtros *dip-steering median filter* e *fault enhancement filter* permitiram melhorar a geometria dos refletores, reduzindo o impacto das laminações onduladas e convolutas e das heterogeneidades como concreções (Fig. 24 e 25). Estas seções filtradas permitiram a interpretação de zonas com deformação da laminação, cuja geometria permitir sugerir que são *shear fractures*, as quais apresentam terminações a planos subverticais, de baixo ângulo e rotacionais (MIRANDA et al., 2018; ALENCAR et al., 2021).

O estudo do volume de imagem 3D permitiu a interpretação de padrões de fácies, mas também a análise de atributos o que possibilitou a interpretação de propriedades físicas como a continuidade de intervalos de laminações, a variação de

propriedades como porosidade, densidade e a distinção de intervalos portadores de heterogeneidades como laminações convolutas, concreções, *shear-fractures* e juntas. De forma geral, os atributos empregados, relacionados com a análise do traço complexo do sinal propagado (atributos instantâneos), e atributos relacionados com a amplitude das reflexões e absorção de energia (energia e IQF) são utilizados para a interpretação de feições geológicas em dados de sísmica de reflexão, mas também são utilizados para o estudo de dados de GPR (KHWANMUANG; UDPHUAY, 2012; ZHAO et al., 2013; AKINSUNMADE et al., 2019; LE; NGUYEN, 2020; LOPES et al., 2023). Estes são normalmente utilizados para auxiliar a interpretação da espessura e continuidade de camadas, detecção de heterogeneidades litológicas e de aspectos como porosidade, saturação por fluídos e influência de fraturas.

A utilização destes atributos levou em consideração o fato de que as reflexões geradas são o resultado da variação da condução do sinal eletromagnético através das rochas. A mudança nas propriedades dielétricas das camadas de rocha produz a reflexão de energia (ondas eletromagnéticas) que retornam para o detector e são amplificadas e registradas. Em materiais não magnéticos, resistivos, a velocidade do sinal é reduzida. A atenuação do sinal é produzida pelo espalhamento (*scattering*) e pela absorção do sinal nos materiais geológicos, e é fortemente influenciada, dentre outros fatores, pela permissividade dielétrica dos materiais. A atenuação é proporcional à condutividade elétrica, o que leva a produção de atenuação em materiais com alta condutividade elétrica (BAKER et al., 2007; KOPPENJAN, 2009). A presença de "heterogeneidades" como a ocorrência de água em zonas porosas e variações na constante dielétrica de materiais também devido a variação na densidade (GRIMM *et al*., 2006), podem atuar como pontos de espalhamento e atenuação do sinal de GPR.

No presente estudo não foi investigada a relação entre as características físicas dos laminitos e suas propriedades elétricas (constantes dielétricas, permissividade dielétrica etc.). Estudos recentes sugerem que rochas calcárias representam, de forma geral, materiais com condutividade elétrica e propriedades negligíveis (MOUNT; COMAS, 2014). Em rochas calcárias com alta porosidade foi demonstrada uma boa correlação entre a permissividade dielétrica e a porosidade (MOUNT; COMAS, 2014). A presença de heterogeneidades, como minerais contendo ferro e pirita por exemplo, podem criar variações na propagação do sinal. Nos laminitos estudados, não foi possível identificar variações referentes a esses minerais, apesar de ser notada a

presença deles na parte superficial da bancada. A calcita apresenta constante dielétrica (*k*) em torno de 7,8 a 8,5, e a pirita apresenta constante dielétrica de 10,9 (HUSK; SEEHRA, 1979). Calcários apresentam constante dielétrica em entre de 10.5 a 9.6 (MOUNT; COMAS, 2014). A água possui constante dielétrica de aproximadamente 80, o que também faz da água um forte fator de atenuação do sinal eletromagnético, quando presente como fluído intersticial. Segundo GOMAA et al (2015), que estudou exemplos de biomicritos e bioesparitos, a constante dielétrica decai com o aumento da frequência de aquisição do dado, e diminui com a presença de areia e argilominerais. Considerando vários aspectos que podem influenciar na mudança das propriedades elétricas dos laminitos estudados (densidade, porosidade, presença de água, variação composicional), e que podem influenciar na variação dos sinais registrados, é possível considerar que a distribuição de altos e baixos valores do atributo de fase instantânea (Fig. 30A) está relacionada a interação da frequência do sinal em relação a densidade dos materiais que formam os conjuntos de laminações. Neste caso a modelagem isolou as camadas com maiores valores e a regularidade e continuidade dos intervalos reflete o efeito do acamamento dos laminitos. Além disso, verifica-se que existe uma alternância de intervalos mais e menos densos com alta frequência. O atributo de frequência dominante (Fig. 30B) demonstrou por outro lado a continuidade de intervalos que apresentam densidade média maior, e que apresentam maior espessura do que os intervalos de laminitos diferenciados pelo efeito deposicional. Estes intervalos apresentam estruturas silicificadas como laminações convolutas e concreções. Este atributo também permitiu separar em três partes o volume 3D com base na ocorrência de dois intervalos que apresentam maior número de heterogeneidades dentro dos laminitos formando zonas tabulares conforme a laminação. Uma zona basal e outras na porção superior separadas por um intervalo que apresenta praticamente nenhuma anomalia com valores elevados (Fig. 30B).

A Figura 31A mostra a modelagem do atributo de aceleração de fase instantânea. Este atributo é independente da amplitude e tem relação com o efeito de propagação do sinal e é utilizado para se ressaltar a geometria e continuidade de eventos. Espera-se que a fase apresente os mesmos valores ao longo de um evento e a mudança lateral é produzida pela variação na geometria, espessura e composição do intervalo (SUBRAHMANYAM; RAO, 2008). Como a figura mostra também este atributo demonstra a continuidade de intervalos portadores de laminações convolutas

e concreções. Embora, esse tenha mostrado intervalos contínuos nas porções inferior e superior do volume, também mostrou a presença de estruturas com continuidade no intervalo médio, diferentemente do que foi ressaltado no atributo de frequência dominante. Possivelmente, isso se deve a questão da espessura dos intervalos diferenciados. É possível que o atributo de frequência dominante capturou intervalos mais espessos, e o de aceleração da fase instantânea conseguiu identificar intervalos mais delgados com continuidade mais expressiva, além de outras zonas menores com aspecto tabular, que possivelmente também representam heterogeneidades (Fig. 31A). O levantamento cobriu uma área de aproximadamente 30 m^2, e em toda a extensão foi possível verificar a continuidade dos conjuntos de laminações e das camadas portadoras de heterogeneidade com base na geometria dos refletores e nos dados obtidos com a extração dos atributos de frequência (Fig. 30 e 31).

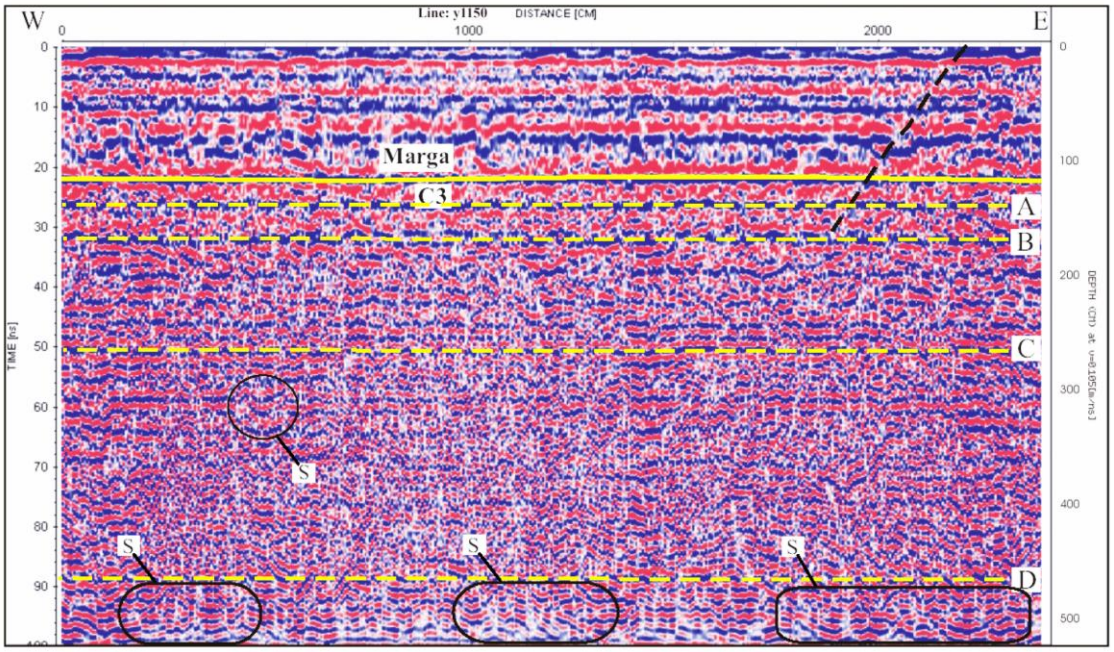
No caso dos calcários laminados, o aumento de resistência mecânica e da densidade está associado com a redução de porosidade, que pode variar entre aproximadamente 4% até 12% (MIRANDA *et al.*, 2016, 2018; ARAÚJO et al., 2020; RAMOS et al., 2020). Como eles apresentam conteúdo de areia e de argilominerais muito pequeno, é possível inferir que a mudança da propriedade está associada com aspectos como densidade e porosidade. Dessa forma é sugerido que as zonas destacadas representam regiões com menor porosidade e maior densidade, resistência mecânica, conforme demonstrado por ARAÚJO et al (2020).

Possivelmente, o resultado mais importante deste estudo foi a confirmação de que o método é capaz de detectar a heterogeneidades de pouca continuidade como concreções, e zonas de dissolução e carstificação, além de estruturas de médio porte como juntas e *shear fractures* que podem alcançar de dezenas de centímetros a vários metros, e cujas aberturas podem variar de 0,5 mm a 5 cm. O método também foi capaz de definir a continuidade de conjuntos de laminações que passaram por processo precoce de cimentação e apresentam grande continuidade lateral, o que implica em um impacto mais efetivo em termos de fluxo para reservatórios geológicos. No caso da litologia estudada o padrão do acamamento e dos processos diagenéticos favorecem a continuidade lateral expressiva das heterogeneidades associadas a diagênese individual de camadas com características diferentes. O método foi aplicado com parâmetros para alta resolução espacial das informações adquiridas, e isso implica a limitação em termos de profundidade investigada. Logo, seria interessante como uma proposta de aplicação do método para a criação de modelos

geológicos de reservatórios a aquisição de dados com antenas de frequências diferentes, para que fosse possível testar a possibilidade de realizar *upscaling* entre diferentes levantamentos. Por exemplo, seria interessante testar antenas com frequências intermediárias as que foram utilizadas (1,2 GHz), e antenas com frequências menores (600 e 400 MHz), para que fosse possível verificar o limite de identificação das heterogeneidades definidas neste estudo com foco em volumes de imageamento maiores e mais próximos da escala de reservatórios.

Silva (2003) realizou uma aquisição de GPR com antena de 400 MHz em afloramentos da Mineração Caldas, próximo às cidades de Barbalha e Crato. Este levantamento teve como objetivo verificar a possibilidade de identificar estruturas rúpteis como falhas, juntas e veios. O levantamento resultou em uma seção 2D com 12 m de extensão. A seção incluiu em sua porção mais superior um intervalo com 1 m de margas e abaixo um intervalo com calcários laminados (intervalo C6), com aproximadamente 4 m de espessura. Este autor verificou que com esta frequência (400 MHz) o método permitiu definir intervalos com padrões de refletores mais contínuos e refletores com ondulações e menor continuidade, que foram interpretados como intervalos portadores de laminações convolutas criadas por processos de eventos tectônicos. Entretanto, considerando a resolução exibida pelo dado deste levantamento é possível verificar que não foi possível detectar os intervalos de poucos centímetros formados por laminações convolutas e concreções, e nem as juntas, veios e *shear fractures*.

Figura 34- Seção GPR 2D analisada por Silva (2003) executada na Mineração Caldas. O intervalo de laminitos C3 foi investigado e foi possível verificar intervalos dom refletores mais contínuos e refletores descontínuos e ondulados. A, B C e D foram identificados como refletores contínuos que demarcam intervalos com fácies diferentes. S - Marca trechos com refletores convolutos que podem indicar deformação causada por tectonismo sin-deposicional. A linha preta tracejada indica a interpretação de uma fratura.



Fonte: A autora (2023).

5. CONCLUSÃO

O estudo baseado na análise de dados de alta resolução de GPR obtidos do intervalo C6 de calcários laminados da Formação Crato permitiu as seguintes conclusões:

1 - O uso de antenas de mais alta frequência permitiu imagear feições como intervalos portadores de laminações convolutas e concreções que representam heterogeneidades diagenéticas relacionadas a cimentação precoce dos estratos, e que apresentam importância para o fluxo em meios porosos;

2 - Os dois intervalos de frequência utilizados obtiveram resultados similares, mas devido ao fenômeno de atenuação o levantamento com a antena de 2,6 GHz ficou limitado a aproximadamente 1,5 m. Este também revelou detalhes melhores do padrão de acamamento dos laminitos. Entretanto, assim como ocorreu com os dados obtidos com a antena de 900 MHz, não foi possível imagear os planos de fraturas preenchidas por calcita (veios);

3 - O pós-processamento com filtros do tipo *dip-steering* permitiu melhorar substancialmente o padrão de geometria dos refletores associados aos laminitos, mas devido a questão de amostragem do dado este também pode produzir artefatos significativos. Esta melhoria dos dados permitiu verificar zonas de deformação da geometria do acamamento que indicam a ocorrência de *shear fractures*;

4 - A aplicação de filtros do tipo *dip-steering*, assim como a extração de atributos permitiu melhorar a qualidade dos dados migrados e caracterizar bem o padrão de ocorrência de heterogeneidades localizadas como zonas de dissolução, e heterogeneidades que apresentam alta continuidade lateral e são formadas por intervalos de laminitos portadores de laminações convolutas e concreções calcárias. Foi possível caracterizar aspectos como espessura e continuidade lateral destes intervalos, que possuem maior densidade e menor porosidade, por toda extensão do levantamento. Estes níveis apresentam boa continuidade, e representam um controle horizontal do fluxo, ou do processo de fraturamento hidráulico, durante etapas de desenvolvimento e produção.

5 - A análise de atributos também permitiu identificar a presença de uma junta recente que atuou como condutor para a percolação de água meteórica e criou uma zona afetada por dissolução nos laminitos. Os atributos de energia e absorção (*Q-factor*)

permitiram identificar zonas mais porosas criadas pela circulação de água meteórica ao longo do plano da junta;

SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

A título de sugestão de continuidade desta pesquisa, com foco na modelagem de análogos, observa-se que seria importante a execução de novos levantamentos 2D e 3D com outros padrões de frequência para testar a possibilidade de executar a integração com *upscaling* de parâmetros dos afloramentos. Cada nível de frequência permitirá capturar um conjunto de feições, então sugere-se a possibilidade de integrar levantamentos sobrepostos com diferentes escalas, que permitiriam transportar a interpretação de feições entre as diferentes resoluções espaciais.

Também seria importante realizar uma análise das propriedades elétricas dos laminitos, o que permitiria uma melhor modelagem dos dados. Além disso, estas propriedades poderiam ser comparadas com outros dados como propriedades mecânicas e de propriedades como velocidade acústica (Vp, Vs), o que permitiria o estabelecimento de parâmetros adicionais para a modelagem de propriedades sub-sísmicas. Isto permitiria a verificação da correlação de algumas propriedades aqui discutidas, bem como a criação de modelos parametrizados multifísica, e a consequente melhoria de modelos geológicos análogos para rochas desta natureza.

APÊNDICE

Atributo	Descrição	Aplicação
Energia	Representa a soma do quadrado das amplitudes em um determinado intervalo de tempo (time-gate)	Auxilia a ressaltar variações no contraste das amplitudes, em sucessões siliciclásticas pode auxiliar na definição de porosidade, ressalta a presença de *bright-spots* e de acumulações de gás.
Instantaneous (quality) *Q-factor*	Representa a razão entre a frequência instantânea e dobro da largura de banda instantânea	Boa correlação com propriedades como porosidade, fraturamento e permeabilidade. Indica a variação local do fator de qualidade (Q-*factor*), apresenta informação similar a impedância acústica relativa extraída do traço sísmico. Indica a absorção relativa de energia nas camadas de rochas.
Frequência Instantânea *(Instantaneous Frequency)*	Representa a taxa de tempo de mudança de uma fase instantânea.	Pode indicar zonas fraturadas (zonas de baixa frequência), indicador de camadas delgadas. Zonas com altas frequências indicam interfaces abruptas como rochas laminadas (folhelhos), e frequência mais baixas são indicativas de camadas com acamamento maciço.
Fase Instantânea *(Instataneous phase)*	Este atributo é independente das amplitudes do traço e está relacionado com a propagação da frente de onda. É obtido por meio do calculo da fase instantânea na posição da amostra, e enfatiza a continuidade/descontinuidade de reflexões por meio da representação equalizada de eventos fortes e fracos. Este é utilizado para o calculo de outros atributos instantâneos.	Enfatiza eventos fortes, e ressalta descontinuidades dos refletores como falhas, *pinch-outs*, contatos angulares e interface entre camadas.
Aceleração de fase instantânea *(Instantaneous phase acceleration)*	Representa a derivada no tempo da Frequência Instantânea, obtida por meio do espectrograma da taxa de frequência instantânea, apresentado como uma distribuição conjunta tempo-frequência, e é obtido por meio do cálculo local da STFT *(shor-time fourrier transform).*	Esta enfatiza as frequências mais rápidas e permite obter uma melhor resolução das camadas delgadas. Também ressalta o efeito de absorção das ondas devido a dispersão das frequências mais rápidas em camadas menos consolidadas.
Frequência dominante *(Dominant frequency)*	Representa a raiz quadrada da soma dos quadrados da frequência instantânea e da largura de banda instantânea.	É utilizada para definir a espessura das canadas, a amplitude calculada será máxima em camadas cuja espessura apresentem correlação com a estimativa obtida a partir da frequência dominante. Esta também permite enfatizar o efeito de continuidade lateral de camadas.

REFERÊNCIAS

About gpr. IndiComet Geociências, 2017. Disponível em: https://indicomet.com/about-gpr.html . Acesso em: 18 jan. 2023.

AKINSUNMADE, Akinniyi; TOMECKA-SUCHOŃ, Sylwia; PYSZ, Paweł. Complex analysis of GPR signals for the delineation of subsurface subtle features. **Geology, Geophysics and Environment**, v. 45, n. 4, p. 257-267, 2019.

ALENCAR, Márcio Lima et al. Soft-sediment deformation structures in Aptian lacustrine laminites: Evidence of post-rift paleoseismicity in the Araripe basin, NE Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 105, p. 102955, 2021.

ALVAREZ, Leidy Laura et al. Impact of fracture topology on the fluid flow behavior of naturally fractured reservoirs. **Energies**, v. 14, n. 17, p. 5488, 2021.

ANCHUELA, Ó. Pueyo et al. Mapping subsurface karst features with GPR: results and limitations. **Environmental Geology**, v. 58, p. 391-399, 2009.

ANDERSSON, Johan; DVERSTORP, Björn. Conditional simulations of fluid flow in three-dimensional networks of discrete fractures. **Water Resources Research**, v. 23, n. 10, p. 1876-1886, 1987.

ANDERSSON, Johan; SHAPIRO, Allen M.; BEAR, Jacob. A stochastic model of a fractured rock conditioned by measured information. **Water Resources Research**, v. 20, n. 1, p. 79-88, 1984.

ANNAN, A. P. Ground-penetrating radar. In: **Near-surface geophysics**. Society of Exploration Geophysicists, p. 357-438, 2005.

ANNAN, A. P.; COSWAY, S. W. GPR frequency selection. **Fifth International Conferention on Ground Penetrating Radar**, p. 747-760, 1994.

ANNAN, A. P.; COSWAY, S. W. Ground penetrating radar survey design. In: **5th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems**. EAGE Publications BV, 1992. p. 329-351.

ARAUJO, A. F. L. **Estratigrafia Mecânica de Laminitos Aptianos da Bacia do Araripe: Aplicação à Caracterização de Reservatórios Naturalmente Fraturados** [s.l.] Universidade Federal de Pernambuco, 2020.

ASSINE, M. L. Análise estratigráfica da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 22, n. 3, p. 289–300, 1992.

ASSINE, M. L. *et al*. Sequências deposicionais do Andar Alagoas da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 22, p. 3–28, 2014.

AZERÊDO, Ana C.; DUARTE, Luís V.; SILVA, Alexandre P. The challenging carbonates from the Pre-Salt reservoirs offshore Brazil: facies, palaeoenvironment and diagenesis. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 108, p. 103202, 2021.

BAKER, Gregory S.; JORDAN, Thomas E.; PARDY, Jennifer. An introduction to ground penetrating radar (GPR). 2007.

BARNES, Arthur E. A tutorial on complex seismic trace analysis. **Geophysics**, v. 72, n. 6, p. W33-W43, 2007.

BARNES, Arthur E. Instantaneous spectral bandwidth and dominant frequency with applications to seismic reflection data. **Geophysics**, v. 58, n. 3, p. 419-428, 1993.

BARNES, Arthur E. Seismic attributes in your facies. **CSEG recorder**, v. 26, n. 7, p. 41-47, 2001.

BARONE, Pier Matteo; DI MAGGIO, Rosa Maria. Forensic geophysics: ground penetrating radar (GPR) techniques and missing persons investigations. **Forensic Sciences Research**, v. 4, n. 4, p. 337-340, 2019.

BARR, G. L. **Application of ground-penetrating radar methods in determining hydrogeologic conditions in a karst area, west-central Florida**. US Geological Survey, 1993.

BECK, B.F., SAYED, S., The sinkhole hazard in Pinelas County: a geologic summary for planning purposes. Florida Sinkhole Research Institute, Report 90-91-1,1991.

BISDOM, Kevin; BERTOTTI, Giovanni; NICK, Hamidreza M. The impact of different aperture distribution models and critical stress criteria on equivalent permeability in fractured rocks. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 121, n. 5, p. 4045-4063, 2016.

BORKOWSKI, Tomasz et al. A Controlled Experiment to Test the Efficacy of Ground-Penetrating Radar in the Search for Clandestine Burials in Poland. **Forensic Sciences**, v. 2, n. 3, p. 585-600, 2022.

BRISTOW, Charlie S.; JOL, Harry M. An introduction to ground penetrating radar (GPR) in sediments. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 211, n. 1, p. 1-7, 2003.

ČERU, Teja; DOLENEC, Matej; GOSAR, Andrej. Application of Ground Penetrating Radar Supported by Mineralogical-Geochemical Methods for Mapping Unroofed Cave Sediments. **Remote Sensing**, v. 10, n. 4, p. 639, 2018.

CLAIRMONT, Roberto et al. Seismic attribute analyses and attenuation applications for detecting gas hydrate presence. **Geosciences**, v. 11, n. 11, p. 450, 2021.

CRAIG JONES, D.; HUDYMA, Nick. Characterization of Weathered Limestone Using Cross-Hole Ground Penetrating Radar Techniques. In: **Geo-Chicago 2016**. p. 475-486, 2016.

DE CASTRO, David Lopes et al. Ground-Penetrating Radar imaging techniques applied in 3D environment: Example in inactive dunes. **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 32, n. 2, p. 273-289, 2014.

DE LIMA, Rebeca Seabra et al. Ground Penetrating Radar digital imaging and modeling of microbialites from the Salitre Formation, Northeast Brazil. **Geologia USP. Série Científica**, v. 18, n. 2, p. 187-200, 2018.

DE OLIVEIRA JR, Josibel Gomes et al. Enhancing stratigraphic, structural and dissolution features in GPR images of carbonate karst through data processing. **Near Surface Geophysics**, v. 18, n. 2, p. 135-148, 2020.

DERSHOWITZ, William S.; EINSTEIN, Herbert H. Three dimensional flow modeling in jointed rock masses. In: **6th ISRM congress**. OnePetro, 1987.

DOS REIS JÚNIOR, João Andrade et al. ERT and GPR survey of collapsed paleocave systems at the western border of the Potiguar Basin in northeast Brazil. **Near Surface Geophysics**, v. 13, n. 4, p. 369-381, 2015.

DOS REIS JÚNIOR, João Andrade; DE CASTRO, David Lopes; FILHO, Francisco Pinheiro Lima. Caracterização de sistemas de paleocavernas colapsadas usando atributos GPR. In: **13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 26–29 August 2013**. Society of Exploration Geophysicists and Brazilian Geophysical Society, 2013. p. 859-864, 2013.

EHRENBERG, S. N.; NADEAU, P. H. Sandstone vs. carbonate petroleum reservoirs: A global perspective on porosity-depth and porosity-permeability relationships. **AAPG bulletin**, v. 89, n. 4, p. 435-445, 2005.

ELSWORTH, D. A hybrid boundary element-finite element analysis procedure for fluid flow simulation in fractured rock masses. **International journal for numerical and analytical methods in geomechanics**, v. 10, n. 6, p. 569-584, 1986.

ELSWORTH, Derek. A model to evaluate the transient hydraulic response of three-dimensional sparsely fractured rock masses. **Water Resources Research**, v. 22, n. 13, p. 1809-1819, 1986.

ENDO, HOWARD KIEI. **Mechanical transport in two-dimensional networks of fractures**. University of California, Berkeley, 1984.

FABIN, Carlos E. et al. Stratigraphic relations of the Ipubi formation: siliciclastic-evaporitic succession of the Araripe Basin. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, p. 2049-2071, 2018.

FERNANDES, Francisco M.; PAIS, Jorge C. Laboratory observation of cracks in road pavements with GPR. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 1130-1138, 2017.

FERNANDES JR, Antonio L. et al. GPR investigation of karst guided by comparison with outcrop and unmanned aerial vehicle imagery. **Journal of Applied Geophysics**, v. 112, p. 268-278, 2015.

GARLAND, Joanna et al. Advances in carbonate exploration and reservoir analysis. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 370, n. 1, p. 1-15, 2012.

GEIGER, Sebastian; MATTHÄI, Stephan. What can we learn from high-resolution numerical simulations of single-and multi-phase fluid flow in fractured outcrop analogues?. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 374, n. 1, p. 125-144, 2014.

GIUFFRIDA, Alessandro et al. Fracture stratigraphy and DFN modelling of tight carbonates, the case study of the Lower Cretaceous carbonates exposed at the Monte Alpi (Basilicata, Italy). **Marine and Petroleum Geology**, v. 112, p. 104045, 2020.

GOMAA, Mohamed M.; KASSAB, Mohamed A.; EL-SAYED, Nahla A. Study of pertrographical and electrical properties of some Jurassic carbonate rocks, north Sinai, Egypt. **Egyptian Journal of Petroleum**, v. 24, n. 3, p. 343-352, 2015.

GRIMM, Robert E. et al. Absorption and scattering in ground-penetrating radar: Analysis of the Bishop Tuff. **Journal of Geophysical Research: Planets**, v. 111, n. E6, 2006.

GUERRIERO, Vincenzo et al. Quantifying uncertainties in multi-scale studies of fractured reservoir analogues: Implemented statistical analysis of scan line data from carbonate rocks. **Journal of Structural Geology**, v. 32, n. 9, p. 1271-1278, 2010.

GUERRIERO, Vincenzo. Power law distribution: Method of multi-scale inferential statistics. **Journal of Modern Mathematics Frontier**, v. 1, n. 1, p. 21-28, 2012.

GURJÃO, K. G. R. et al. Petrophysics of carbonatic and evaporitic rocks from Araripe Basin. In: **13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 26–29 August 2013**. Society of Exploration Geophysicists and Brazilian Geophysical Society, 2013. p. 1142-1147.

HART, Bruce S. Validating seismic attribute studies: Beyond statistics. **The Leading Edge**, v. 21, n. 10, p. 1016-1021, 2002.

HE, Shengdi; LI, Yanrong; AYDIN, Adnan. A comparative study of UDEC simulations of an unsupported rock tunnel. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 72, p. 242-249, 2018.

HEIMHOFER, Ulrich et al. Deciphering the depositional environment of the laminated Crato fossil beds (Early Cretaceous, Araripe Basin, North-eastern Brazil). **Sedimentology**, v. 57, n. 2, p. 677-694, 2010.

HOWELL, John A.; MARTINIUS, Allard W.; GOOD, Timothy R. The application of outcrop analogues in geological modelling: a review, present status and future outlook. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 387, n. 1, p. 1-25, 2014.

HUSK, D. E.; SEEHRA, M. S. Dielectric constant of iron pyrite (FeS2). **Solid State Communications**, v. 27, n. 11, p. 1147-1148, 1978.

JEANNIN, Mathieu et al. Multiconfiguration GPR measurements for geometric fracture characterization in limestone cliffs (Alps). **Geophysics**, v. 71, n. 3, p. B85-B92, 2006.

JING, Lanru; STEPHANSSON, Ove. Discrete fracture network (DFN) method. In: **Developments in geotechnical engineering**. Elsevier, p. 365-398, 2007.

JOHANN, P. R. S.; MONTEIRO, R. C. Geophysical Reservoir Characterization and Monitoring at the Brazilian Pre-Salt Oil Fields. **Offshore technology Conference**. 2016.

KARGARPOUR, Mohammad Ali. Carbonate reservoir characterization: an integrated approach. **Journal of Petroleum Exploration and Production Technology**, v. 10, n. 7, p. 2655-2667, 2020.

KHWANMUANG, Wisarat; UDPHUAY, Suwimon. Ground-penetrating radar attribute analysis for visualization of subsurface archaeological structures. **The leading edge**, v. 31, n. 8, p. 946-949, 2012.

KNOPH, Katharine Marie. **Ground-penetrating radar imaging of depositional and diagenetic features in an upper Miocene carbonate reservoir analog, SE Spain**. 2011. Tese de Doutorado. University of Kansas.

KOPPENJAN, Steven. Ground penetrating radar systems and design. **Ground penetrating radar: Theory and applications**, v. 1, 2009.

KRYSIŃSKI, Lech; SUDYKA, Jacek. GPR abilities in investigation of the pavement transversal cracks. **Journal of Applied Geophysics**, v. 97, p. 27-36, 2013.

LAPPONI, Fabio et al. From outcrop to 3D modelling: a case study of a dolomitized carbonate reservoir, Zagros Mountains, Iran. 2011.

LAUBACH, Stephen E. et al. The role of chemistry in fracture pattern development and opportunities to advance interpretations of geological materials. **Reviews of Geophysics**, v. 57, n. 3, p. 1065-1111, 2019.

LE, Cuong Van Anh; VAN NGUYEN, Thuan. Ground penetrating radar attributes analysis for detecting underground artificial structures in urban areas, Vietnam. **Lowland Technology International**, v. 22, n. 2, p. 239-239, 2020.

LEI, Qinghua; LATHAM, John-Paul; TSANG, Chin-Fu. The use of discrete fracture networks for modelling coupled geomechanical and hydrological behaviour of fractured rocks. **Computers and Geotechnics**, v. 85, p. 151-176, 2017.

LEPILLIER, Baptiste et al. From outcrop scanlines to discrete fracture networks, an integrative workflow. **Journal of Structural Geology**, v. 133, p. 103992, 2020.

LI, Fangyu et al. Seismic attenuation attributes with applications on conventional and unconventional reservoirs. **Interpretation**, v. 4, n. 1, p. SB63-SB77, 2016.

LIU, Richeng et al. A fractal model for characterizing fluid flow in fractured rock masses based on randomly distributed rock fracture networks. **Computers and Geotechnics**, v. 65, p. 45-55, 2015.

LIU, Xiuwei; DONG, Xuejun; LESKOVAR, Daniel I. Ground penetrating radar for underground sensing in agriculture: a review. **International Agrophysics**, v. 30, n. 4, 2016.

LIU, Xiuwei et al. Ground penetrating radar (GPR) detects fine roots of agricultural crops in the field. **Plant and Soil**, v. 423, p. 517-531, 2018.

LOMBARDI, Federico; PODD, Frank; SOLLA, Mercedes. From its core to the niche: Insights from GPR applications. **Remote Sensing**, v. 14, n. 13, p. 3033, 2022.

LONG, Jane CS et al. Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures. **Water resources research**, v. 18, n. 3, p. 645-658, 1982.

LONG, Jane CS; GILMOUR, Peggy; WITHERSPOON, Paul A. A model for steady fluid flow in random three-dimensional networks of disc-shaped fractures. **Water Resources Research**, v. 21, n. 8, p. 1105-1115, 1985.

LONGONI, LAURA et al. Surface and subsurface non-invasive investigations to improve the characterization of a fractured rock mass. **Journal of Geophysics and Engineering**, v. 9, n. 5, p. 461-472, 2012.

LOPES, Juliana AG et al. 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**, p. 106126, 2023.

LUO, Yuxin et al. Absorbing Quality Factor Attribute for Recognising Ordovician Cave and Underground River System in Tahe Oilfield. In: **Technology and Application of Environmental and Engineering Geophysics: Selected Papers of the 7th International Conference on Environmental and Engineering Geophysics, ICEEG-Beijing 2016**. Springer Singapore, 2017. p. 25-33.

MAGALHÃES, A. J. C. et al. Ground penetrating radar for facies architecture and high-resolution stratigraphy: Examples from the Mesoproterozoic in the Chapada Diamantina Basin, Brazil. **Marine and Petroleum Geology**, v. 86, p. 1191-1206, 2017.

MÄKEL, G. H. The modelling of fractured reservoirs: constraints and potential for fracture network geometry and hydraulics analysis. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 292, n. 1, p. 375-403, 2007.

MATHENEY, Michael P.; NOWACK, Robert L. Seismic attenuation values obtained from instantaneous-frequency matching and spectral ratios. **Geophysical Journal International**, v. 123, n. 1, p. 1-15, 1995.

MCMECHAN, George A.; GAYNOR, Gerard C.; SZERBIAK, Robert B. Use of ground-penetrating radar for 3-D sedimentological characterization of clastic reservoir analogs. **Geophysics**, v. 62, n. 3, p. 786-796, 1997.

MELLETT, James S. Ground penetrating radar applications in engineering, environmental management, and geology. **Journal of Applied Geophysics**, v. 33, n. 1-3, p. 157-166, 1995.

MEYER, Douglas E. et al. Use of seismic attributes in 3-D geovolume interpretation. **The Leading Edge**, v. 20, n. 12, p. 1377-1400, 2001.

MIRANDA, Tiago et al. Petrophysics and petrography of Aptian tight carbonate reservoir, Araripe Basin, NE Brazil. In: **78th EAGE Conference and Exhibition 2016**. EAGE Publications BV,. p. 1-5, 2016.

MIRANDA, T. S. *et al*. Quantifying aperture, spacing and fracture intensity in a carbonate reservoir analogue: Crato Formation, NE Brazil. **Marine and Petroleum Geology**, v. 97, n. May, p. 556–567, 2018.

MIZUNO, T. A.; MIZUSAKI, A. M. P.; LYKAWKA, R. Facies and paleoenvironments of the Coqueiros Formation (Lower Cretaceous, Campos Basin): A high frequency stratigraphic model to support pre-salt" coquinas" reservoir development in the Brazilian continental margin. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 88, p. 107-117, 2018.

MOUNT, Gregory J.; COMAS, Xavier. Estimating porosity and solid dielectric permittivity in the M iami L imestone using high-frequency ground penetrating radar (GPR) measurements at the laboratory scale. **Water Resources Research**, v. 50, n. 10, p. 7590-7605, 2014.

MUNIZ, M. C.; BOSENCE, D. W. J. Pre-salt microbialites from the Campos Basin (offshore Brazil): image log facies, facies model and cyclicity in lacustrine carbonates. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 418, n. 1, p. 221-242, 2015.

NELSON, Ronald. **Geologic analysis of naturally fractured reservoirs**. Elsevier, 2001.

NEUMANN, V. H. D. M. L. **Estratigrafia, sedimentologia, geoquímica y diagenesis de los Sistemas Lacustres Aptiense-Albienses de la Cuenca de Araripe (Noreste de Brasil)**. Publicacions Universitat de Barcelona, 1999.

NEUMANN, V. H. *et al*. Organic matter composition and distribution through the Aptian – Albian lacustrine sequences of the Araripe Basin, northeastern Brazil. **International Journal of Coal Geology**, v. 54, p. 21–40, 2003.

OUMAROU, Sanda et al. Seismic attributes in reservoir characterization: an overview. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 14, p. 1-15, 2021.

PIPAN, Michele et al. 2-D and 3-D processing and interpretation of multi-fold ground penetrating radar data: a case history from an archaeological site. **Journal of Applied geophysics**, v. 41, n. 2-3, p. 271-292, 1999.

RAMOS, Germano Mário Silva et al. Estimation of compaction rates for a tight carbonate reservoir based in analyses of diagenetic concretions. In: **RIO OIL & GAS EXPO AND CONFERENCE, Rio de Janeiro**. p. 1-11, 2020.

ROBINSON, Peter Clive. **Connectivity, flow and transport in network models of fractured media**. 1984. Tese de Doutorado. University of Oxford.

RODRÍGUEZ-PASCUA, M. A. *et al*. Soft-sediment deformation structures interpreted as seismites in lacustrine sediments of the Prebetic Zone, SE Spain, and their potential use as indicators of earthquake magnitudes during the Late Miocene. **Sedimentary Geology**, v. 135, n. 1–4, p. 117–135, 2000.

SAINTENOY, Albane et al. Detecting faults and stratigraphy in limestone with Ground-Penetrating Radar: A case study in Rustrel. In: **2017 9th International**

Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR). IEEE, 2017. p. 1-5, 2017.

SANDERSON, David J.; NIXON, Casey W. The use of topology in fracture network characterization. **Journal of Structural Geology**, v. 72, p. 55-66, 2015.

SANDERSON, David J.; NIXON, Casey W. Topology, connectivity and percolation in fracture networks. **Journal of Structural Geology**, v. 115, p. 167-177, 2018.

SANTOS, R. F. V. C. et al. Numerical modeling of naturally fractured carbonate reservoir based on outcrops of Crato Formation, NE Brazil. In: **78th EAGE Conference and Exhibition 2016**. EAGE Publications BV, p. 1-5, 2016.

SILVA, A. L. & NEUMANN, V.H. Estratigrafia Física e Deformação do Sistema Lacustre Carbonático Aptiano-Albiano da Bacia do Araripe. Boletim do 2º Workshop PRH-ANP/MCT dos Programas de Formação de Recursos Humanos para o Setor de Petróleo e Gás da UFPE. Recife. UFPE. p. 15-18, 2002.

SILVA, A. L. Estratigrafia Física e Deformação do Sistema Lacustre Carbonático Aptiano-Albiano da Bacia do Araripe em Afloramento Selecionados. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geociências – Universidade Federal de Pernambuco. p.118, 2003.

SILVA, Jefferson Pedro et al. Topological analysis of fracture networks integrated with flow simulation models for equivalent fracture permeability estimation. **Journal of Structural Geology**, v. 147, p. 104338, 2021.

SMITH, Leslie; SCHWARTZ, Franklin W. An analysis of the influence of fracture geometry on mass transport in fractured media. **Water Resources Research**, v. 20, n. 9, p. 1241-1252, 1984.

STEWART, M., PARKER, J., Localization and seasonal variation of recharge in a covered karst aquifer system, Florida, USA. Int. Contrib. Hydrogeol, v.13, p. 443–460, 1992.

SUBRAHMANYAM, D.; RAO, P. H. Seismic attributes-a review. In: **7th International Conference and Exposition on Petroleum Geophysics, Hyderabad, India**. 2008.

TANER, M. Turhan. Seismic attributes. **CSEG recorder**, v. 26, n. 7, p. 48-56, 2001.

TERRA, J. G. S. *et al*. Classificações Clássicas De Rochas Carbonáticas. **B. Geociências. Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 1, p. 9–29, 2010.

THAKUR, Mohmad Mohsin; PRASHANT, Amit. GPR investigation at two sites of Archaeological Interest in Vadnagar, India. In: **2016 16th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)**. IEEE, p. 1-6, 2016.

THOMPSON, Daniel L.; STILWELL, Jeffrey D.; HALL, Mike. Lacustrine carbonate reservoirs from Early Cretaceous rift lakes of Western Gondwana: Pre-salt coquinas of Brazil and West Africa. **Gondwana Research**, v. 28, n. 1, p. 26-51, 2015.

TORRES, T. C. Processamento e interpretação de dados sísmicos 2-D da Bacia de Camamu. Trabalho de Conclusão de Curso- Universidade Federal da Bahia, Bahia. p. 35-39, 2018.

VEGA, M. D. L.; OSELLA, A.; LASCANO, E.; CARCIONE, J. M. Ground-penetrating radar and geo-electrical simulations of data from the Floridablanca archaeological site. **Archaeological Prospection**, v. 12, n. 1, p. 19–30, 2005.

WANG, Xiaoguang et al. Heterogeneous fluid flow in fractured layered carbonates and its implication for generation of incipient karst. **Advances in Water Resources**, v. 107, p. 502-516, 2017.

WEINSTEIN-EVRON, Mina; BECK, Alex; EZERSKY, Michael. Geophysical investigations in the service of Mount Carmel (Israel) prehistoric research. **Journal of Archaeological Science**, v. 30, n. 10, p. 1331-1341, 2003.

WHITE, Roy E. Properties of instantaneous seismic attributes. **The Leading Edge**, v. 10, n. 7, p. 26-32, 1991.

ZAJC, Marjana; POGAČNIK, Željko; GOSAR, Andrej. Ground penetrating radar and structural geological mapping investigation of karst and tectonic features in flyschoid rocks as geological hazard for exploitation. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 67, p. 78-87, 2014.

ZHAO, Wenke et al. Ground penetrating radar (GPR) attribute analysis for archaeological prospection. **Journal of Applied Geophysics**, v. 97, p. 107-117, 2013.

ZIHMS, S. G. *et al*. Crato Formation laminites - a representative geomechanical pre-salt analogue? representative geomechanical. 5th Atlantic **Conjugate Margins Conference**. 2017.