



Universidade de Brasília – UnB

Instituto de Geociências – IG

Programa de Pós-Graduação em Geologia

**Caracterização Mineralógica e Estudo de Processos de Formação e
Remobilização de Carbonatos da Formação Salitre**

Dissertação de Mestrado

Nº 458

Diego Canídia do Carmo Couto

Brasília – DF, março de 2020

Caracterização Mineralógica e Estudo de Processos de Formação e Remobilização de Carbonatos da Formação Salitre

Dissertação de mestrado realizada junto ao Programa de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geologia.

Área de Concentração: Mineralogia e Petrologia

Orientadora: Profa. Dra. Paola Ferreira Barbosa

Co-orientador: Prof. Dr. Roberto Ventura Santos

Brasília – DF, 2020

Profa. Dra. Paola Ferreira Barbosa (Orientadora)

Universidade de Brasília - UnB

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Federico Alberto Cuadros Jiménez

Universidade de Brasília - UnB

Prof. Dr. Leonardo Evangelista Lagoeiro

Universidade Federal do Paraná – UFPR

AGRADECIMENTOS

- Agradeço a todos que contribuíram de alguma forma para que este trabalho de mestrado fosse possível. A todos vocês, dedico minha eterna gratidão:
- Aos meus pais, por todo carinho, suporte e compreensão durante toda a minha permanência em Brasília – DF.
- À Prof. Dr. Paola Ferreira Barbosa pela orientação, paciência, ensinamentos e todas as horas de excelência dedicadas a mim e a este trabalho.
- Ao Prof. Dr. Roberto Ventura Santos pela co-orientação e por todo o empenho e suporte oferecido durante todo o trabalho.
- À empresa Shell, pelo financiamento do PROJETO POROKARST 3D, que tornou possível a realização deste trabalho.
- À professora Lucieth Cruz Vieira, integrante ativa do projeto.
- Aos amigos de projeto, Igor Augusto Pureza Taveira e Cleber Peralta pelo companheirismo e por toda ajuda prestada.
- À Universidade de Brasília (UnB), minha segunda casa desde 15/08/2011.
- A todos os professores, técnicos de laboratórios e funcionários do Instituto de Geociências que se envolveram com excelência na execução desse projeto, em especial ao Laboratório de QEMScan (QEMLab), o Laboratório de Raios-X e o Laboratório de Geocronologia da Universidade de Brasília.
- A todos os amigos e companheiros de curso que foram minha família em Brasília durante a graduação e mestrado, em especial: Gabriel Domingues; Jetúlio Hugo e Murilo Pessoa.
- O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

- This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001."

FICHA CATALOGRÁFICA

CC871c	Canídia do Carmo Couto, Diego
	Caracterização Mineralógica e Estudo de Processos de Formação e Remobilização de Carbonatos da Formação Salitre.
	Diego Canídia do Carmo Couto; Orientador: PhD Paola Ferreira Barbosa; Co-orientador: PhD Roberto Ventura Roberto Ventura Santos. -- Brasília, 2020. 60 p.
	Dissertação de Mestrado em Geologia Nº 458 - Universidade de Brasília, 2020.
	1. Carbonatos; 2. Fluidos Hipogênicos; 3. Caracterização Mineral; 4. Estruturas Preenchidas; 5. Dolomitização.

SUMÁRIO

i. Estrutura da Dissertação	7
ii. Apresentação do Problema	8
iii. Justificativa	9
iv. Localização e Vias de Acesso	9
v. Objetivos	10
Resumo	12
Abstract	13
1. Introdução	14
2. Contexto Regional	16
2.1. Contexto Tectônico	17
2.2. Grupo Una	17
2.3. Formação Salitre	18
2.4. Unidade Nova América	19
3. Amostras e Métodos	19
3.1. Caracterização Mineral	20
3.2. Difração de Raios-X	20
3.3. Microscopia ótica	20
3.4. QEMScan	21
3.5. Catodoluminescência	22
3.6. Charge Contrast Imaging	23
4. Resultados	24
4.1. Afloramento Fazenda Canaã	24
4.2. Afloramento Achado	30
4.3. Afloramento Ipanema	39
5. Isótopos de Carbono e Oxigênio	45
6. Discussão	51
7. Conclusão	54
Referências	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura i. Mapa de localização e vias de acesso do Município de Irecê, saindo da capital do estado, Salvador	11
Figura 1. Mapa geológico da Bacia Neoproterozoica de Irecê em contexto regional. Afloramentos de Fazenda Canaã, Achado e Ipanema representados pela estrela vermelha. Mapa modificado de CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais), Alkmim (2004), Kuchenbecker <i>et al.</i> (2013) e Redivo <i>et al.</i> (2019)	16
Figura 2. Pontos amostrados no Afloramento Fazenda Canaã visto em planta em A. Dolomito laminado em B. Estromatólito colunar em C	25
Figura 3. Difratoograma de Raios-X representativo de amostras do Afloramento Canaã. Importante notar que a encaixante é essencialmente constituída por dolomita e fluorapatita, enquanto que os veios são constituídos por calcita. Amostra CARB-0015 em (a). Amostra CARB-0023A em (b). Amostra CARB-0024 em (c). Amostra CARB-0026B em (d). Amostra CARB-0030A em (e). Amostra CARB-0033 em (f)	26
Figura 4. Testemunho de sondagem da amostra CARB-0021 em A. Testemunho de sondagem da amostra CARB-0027 em B. Análise QEMScan da amostra CARB-0021 em C. Análise QEMScan da amostra CARB-0027 em D. Testemunhos de sondagem das amostras CARB-0023A em C e CARB-0028B em F. Fotomicrografias com polarizadores cruzados em G da amostra CARB-0023A e H da amostra CARB-0028B. Detalhe para vesícula milimétrica em C, veios calcíticos caóticos associados com quartzo em D, veio milimétrico paralelo a laminação em G e veios submilimétricos com arranjo caótica em H	27
Figura 5. Análise QEMScan da amostra CARB-0023A. Detalhe para veios de calcita submilimétricos a milimétricos associados a quartzo, feldspato potássico e ilita	28
Figura 6. Amostra CARB-0023A. Fotomicrografia em mosaico com polarizadores paralelos em A. Imagem CL em mosaico em B. Testemunho de sondagem em C. Fotomicrografia com polarizadores paralelos em D. Imagem CL em E. Imagem de backscattering em F. Imagem CCI em G. Detalhe para a imagem CL em mosaico mostrando luminescência decrescente da borda para o centro do veio, evidenciando veio de calcita com bordas dolomitizadas em B e zonação dos cristais de dolomita decorrentes	

do processo de dolomitização do veio de calcita em imagem de CCI em G29

Figura 7. Pontos amostrados no Afloramento Achado visto em planta em A. Dolomito em lajedo em B. Nível brechado em C31

Figura 8. Difratoograma de Raios-X representativo de amostras do Afloramento Achado. Importante notar que a encaixante é essencialmente constituída por dolomita, enquanto que os veios são constituídos por calcita. Amostra CARB-0040B em (a). Amostra CARB-50A em (b). Amostra CARB-0051 em (c). Amostra CARB-0069B em (d). Amostra CARB-0071B em (e). Amostra CARB-0075 em (f)32

Figura 9. Fotomicrografias com polarizadores paralelos. CARB-0053A em A e B, CARB-0046B em C e D, CARB-0043 em E, CARB-0052B em F e CARB-0049 em G, H e I. Detalhe para veio preenchido por calcita e dolomita em A, calcita e cristais de dolomita preenchendo cavidade em B, veio de calcita com borda de dissolução dolomítica em C, cristais zonados de dolomita em D, dolomita preenchendo vesícula em E, dolomita preenchendo vesícula milimétrico em F, dolomita preenchendo vesícula em G, porosidade intracristalina bordejada por cristais de dolomita em H e vesícula preenchida por calcita e dolomita em I. Calcita em vermelho33

Figura 10. Análise QEMScan da amostra CARB-0071B em A. Testemunho de sondagem da amostra CARB-0071B em B. Fotomicrografias com polarizadores paralelos em C e E. Imagens de CL em D e F. Detalhe para cavidades preenchidas por calcita e bordejados por quartzo e dolomitização da calcita aparente nas imagens de CL em F em dolomito34

Figura 11. Análise QEMScan da amostra CARB-0069B em A. Testemunho de sondagem da amostra CARB-0069B em B. Fotomicrografias com polarizadores paralelos em C e E. Imagens de CL em D e F. Detalhe para vesículas subcentimétricas preenchidos por calcita em A e a definição de duas fases carbonáticas distintas em imagem de CL em D e F35

Figura 12. Análise QEMScan da amostra CARB-0052A em A. Testemunho de sondagem da amostra CARB-0052A em B. Fotomicrografias com polarizadores paralelos em C e E e imagens CL em D e F. Detalhe para veio dolomítico em matriz dolomítica em

C e D e veio dolomítico com presença de calcita em matriz dolomítica em E e F36

Figura 13. Análise QEMScan e testemunho de sondagem da amostra CARB-0067 em A e B, respectivamente. Fotomicrografias com polarizadores paralelos em C e E e imagens de CL em D e F. Detalhe para cimentação dolomítica entre os clastos de dolomito em A e B, cristal de calcita bem definida em matriz dolomitizada em C e E e o contraste de luminescência entre dolomita (vermelho claro) e calcita (vermelho escuro) em D e F37

Figura 14. Amostra CARB-0067. Imagem de CL em A. Fotomicrografias com polarizadores paralelos em B e D e imagens de CL em C e E. Detalhe para clasto dolomítico cimentado por dolomita recristalizada em A e trama dolomítica constituída por cristais irregulares em B e C. As imagens de CL (A, C e E) mostram a diferença de intensidade de luminescência entre calcita e dolomita em brecha dolomítica. Enquanto que a calcita é representada por tons escuros, a dolomita é marcada por tons mais claros em comparação, porém com zoneamento de cores que sugere recristalização em alguns domínios38

Figura 15. Pontos amostrados no Afloramento Ipanema visto em planta em A. Calcarenito bandado em lajedo em B. Calcarenitos com níveis brechados em amostras mesoscópicas em C e D39

Figura 16. Difratoograma de Raios-X representativo de amostras do Afloramento Ipanema. Importante notar que a encaixante é essencialmente constituída por calcita, enquanto que os veios são constituídos por dolomita. Amostra CARB-0078B em (a). Amostra CARB-0085 em (b). Amostra CARB-0088A+B em (c). Amostra CARB-0089B em (d)40

Figura 17. Testemunho de sondagem da amostra CARB-0080 em A. Testemunho de sondagem da amostra CARB-0082 em B. Análise QEMScan da amostra CARB-0080 em C. Análise QEMScan da amostra CARB-0082 em D. Testemunho de sondagem da amostra CARB-0083 em E. Testemunho de sondagem da amostra CARB-0086 em F. Análise QEMScan da amostra CARB-0083 em G. Análise QEMScan da amostra CARB-0086 em F. Detalhe para encaixante calcítica em todas as amostras e estrutura de

laminação constituída por dolomita e minerais em menor quantidade como microclínio e illita, além de vesícula calcítica evidente em B42

Figura 18. Amostra CARB-0089B. Análise QEMScan em A, testemunho de sondagem e B, fotomicrografias com polarizadores paralelos em C e E e imagens CL em D e F. Importante notar trama calcítica com laminações dolomíticas recortada por microfraturas preenchidas por calcita e dolomita em A. Detalhe para veio de dolomita em C e imagem CL evidenciando o contraste entre trama calcítica (vermelho escuro) e veios preenchidos por dolomita (vermelho claro) em D e F43

Figura 19. Amostra CARB-0078B. Análise QEMScan em A. Testemunho de sondagem em B, fotomicrografia com polarizadores paralelos em C. Imagem de CL em D. Fotomicrografias com polarizadores paralelos em E e F. Detalhe para encaixante calcítica com laminações de composição majoritariamente dolomítica em A, cavidades constituídas por cristais de calcita no centro e quartzo na borda em E e F e imagem CL do contato entre a encaixante calcítica, laminação de composição dolomítica, e estrutura de dissolução, de composição dolomítica recortando tanto a encaixante, quanto a laminação44

Figura 20. Amostragem para análise isotópica de carbono e oxigênio da amostra CARB-0052A. O gráfico mostra a variação nos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ para cada ponto analisado na amostra, de 1 a 16. Detalhe para valores mais negativos de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ nas estruturas preenchidas em amostra de brecha dolomítica quando comparado a encaixante. Valores para preenchimentos em negrito49

Figura 21. Amostragem para análise isotópica de carbono e oxigênio da amostra CARB-0054A. O gráfico mostra a variação nos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ para cada ponto analisado na amostra, de 1 a 13. Detalhe para valores mais negativos de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ nas estruturas preenchidas em amostra de dolomito quando comparado à encaixante. Valores para preenchimentos em negrito50

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Dados Isotópicos do Afloramento Fazenda Canaã. Amostras referentes a regiões com evidência de preenchimento estão em negrito. As demais, referem-se a amostras de regiões da rocha encaixante45

Tabela 2. Dados Isotópicos do Afloramento Achado. Amostras referentes a regiões com evidência de preenchimento estão em negrito. As demais, referem-se a amostras de regiões da rocha encaixante46/47

Tabela 3. Dados Isotópicos do Afloramento Ipanema. Amostras referentes a regiões com evidência de preenchimento estão em negrito. As demais, referem-se a amostras de regiões da rocha encaixante47

i. Estrutura da Dissertação

O presente trabalho de conclusão de mestrado pela Universidade de Brasília é apresentado na forma de artigo científico sob a seguinte titulação “**Caracterização Mineralógica e Estudo de Processos de Formação e Remobilização de Carbonatos da Formação Salitre**”. O trabalho é desenvolvido ao longo de 7 capítulos mais anexos: introdução; contexto regional; amostras e métodos; resultados, discussão, conclusão e isótopos de carbono e oxigênio: discussão de dados preliminares.

- O capítulo 1 introduz a hipótese central do trabalho, onde é estabelecida a problemática, os objetivos gerais e específicos do trabalho, além de pontos importantes para a compreensão do texto.
- O capítulo 2 trata do contexto geológico regional da área estudada, introduzindo a Bacia de Irecê e suas unidades, com foco na Unidade Nova América, unidade amostrada para este trabalho.
- O capítulo 3 aborda os materiais e métodos utilizados neste trabalho, onde é descrito desde o processo de amostragem até a metodologia utilizada na análise de dados.
- O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos a partir da caracterização mineral dos afloramentos amostrados por meio de técnicas de alta resolução. Inclui dados de Difração de Raios-X (DRX), Petrografia Ótica, QEMScan, Catodoluminescência (CL), Charge Contrast Imaging (CCI) e isótopos de carbono e oxigênio.
- O capítulo 5 apresenta uma discussão e correlação dos dados obtidos, abordando as principais feições investigadas do ponto de vista da interação entre os carbonatos estudados e fluidos hipogênicos.
- O capítulo 6 apresenta as principais conclusões do trabalho, com base na análise de dados e discussão dos resultados obtidos.

- O capítulo 7 contém os dados de isótopos obtidos para as rochas estudadas no projeto em análises pontuais.

ii. Apresentação do Problema

A extração de petróleo no sistema pré-sal representa hoje, aproximadamente 50% de todo óleo que é extraído no Brasil, número que deve chegar a 75% até o ano de 2026, segundo a Agência Nacional de Petróleo (ANP). Esses reservatórios são de natureza lagunar e constituídos essencialmente por rochas carbonáticas, e representam um sistema complexo e carstificado, além de ainda ser pouco compreendido e estudado (Della Porta *et al.* 2015). Até a descoberta do pré-sal, nos anos 2000, os reservatórios conhecidos e explorados eram hospedados em arenitos turbidíticos em ambiente marinho profundo utilizando técnicas relativamente simples. A descoberta do pré-sal elevou a pesquisa mineral de petróleo e gás a um novo patamar, onde a necessidade de autossuficiência e baixa na produção de óleo advindo de turbiditos levou a busca por conhecimento desses novos reservatórios.

A profundidade desses reservatórios, que pode chegar a 8000 metros, foi por muito tempo o principal fator que inviabilizava a extração de óleo nesses reservatórios, porém, com a evolução da tecnologia de perfuração nos últimos anos, a profundidade não é o mais o fator limitante. Hoje, o principal desafio da exploração desses reservatórios é entender como os processos secundários de dissolução e carstificação gerados durante a evolução da bacia carbonática controlam as propriedades do reservatório, como porosidade, permeabilidade e pressão capilar, além de um sistema fraturado e interligado responsável pela migração de fluidos nesse sistema.

Devido às dificuldades e inviabilidade de estudar diretamente as rochas reservatório do pré-sal, surgiu a necessidade de pesquisar análogos carbonáticos

atualmente expostos. Diante desse cenário, este trabalho busca compreender os processos envolvidos na dissolução e carstificação de carbonatos durante processos deformacionais e diagênese da bacia de Irecê. Particularmente será abordada a atuação de fluidos hipogênicos, a partir da definição e caracterização em alta resolução da mineralogia de veios, fraturas preenchidas e rocha encaixante através de técnicas analíticas avançadas.

iii. Justificativa

Os carbonatos da Formação Salitre estão inseridos na porção central da Bacia Neoproterozoica de Irecê, constituindo parte do Grupo Una e têm sido alvo de extensivos estudos no campo da estratigrafia e geologia estrutural, em um contexto amplamente regional (Guimarães *et al.* 2011; Misi *et al.* 2011; Caxito *et al.* 2012; e Drummond *et al.* 2015). Para esses autores a Formação Salitre é correspondente cronoestratigráfico da Formação Sete Lagoas, do Grupo Bambuí, com exceção de sua porção superior.

Na região de Irecê – BA, mais precisamente na Unidade Estratigráfica Nova América, esses carbonatos constituem um sistema complexo e heterogêneo que se encontra fraturado e densamente venulado. São frequentes nessas rochas fases minerais que resultam de processos diagenéticos e secundários, principalmente associados a migração de fluidos hipogênicos na bacia, diretamente associados aos processos de dissolução e carstificação. Esses processos atuam de forma heterogênea na bacia, controlados principalmente por estruturas e estão diretamente relacionados a evolução mineralógica desses carbonatos.

iv. Localização e Vias de Acesso

A área de estudo está localizada no Município de Irecê, localizado no centro-norte do Estado da Bahia (**Figura i**). O domínio da Bacia de Irecê possui uma extensão de

aproximadamente 31.500 Km² e engloba dezenas de municípios do sertão baiano, sendo Irecê o principal deles, distante 476 Km da capital do estado, Salvador.

v. Objetivos

O projeto tem como objetivo central a identificação, correlação e caracterização em alta resolução de fases minerais presentes nas estruturas distensivas das encaixantes carbonáticas da Formação Salitre. A partir da caracterização mineral dessas feições, espera-se avançar no entendimento da origem, migração e interações de fluidos hipogênicos responsáveis pelo preenchimento dessas estruturas. Se correta a hipótese de que a bacia acomoda fluidos hipogênicos, surgirá uma nova perspectiva na compreensão

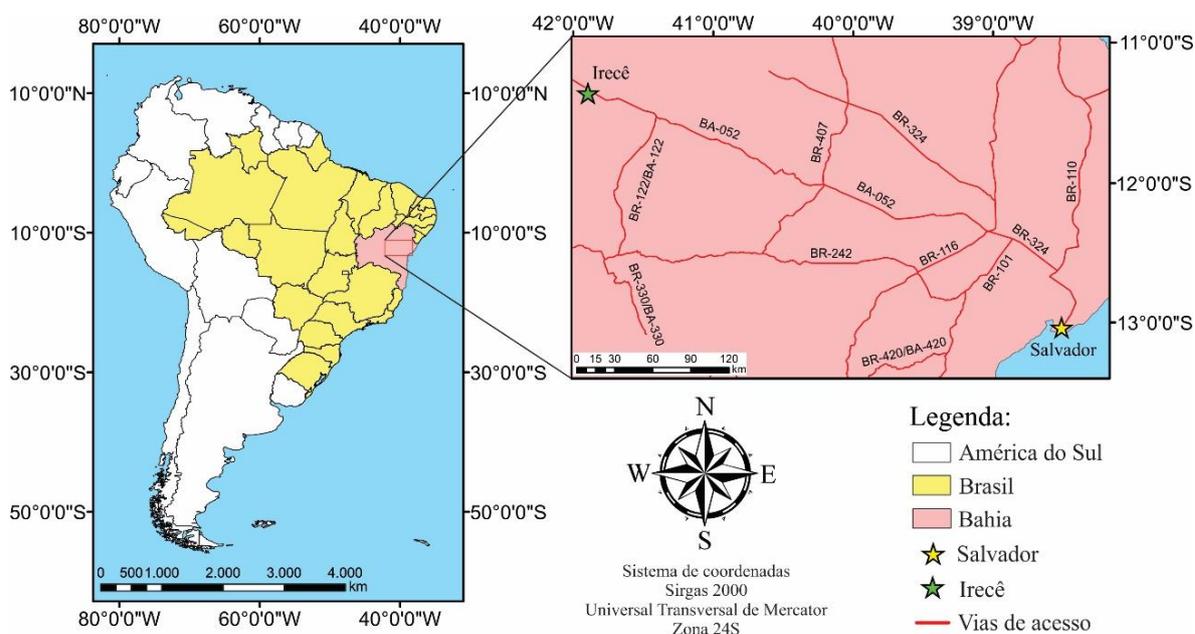


Figura i. Mapa de localização e vias de acesso do Município de Irecê, saindo da capital do estado, Salvador.

dos processos de dissolução, carstificação e remobilização de carbonatos em bacias neoproterozoicas, além da correlação desses processos com as propriedades reservatório dessas rochas como: porosidade, permeabilidade e pressão capilar, que poderão ser aplicados em outras bacias análogas.

Este trabalho apresenta uma caracterização mineralógica em alta resolução dos carbonatos da Formação Salitre, na Unidade Nova América, e suas feições distensivas preenchidas como veios, estruturas vesiculares e fraturas, conduzido a partir do estudo dos Afloramentos de Fazenda Canaã, Achado e Ipanema, na região de Irecê (**Figura i**). Para o estudo mineralógico foram utilizadas técnicas de Difração de Raios-X (DRX) e QEMScan, complementados por petrografia ótica, dados de catodoluminescência (CL) e imagens obtidas através da técnica Charge Contrast Imaging, obtidas utilizando Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

A caracterização mineral qualitativa e quantitativa dos veios e estruturas vesiculares foi feita a partir da técnica QEMScan, complementada pela difração de Raios-X e petrografia ótica, enquanto que as técnicas de catodoluminescência e CCI geraram dados que permitiram elucidar a relação entre as fases minerais observadas e feições texturais dessas rochas. O conjunto de dados gerados permitiu avaliar as interações entre rocha encaixante e fluidos hipogênicos responsáveis pela geração de fases minerais distintas e presentes na forma de veios e agregados vesiculares, além de processos heterogêneos e complexos de dissolução e carstificação observados nos afloramentos estudados.

Caracterização Mineralógica e Estudo de Processos de Formação e Remobilização de Carbonatos da Formação Salitre

Diego Canídia do Carmo Couto^{1*}; Paola Ferreira Barbosa¹; Roberto Ventura Santos¹;
Lucieth Cruz Vieira²; Elton Luiz Dantas²; Igor Augusto Pureza Taveira²; Cleber Peralta
Gomes Júnior²

¹Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy
Ribeiro, Asa Norte, 70910900 Brasília, DF, Brasil

*diego.gsia@hotmail.com

Resumo

As rochas carbonáticas da Formação Salitre, localizadas na Bacia de Irecê, vêm sendo foco de extensos estudos estratigráficos e estruturais em escala regional há várias décadas. Essas rochas despertam interesses econômicos pois hospedam depósitos de fosforitos, além de constituir um sistema análogo para estudo de processos envolvidos em ambientes reservatórios como o sistema petrolífero do pré-sal. Este estudo realiza pela primeira vez a integração dos dados de Difração de Raios-X (DRX), QEMScan, Petrografia Ótica, Catodoluminescência (CL) e Charge Contrast Imaging (CCI) para caracterização em alta resolução da mineralogia de estruturas distensivas preenchidas, além de um estudo de isótopos estáveis de carbono e oxigênio. A caracterização mineral dessas rochas revelou fases minerais distintas crescidas em estruturas venulares e vesiculares, ou em matriz e cimento carbonático presente em dolomitos, estromatólitos

colunares, calcarenitos e brechas carbonáticas. O estudo dessas fases minerais revela que existem feições pré e sin-diagenéticas parcialmente preservadas e que as estruturas distensivas observadas na forma de veios e vesículas estão associadas à interação dessas rochas com fluidos hipogênicos.

Palavras-chave: carbonatos; fluidos hipogênicos; caracterização mineral; estruturas preenchidas; dolomitização

Abstract

Salitre Formation's carbonate rocks, Irecê Basin, Bahia, Brazil, have been the focus of extensive stratigraphic and structural studies in basin scale for several decades. There is economic interest as they host phosphorites deposits, and also for being an analogous system for processes involved in reservoir environments formation such as the pre-salt oil system. This study performs for the first time the integration of X-Ray Diffraction (XRD), QEMScan, Optical Petrography, Catodoluminescence (CL) and Charge Contrast Imaging (CCI) data for high resolution characterization of the filled mineralogy of distensive structures, in addition to a study of stable carbon and oxygen isotopes. The mineral characterization of these rocks revealed distinct mineral phases grown in vein and vesicle structures, or in matrix and carbonate cement present in dolostones, columnar stromatolites, calcarenites and carbonate gaps. The study of these mineral phases reveals that there are partially preserved pre- and syn-diagenetic features and that the distensive structures observed in the form of veins and vesicles are associated with the interaction of these rocks with hydrothermal fluids. These fluids play an important role in the dissolution, karstification and remobilization of carbonates, important processes in the study of carbonates in mineral deposit systems or reservoir rock.

Keywords: carbonates; hypogenic fluids; mineral characterization; filled structures; dolomitization

1. Introdução

A diagênese consiste em qualquer mudança física ou química nos sedimentos ou rochas sedimentares após a deposição, excluindo processos intempéricos e metamórficos e envolvendo diferentes processos, ambientes e profundidade (Jackson, 1997). Já o hidrotermalismo é definido como alterações na rocha as quais ocorrem sob condições de soterramento, geradas a partir da interação da rocha encaixante com fluidos de temperatura elevada que migram de fora para dentro do sistema através de fraturas e falhas (Sverjensky, 1981). Esse processo resulta no preenchimento de estruturas distensivas, dolomitização e até mesmo na formação de depósitos minerais. Além do preenchimento de estruturas distensivas, pode levar ainda à obliteração e formação de porosidade através de processos de dissolução. Uma importante questão relativa a esses processos refere-se ao *timing* e origem dos fluidos relacionados aos processos de dolomitização e hipogênese (Bjørlykke e Høeg, 1997; Navarro-Ciurana *et al.* 2016; Cazarin *et al.* 2019). Em geral, os estudos que abordam esse tema relacionam os fluidos tanto a fontes externas à bacia quanto à fontes internas relacionadas aos processos de compactação. Uma abordagem mineralógica dessa questão pode trazer informações importantes sobre os mecanismos que controlam a migração desses fluidos.

Os carbonatos da Formação Salitre localizam-se na porção centro-norte do Estado da Bahia, Brasil. Essas rochas ocorrem inseridas na porção central da Bacia Neoproterozóica de Irecê, constituindo parte do Grupo Una. Essa unidade tem sido alvo de extensivos estudos no campo da estratigrafia e geologia estrutural, em um contexto amplamente regional (Guimarães *et al.* 2011; Misi *et al.* 2011; Caxito *et al.* 2012; e Drummond *et al.*

2015). Na região de Irecê-BA, na Unidade Estratigráfica Nova América, esses carbonatos constituem um sistema complexo e heterogêneo que se encontra fraturado e densamente venulado, onde suas fases minerais resultam de processos diagenéticos e secundários, principalmente associados à interação desses carbonatos com fluidos hipogênicos na bacia, correlacionados aos processos de dissolução e carstificação. Esses processos atuam de forma heterogênea na bacia controlados por estruturas regionais e ocorrem diretamente associados à evolução mineralógica desses carbonatos.

O presente estudo utiliza realiza uma caracterização mineralógica em alta resolução de carbonatos inseridos em um contexto distensivo, conduzido a partir do estudo dos Afloramentos de Fazenda Canaã, Achado e Ipanema. A caracterização mineral qualitativa e quantitativa foi realizada a partir da combinação das técnicas de Difração de Raios-X e QEMScan, complementadas por um estudo de Petrografia Ótica, enquanto que as técnicas de Catodoluminescência e Contrast Imaging geraram dados que permitiram elucidar a relação entre as fases minerais observadas e feições texturais dessas rochas. Os dados gerados permitiram avaliar os processos de interação entre rocha e fluidos hipogênicos responsáveis pela geração de fases minerais distintas e descritas na forma de veios e agregados vesiculares, além de processos heterogêneos e complexos de dissolução e carstificação. O estudo realiza ainda uma análise isotópica de carbono e oxigênio como ferramenta para investigar fonte e gradiente de temperatura do fluido responsável pelo preenchimento das estruturas distensivas dos carbonatos estudados.

2. Contexto Regional

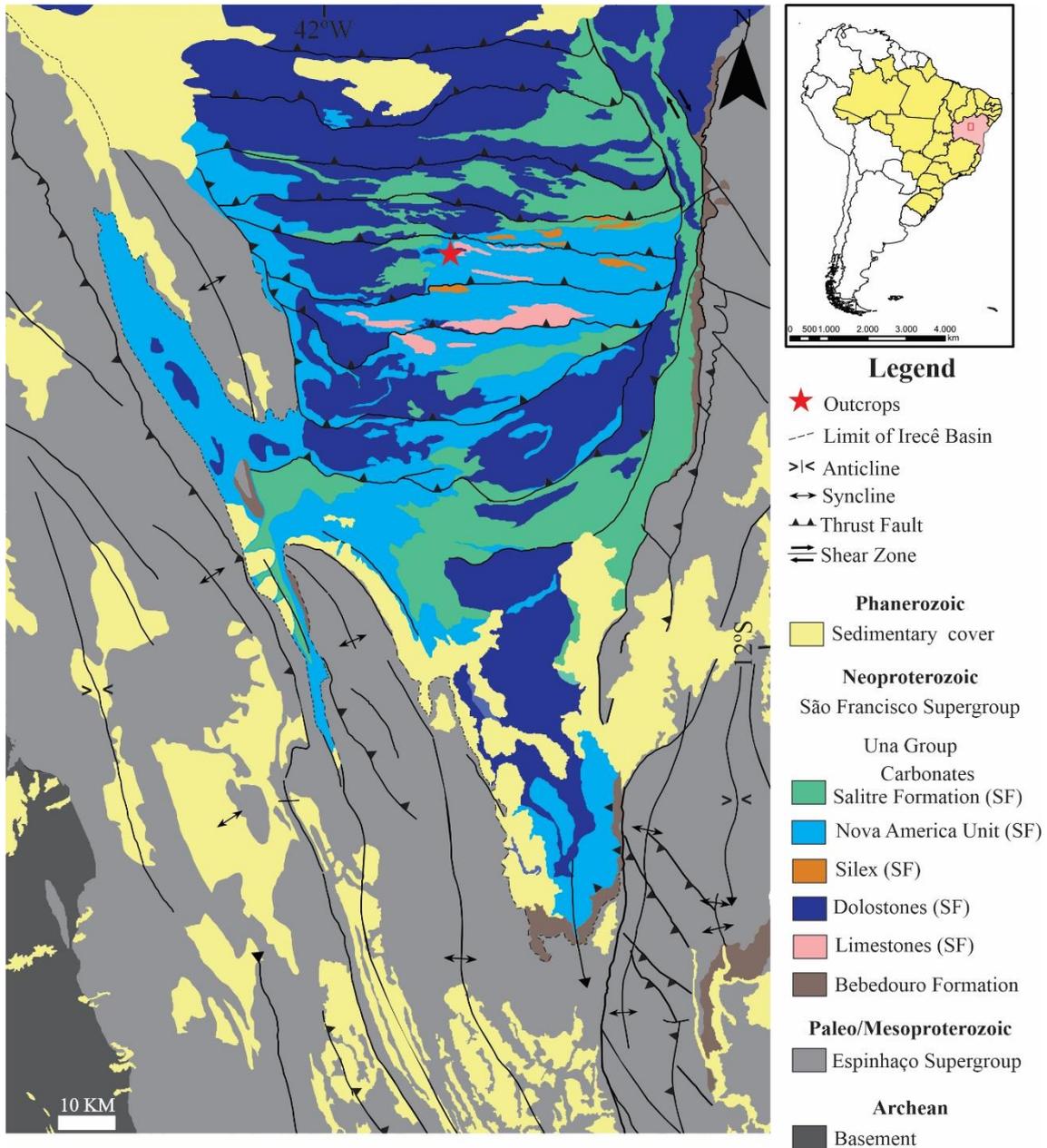


Figura 1. Mapa geológico da Bacia Neoproterozoica de Irecê em contexto regional. Afloramentos de Fazenda Canaã, Achado e Ipanema representados pela estrela vermelha. Mapa modificado de CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais), Alkmim (2004), Kuchenbecker *et al.* (2013) e Redivo *et al.* (2019).

As rochas da Formação Salitre, alvo deste presente trabalho, integram o Grupo Una, pertencente ao Supergrupo São Francisco, de idade Neoproterozoica e estão inseridas na Bacia de Irecê (Neoproterozoico) e contemplam a porção centro-norte do Cráton São Francisco.

2.1. Contexto Tectônico

A Bacia Neoproterozoica de Irecê constitui a principal ocorrência de coberturas sedimentares neoproterozóicas na porção centro-norte do Cráton São Francisco. Nessa região afloram as rochas neoproterozoicas do Grupo Una, que recobrem o Supergrupo Espinhaço e seu embasamento (Danderfer *et al.* 2009; Fuck *et al.* 1993) e são constituídas por depósitos glácio-marinhos da Formação Bebedouro (Oliveira e Leonardos, 1943; Guimarães, 1996) na base sobrepostas de forma discordante pelas rochas carbonáticas da Formação Salitre (Branner, 1911).

2.2. Grupo Una

O Grupo Una é constituído por diamictitos glaciais marinhos recobertos por calcários interglaciais, ambos da Formação Bebedouro, na base, e dolomitos e rochas siliciclásticas dos membros Nova América, Gabriel, Jussara e Irecê, da Formação Salitre no topo (Teixeira *et al.* 2010; Misi *et al.* 2011; Alkmin e Martins-Neto, 2012; Caxito *et al.* 2012).

O Grupo Una ocorre em contato discordante erosivo e angular com as unidades sotopostas dos Grupos Chapada Diamantina e Espinhaço, do Mesoproterozoico, e sobre as rochas do embasamento Arqueano-Paleoproterozóico (Guimarães, 1996).

As rochas do Grupo Una fazem parte do Supergrupo São Francisco (Barbosa *et al.* 2012) e ocorrem em parte das Bacias de Irecê, Ituaçu, Salitre e Una-Utinga. A sucessão de carbonatos do Grupo Una é correspondente cronoestratigráfico ao Grupo Bambuí na Bacia do São Francisco, sendo formado pelas formações Bebedouro (glacial) e Salitre (calcário) (Misi *et al.* 2007; Misi e Veizer, 1998).

2.3. Formação Salitre

A Formação Salitre foi descrita por Hartt e Agassiz (1870) como uma escarpa de carbonato com nódulos de sílica. Essa formação compreende a grande maioria das rochas do Grupo Una e é constituída por uma sucessão de rochas carbonáticas com intercalações terrígenas geralmente não descritas, constituindo pacotes que, dispostas verticalmente, compõem “ciclos” da ordem de centenas de metros de espessura, correlacionáveis em escala de bacia (Misi e Souto, 1975; Misi, 1979; Bomfim *et al.* 1985; Souza *et al.* 1993). Essencialmente, as rochas da Formação Salitre registram um ambiente de plataforma dominada por marés (Souza *et al.* 1993), depositadas em ambiente marinho raso (Branner, 1911) e interpretadas como resultado da transgressão marinha generalizada que atuou no antepaís brasileiro (Leão & Dominguez, 1992).

As formações Bebedouro e Salitre formam uma sucessão de 1,2 km de espessura, correlatas ao Grupo Bambuí da Bacia do São Francisco. Nessa configuração, a Formação Bebedouro é equivalente à Formação Glaciogênica Jequitaí, enquanto que a Formação Salitre é equivalente à Formação Sete Lagoas, do Grupo Bambuí, com exceção de sua porção superior (Guimarães *et al.* 2011; Misi *et al.* 2011; Caxito *et al.* 2012; Drummond *et al.* 2015). A primeira subdivisão litoestratigráfica com silicatos associados da Formação Salitre foi proposta por Misi e Souto (1975), que a subdividiram em 5 unidades (C, B, B1, A e A1).

A exposição da Formação Salitre, juntamente da Formação Bebedouro, ocorre exclusivamente em sinclinais denominados de Una-Utinga, Ituaçu, Irecê e Salitre, na região da Chapada Diamantina e divide-se entre as rochas glácio-marinhas da Formação Bebedouro e as unidades da Formação Salitre (Bomfim *et al.* 1985; Souza *et al.* 1993). O empilhamento e a repetição dessas unidades informais, sugerem uma natureza cíclica da

sucessão, marcada por quatro tendências alternativas de sedimentação, chamado de “Ciclos”: dois ciclos transgressivos (II e IV) e dois regressivos (I e III).

2.4. Unidade Nova América

Bomfim *et al.* (1985) relacionaram a Unidade Nova América a um ciclo regressivo (II). Essa unidade apresenta estruturas sedimentares típicas de ambiente de submaré a supramaré, tais como tapetes algais, estruturas do tipo “*tepees*”, intraclastos, laminação cruzada e estruturas do tipo “*bird eyes*”, em diversos pontos de sua área de ocorrência, como nos arredores a sul de Lapão e no Povoado de Achado.

A Unidade Nova América compreende os afloramentos abordados neste trabalho, sendo representado pelos Afloramentos de Fazenda Canaã, Achado e Ipanema, localizados aos arredores do Município de Irecê – BA. Esses afloramentos são constituídos por dolarenitos, dolomitos, calcarenitos, calcilutitos, brechas e estromatólitos fosforíticos de pequeno porte do tipo *Jurusania* (*Krylov*) e que apresentam alto interesse econômico segundo (Bomfim *et al.* 1985). Santana (2016) analisou fácies, ciclos e datas da porção basal da unidade por U-Pb (SHRIMP), onde o zircão mais jovem apresentou a idade de 669 ± 14 Ma de idade.

3. Amostras e Métodos

Foram coletados 79 testemunhos com 12 a 23 cm de comprimento e 3 cm de diâmetro utilizando plugadeira manual. Calcarenitos, dolomitos, estromatólitos colunares e brechas carbonáticas foram os litotipos amostrados. Os afloramentos foram amostrados baseado nas diferentes feições litofaciológicas observadas. Os testemunhos foram descritos e preparados para a confecção de lâminas delgadas polidas impregnadas com corante azul.

3.1. Caracterização Mineral

A caracterização da assembleia mineral foi feita utilizando as técnicas de Microscopia Ótica, Difração de Raios-X e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), por meio das técnicas de QEMScan, *Charge Contrast Imaging* e Catodoluminescência (CL). A análise de CL foi realizada no Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista (UNESP), no campus de Rio Claro - SP, enquanto todas as demais análises foram realizadas nos laboratórios do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG - UnB), Brasília – DF, Brasil.

3.2. Difração de Raios-X

Para análise de DRX, 56 amostras de testemunho foram selecionadas, preparadas e analisadas qualitativamente no Laboratório de Raios-X da Universidade de Brasília, utilizando-se o método de Difração de Raios-X do pó em amostra total em um difratômetro Rigaku: Modelo Ultima IV, operando com tubo de cobre acoplado e filtro de níquel, sob 30 kV e 15 mA com ângulo de varredura variando entre 5° e 60° 2 θ .

Inicialmente, as amostras foram pulverizadas na fração argila (< 2 μ m) em almofariz de ágata para análise de amostra total. A partir da análise dos difratogramas gerados, os minerais são identificados com apoio do software JADE 9.0 da MDI, que dispõe de rotinas de busca automática de picos e pesquisa de possíveis minerais no banco de dados mineralógicos do *International Center for Diffraction Data (ICDD)*.

3.3. Microscopia ótica

A microscopia ótica foi realizada em 107 lâminas delgadas polidas no Laboratório de Microscopia da Universidade de Brasília utilizando os microscópicos Zeiss Imager.A2m e Olympus BX60. A técnica foi utilizada com o objetivo de reconhecer, em microescala, a mineralogia dessas rochas e identificar previamente feições texturais e fases minerais

além de calcita e dolomita, que é a paragênese mais comum desses carbonatos. Além da caracterização preliminar das rochas, a técnica possibilita a análise de feições texturais como arranjo dos grãos, contato entre os minerais que constituem sua paragênese, matriz e porosidade. No processo de descrição petrográfica, algumas lâminas foram tingidas com alizarina-S, uma técnica eficaz na diferenciação ótica entre calcita e dolomita devido ao tingimento da calcita de vermelho por meio de sua reação com o reagente.

3.4. QEMScan

Para a caracterização mineral de alta resolução das amostras, foram analisadas 94 lâminas delgadas polidas, utilizando a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) no Laboratório de Microscopia Eletrônica do IG – UnB. As lâminas foram metalizadas com carbono e estudadas qualitativamente e quantitativamente por meio de um analisador QEMScan, modelo Quanta FEI 650F, acoplado ao MEV com auxílio de dois sensores EDS Bruker (*energy dispersive spectrometer*), em uma análise automatizada. As condições para análises foram: alto vácuo, feixe de corrente de 10 nA e voltagem de aceleração de 15 kV em mapas composicionais de 15 µm de resolução.

Na análise QEMSCAN, os detectores EDS são utilizados para atribuir identidades minerais a cada ponto de medição baseado em um banco de dados previamente configurado, comparando o sinal de BSE e espectro de EDS obtido em tempo real a um banco de dados de identificação de mineral. A aquisição de dados no QEMScan possibilita a identificação dos minerais de acordo com a proporção de elementos químicos. Como o método compara os dados obtidos com o banco de dados pré-existente, é importante uma caracterização mineral prévia anterior à aplicação desse método, que neste trabalho foram os métodos de Difração de Raios-X e Petrografia Ótica.

3.5. Catodoluminescência

Para a caracterização textural e análise detalhada das estruturas distensivas preenchidas, por meio do estudo do contraste de luminescência entre calcita e dolomita, foi utilizada a técnica de Catodoluminescência (CL) em amostras selecionadas. A análise foi realizada no centro UNESPetro da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus Rio Claro em microscópio de luz polarizada Zeiss Axio Scope.A1 equipado com a catodoluminescência ótica CITL mk5. As condições para análises foram: vácuo entre 40 e 25 mTorr, feixe de corrente de 10 nA e voltagem de aceleração de 11kV.

Quando seções delgadas de rochas ou minerais são examinadas através da luminescência produzida por impacto de elétrons energéticos, estruturas são frequentemente evidentes (características texturais, impurezas e defeitos na estrutura do cristal), as quais são invisíveis sob luz ordinária branca ou polarizada. Estas estruturas luminescentes podem dar importantes indícios a respeito da origem ou história do material (Sippel & Glover, 1965).

Os inibidores da luminescência ativada por Mn^{2+} em carbonatos são Fe^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} e Fe^{3+} . O Fe^{2+} , geralmente é considerado o único inibidor de carbonatos naturais, porém Fe^{3+} e Ni^{2+} são provavelmente os ativadores mais importantes em alguns casos (Machel *et al.* 1991). As concentrações nas quais os inibidores são mais eficazes podem variar de acordo com cada elemento. Concentrações mínimas efetivas com valores abaixo de 30-35 ppm foram relatadas em estudos de fotoluminescência (Gies, 1976) e inibidores podem ser mais eficazes na CL também em baixas concentrações. A interação de Mn^{2+} e Fe total (Fe^{2+} e Fe^{3+}) na determinação das características de luminescência dos carbonatos naturais ainda não é bem caracterizada, diferentemente da relação entre Fe^{2+}/Mn^{2+} onde isso parece possível. Nessa condição, as concentrações absolutas de Mn^{2+} e Fe^{2+}

determinam e controlam a intensidade de luminescência dessas rochas (Habermann, 1997).

3.6. Charge Contrast Imaging

O *Charge Contrast Imaging* (CCI) é uma técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) que utiliza análise em baixo vácuo de amostras não metalizadas, fotografadas com um detector de elétrons secundário. As análises foram realizadas utilizando o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) JEOL Quanta 450 no Laboratório de Geocronologia da Universidade de Brasília. As condições para análises foram: baixo vácuo, feixe de corrente de 10 nA e voltagem de aceleração de 20 kV.

Como nem todos os carbonatos apresentam forte catodoluminescência devido à ausência de íons ativadores tais como Mn^{2+} , o CCI pode ser utilizado para a caracterização de zoneamento composicional e de feições de microfraturamento, além de refinamento das imagens CL, como mostrado na amostra CARB-0023A (Figura 6). Seções polidas de carbonatos são comumente examinadas por MEV, utilizando imagem retroespalhada (BSE) ou CL, enquanto que o CCI, tem sido utilizado para observar a zonação diagenética complexa em carbonatos (Lee, 2000; Lee *et al.* 2005).

O CCI é um método que se assemelha ao método de CL. Ambos os métodos apresentam imagens de alterações na composição química e microfraturamento (Griffin, 1997). No caso do CCI, em vez desses fatores causarem a liberação de fótons, a diferença mínima na carga superficial causa uma pequena diferença na emissão de elétrons, o que leva a variações no contraste de tom de cinza (Doehne e Carson, 2001). Resultando em detalhes não evidenciados com a CL.

4. Resultados

Dolomitos, calcarenitos, brechas carbonáticas e estromatólitos colunares do gênero *Jurussia Krylov* são os principais litotipos amostrados nos afloramentos estudados neste trabalho. Esses diferentes litotipos apresentam diferenças faciológicas significativas, o que associado à intensidade de deformação e fraturamento, controlam a natureza da interação de fluidos hipogênicos com essas rochas.

4.1. Afloramento Fazenda Canaã

O Afloramento Fazenda Canaã é constituído por dolomitos e estromatólitos colunares. Em análise mesoscópica observa-se que essas rochas apresentam granulometria silte a areia muito fina, ocorrem laminadas, são essencialmente constituídas por dolomita e apresentam estruturas distensivas na forma de veios e agregados vesiculares preenchidos por calcita. A **Figura 2** mostra o afloramento em planta e os principais litotipos encontrados.

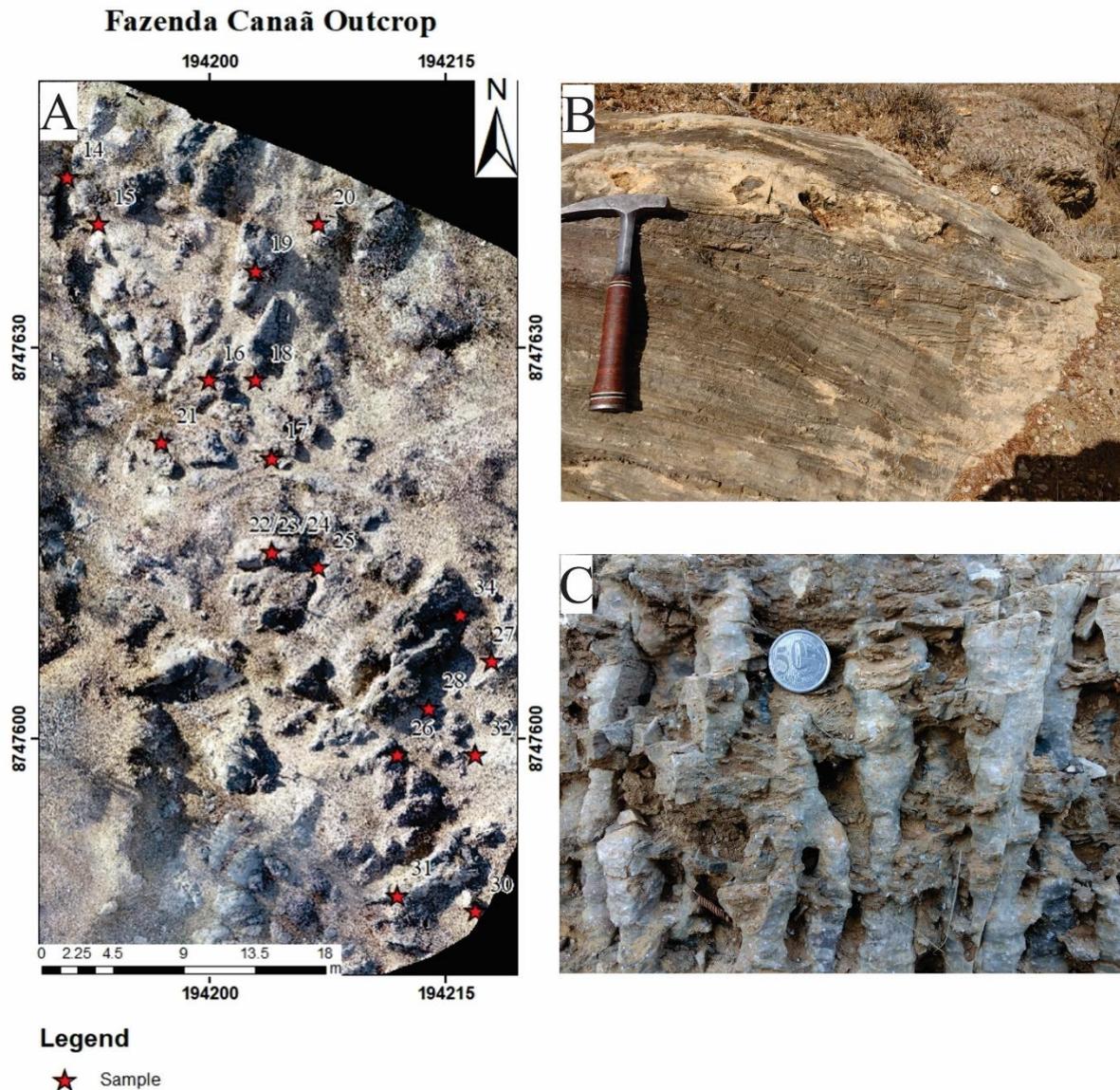


Figura 2. Pontos amostrados no Afloramento Fazenda Canaã visto em planta em A. Dolomito laminado em B. Estromatólito colunar em C.

A análise de Difração de Raios-X do pó de amostras do afloramento mostra que, além de dolomita e calcita, essas rochas também apresentam fluorapatita, quartzo e caulinita (**Figura 3**). A análise QEMScan e petrografia ótica de amostras da **Figura 4** mostram que a encaixante dolomítica é essencialmente constituída por matriz dolomítica com estruturas preenchidas por calcita. A correlação desses dados mostra que calcita é a principal fase mineral que preenche os veios e vesículas, ocorrendo associada a quartzo em suas bordas em alguns domínios. Essas estruturas organizam-se de duas maneiras,

ocorrendo em escala submilimétrica a milimétrica paralelas às estruturas de laminação da rocha e também em um arranjo caótico em estruturas submilimétricas.

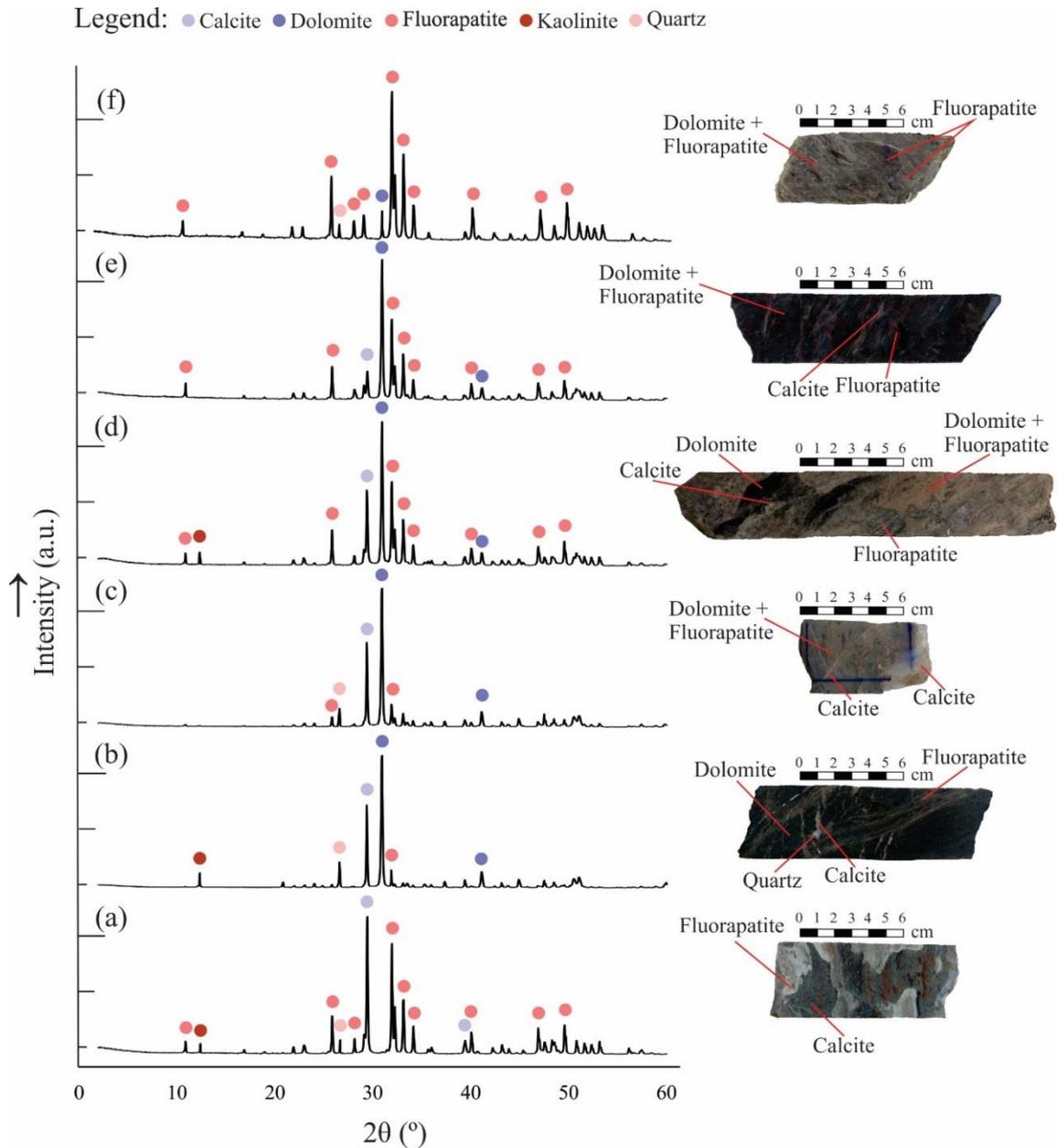


Figura 3. Difratoograma de Raios-X representativo de amostras do Afloramento Canaã. Importante notar que a encaixante é essencialmente constituída por dolomita e fluorapatita, enquanto que os veios são constituídos por calcita. Amostra CARB-0015 em (a). Amostra CARB-0023A em (b). Amostra CARB-0024 em (c). Amostra CARB-0026B em (d). Amostra CARB-0030A em (e). Amostra CARB-0033 em (f).

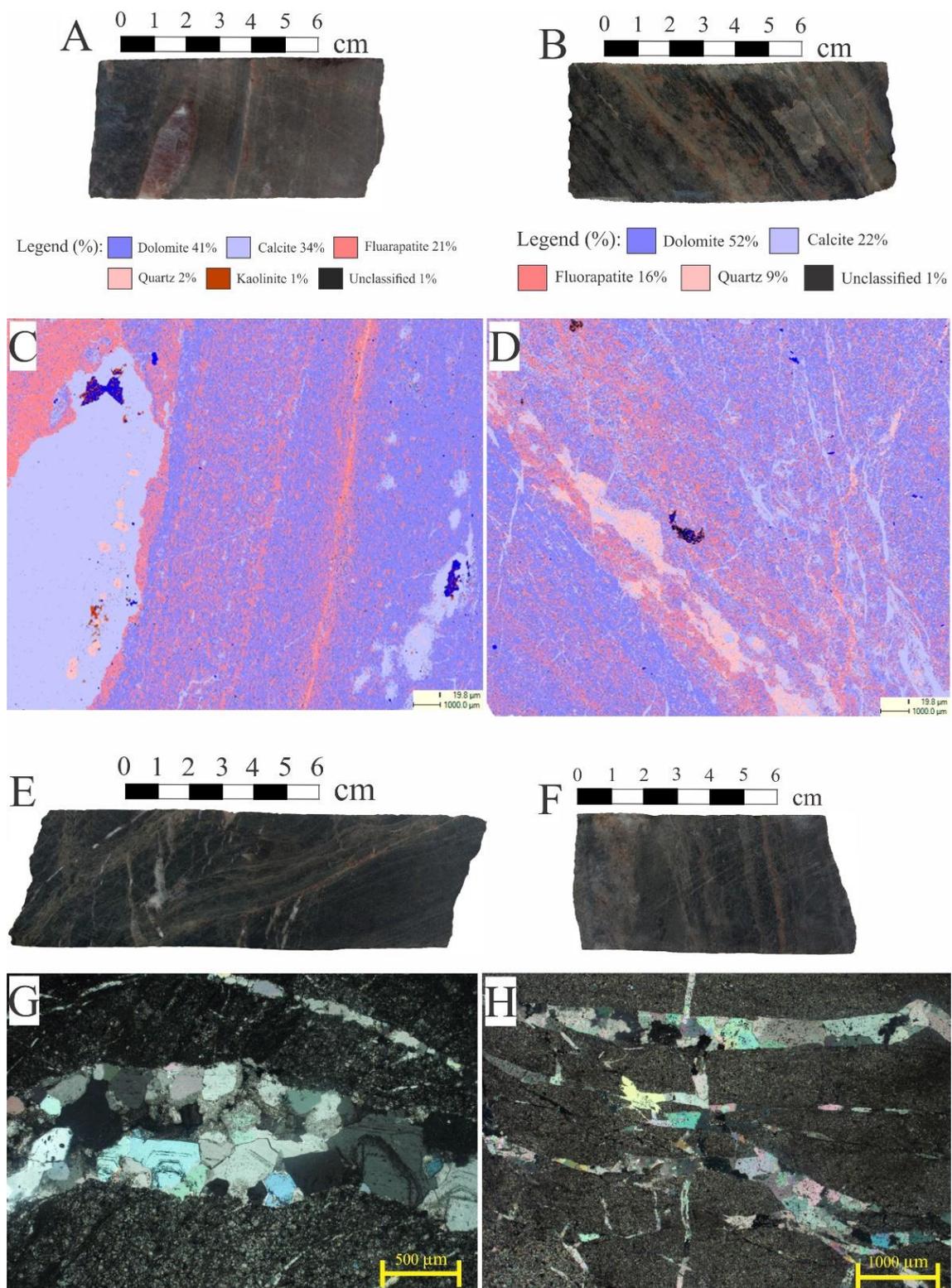


Figura 4. Testemunho de sondagem da amostra CARB-0021 em A. Testemunho de sondagem da amostra CARB-0027 em B. Análise QEMScan da amostra CARB-0021 em C. Análise QEMScan da amostra CARB-0027 em D. Testemunhos de sondagem das amostras CARB-0023A em E e CARB-0028B em F. Fotomicrografias com polarizadores cruzados em G da amostra CARB-0023A e H da amostra CARB-0028B. Detalhe para vesícula milimétrica em C, veios calcíticos caóticos associados com quartzo em D, veio milimétrico paralelo a laminação em G e veios submilimétricos com arranjo caótica em H.

Legend (%): Dolomite 52% Calcite 18% Fluorapatite 11% Pores 1%

Quartz 9% Unclassified 5% Kaolinite 2% Microcline 1% Illite 1%

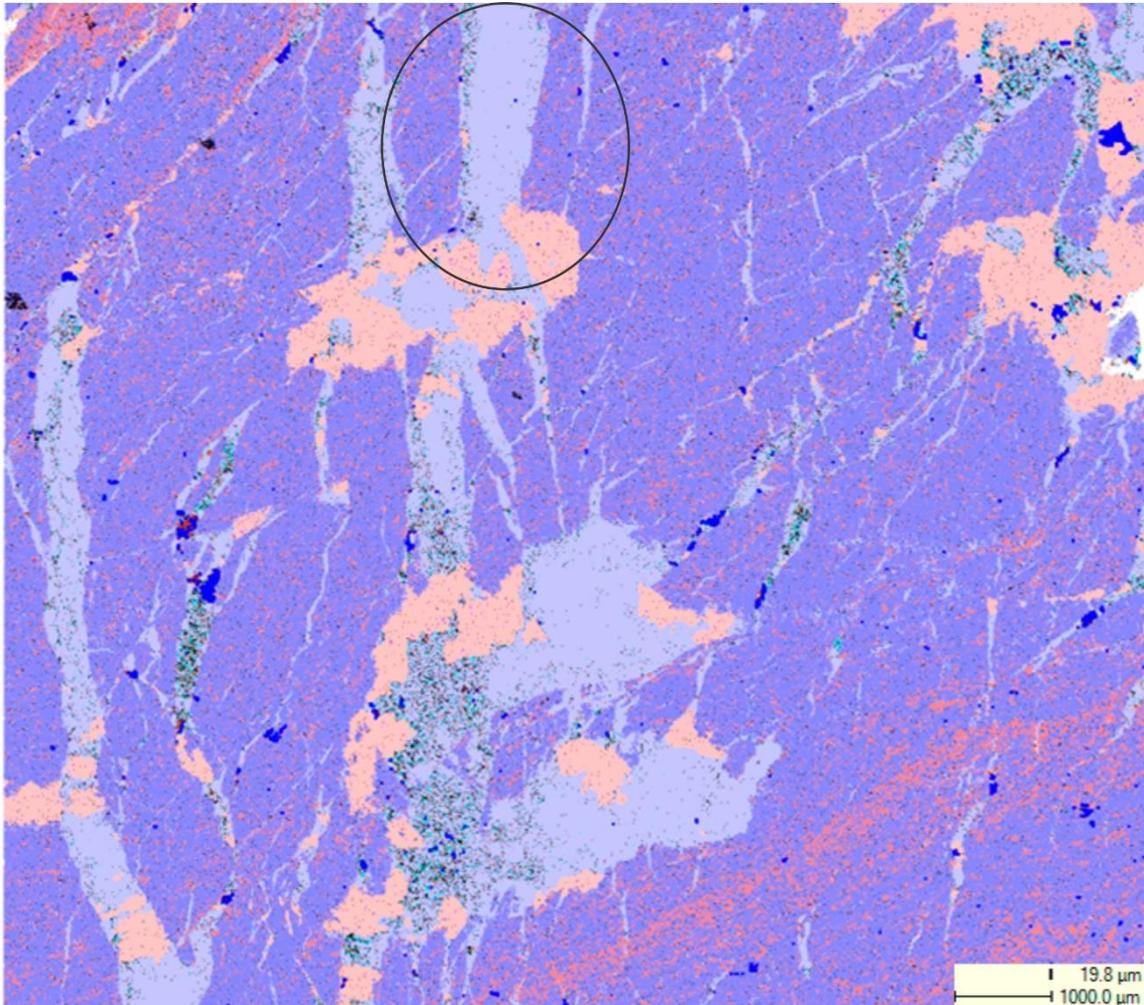


Figura 5. Análise QEMScan da amostra CARB-0023A. Detalhe para veios de calcita submilimétricos a milimétricos associados a quartzo, feldspato potássico e illita.

Além da caracterização das estruturas distensivas, a correlação desses dados mostra que a fluorapatita define estruturas de laminação desses carbonatos, ocorrendo segundo um arranjo bandado.

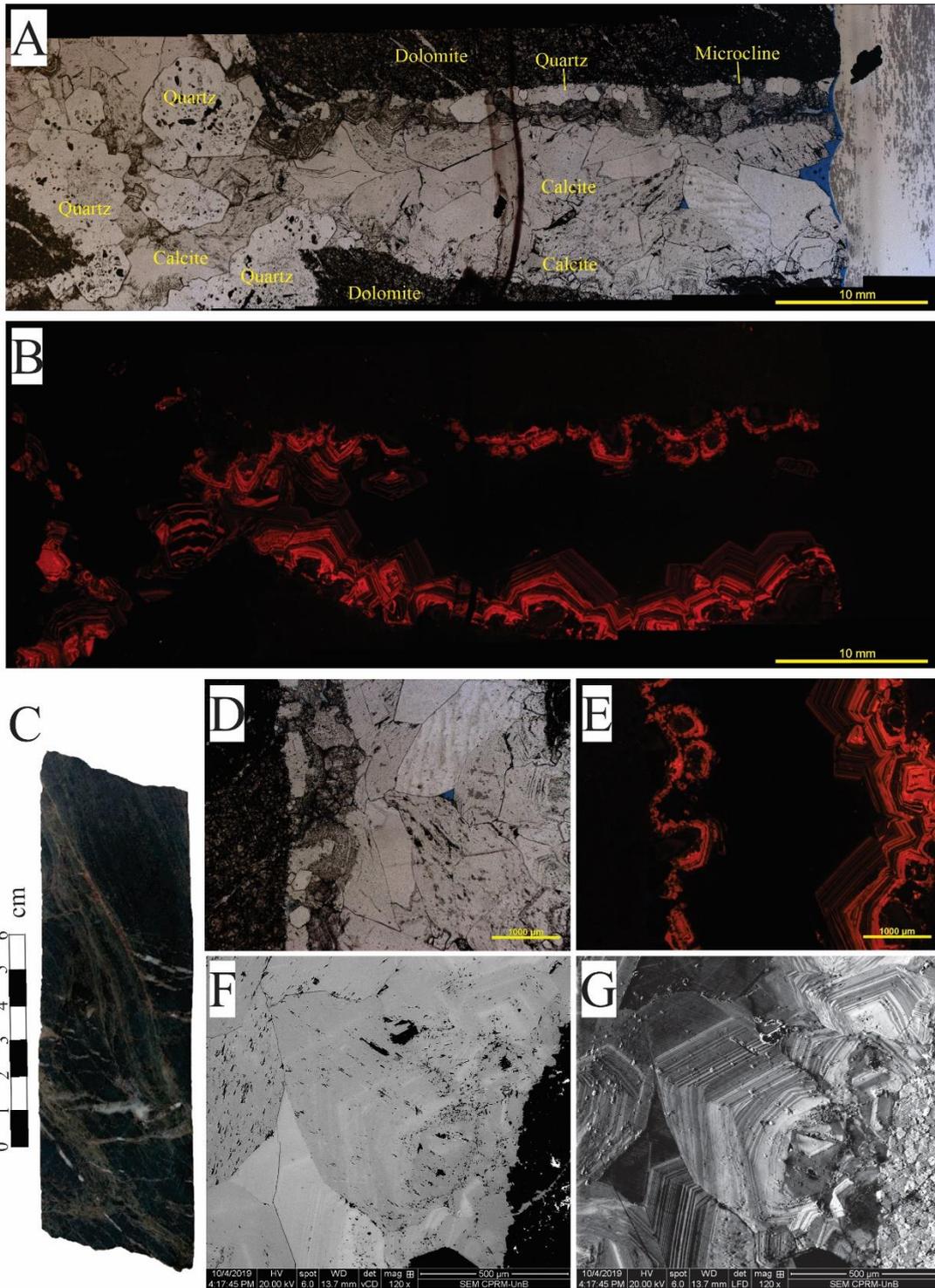


Figura 6. Amostra CARB-0023A. Fotomicrografia em mosaico com polarizadores paralelos em A. Imagem CL em mosaico em B. Testemunho de sondagem em C. Fotomicrografia com polarizadores paralelos em D. Imagem CL em E. Imagem de backscattering em F. Imagem CCI em G. Detalhe para a imagem CL em mosaico mostrando luminescência decrescente da borda para o centro do veio, evidenciando veio de calcita com bordas dolomitizadas em B e zonação dos cristais de dolomita decorrentes do processo de dolomitização do veio de calcita em imagem de CCI em G.

A Análise QEMScan da amostra CARB-0023A (**Figura 5**) revela que microcristais de microclínio, caulinita e illita ocorrem de forma conjunta nos veios e agregados vesiculares.

A análise de Catodoluminescência (CL), *Charge Contrast Imaging* (CCI) do veio de calcita da amostra CARB-0023A (**Figura 6**) mostra luminescência decrescente da borda para o centro, evidenciando zoneamento composicional. Esse zoneamento e intensidade de luminescência são ativados pela presença de Mn^{2+} , decorrente provavelmente da interação da rocha com fluidos hipogênicos que contenha Mn^{2+} .

4.2. Afloramento Achado

Dolomitos, estromatólitos colunares e brechas carbonáticas são os principais litotipos encontrados no Afloramento Achado (**Figura 7**). Em análise mesoscópica essas rochas apresentam granulometria areia fina a areia grossa e são essencialmente constituídas por dolomita e recortadas por veios e vesículas constituídos por calcita.

A análise dos picos de intensidade do DRX (**Figura 8**) de amostras do afloramento indica que além de calcita e dolomita, essas rochas também apresentam em sua associação mineral: fluorapatita, quartzo, caulinita, microclínio e illita.

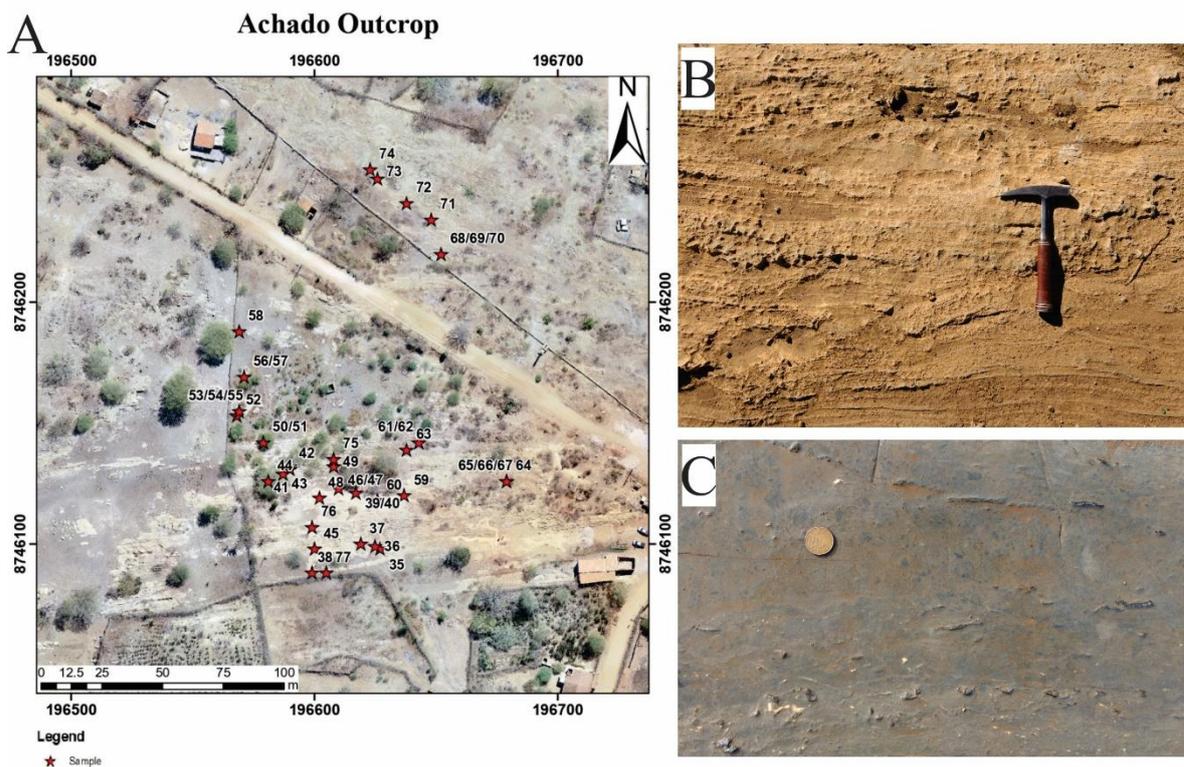


Figura 7. Pontos amostrados no Afloramento Achado visto em planta em A. Dolomito em lajedo em B. Nível brechado em C.

Amostras tingidas com o corante alizarina-S tiveram realçadas as relações texturais entre calcita e dolomita. O corante reage com a calcita, destacada em vermelho. Feições de dissolução em veios calcíticos, sobrecrecimento de calcita em cimento dolomítico e dolomita zonada podem ser observadas nas amostras da **Figura 9**. A petrografia ótica com lâminas tingidas também mostra, em maior nível de detalhamento, feições não acessadas com os outros métodos aplicados neste trabalho, como veios e agregados vesiculares preenchidos por calcita e porosidade intracristalina (**Figura 9**).

A correlação de dados de QEMScan, CL e petrográficos desse afloramento evidenciam a presença de matriz dolomítica recristalizada (**Figura 9**), além de alguns poros primários possivelmente diagenéticos preenchidos por calcita e quartzo (**Figura 10**) e posteriormente dolomitizados. Esses dados também revelam que o afloramento apresenta domínios brechados e níveis dominados por estromatólitos colunares. Os estromatólitos colunares são constituídos por fluorapatita em matriz dolomítica com

domínios recristalizado, além de apresentarem menor densidade de estruturas distensivas preenchidas quando comparados aos dolomitos e brechas.

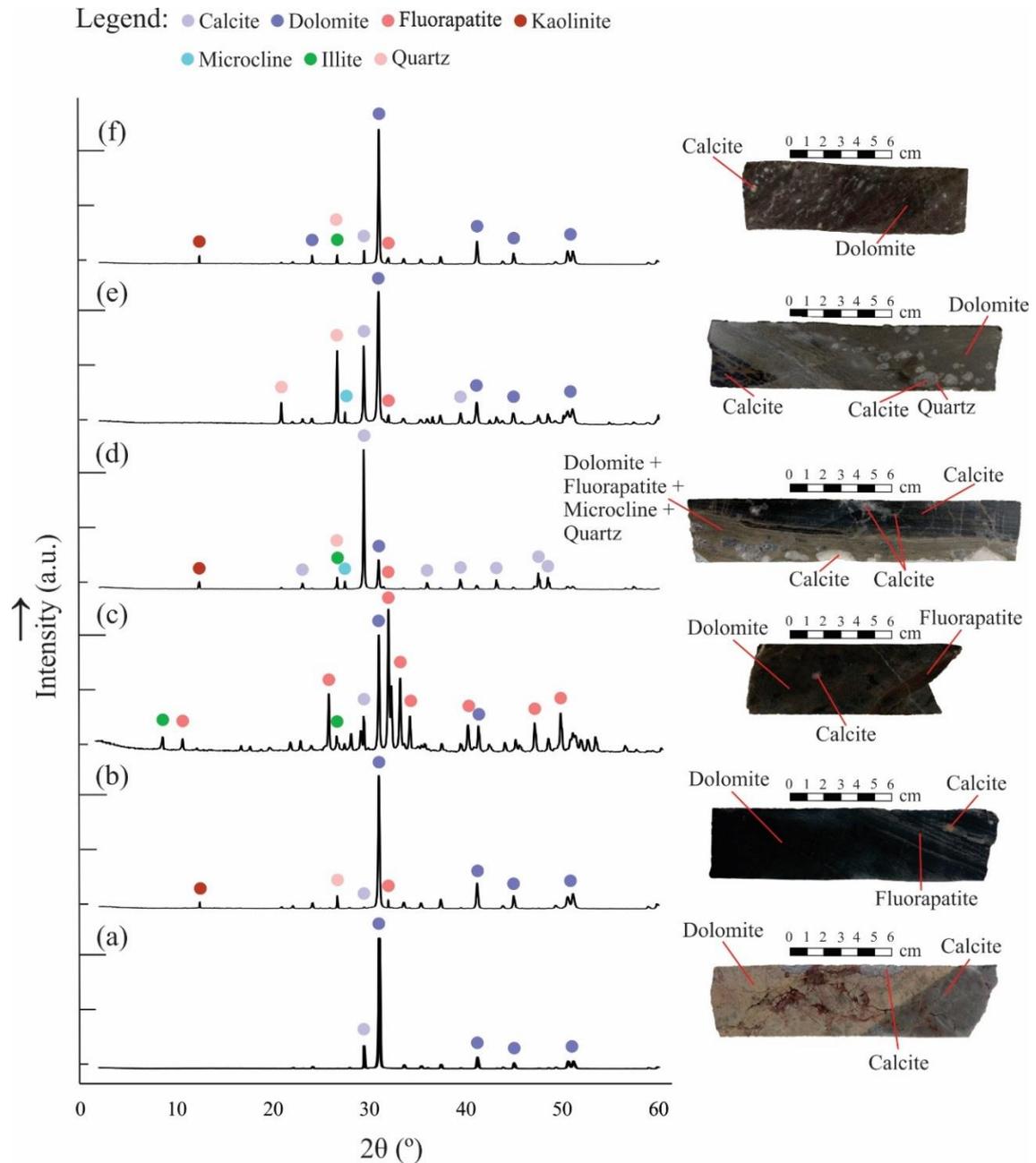


Figura 8. Difratoograma de Raios-X representativo de amostras do Afloramento Achado. Importante notar que a encaixante é essencialmente constituída por dolomita, enquanto que os veios são constituídos por calcita. Amostra CARB-0040B em (a). Amostra CARB-50A em (b). Amostra CARB-0051 em (c). Amostra CARB-0069B em (d). Amostra CARB-0071B em (e). Amostra CARB-0075 em (f).

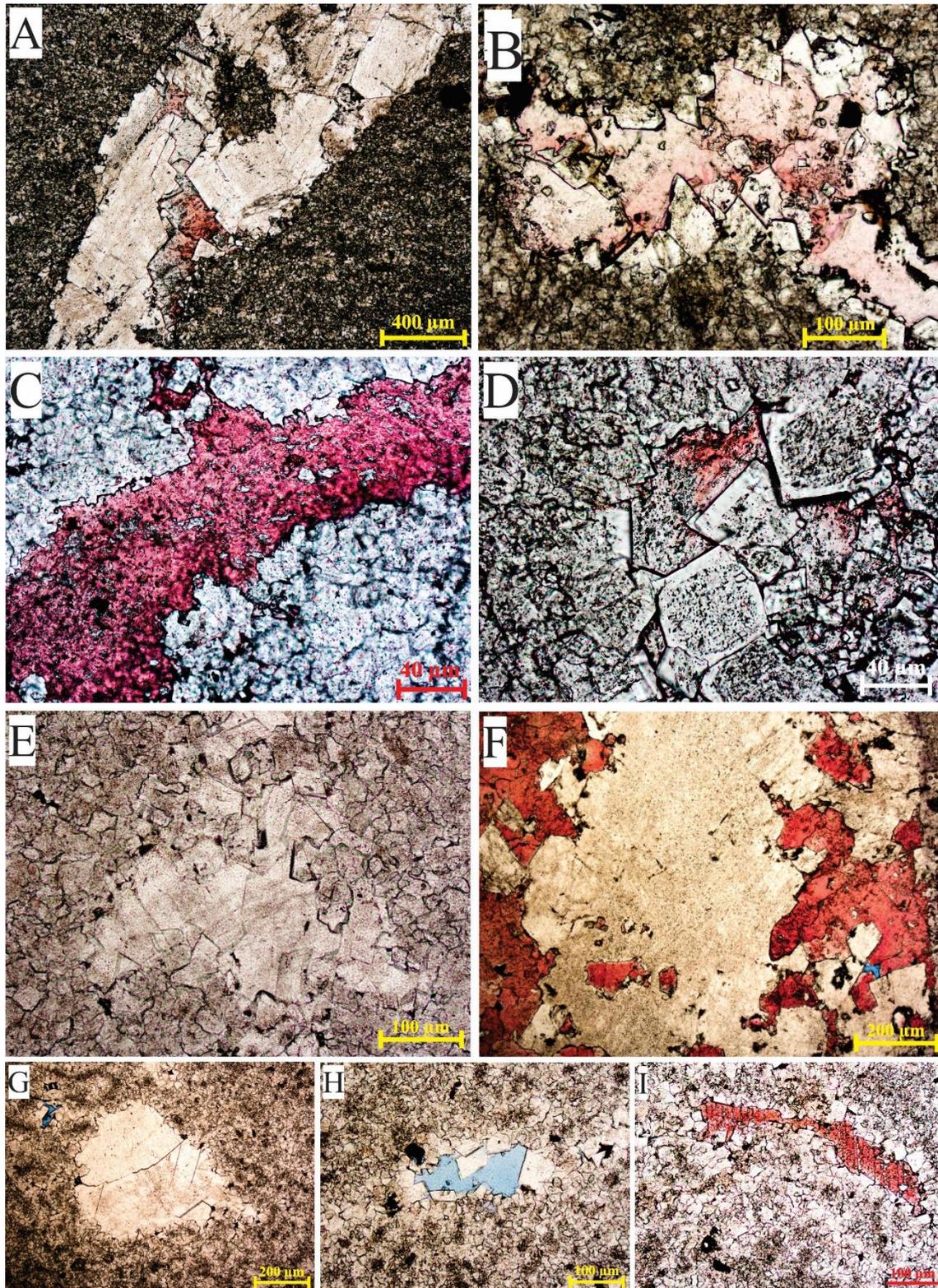


Figura 9. Fotomicrografias com polarizadores paralelos. CARB-0053A em A e B, CARB-0046B em C e D, CARB-0043 em E, CARB-0052B em F e CARB-0049 em G, H e I. Detalhe para veio preenchido por calcita e dolomita em A, calcita e cristais de dolomita preenchendo cavidade em B, veio de calcita com borda de dissolução dolomítica em C, cristais zonados de dolomita em D, dolomita preenchendo vesícula em E, dolomita preenchendo vesícula milimétrica em F, dolomita preenchendo vesícula em G, porosidade intracristalina bordejada por cristais de dolomita em H e vesícula preenchida por calcita e dolomita em I. Calcita em vermelho.

Legend (%): ■ Calcite 61% ■ Dolomite 22% ■ Quartz 9%
■ Fluorapatite 4% ■ Microcline 2% ■ Illite 1% ■ Unclassified 1%

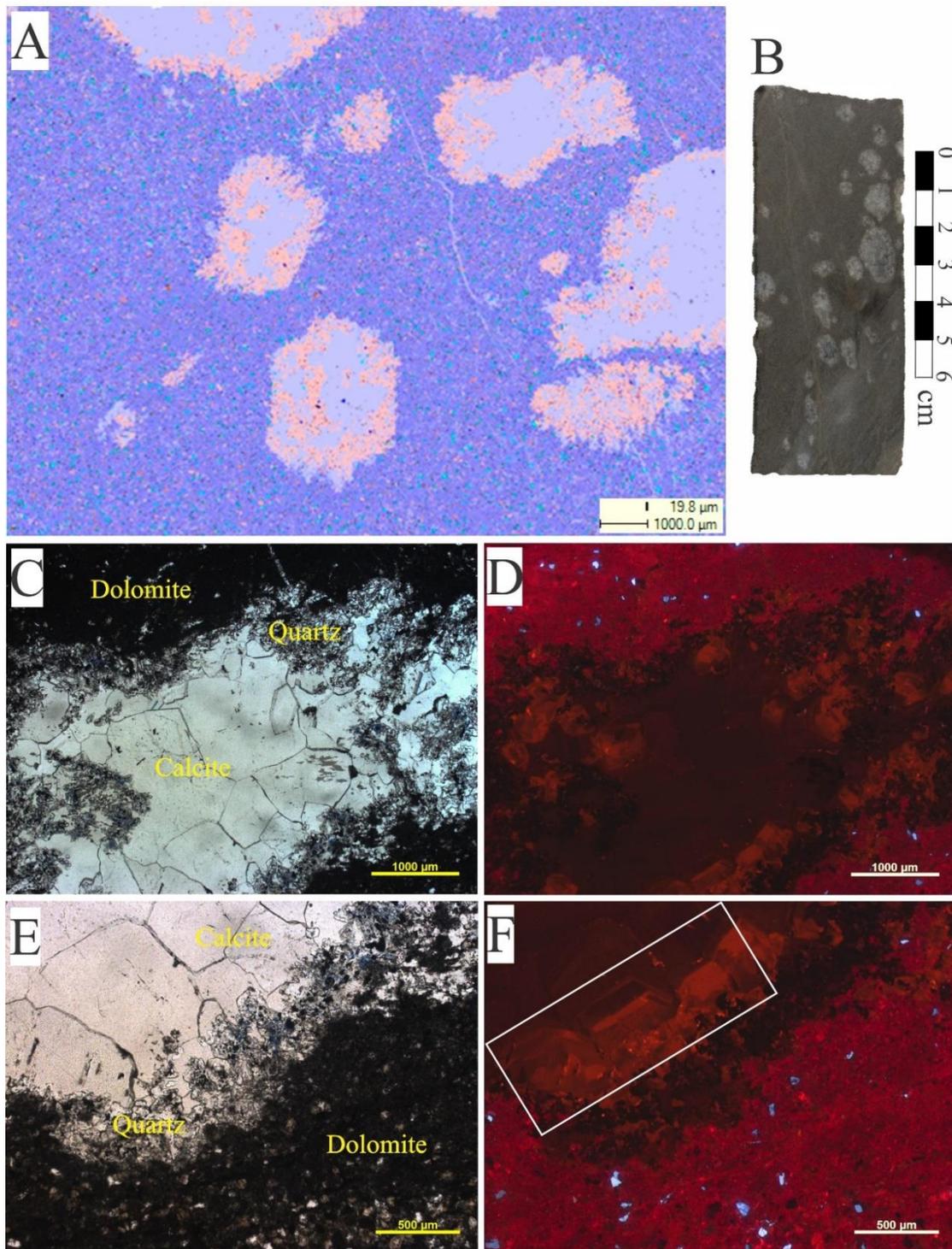


Figura 10. Análise QEMScan da amostra CARB-0071B em A. Testemunho de sondagem da amostra CARB-0071B em B. Fotomicrografias com polarizadores paralelos em C e E. Imagens de CL em D e F. Detalhe para cavidades preenchidas por calcita e bordejados por quartzo e dolomitização da calcita aparente nas imagens de CL em F em dolomito.

Legend (%): Calcite 64% Dolomite 23% Quartz 4%

Fluorapatite 4% Microcline 3% Illite 1% Unclassified 1%

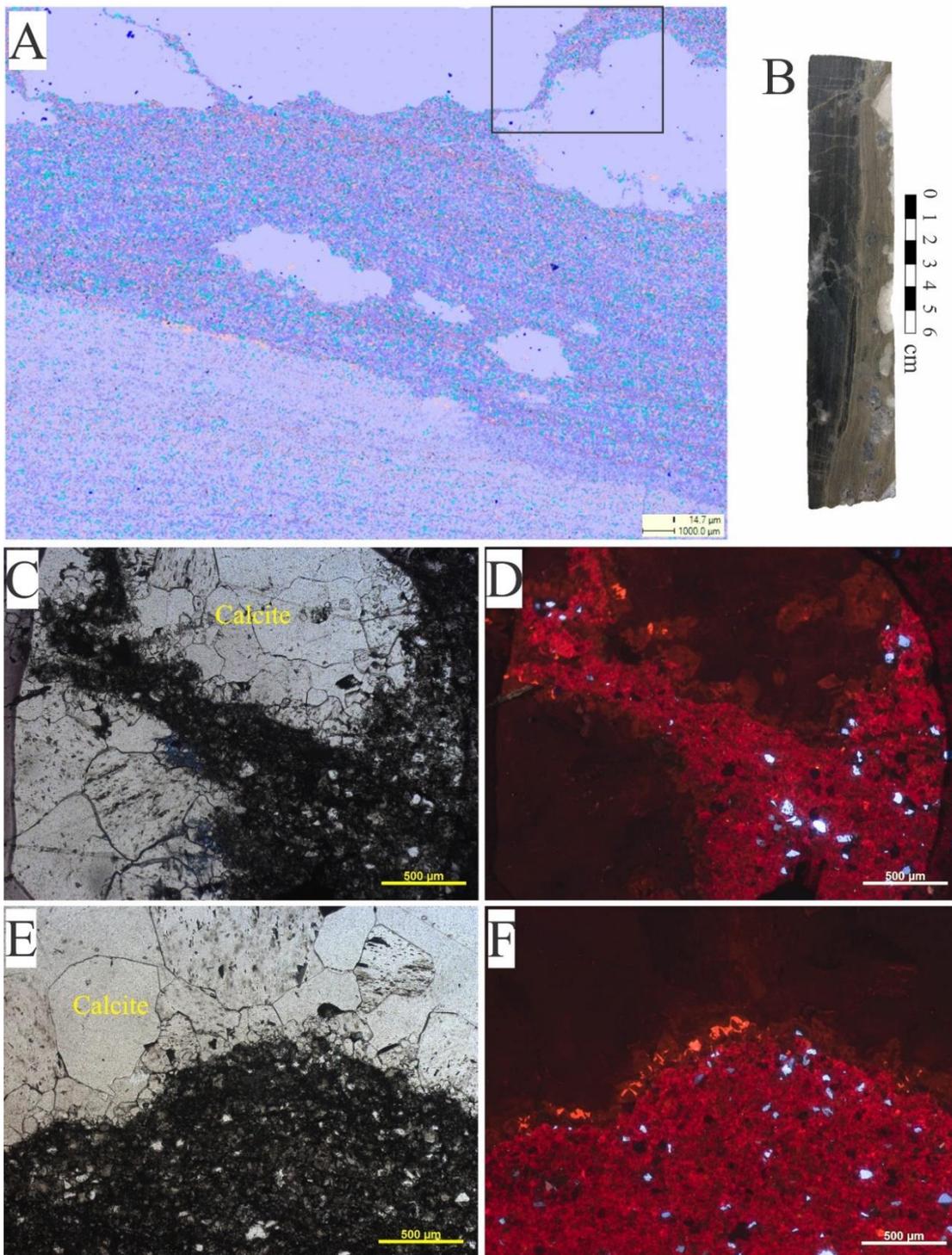


Figura 11. Análise QEMScan da amostra CARB-0069B em A. Testemunho de sondagem da amostra CARB-0069B em B. Fotomicrografias com polarizadores paralelos em C e E. Imagens de CL em D e F. Detalhe para vesículas subcentimétricas preenchidos por calcita em A e a definição de duas fases carbonáticas distintas em imagem de CL em D e F.

Legend (%): ■ Dolomite 85% ■ Calcite 11% ■ Unclassified 3% ■ Apatite 1%

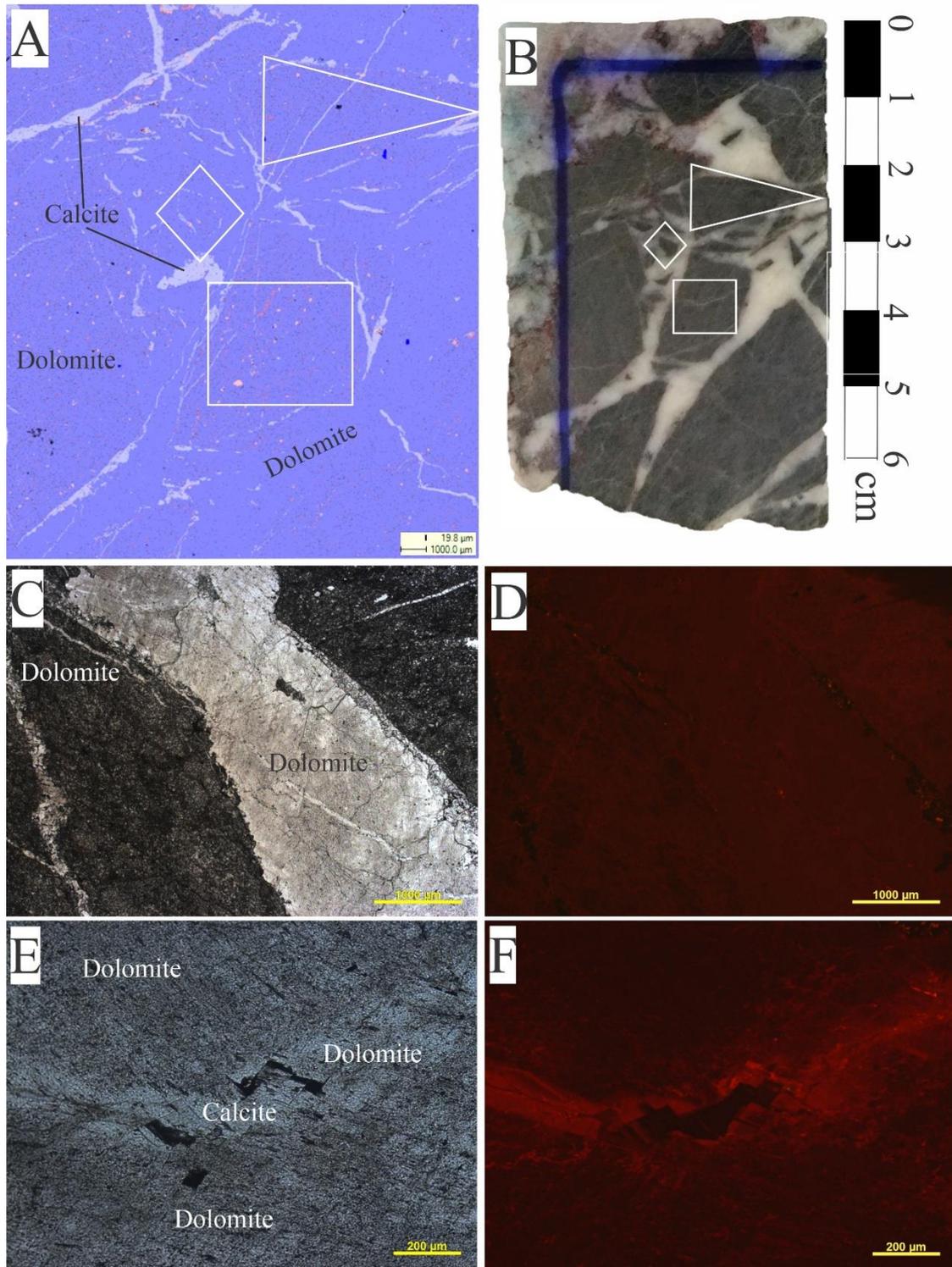


Figura 12. Análise QEMScan da amostra CARB-0052A em A. Testemunho de sondagem da amostra CARB-0052A em B. Fotomicrografias com polarizadores paralelos em C e E e imagens CL em D e F. Detalhe para veio dolomítico em matriz dolomítica em C e D e veio dolomítico com presença de calcita em matriz dolomítica em E e F.

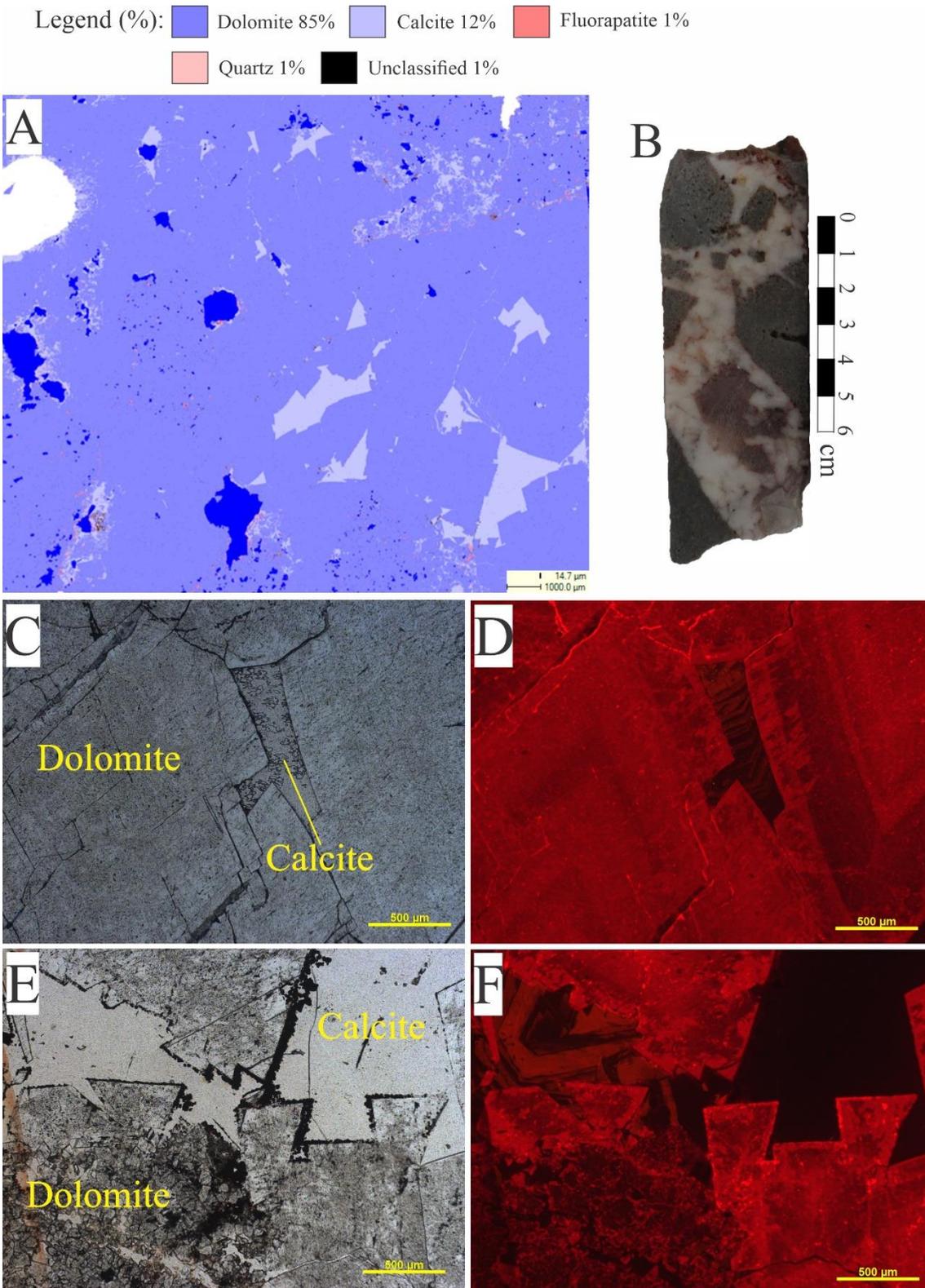


Figura 13. Análise QEMScan e testemunho de sondagem da amostra CARB-0067 em A e B, respectivamente. Fotomicrografias com polarizadores paralelos em C e E e imagens de CL em D e F. Detalhe para cimentação dolomítica entre os clastos de dolomito em A e B, cristal de calcita bem definida em matriz dolomitizada em C e E e o contraste de luminescência entre dolomita (vermelho claro) e calcita (vermelho escuro) em D e F.

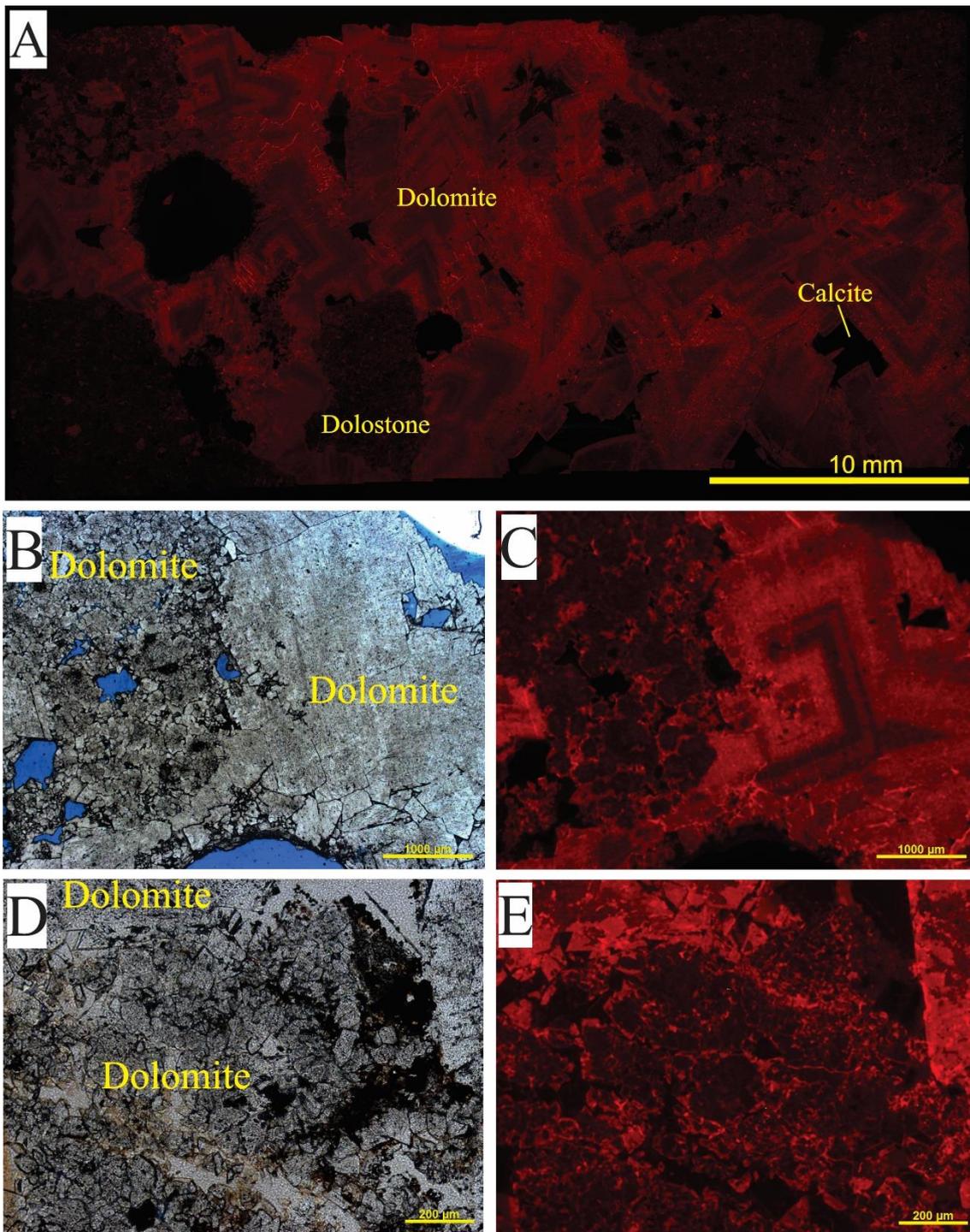


Figura 14. Amostra CARB-0067. Imagem de CL em A. Fotomicrografias com polarizadores paralelos em B e D e imagens de CL em C e E. Detalhe para clasto dolomítico cimentado por dolomita recristalizada em A e trama dolomítica constituída por cristais irregulares em B e C. As imagens de CL (A, C e E) mostram a diferença de intensidade de luminescência entre calcita e dolomita em brecha dolomítica. Enquanto que a calcita é representada por tons escuros, a dolomita é marcada por tons mais claros em comparação, porém com zoneamento de cores que sugere recristalização em alguns domínios.

Os dados de QEMScan e imagens de catodoluminescência dos dolomitos mostram que a principal fase presente nas estruturas distensivas dessas rochas é a calcita (**Figura 11**) enquanto que as brechas carbonáticas apresentam preenchimentos constituídos majoritariamente por dolomita e, em menor quantidade, calcita (**Fig. 12, 13 e 14**). A diferença da intensidade de luminescência entre dolomita e calcita, nessas amostras, evidencia a distinção química dessas duas fases minerais. As texturas observadas em microscopia ótica mostram que esses carbonatos estão associados a processos de dolomitização, seja pela adição de dolomita por meio de novas fases preenchendo estruturas veios e vesículas (**Figura 9**), pela alteração da calcita (**Figura 10**) ou como cimento (**Figura 12**).

4.3. Afloramento Ipanema

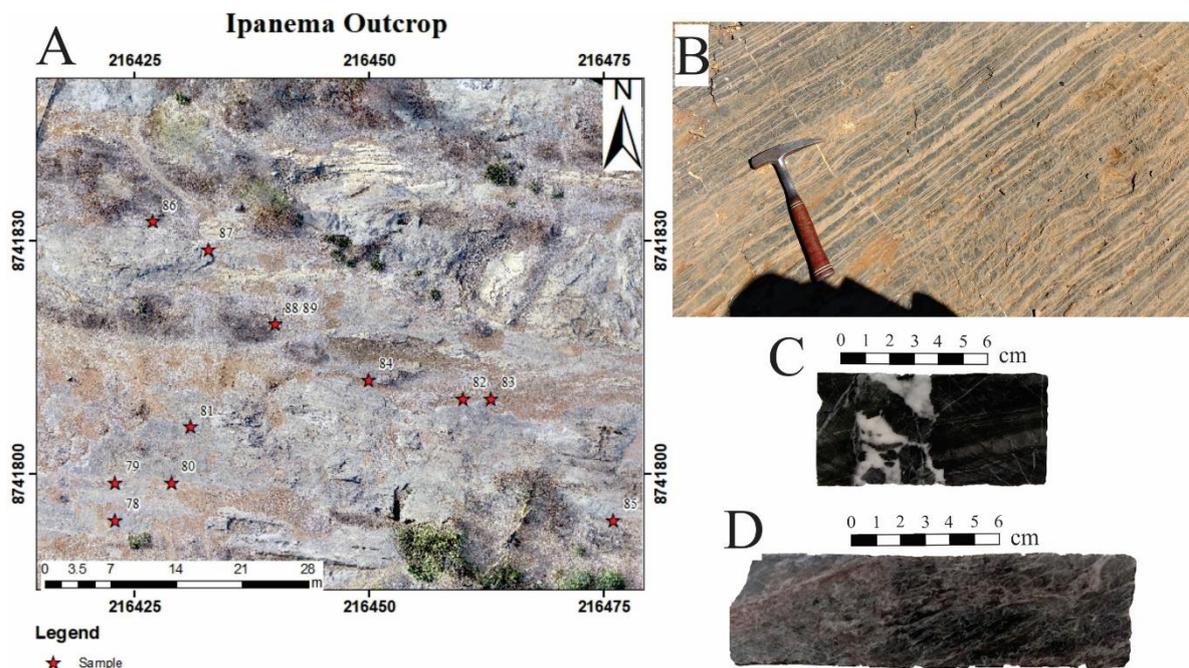


Figura 15. Pontos amostrados no Afloramento Ipanema visto em planta em A. Calcarenito bandado em lajedo em B. Calcarenitos com níveis brechados em amostras mesoscópicas em C e D.

O Afloramento Ipanema é formado por esteiras algais que podem ser classificadas como calcarenitos laminados de granulometria silte a areia fina com níveis brechados

(Figura 15). O afloramento, assim como os demais afloramentos abordados neste trabalho, ocorre recortado por estruturas distensivas preenchidas por calcita e dolomita.

A análise dos picos de intensidade dos difratogramas gerados a partir da Difração de Raios-X determina a seguinte associação mineral principal para esse afloramento: calcita, dolomita, quartzo, caulinita, microclínio, ilita e hematita (Figura 16).

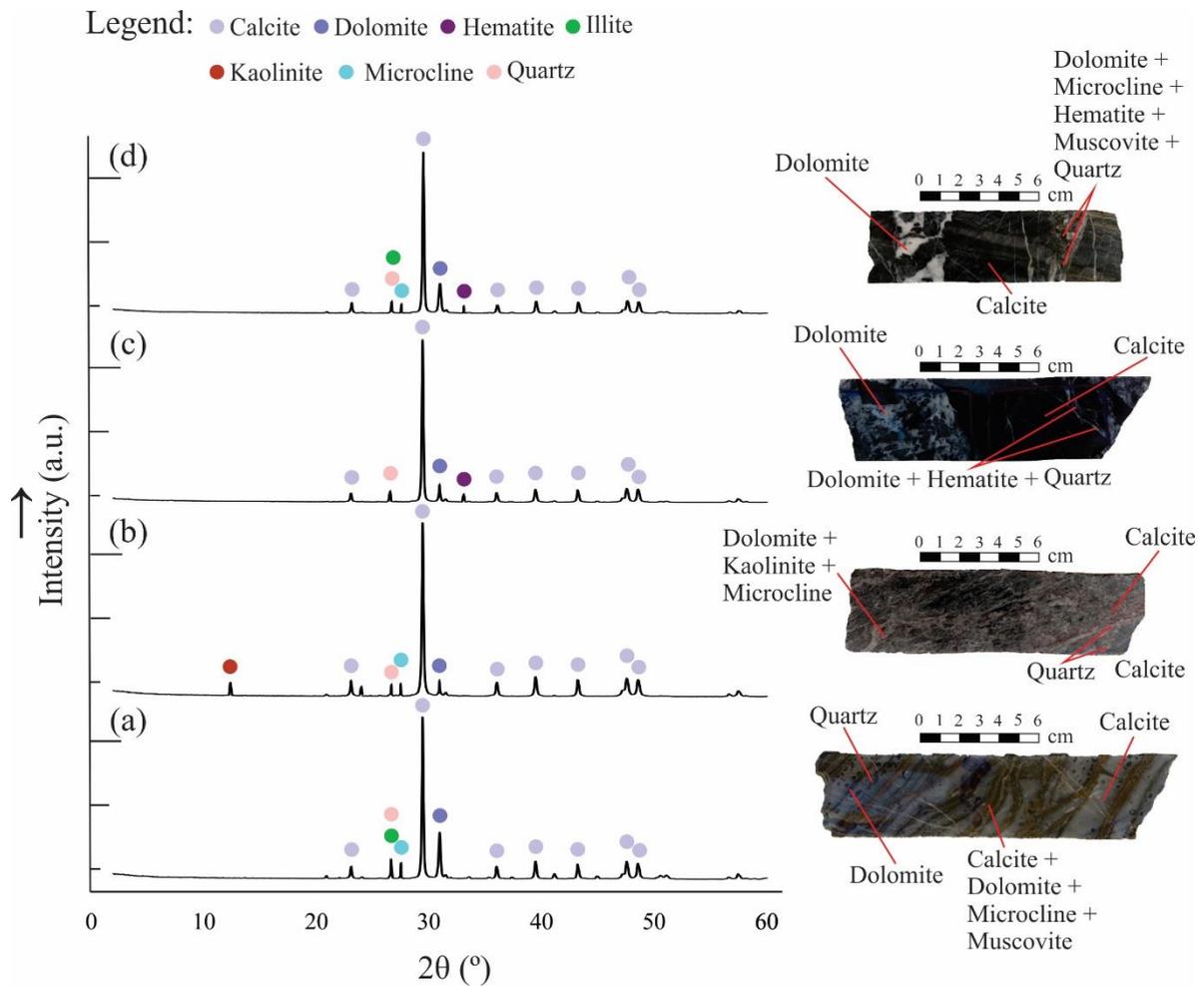


Figura 16. Difratoograma de Raios-X representativo de amostras do Afloramento Ipanema. Importante notar que a encaixante é essencialmente constituída por calcita, enquanto que os veios são constituídos por dolomita. Amostra CARB-0078B em (a). Amostra CARB-0085 em (b). Amostra CARB-0088A+B em (c). Amostra CARB-0089B em (d).

O Afloramento Ipanema, diferentemente dos demais afloramentos, apresenta rocha encaixante constituída por calcarenitos laminados. Nessas rochas, as estruturas preenchidas são constituídas por calcita (**Figura 17**) e em menor quantidade, por dolomita (**Figura 18**). Níveis brechados ocorrem em algumas porções do afloramento e são caracterizados pela presença de clastos submilimétricos a milimétricos de composição calcítica ou dolomítica. A laminação desses carbonatos, possivelmente associada a processos de dissolução, é marcada pela maior quantidade de dolomita, além de quartzo, fluorapatita, microclínio, ilita e halita em menor quantidade (**Figura 19**).

A **Figuras 17 e 19**, mostram o litotipo mais comum encontrado nesse afloramento: calcarenito laminado com matriz calcítica e domínios brechados. A correlação dos dados de QEMScan, petrografia ótica e catodoluminescência das amostras CARB-0089B (**Figura 18**) e CARB-0078B (**Figura 19**) mostra que a encaixante apresenta estruturas distensivas na forma de veios e agregados vesiculares preenchidos por calcita, e, em menor quantidade, por dolomita. Feições de dissolução na forma de camadas ocorrem e são essencialmente constituídas por dolomita. Fluorapatita, microclínio, ilita, halita e pirita são minerais secundários e acessórios que ocorrem em menor quantidade na trama dessas rochas (**Fig. 18 e 19**). Cavidades preenchidas por cristais de calcita bem formados no centro e quartzo na borda ocorrem em algumas amostras e denotam natureza diagenética (**Figura 19**).

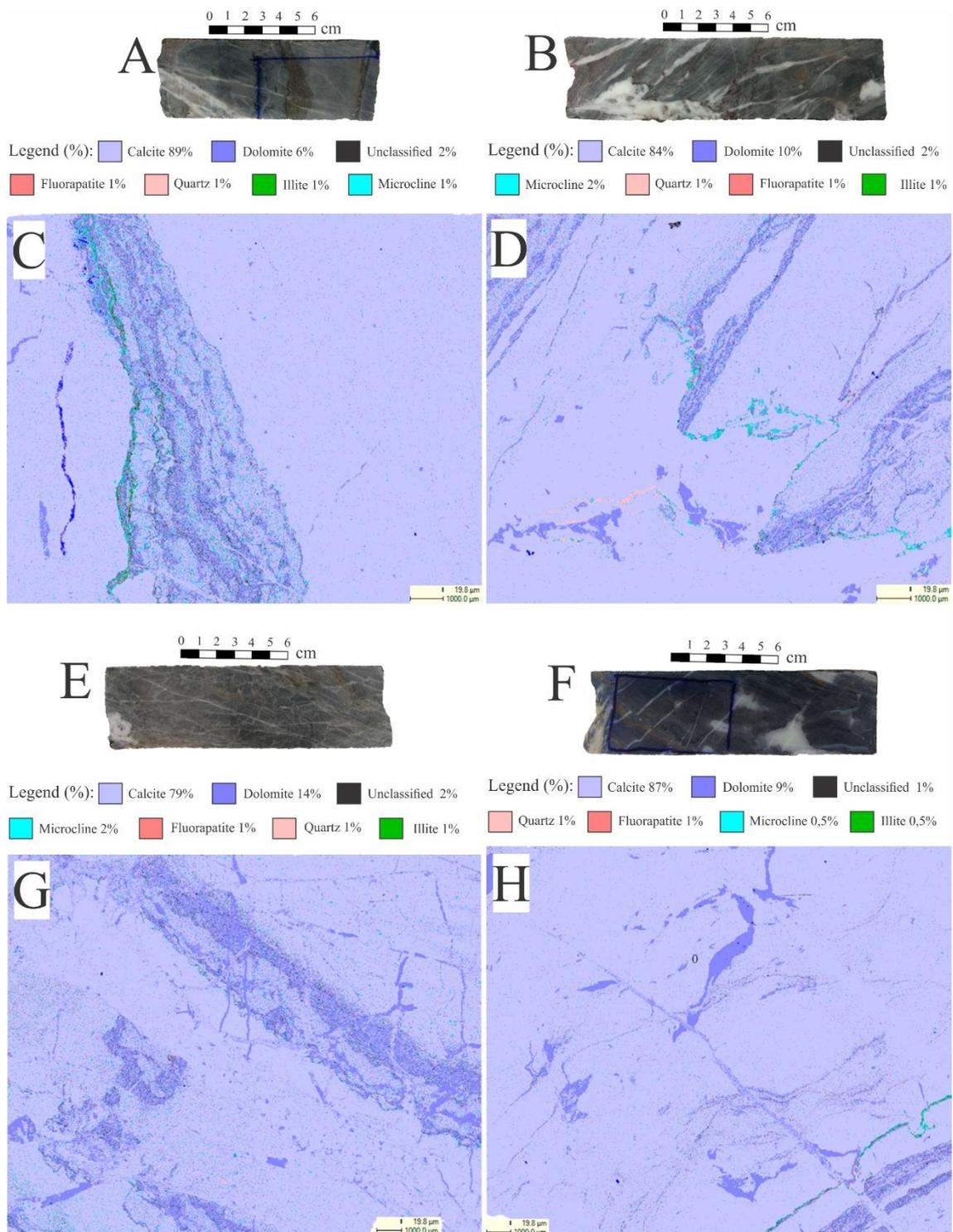


Figura 17. Testemunho de sondagem da amostra CARB-0080 em A. Testemunho de sondagem da amostra CARB-0082 em B. Análise QEMScan da amostra CARB-0080 em C. Análise QEMScan da amostra CARB-0082 em D. Testemunho de sondagem da amostra CARB-0083 em E. Testemunho de sondagem da amostra CARB-0086 em F. Análise QEMScan da amostra CARB-0083 em G. Análise QEMScan da amostra CARB-0086 em F. Detalhe para encaixante calcítica em todas as amostras e estrutura de laminação constituída por dolomita e minerais em menor quantidade como microclínio e illita, além de vesícula calcítica em B.

Legend (%): Calcite 58% Dolomite 27% Microcline 7% Fluorapatite 4%

Quartz 3% Illite 5% Pyrite 1% Unclassified 1%

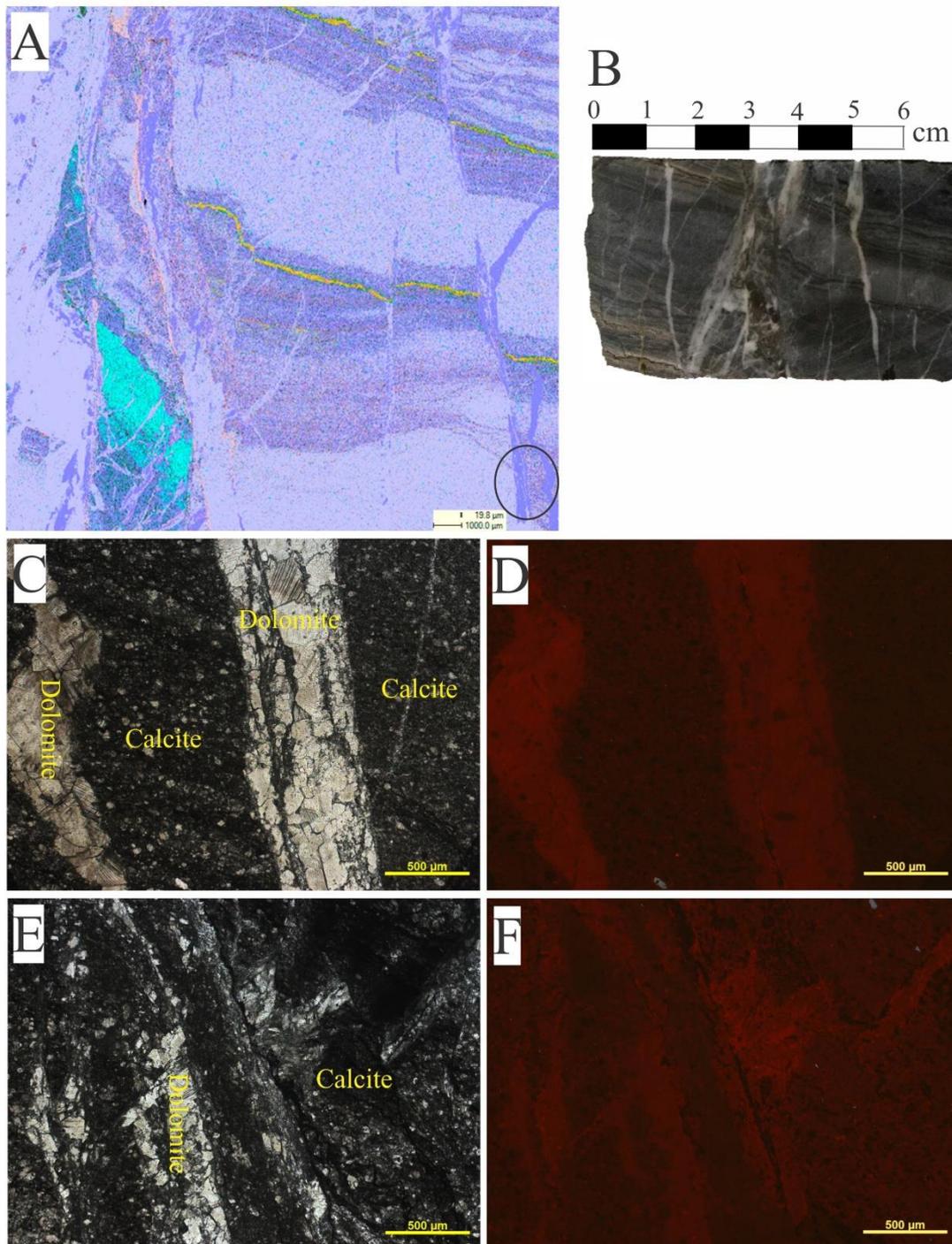


Figura 18. Amostra CARB-0089B. Análise QEMScan em A, testemunho de sondagem e B, fotomicrografias com polarizadores paralelos em C e E e imagens CL em D e F. Importante notar trama calcítica com laminações dolomíticas recortada por microfraturas preenchidas por calcita e dolomita em A. Detalhe para veio de dolomita em C e imagem CL evidenciando o contraste entre trama calcítica (vermelho escuro) e veios preenchidos por dolomita (vermelho claro) em D e F.

Legend (%): Calcite 67% Dolomite 16% Quartz 8% Microcline 4%

Fluorapatite 2% Illite 1% Halite 1% Unclassified 1%

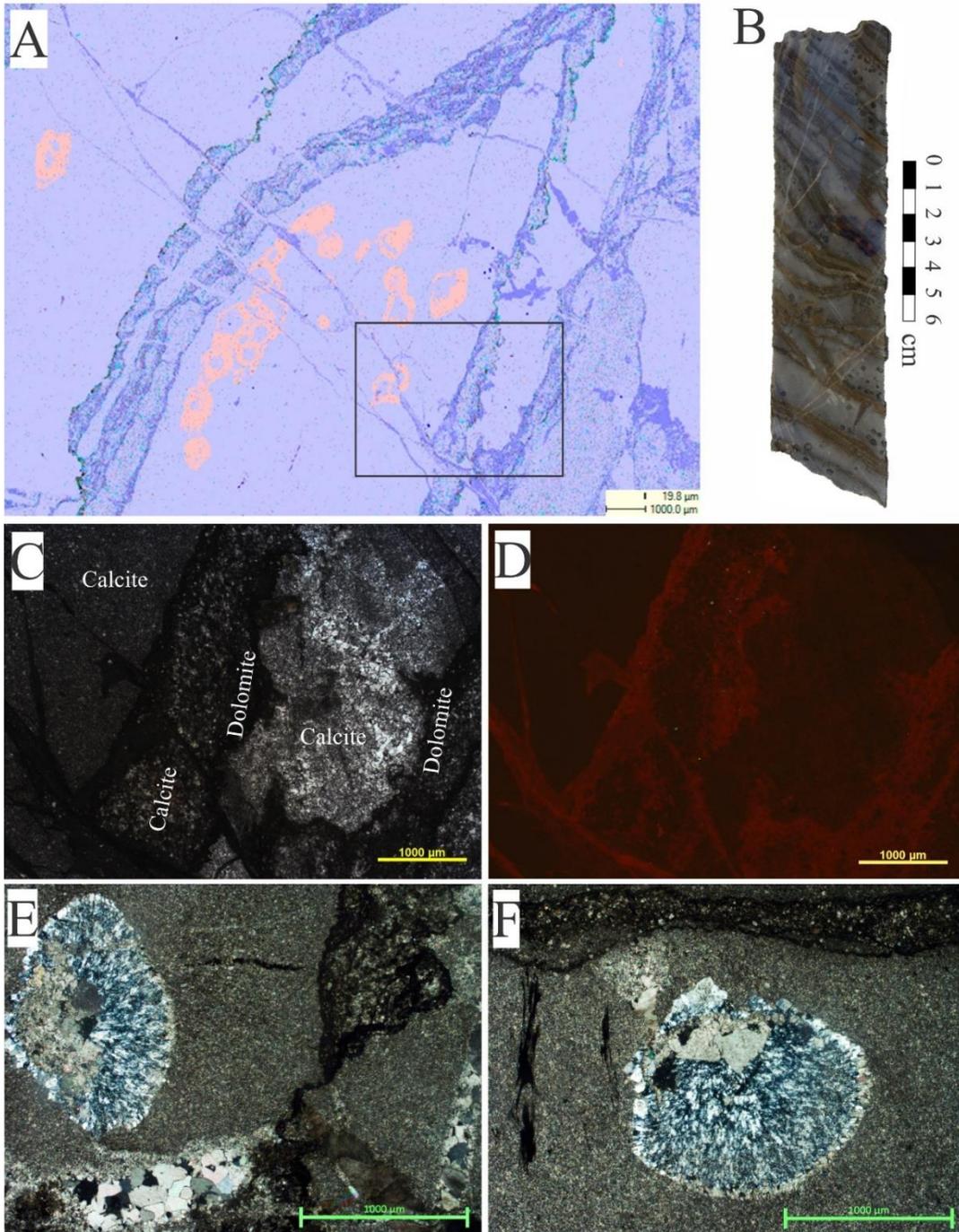


Figura 19. Amostra CARB-0078B. Análise QEMScan em A. Testemunho de sondagem em B, fotomicrografia com polarizadores paralelos em C. Imagem de CL em D. Fotomicrografias com polarizadores paralelos em E e F. Detalhe para encaixante calcítica com laminações de composição majoritariamente dolomítica em A, cavidades constituídas por cristais de calcita no centro e quartzo na borda em E e F e imagem CL do contato entre a encaixante calcítica, laminação de composição dolomítica, e estrutura de dissolução, de composição dolomítica, recortando encaixante e estrutura de laminação.

5. Isótopos de Carbono e Oxigênio

Para determinação de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$, foram amostrados com *microdrill* 132 pontos com cerca de 1 mm de diâmetro em amostras de rochas carbonáticas. As alíquotas referem-se a 18 amostras dos afloramentos de Fazenda Canaã, Achado e Ipanema. Todas as microperfurações foram realizadas em áreas com evidência textural de preenchimento e em regiões entendidas como pertencentes à rocha encaixante em um intervalo com espaçamento variável entre 0,25 e 0,30 cm.

As análises isotópicas de carbono e oxigênio foram realizadas no Laboratório de Geocronologia da Universidade de Brasília, utilizando-se um espectrômetro de massa *Delta V Plus* com entrada dupla. Após pulverizadas, as amostras tiveram o CO_2 extraído em linha de alto vácuo após reação com ácido ortofosfórico (100%) a 25°C por 24 horas. O CO_2 liberado nesta reação foi analisado em ICPMS com multi-coletor, após purificado criogenicamente, utilizando gás de referência do próprio laboratório. A calibração do sistema realizada segundo padrões internacionais (NBS-18, NBS-19 e NBS-20) e os erros associados são de 0,05‰, para o carbono e 0,10‰ para o oxigênio. Os resultados são expressos na notação de δ e descritos em partes por mil (‰), de acordo com detalhes relacionados ao padrão *Vienna Pee Dee Belemnite* (VPDB).

Tabela 1: Dados Isotópicos do Afloramento Fazenda Canaã. Amostras referentes a regiões com evidência de preenchimento estão em negrito. As demais, referem-se a amostras da rocha encaixante.

	V-PDB	V-PDB	V-SMOW		V-PDB	V-PDB	V-SMOW
Amostra	$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$	Amostra	$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$
CARB-0023A-1	1,93	-1,95	28,85	CARB-0028B-4	-1,89	-3,03	27,74
CARB-0023A-2	-5,81	-6,29	24,38	CARB-0028B-5	-2,38	-4,49	26,23
CARB-0028B-1	-2,96	-6,71	23,94	CARB-0028B-6	-0,64	-2,26	28,53
CARB-0028B-2	-1,64	-2,80	27,97	CARB-0028B-7	-1,03	-3,23	27,53
CARB-0028B-3	-1,47	-3,15	27,61				

Tabela 2: Dados Isotópicos do Afloramento Achado. Amostras referentes a regiões com evidência preenchimento estão em negrito. As demais, referem-se a amostras da rocha encaixante.

	V-PDB	V-PDB	V-SMOW		V-PDB	V-PDB	V-SMOW
Amostra	$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$	Amostra	$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$
CARB-0040B-1	2,26	-1,63	29,18	CARB-0054A-3	-4,68	-7,23	23,40
CARB-0040B-2	1,03	-2,76	28,02	CARB-0054A-4	-4,77	-7,13	23,51
CARB-0040B-3	2,05	-2,24	28,55	CARB-0054A-5	-1,40	-6,87	23,78
CARB-0040B-4	0,77	-3,37	27,39	CARB-0054A-6	7,32	-5,13	25,57
CARB-0040B-5	1,89	-2,18	28,61	CARB-0054A-7	7,44	-5,30	25,40
CARB-0040B-6	0,97	-3,21	27,55	CARB-0054A-8	7,62	-5,44	25,26
CARB-0040B-7	0,42	-4,35	26,37	CARB-0054A-9	-3,94	-7,58	23,04
CARB-0046A-1	-14,77	-6,92	23,73	CARB-0054A-10	-4,23	-8,39	22,21
CARB-0046A-2	-3,41	-6,92	23,73	CARB-0054A-11	-4,24	-8,44	22,16
CARB-0046A-3	-5,71	-6,87	23,78	CARB-0054A-12	9,08	-6,48	24,18
CARB-0046A-4	-2,62	-7,99	22,63	CARB-0054A-13	8,01	-6,75	23,90
CARB-0046A-5	-2,49	-8,34	22,26	CARB-0054B-1	8,70	-5,73	24,96
CARB-0046A-6	-3,68	-6,87	23,78	CARB-0054B-2	-4,60	-7,68	22,94
CARB-0046A-7	-2,23	-6,84	23,81	CARB-0054B-3	8,11	-4,98	25,72
CARB-0047B-1	2,09	-1,98	28,82	CARB-0054B-4	-4,88	-7,45	23,18
CARB-0047B-2	2,53	-1,84	28,96	CARB-0054B-5	-4,95	-7,60	23,03
CARB-0047B-3	2,39	-1,76	29,05	CARB-0054B-6	9,01	-4,62	26,10
CARB-0047B-4	1,98	-1,77	29,04	CARB-0054B-7	9,36	-5,97	24,71
CARB-0047B-5	1,30	-2,77	28,00	CARB-0054B-8	-4,63	-7,72	22,90
CARB-0047B-6	-3,17	-6,70	23,96	CARB-0058-1	3,41	-5,57	25,11
CARB-0047B-7	-1,91	-6,14	24,53	CARB-0058-2	9,53	-6,17	24,50
CARB-0050A-1	9,67	-2,32	28,47	CARB-0058-3	9,36	-6,13	24,54
CARB-0050A-2	9,54	-2,33	28,46	CARB-0058-4	-1,49	-6,14	24,53
CARB-0050A-3	-5,24	-5,88	24,79	CARB-0058-5	0,51	-6,26	24,41
CARB-0050A-4	8,27	-3,15	27,61	CARB-0058-6	0,28	-6,09	24,58
CARB-0050A-5	9,43	-2,91	27,86	CARB-0067-1	-3,93	-8,55	22,05
CARB-0050A-6	10,23	-3,81	26,93	CARB-0067-2	2,17	-4,40	26,32
CARB-0052A-1	8,42	-5,19	25,51	CARB-0067-3	-6,76	-7,69	22,93
CARB-0052A-2	5,75	-5,28	25,42	CARB-0067-4	-4,28	-8,42	22,18
CARB-0052A-3	4,29	-5,50	25,19	CARB-0067-5	1,98	-5,06	25,64
CARB-0052A-4	4,51	-5,67	25,02	CARB-0069B-1	10,85	-7,98	22,63
CARB-0052A-5	8,81	-4,87	25,84	CARB-0069B-2	11,23	-7,16	23,47
CARB-0052A-6	8,79	-4,82	25,89	CARB-0069B-3	9,71	-4,96	25,75
CARB-0052A-7	8,75	-4,78	25,93	CARB-0069B-4	9,73	-4,93	25,77
CARB-0052A-8	8,68	-4,81	25,90	CARB-0069B-5	11,22	-6,33	24,34
CARB-0052A-9	1,23	-5,93	24,75	CARB-0069B-6	10,38	-6,12	24,55

CARB-0052A-10	2,39	-5,91	24,77	CARB-0071B-1	11,41	-5,18	25,52
CARB-0052A-11	4,29	-5,47	25,22	CARB-0071B-2	11,30	-5,64	25,04
CARB-0052A-12	5,82	-5,44	25,25	CARB-0071B-3	11,37	-5,49	25,20
CARB-0052A-13	5,99	-5,26	25,44	CARB-0071B-4	11,44	-5,39	25,30
CARB-0052A-14	4,13	-5,70	24,98	CARB-0071B-5	10,55	-6,64	24,02
CARB-0052A-15	5,51	-5,22	25,48	CARB-0071B-6	10,35	-6,68	23,97
CARB-0052A-16	7,68	-5,07	25,64	CARB-0071B-7	9,35	-7,22	23,41
CARB-0053B-1	9,29	-4,16	26,57	CARB-0071B-8	11,52	-5,00	25,71
CARB-0053B-2	-2,73	-6,61	24,04	CARB-0071B-9	11,43	-4,95	25,75
CARB-0053B-3	9,58	-4,72	26,00	CARB-0071B-10	11,11	-5,20	25,50
CARB-0053B-4	9,58	-4,84	25,87	CARB-0071B-11	10,76	-6,41	24,25
CARB-0053B-5	9,20	-4,87	25,84	CARB-0071B-12	10,33	-7,01	23,63
CARB-0054A-1	-4,38	-7,31	23,32	CARB-0071B-13	10,26	-7,00	23,65
CARB-0054A-2	-4,77	-7,30	23,33	CARB-0071B-14	10,73	-6,54	24,11

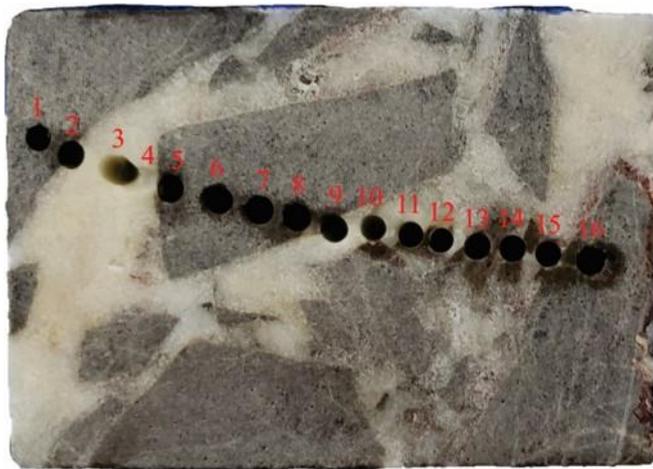
Tabela 3: Dados Isotópicos do Afloramento Ipanema. Amostras referentes a regiões com evidência preenchimento estão em negrito. As demais, referem-se a amostras da rocha encaixante.

	V-PDB	V-PDB	V-SMOW		V-PDB	V-PDB	V-SMOW
Amostra	$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$	Amostra	$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$
CARB-0078B-1	0,00	-7,04	23,60	CARB-0088A-1	-12,21	-7,08	23,56
CARB-0078B-2	-0,12	-6,83	23,82	CARB-0088A-2	-3,84	-6,66	24,00
CARB-0078B-3	0,02	-6,59	24,06	CARB-0088A-3	-13,21	-6,80	23,85
CARB-0078B-4	-0,05	-7,14	23,50	CARB-0088A-4	-6,68	-6,52	24,14
CARB-0078B-5	-0,20	-6,73	23,92	CARB-0088A-5	-0,59	-6,86	23,79
CARB-0078B-6	0,03	-6,70	23,95	CARB-0088A-6	-2,24	-6,91	23,73
CARB-0082-1	-0,81	-7,03	23,61	CARB-0089B-1	-3,62	-6,97	23,67
CARB-0082-2	-0,67	-6,89	23,75	CARB-0089B-2	-1,11	-5,80	24,89
CARB-0082-3	-1,01	-6,86	23,79	CARB-0089B-3	-1,13	-6,45	24,21
CARB-0082-4	-0,09	-6,75	23,90	CARB-0089B-4	-1,39	-5,98	24,69
CARB-0082-5	-0,12	-6,84	23,81	CARB-0089B-5	-1,80	-6,38	24,29
CARB-0082-6	-0,67	-7,01	23,64				

No Afloramento Fazenda Canaã, os valores de $\delta^{13}\text{C}$ para as amostras analisadas variam de -5,81 a 1,93 por mil, enquanto os valores de $\delta^{18}\text{O}$ (V-PDB) variam de -6,71 a -1,95 por mil (**Tabela 1**). Para o Afloramento Achado, os valores de $\delta^{13}\text{C}$ variam de -14,77 a 11,52 por mil, enquanto os valores de $\delta^{18}\text{O}$ variam de -8,55 a -1,63 por mil

(**Tabela 2**). Esses valores isotópicos variam para o Afloramento Ipanema, de -13,21 a 0,03 por mil para $\delta^{13}\text{C}$ e -7,14 a -5,80 por mil para $\delta^{18}\text{O}$ (**Tabela 3**). Os dados isotópicos são mais negativos para $\delta^{18}\text{O}$ quando estão associados às estruturas preenchidas (veios e agregados vesiculares), enquanto que os valores menos negativos ocorrem associados à encaixante carbonática (**Tab. 1, 2 e 3**).

As Figuras 20 e 21 representam amostras do Afloramento Achado e comparam dados isotópicos de carbono e oxigênio de duas amostras (CARB-0052A e CARB-0054A). A análise compara valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ entre os domínios preenchidos e rocha encaixante. A amostra CARB-0052A trata-se de uma brecha dolomítica com preenchimento dolomítico (**Figura 20**) onde foram amostrados, para análise isotópica de carbono e oxigênio em 16 domínios. A amostra CARB 0054-A, trata-se de um dolomito preenchido por calcita com evidências texturais da ocorrência de diversos pulsos de microfraturamento e preenchimento mineral, sem direção preferencial evidente (**Figura 21**). Nessa amostra, 13 domínios foram amostrados incluindo a rocha encaixante e material de preenchimento.



CARB-0071B



1 $\delta^{13}\text{C} = 8,4189$ $\delta^{18}\text{O} = -5,1913$	2 $\delta^{13}\text{C} = 5,7549$ $\delta^{18}\text{O} = -5,2796$	3 $\delta^{13}\text{C} = 4,2876$ $\delta^{18}\text{O} = -5,4990$	4 $\delta^{13}\text{C} = 4,5149$ $\delta^{18}\text{O} = -5,6679$
5 $\delta^{13}\text{C} = 8,8058$ $\delta^{18}\text{O} = -4,8691$	6 $\delta^{13}\text{C} = 8,7944$ $\delta^{18}\text{O} = -4,8249$	7 $\delta^{13}\text{C} = 8,7518$ $\delta^{18}\text{O} = -4,7783$	8 $\delta^{13}\text{C} = 8,6823$ $\delta^{18}\text{O} = -4,8072$
9 $\delta^{13}\text{C} = 1,2320$ $\delta^{18}\text{O} = -5,9303$	10 $\delta^{13}\text{C} = 2,3929$ $\delta^{18}\text{O} = -5,91$	11 $\delta^{13}\text{C} = 4,2881$ $\delta^{18}\text{O} = -5,4683$	12 $\delta^{13}\text{C} = 5,8177$ $\delta^{18}\text{O} = -5,4388$
13 $\delta^{13}\text{C} = 5,9879$ $\delta^{18}\text{O} = -5,2625$	14 $\delta^{13}\text{C} = 4,1282$ $\delta^{18}\text{O} = -5,7045$	15 $\delta^{13}\text{C} = 5,5071$ $\delta^{18}\text{O} = -5,2237$	16 $\delta^{13}\text{C} = 7,6801$ $\delta^{18}\text{O} = -5,0681$

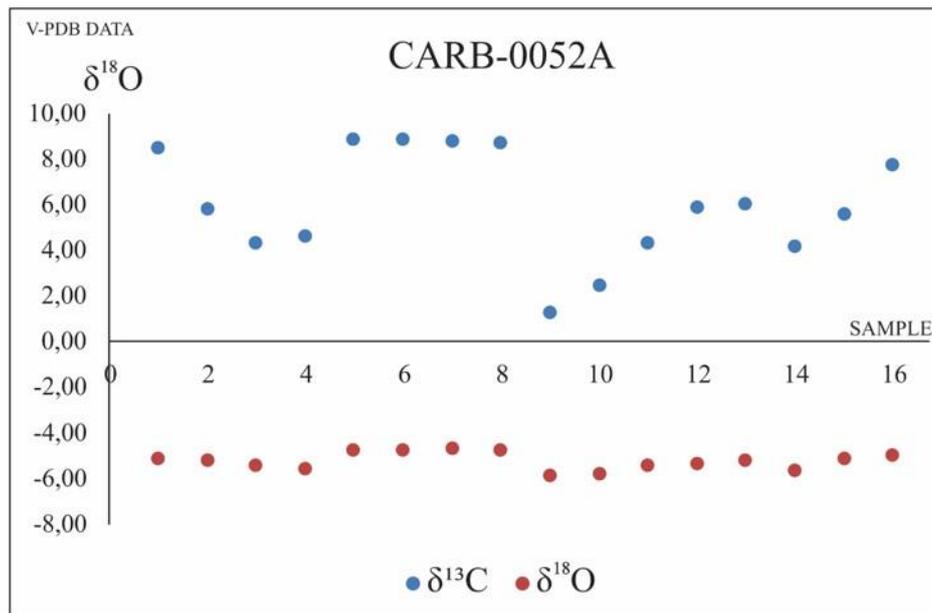
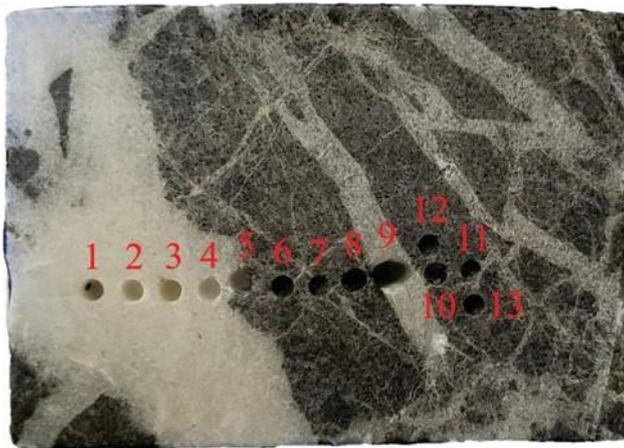


Figura 20. Amostragem para análise isotópica de carbono e oxigênio da amostra CARB-0052A. O gráfico mostra a variação nos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ para cada ponto analisado na amostra, de 1 a 16. Detalhe para valores mais negativos de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ nas estruturas preenchidas em amostra de brecha dolomítica quando comparado a encaixante. Valores para preenchimentos em negrito.



CARB-0054A



1 $\delta^{13}\text{C} = -4,3793$ $\delta^{18}\text{O} = -7,3115$	2 $\delta^{13}\text{C} = -4,7724$ $\delta^{18}\text{O} = -7,3031$	3 $\delta^{13}\text{C} = -4,6838$ $\delta^{18}\text{O} = -7,2343$	4 $\delta^{13}\text{C} = -4,7703$ $\delta^{18}\text{O} = -7,1252$
5 $\delta^{13}\text{C} = -1,4008$ $\delta^{18}\text{O} = -6,8696$	6 $\delta^{13}\text{C} = 7,3192$ $\delta^{18}\text{O} = -5,1322$	7 $\delta^{13}\text{C} = 7,4397$ $\delta^{18}\text{O} = -5,2950$	8 $\delta^{13}\text{C} = 7,6227$ $\delta^{18}\text{O} = -5,4364$
9 $\delta^{13}\text{C} = -3,9393$ $\delta^{18}\text{O} = -7,5830$	10 $\delta^{13}\text{C} = -4,2311$ $\delta^{18}\text{O} = -8,3867$	11 $\delta^{13}\text{C} = -4,2365$ $\delta^{18}\text{O} = -8,4362$	12 $\delta^{13}\text{C} = 9,0769$ $\delta^{18}\text{O} = -6,4780$
13 $\delta^{13}\text{C} = 8,0130$ $\delta^{18}\text{O} = -6,7546$			

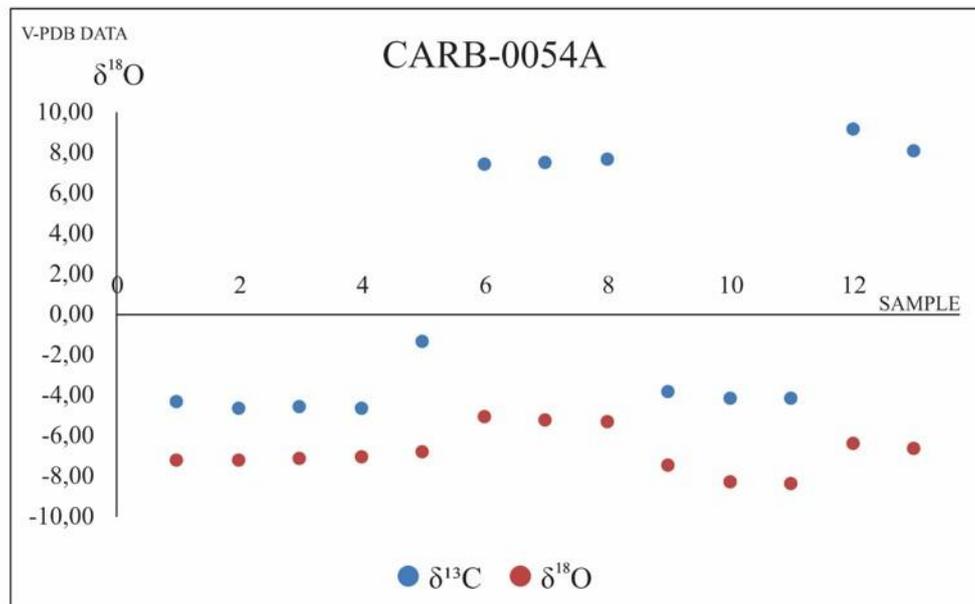


Figura 21. Amostragem para análise isotópica de carbono e oxigênio da amostra CARB-0054A. O gráfico mostra a variação nos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ para cada ponto analisado na amostra, de 1 a 13. Detalhe para valores mais negativos de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ nas estruturas preenchidas em amostra de dolomito quando comparado à encaixante. Valores para preenchimentos em negrito.

6. Discussão

Existem vários fatores que combinados, controlam a cor, intensidade e zonação da catodoluminescência de carbonatos diagenéticos e suas estruturas preenchidas: elementos potencialmente ativadores, sensibilizadores e inibidores; concentração de determinados elementos; taxa de crescimento dos minerais; estrutura interna e superfície dos minerais; particionamento e desequilíbrio químico das soluções; zoneamento composicional e relação de equilíbrio entre a razão Mn^{2+} e Fe^{2+} são exemplos (Machel *et al.* 1991). A catodoluminescência (CL) revela diferenças sutis na composição de elementos e estruturas cristalinas que podem ser usadas para delinear e caracterizar texturas que não são facilmente visíveis usando outros métodos de imageamento (por exemplo, Boggs e Krinsley, 2006). A CL vem sendo muito utilizada em estudos de diagênese de rochas carbonáticas (Richter *et al.* 2003), incluindo na caracterização e delineamento de fraturas (exemplificado em, Gale *et al.* 2004, 2010).

Neste trabalho, a interação de fluidos hipogênicos de temperatura elevada com os carbonatos da bacia durante a diagênese parece ser o fator determinante no controle da variação das respostas de luminescências do carbonato. Os dados de CL dos 3 afloramentos abordados evidenciam o contraste entre a encaixante e suas estruturas de preenchimentos. Não é possível que se assumam claramente uma correlação entre variação composicional e pulso de crescimento mineral. No entanto, o contraste textural é a principal característica evidenciada com os dados de luminescência. Em uma inspeção sob microscopia ótica ou eletrônica convencional, não foi possível observarem-se os pulsos de cristalização mineral. Já sob CL, é possível notar a complexa rede de formação de minerais com a competição de crescimento de hábitos específicos principalmente nos carbonatos.

Nos três afloramentos estudados, não é possível observar variação química pronunciada na dolomita medida por QEMScan. Ainda que tais dados se baseiem em resultados obtidos por EDS, portanto semi-quantitativos a qualitativos, é esperada que essa variação composicional do carbonato seja baixa possivelmente em função do reequilíbrio tanto dos minerais crescidos nas estruturas distensivas e o fluido percolante que preenche os poros, quanto do fluido percolante com a rocha parental. Olanipekun e Azmy (2017) avaliaram os processos de dolomitização e seu efeito no zoneamento a partir do estudo de cristais de dolomita in situ e concluíram que as condições cinéticas e termodinâmicas que levam ao processo de dolomitização controlam a razão Mg/Ca no fluido, favorecendo o início do processo de dolomitização.

Olanipekun e Azmy (2017), concluíram precipitação de dolomita em poros decorre dos processos de homogeneização durante a busca por equilíbrio entre o fluido e os poros da rocha. Ainda segundo Olanipekun e Azmy (2017), a ocorrência de zoneamento nos cristais de dolomita é resultado da evolução do fracionamento dos elementos presentes no fluido percolante, gerado por trocas limitadas entre os poros da rocha e fluidos de dissolução atuantes nesse sistema. Os cristais de dolomita zonados durante o processo de dolomitização são metaestáveis e, portanto, apresentam alto potencial de equilíbrio com os poros durante a interação com o fluido.

A correlação dos dados de DRX, Petrográfica Ótica e QEMScan nos três afloramentos estudados mostram que a matriz carbonática ocorre dolomitizada e recristalizada e que as estruturas distensivas são preenchidas por calcita em maior quantidade e quartzo e dolomita em menor quantidade em sistemas controlados por falhas e fraturas. É possível observar a ocorrência de dolomitização das estruturas preenchidas por minerais carbonáticos (**Figura 10**). A dolomitização dessas estruturas ocorre associada à calcita e

quartzo e como cimento preenchendo cavidades e poros intracristalinos na substituição de matriz dolomítica (**Figura 9 (H)**). A caracterização mineral das amostras estudadas revela que o processo de dolomitização é mais intenso no Afloramento Achado. Esse fato sugere que a interação entre fluidos hipogênicos e os carbonatos desse afloramento ocorre de forma pervasiva. A natureza pervasiva desses fluidos está possivelmente associada à combinação entre alta densidade de estruturas distensivas e controle faciológico que determina o caráter rúptil da deformação durante eventos diagenéticos e pós-diagenéticos devido à granulometria mais grossa dessas rochas em comparação com as rochas dos demais afloramentos estudados, principalmente pela alta densidade de níveis brechados.

A Ilita é um argilomineral produto da alteração do feldspato potássico ou muscovita e forma-se sob temperatura superior a 70°C. A partir de 130 °C a sua distribuição torna-se pervasiva (Morad *et al.* 1990; Giles *et al.* 1992). Segundo (Holzheid, 2016), a solubilidade dos feldspatos alcalinos na presença de fluidos enriquecidos em CO₂ que é alta em condição de baixa temperatura e pressão, abaixa substancialmente em condições de alta temperatura e pressão, justificando nesse contexto, a formação de ilita a partir de feldspato potássico nos carbonatos amostrados.

Os dados de isótopos estáveis de carbono e oxigênio apresentam variação significativa para valores de $\delta^{18}\text{O}$ (V-PDB) entre as estruturas preenchidas e rocha encaixante, onde os preenchimentos apresentam valores para $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ mais negativos quando comparados aos valores de $\delta^{18}\text{O}$ para a encaixante (**ANEXO 3**). Os valores de $\delta^{18}\text{O}$ em minerais carbonáticos variam em função da temperatura, enquanto que os valores de composição isotópica e salinidade dos fluidos a partir dos quais se precipitaram. Segundo Urey (1947), a determinação precisa do teor de $\delta^{18}\text{O}$ dos minerais carbonáticos pode ser utilizado na determinação de sua temperatura de formação. McCrea (1950) demonstrou capacidade de se inferir a temperatura a partir do fracionamento isotópico

entre isótopos de oxigênio. McArthur *et al.* (1980) considera que a composição do isótopo de carbono é um indicador muito sensível dos processos de degradação da matéria orgânica baseado na concentração de CO₂. Além disso, para McArthur *et al.* (1980, 1986) e Benmore *et al.* (1983) a depleção de $\delta^{13}\text{C}$ em rochas carbonáticas pode estar associado a um ambiente anóxico.

7. Conclusão

A correlação dos dados obtidos da amostragem dos afloramentos estudados neste trabalho resultou nas seguintes conclusões:

1. As estruturas distensivas das encaixantes carbonáticas da Unidade Nova América, na Formação Salitre, são preenchidas por calcita, dolomita e quartzo em menor quantidade. Esses preenchimentos são provavelmente provenientes da percolação de fluidos hipogênicos. Enquanto que nos Afloramentos de Fazenda Canaã e Ipanema o preenchimento dessas estruturas está condicionado a estruturas distensivas (fraturas e falhas), no Afloramento Achado, a percolação de fluidos ocorre de forma pervasiva. A natureza pervasiva desses fluidos ocorre devido à combinação da alta densidade de falhas e fraturas da encaixante carbonática e características faciológicas que tornam essas rochas rúpteis durante eventos de deformação, formando assim um sistema ideal para pervasão de fluidos no sistema.
2. O preenchimento de estruturas distensivas desses carbonatos é resultado da interação entre rocha encaixante e com fluidos hipogênicos. A illita é caracterizada como um argilomineral que se forma em decorrência da alteração do feldspato potássico por fluidos hidratados em condições de temperatura elevada. A presença de feições que caracterizam o gradiente geotérmico de fases fluidas mostra que a

formação da ilita está associada a interação da encaixante com fluidos hipogênicos.

3. O efeito geoquímico da interação entre os carbonatos estudados e fluidos revelam uma mudança dos valores iniciais das razões isotópicas carbono e de oxigênio da rocha e/ou do fluido percolante, dado que as suas composições não estão em equilíbrio. Os dados isotópicos mostram que os para carbono e oxigênio valores tornam-se mais negativos em domínios preenchidos (**Fig. 20 e 21**). Esse fracionamento isotópico sugere que esses preenchimentos se originaram da interação desses carbonatos com fluidos. Enquanto que os valores mais negativos para $\delta^{13}\text{C}$ sugerem que esses fluidos tenham origem de fontes externas, os valores mais negativos para $\delta^{18}\text{O}$ sugerem que esses fluidos sejam de natureza hipogênica

Referências

- ALKMIM, F. F. (2004). O que faz de um cráton um cráton? O Cráton do São Francisco e as revelações almeidianas ao delimitá-lo. *Geol. do Cont. sul-americano evolução da obra Fernando Flávio Marques Almeida*. pp. 17–34.
- ALKMIM, F. F., and MARTINS-NETO, M. A. (2012). Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco craton, eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology* 33, 127–139.
- BARBOSA, J. S. F. (2012). *Geologia da Bahia: pesquisa e atualização, 2v.: iL. Color.* – (Série de publicações especiais; 13). Salvador, CBPM, 33-85 p.
- BENMORE, R. A., COLEMAN, M. L., and MCARTHUR, J. M. (1983). Origin of sedimentary francolite from its sulphur and carbon isotope composition. *Nature*, 302(5908), 516-518.
- BJØRLYKKE, K., and HØEG, K. (1997). Effects of burial diagenesis on stresses, compaction and fluid flow in sedimentary basins. *Marine and Petroleum Geology*, v. 14, n. 3, p. 267-276.

- BOGGS, S., and KRINSLEY, D. (2006). Application of cathodoluminescence imaging to the study of sedimentary rocks. Cambridge University Press.
- BONFIM, L. F. C., ROCHA, A. J. D., PEDREIRA, A. J., MORAIS, J. C. P., GUIMARÃES, J. T., and TESCH, N. A. (1985). Projeto Bacia de Irecê. Salvador, CPRM, (Relatório Final).
- BRANNER, J. C. (1911). Aggraded Limestone Plains of the interior of Bahia and Climatic Changes Suggested by them. Geological Society of America Bulletin, v. 22 (2): 187-206.
- CAXITO, F. D. A., HALVERSON, G. P., UHLEIN, A., STEVENSON, R., GONÇALVES DIAS, T., and UHLEIN, G. J. (2012). Marinoan glaciation in east central Brazil. Precambrian Research, 200-203, 38– 58.
- CAZARIN, C. L. et al. (2019). The conduit-seal system of hypogene karst in Neoproterozoic carbonates in northeastern Brazil. Marine and Petroleum Geology, v. 101, p. 90-107.
- DANDERFER, F. A., DE WAELE, B., PEDREIRA, A. J., and NALINI, H. A. (2009). New geochronological constraints on the geological evolution of Espinhaço basin within the São Francisco Craton-brazil. Precambrian Res., 170, pp. 116-128.
- DRUMMOND, J. B. R., PUFAHLI, P. K., PORTO, C. G., and CARVALHO, M. (2015). Neoproterozoic peritidal phosphorite from the Sete Lagoas Formation, Brazil, and the Precambrian P-cycle. Sedimentology 62, 1978–2008.
- FUCK, R. A., JARDIM DE SÁ, E. F., PIMENTEL, M. M., DARDENNE, M. A., and PEDROSA-SOARES, A. C. (1993). As faixas de dobramentos marginais do Cráton do São Francisco. In: J.M.L. Dominguez & A. Misi (eds). O Cráton do São Francisco. Salvador, SBG/SGM/CNPq, p. 161-186.
- GALE, J. F. W., and et al. (2004). Predicting and characterizing fractures in dolostone reservoirs: Using the link between diagenesis and fracturing. Geological Society, London, Special Publications, v. 235, n. 1, p. 177-192.
- GALE, J. F. W., and et al. (2010). Modeling fracture porosity evolution in dolostone. Journal of Structural Geology, v. 32, n. 9, p. 1201-1211.

- GIES, H. (1976). Zur Beziehung zwischen Photolumineszenz und Chemismus natürlicher Karbonate. Neues Jahrbuch für Mineralogie Abhandlungen, v. 127, pp 1-46.
- GILES, M. R., STEVENSON, S., and MARTIN, S. V. (1992). The reservoir properties and diagenesis of the Brent Group: a regional perspective. In: Morton A.C., Haszeldine R.S., Giles M.R., Brown S.(eds.) Geology of the Brent Group. Special Publications of the Geological Society of London, 61:289- 327.
- GUIMARÃES, J. T. A. (1996). Formação Bebedouro no Estado da Bahia: Faciologia, Estratigrafia e Ambientes de Sedimentação. Salvador. 155p. Dissertação de Mestrado - Instituto de Geociências, UFBA.
- GUIMARÃES, J. T., MISI, A., PEDREIRA, A. J., and DOMINGUEZ, J. M. L. (2011). The Bebedouro Formation, Una Group, Bahia (Brazil). In: Arnaud, E., Halverson, G.P., Shields-Zhou, G. (Eds.), The Geological Record of Neoproterozoic Glaciations. Geological Society. London, Memoirs vol. 36, pp. 503–508.
- HABERMANN, D. (1997). Quantitative hochauflösende Kathodenlumineszenz-Spektroskopie von Calcit und Dolomit. Unveroff. Dissertation Ruhr-Universität Bochum, 152 pp.
- HARTT, C. F., and AGASSIZ, L. (1870). Geology and Physical Geography of Brazil. Osgood, Fields.
- HOLZHEID, A. (2016). Dissolution kinetics of selected natural minerals relevant to potential CO₂-injection sites—Part 2: Dissolution and alteration of carbonates and feldspars in CO₂-bearing brines. Geochemistry, v. 76, n. 4, p. 643-657.
- JACKSON, J. A., BATES, R. L. (1997). Glossary of geology: Alexandria. Virginia, American Geological Institute.
- KUCHENBECKER, M., REIS, H. L. S., and FRAGOSO, D. G. C. (2013). Caracterização estrutural e considerações sobre a evolução tectônica da Formação Salitre na porção central da Bacia de Irecê, norte do Cráton do São Francisco (BA). In: Rev. Geonomos 19.
- LEE, M. R. (2000). Imaging of calcite by optical and SEM cathodoluminescence. Microscopy and Analysis, September, p. 21–22.

- LEE, M. R., MARTIN, R. W., TRAGER-COWAN, C., and EDWARDS, P. R. (2005). Imaging of cathodoluminescence zoning in calcite by scanning electron microscopy and hyperspectral mapping: *Journal of Sedimentary Research*, v.75, p. 313-322.
- LEÃO, Z. M. A. N., and DOMINGUEZ, J. M. L. (1992). Plataformas carbonáticas pré-cambrianas: o exemplo da Formação Salitre, Proterozoico Superior, Estado da Bahia. *Revista Brasileira de Geociências*, 22(4):407-421.
- MACHEL, H. G., MASON, R. A., MARIANO, A. N., and MUCCI, A. (1991). Causes and emission of luminescence in calcite and dolomite. In: Barker, C.E. and Kopp, O.C. (eds) *Luminescence Microscopy and Spectroscopy - Qualitative and quantitative applications*. SEPM (Society for Sedimentary Geology) Short Course, No. 25, pp 9-25.
- MACHEL, H. G., and LONNEE, J. (2002). Hydrothermal dolomite — a product of poor definition and imagination. *Sedimentary Geology* 152, 163–171.
- MCARTHUR, J. M., COLEMAN, M. L., and BREMNER, J. M. (1980). Carbon and oxygen isotopic composition of structural carbonate in sedimentary francolite. *Journal of the Geological Society*, 137(6), 669-673.
- MCARTHUR, J. M., BENMORE, R. A., COLEMAN, M. L., SOLDI, C., YEH, H. W., and O'BRIEN, G. W. (1986). Stable isotopic characterisation of francolite formation. *Earth and Planetary Science Letters*, 77(1), 20-34.
- MCCREA, J. M. (1950). On the isotopic chemistry of carbonates and a paleotemperature scale. *J. Chem. Phys.* 18, 849.
- MISI, A., and SOUTO, P. G. (1975). Controle estratigráfico das mineralizações de Pb-Zn-F-Ba do Grupo Bambuí, parte leste da Chapada de Irecê (Bahia). *Rev. Bras. Geociências*, v. 5, p. 30-45.
- MISI, A. (1979). O Grupo Bambuí na Bahia. Salvador, SME/CPM, v.1, p.120-154.
- MISI, A., and VEIZER, J. (1998). Neoproterozoic carbonate sequences of the Una Group, Irecê Basin, Brazil: chemostratigraphy, age and correlations. *Precambrian Research* 89, 87–100.

- MISI, A., KAUFMAN, A., VEIZER, J., POWIS, K., AZMY, K., BOGGIANI, P., GAUCHER, C., TEIXEIRA, J. B. G., SANCHES, A., and IYER, S. (2007). Chemostratigraphic correlation of Neoproterozoic successions in South America. *Chemical Geology* 237, 143–167.
- MISI, A., KAUFMAN, A. J., AZMY, K., DARDENNE, M. A., SIAL, A. N., and OLIVEIRA, T. F. de. (2011). Neoproterozoic successions of the São Francisco Craton, Brazil: the Bambuí, Una, Vazante and Vaza Barris/Miaba groups and their glaciogenic deposits. In: Arnaud, E., Halverson, G.P., Shields-Zhou, G. (Eds.), *The Geological Record of Neoproterozoic Glaciations*. Geological Society, London, Memoirs vol. 36, pp. 509–522.
- MORAD, S., AL-AASM, I. S., RAMSEYER, K., MARFIL, R., and ALDAHAN, A. A. (1990). Diagenesis of carbonate cements in Permian-Triassic sandstones from the Iberian Range, Spain; evidence from chemical and stable isotopes. *Sedimentary Geology*, 67:281-295.
- NAVARRO-CIURANA, D. et al. (2016). Petrography and geochemistry of fault-controlled hydrothermal dolomites in the Riópar area (Prebetic Zone, SE Spain). *Marine and Petroleum Geology*, v. 71, p. 310-328, 2016.
- OLANIPEKUN, B. J., and AZMY, K. (2017). In situ characterization of dolomite crystals: Evaluation of dolomitization process and its effect on zoning. *Sedimentology*, v.64, n. 6, p. 1708-1730.
- OLIVEIRA, A. I., and LEONARDOS, O. H. (1940). *Geologia do Brasil. Com. Bras. Centenários*. Portugal.
- REDIVO, H. V., MIZUSAKI, A. M. P., and SANTANA, A. V. A. (2019). REE patterns and trustworthiness of stable carbon isotopes of Salitre Formation, Irecê Basin (Neoproterozoic), São Francisco Craton. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 90, p. 255-264.
- RICHTER, D. K., and et al. (2003). Progress in application of cathodoluminescence (CL) in sedimentary petrology. *Mineralogy and Petrology*, v. 79, n. 3-4, p. 127-166.
- SANTANA, A. V. A. de. (2016). *Análise estratigráfica em alta resolução: exemplo em rampa carbonática dominada por microbialitos da Formação Salitre, Bacia do Irecê, Bahia*. 2016. xvi, 183 f., il. Tese (Doutorado em Geologia) — Universidade de Brasília, Brasília.
- SIPPEL, R. F., and GLOVER, E. D. (1965). Structures in carbonate rocks made visible by luminescence petrography. *Science*, v. 150, n. 3701, p. 1283-1287.

- SOUZA, S. L., BRITO, R. W. S., and SILVA, P. C. R. (1993). *Estratigrafia, Sedimentologia e Recursos Minerais da Formação Salitre na Bacia de Irecê, Bahia*. Salvador, Companhia Baiana de Pesquisa Mineral (CBPM), (Série Arquivos Abertos 2), 36 p.
- SVERJENSKY, D. A. (1981). The origin of a Mississippi Valley-type deposits in the Viburnum trend, southeast Missouri. *Economic Geology*, 76: 1848-1872.
- TEIXEIRA, J. B. G., SILVA, M. da G., MISI, A., CRUZ, S. C. P., and SILVA SÁ, J. H. (2010). Geotectonic setting and metallogeny of the northern São Francisco craton, Bahia, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 30, 71–83.
- UREY, H. C. (1947). The thermodynamic properties of isotopic substances. *Journal of the Chemical Society (Resumed)*, p. 562-581.