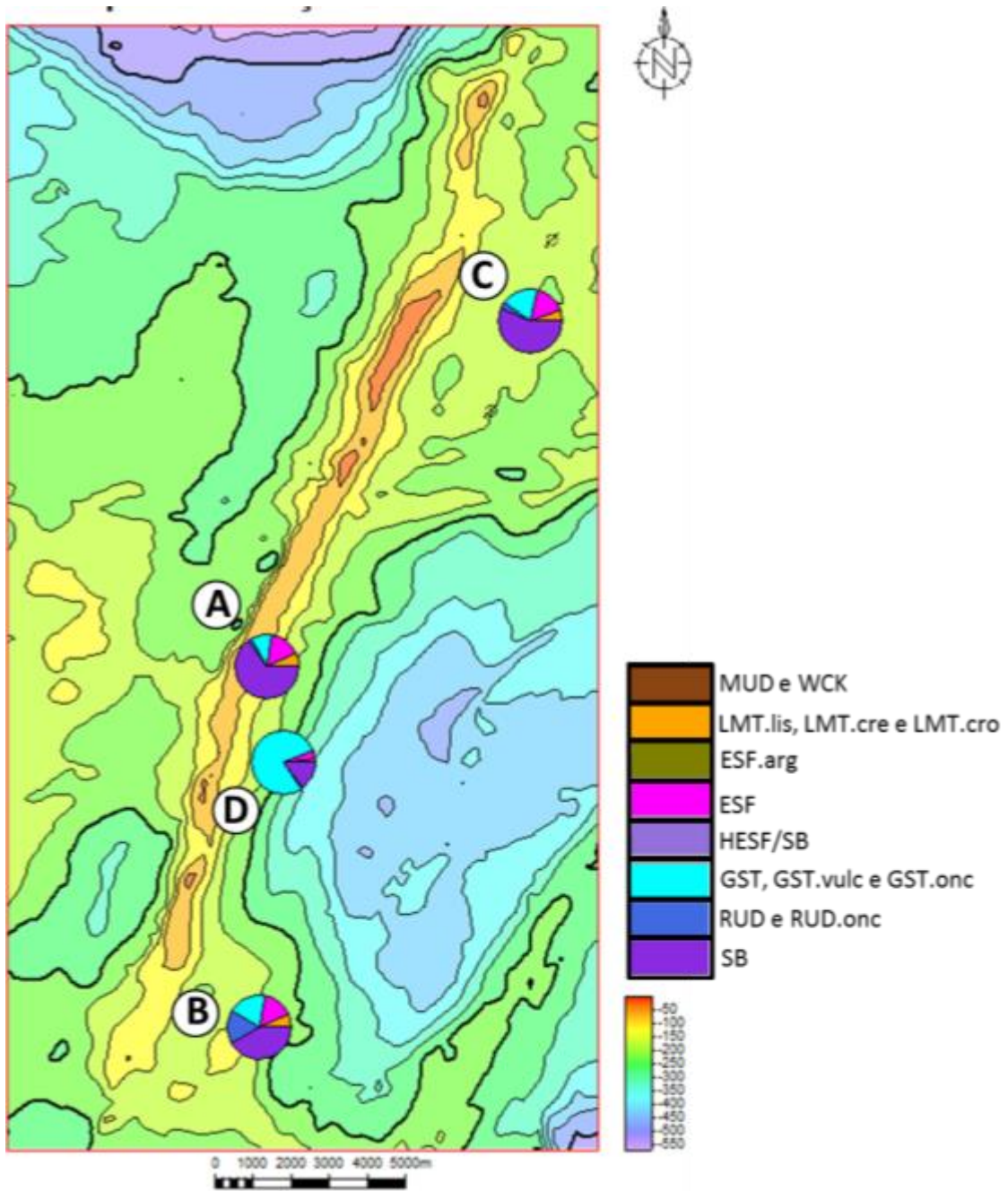


Figura 95 - Proporção de fácies sedimentares no intervalo selecionado para o estudo diagenético



Legenda: Mapa estrutural do topo da Fm. Barra Velha, mostrando a proporção das fácies sedimentares identificadas no intervalo selecionado para a caracterização diagenética.

Fonte: A autora, 2018.

5.3 Análise diagenética

Nesse capítulo serão apresentados os resultados do estudo diagenético do intervalo de interesse, selecionado na etapa anterior. Tal estudo foi baseado na descrição de 221 lâminas delgadas provenientes dos quatro poços alvo, e das análises complementares realizadas em amostras e lâminas selecionadas.

Cabe ressaltar que uma das grandes dificuldades ao se estudar a diagênese em contexto continental é a distinção entre os processos diagenéticos precoces e os processos deposicionais, já que os fluidos que dão origem a ela por vezes são semelhantes aos que são responsáveis pela formação do depósito (De Boever *et al.*, 2017). Para esse estudo, foi considerada diagênese todo produto e/ou processo cuja gênese se deu após a precipitação dos esferulitos e *shrubs*, que são considerados os constituintes do arcabouço das rochas carbonáticas aqui estudadas.

5.3.1 Produtos e processos diagenéticos

5.3.1.1 Dolomita

Dolomita é o mineral diagenético volumetricamente mais abundante nas amostras analisadas (Figura 96-4). Ocorre em uma grande diversidade de formas, que foram interpretadas como tendo sido geradas por diferentes fases e processos diagenéticos. As morfologias identificadas foram: 1) dolomita romboédrica; 2) dolomita subédrica com extinção ondulante; 3) dolomita lamelar; 4) dolomita anédrica.

5.3.1.1.1 Dolomita romboédrica

Consiste em cristais euédricos, de morfologia romboédrica e cristalinidade fina a média (Figura 96-4). Tais cristais ocorrem entre os componentes do arcabouço, principalmente nas fácies SB e ESF. Todavia, é muito comum em todas as fácies deposicionais, apresentando-se em grande volume nos quatro poços, constituindo mosaicos (Figura 96-1), ou na forma de cristais individuais espaçados, que parecem “flutuar” dentro do espaço poroso (Figura 96-3).

Os romboedros de dolomita frequentemente apresentam núcleos turvos, possivelmente devido à existência de microinclusões ou de microporosidade. Nesses casos, comumente associam-se a materiais filamentosos, de composição dolomítica (Figura 96-5). Quando observados em catodoluminescência, mostram-se zonados, com núcleos com forte luminescência avermelhada, envolvidos por níveis de luminescência esverdeada (Figura 96-2). Em MEV, apresentaram-se como cristais bem formados, com tamanhos significativamente maiores do que os cristais de calcita que constituem os *shrubs* e esferulitos do arcabouço (Figura 96-6). A Figura 97 mostra os espectros obtidos pela análise de EDS de cristais de dolomita romboédrica e calcita dos *shrubs* feitos em uma amostra de SB.

A associação dos cristais de dolomita romboédrica com material dolomítico filamentosos, somada ao fato de frequentemente apresentarem núcleos turvos sugerem que os mesmos tenham sido nucleados em um substrato. Wright & Barnett (2015) e Helinger Jr. *et al.* (2017) interpretam que tal substrato seria uma matriz de argilominerais magnesianos. No entanto, esses minerais são extremamente raros no intervalo selecionado para o presente estudo diagenético, ocorrendo em maior volume apenas em uma amostra do poço D. Assim, uma hipótese alternativa a proposta por esses autores seria a de que a dolomita romboédrica teria tido como sítio de nucleação um substrato organoquímico.

Como já discutido, autores como Vasconcelos *et al.* (1995); Vasconcelos & McKenzie, (1997) e Wright & Wacey (2005) evocam a mediação microbial para a ocorrência de dolomita em condições ambientes. Além desses autores, Garcia Del Cura *et al.* (2001) mostram evidências petrográficas e geoquímicas que indicam a indução de bactérias na precipitação de cristais

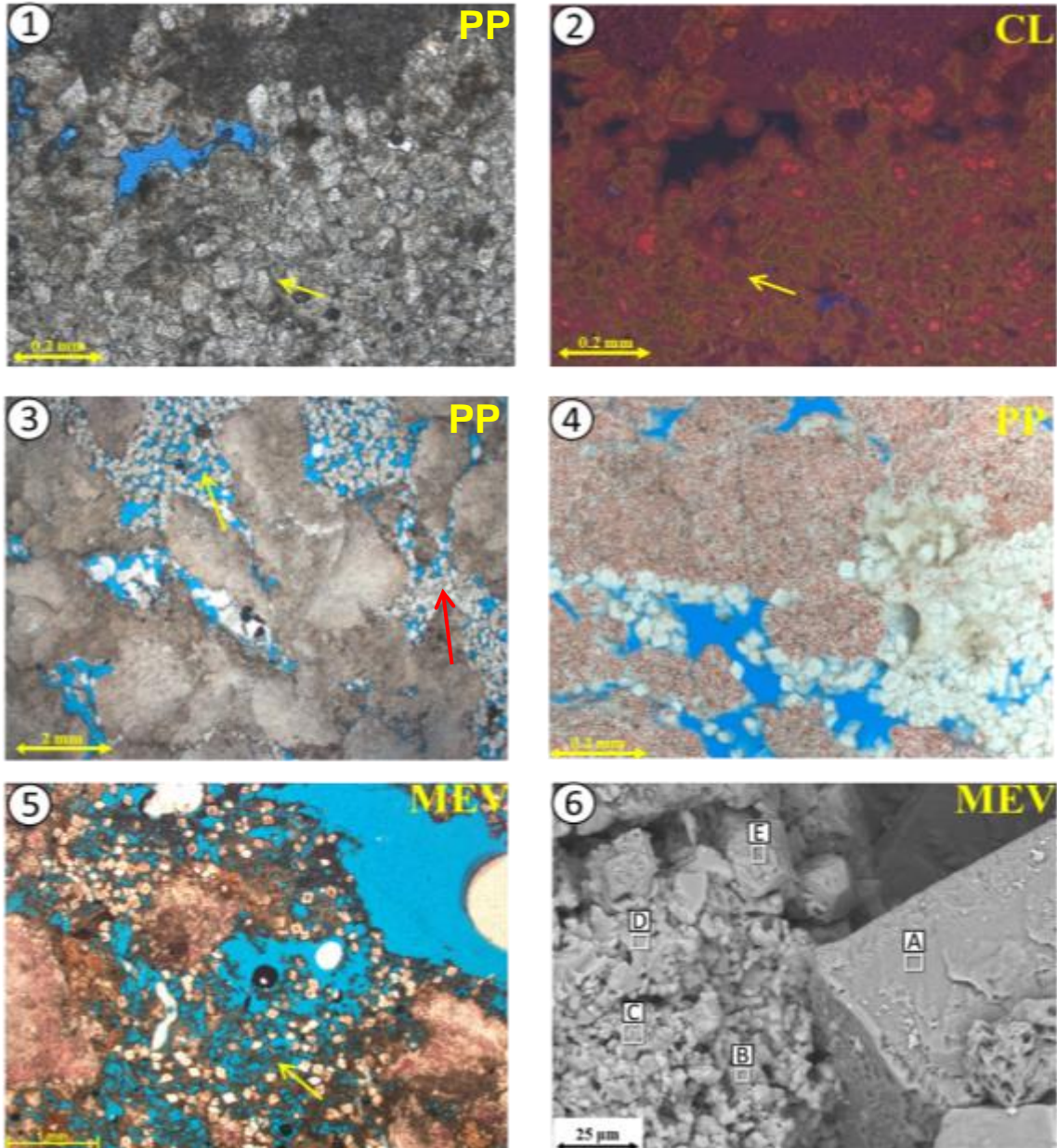
romboédricos de dolomita em ambiente lacustre (Plioceno, Espanha). Nesses cristais, foi possível observar corpos subesféricos e alongados que lembram corpúsculos de bactérias.

Portanto, interpreta-se que os cristais de dolomita romboédrica provavelmente são diageneticamente precoces, e são originados da indução microbial em substratos organoquímicos. A mediação microbial atua como catalizadora para o início da precipitação da dolomita, que continuaria a crescer abioticamente, resultando em cristais euédricos e zonados. O substrato organoquímico pode então ser totalmente degradado, resultando em cristais que parecem “flutuar” no espaço poroso, ou ser mineralizado, formando lamelas de dolomita ou sílica.

Deve-se notar que a origem aqui proposta para a dolomita romboédrica é muito semelhante ao modelo descrito para os esferulitos. Todavia, as relações petrográficas observadas evidenciam que as mesmas seriam um pouco posteriores, provavelmente em condições de soterramento levemente maiores, associadas a fluidos mais saturados em relação ao magnésio (maiores razões Mg^{2+}/Ca^{2+}).

Cristais menores e mais límpidos de dolomita romboédrica foram observados, principalmente relacionados à fácies SB. Esses cristais não se associam ao material filamentoso, e parecem se concentrar nas gargantas dos poros, em um arranjo cumulático (Figura 96-3). Tal arranjo que pode ser indicativo de processos de decantação dos cristais de dolomita romboédrica, bioinduzidos diretamente na coluna d'água, podendo ser considerados nesse caso deposicionais. Esse tipo de precipitação de dolomita também foi descrito por Garcia Del Cura *et al.* (2001). Além disso, Saller *et al.* (2016) propõe um modelo semelhante para os depósitos da Bacia de Kwanza.

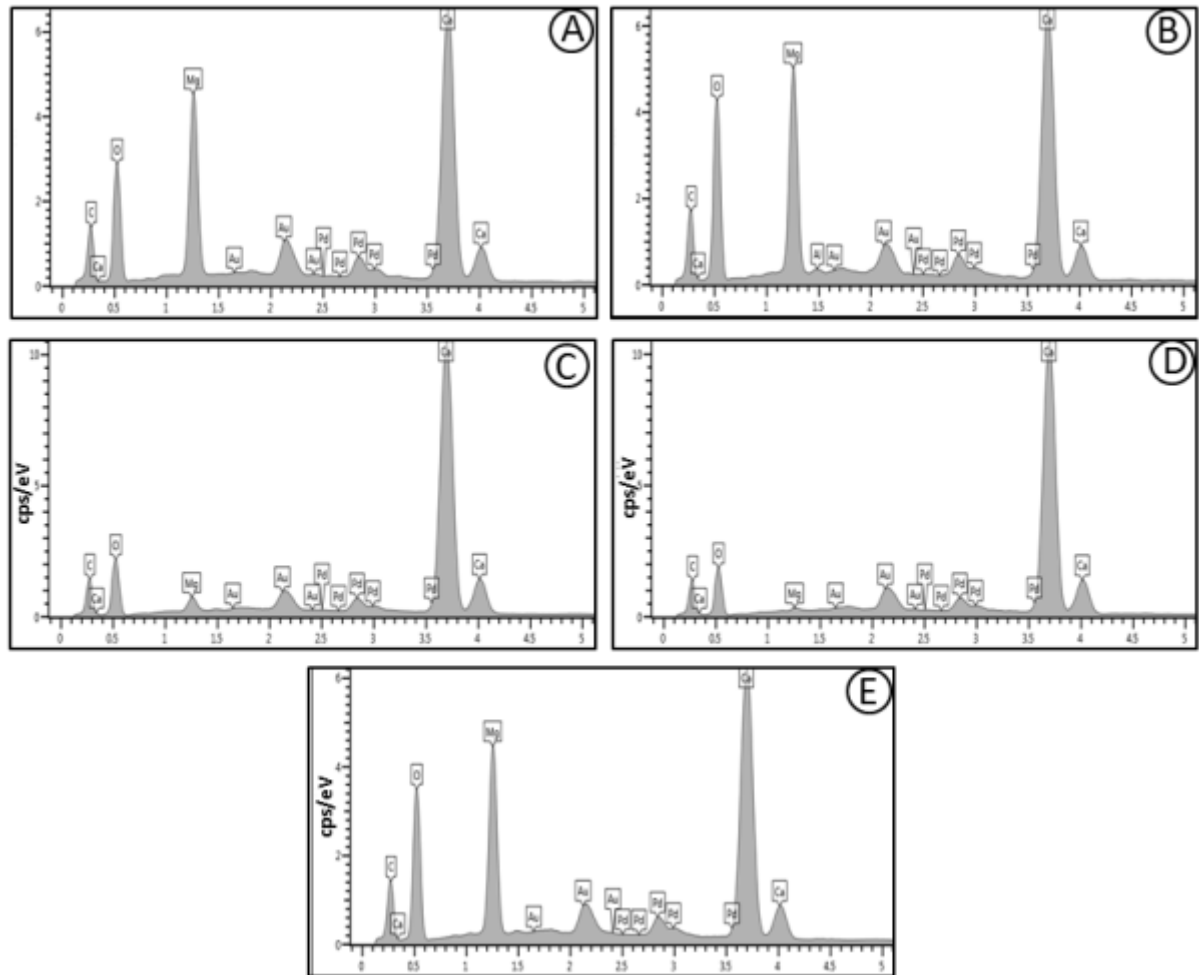
Figura 96 - Características gerais da dolomita romboédrica



Legenda: 1) mosaico de dolomita romboédrica. Fotomicrografia com PP; 2) mesmo de 1, em imagem de catodoluminescência. Notar núcleo de luminescência avermelhada e zoneamento dos cristais de dolomita romboédrica; 3) Cristais de dolomita romboédrica dispostos na porosidade *framework* da fácies SB (seta amarela). Notar que os cristais parecem “flutuar” no meio dos poros, e em alguns pontos parecem ter uma arranjo cumulático (seta vermelha). Fotomicrografia com PX. 4) detalhe dos cristais de dolomita romboédrica. Fotomicrografia com PP; 5) Dolomita romboédrica envolvida por material filamentoso de composição dolomítica (seta). Fotomicrografia com PP. 6) Imagem em MEV (BEI) mostrando detalhe de um cristal de dolomita romboédrica (A, B e E). Notar diferença no tamanho em comparação aos cristais de calcita que constituem o *shrub* (C e D).

Fonte: A autora, 2018.

Figura 97 - Espectros obtidos pela análise de EDS dos pontos na Figura 96-6



Legenda: A) dolomita; B) dolomita; C) calcita; D) calcita; E) dolomita. Os picos de ouro (Au) e paládio (Pd) são devidos à metalização das amostras.

Fonte: A autora, 2018.

5.3.1.1.2 Dolomita subédrica com extinção ondulante

São cristais subédricos de dolomita, que apresentam faces curvas e extinção ondulante. Foram identificadas duas fases diagenéticas que geraram cristais de dolomita com essas características: 1) fase eodiagenética; 2) fase mesodiagenética. Ambas as fases estão presentes em

todos os poços, mas são particularmente abundantes nos poços C, e D, ocorrendo raramente nos poços A e B. Associam-se principalmente as fácies com maiores valores de permoporosidade, como as fácies SB, GST e RUD.

A fase eodiagenética consiste em mosaicos de dolomita subédrica com faces serrilhadas e cristalinidade média a grossa. Ocorre também como franja isópaca, por vezes de aspecto fibroso. Em ambos os casos, os cristais tem aspecto sujo, possivelmente devido à presença de inclusões e/ou microporosidade. Frequentemente são recobertos por franjas de dolomita anédrica que, como será discutido em seguida, é interpretada como uma fase de cimentação eodiagenética. Em análise por catodoluminescência, mostra um aspecto maciço, localmente zonado, com luminescência baixa, de cor alaranjada a esverdeada (Figura 98-2). Por vezes, os cristais de dolomita subédrica são envolvidos por filamentos alongados argilosos, ou de composição dolomítica. Em uma amostra, ocorre associado a essa fase diagenética um cristal alongado de calcita, que pode representar um pseudomorfo de sal (Figura 98-6).

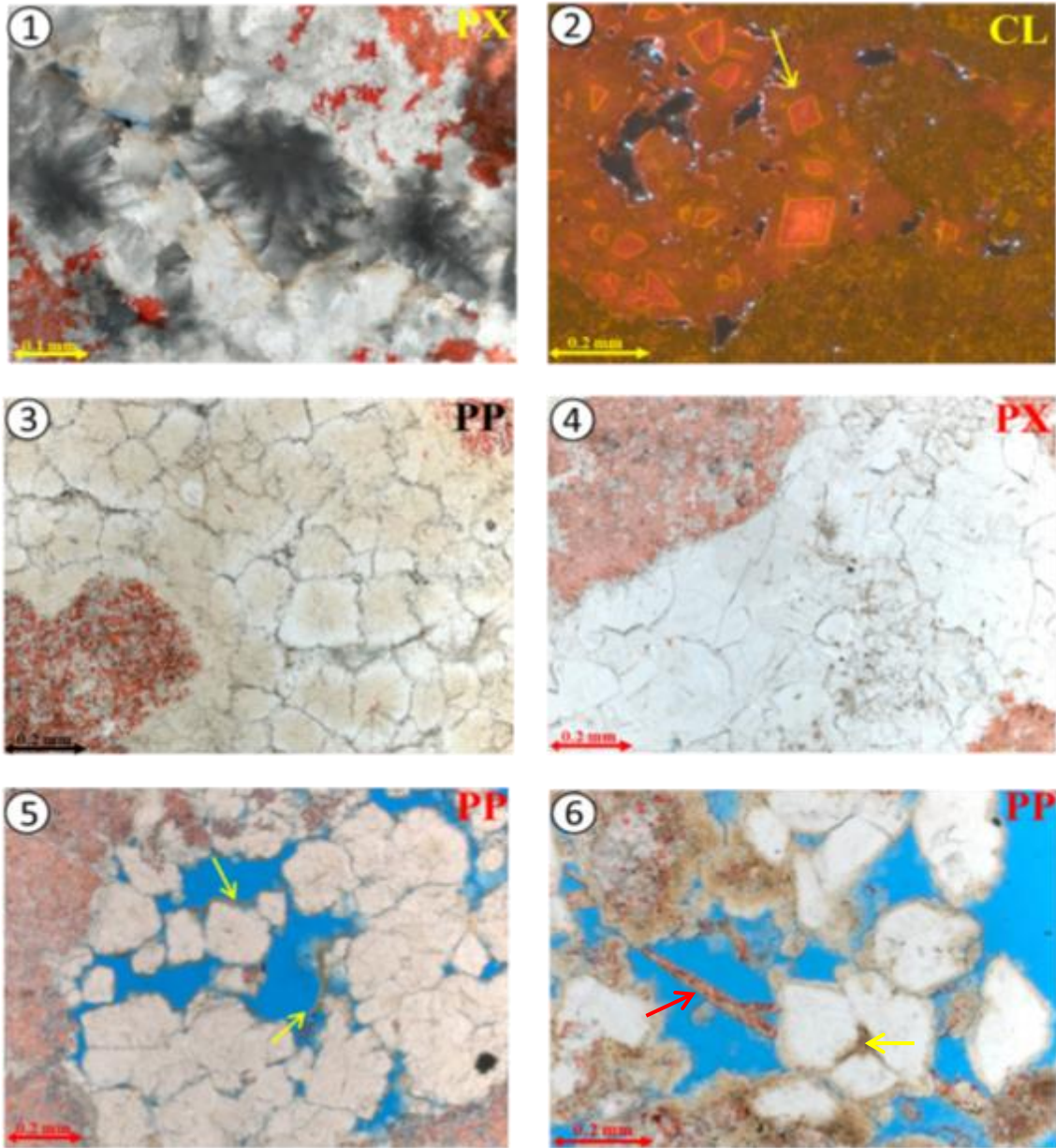
A fase mesodiagenética consiste em mosaicos formados por cristais de dolomita grossos, com bordas serrilhadas e aspecto límpido. Esses mosaicos geralmente preenchem porosidade secundária, como *vugs* e brechas, que não são cortados por estilólitos, o que evidencia sua origem tardia.

As características nos cristais das duas fases diagenéticas acima descritas (faces curvas e extinção ondulante) são muito semelhantes às observadas na chamada dolomita-em-sela, as quais apresentam distorções na sua estrutura cristalina, devido ao seu crescimento rápido (Spötl & Pitman, 1998). A maior parte dos autores interpreta a dolomita-em-sela como tendo origem em fluidos hipersalinos de altas temperaturas (segundo Spötl & Pitman (1998), maiores do que 60°C), e comumente associam sua ocorrência a processos hidrotermais, ou a reações de sulfatoredução termoquímicas mesodiagenéticas (Machel, 1987). No entanto, pouquíssimos autores (Searl & Fallick, 1990; Gao & Land, 1991; Gao & Land, 1992) associam uma origem eodiagenética para esse tipo de dolomita, sendo que todos esses estudos são contestados na literatura geológica.

A fase considerada mesodiagenética tem todas as características diagnósticas de uma dolomita-em-sela (feições petrográficas e origem tardia), e possivelmente foi gerada pela interação da rocha com fluidos de origem bacinal.

A fase de dolomita subédrica considerada eodiagenética também apresenta as características petrográficas diagnósticas de uma dolomita-em-sela. Contudo, o seu tempo de formação é diferente do que é descrito na literatura. Para a comprovação de que esse cimento consista realmente na dolomita-em-sela, é necessário realizar estudos adicionais, como, por exemplo, de inclusões fluidas, que não foram realizadas pelo presente estudo. Contudo, se comprovado que esse cimento consiste realmente na dolomita-em-sela, sua ocorrência poderia estar relacionada à existência de fontes hidrotermais ativas durante a deposição da Formação Barra Velha, que interagiriam com o fundo do lago, como pode ser observado em vários lagos do recente (e.g *Pyramid Lake*, Nevada; Lago Abhé, Sistema Rifte do Leste Africano).

Figura 98 - Características gerais das duas fases de dolomita subédrica com extinção ondulante



Legenda: 1) mosaico de dolomita subédrica mesodiagenética. Notar bordas curvas e extinção ondulante dos cristais. Fotomicrografia com PP; 2) imagem de catodoluminescência de franja de dolomita subédrica eodiagenética. Notar leve zoneamento, mostrando luminescência fraca, alaranjada a esverdeada; 3) mosaico de dolomita subédrica eodiagenética. Notar que os cristais apresentam bordas serrilhadas tem aspecto sujo. Fotomicrografia com PP; 4). mosaico de dolomita subédrica mesodiagenética. Notar que os cristais são maiores e límpidos. Fotomicrografia com PP; 5) cristais de dolomita subédrica eodiagenética envolvidos por lamelas argilosas. Fotomicrografia com PP; 6) cristais de dolomita subédrica eodiagenética apresentando franja de dolomita anédrica acastanhada (seta amarela). Notar cristal alongado de calcita, que é um possível pseudomorfo de sal (seta vermelha).

Fonte: A autora, 2018.

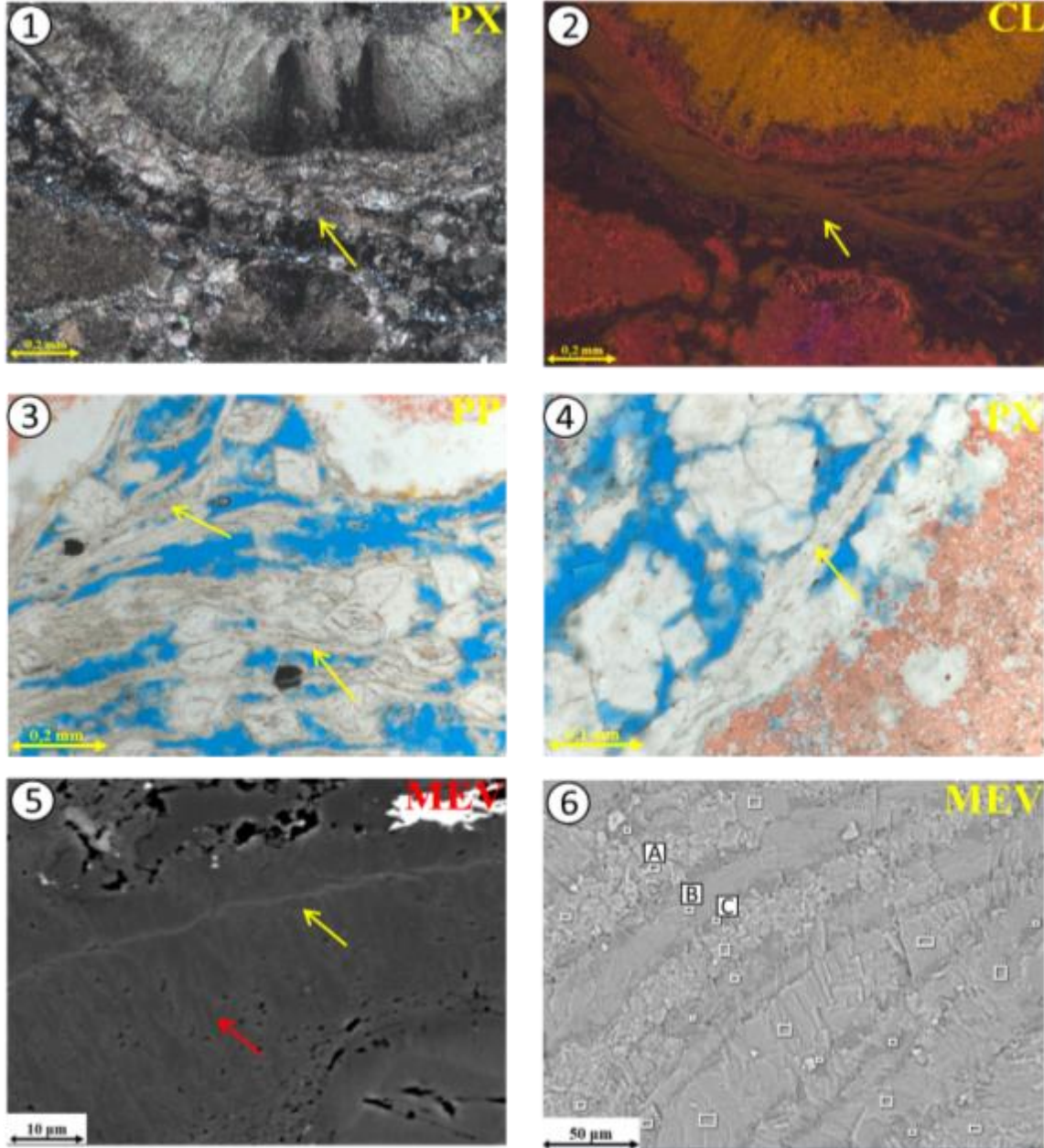
5.3.1.1.3 Dolomita lamelar

Consiste em agregados dolomíticos com morfologia lamelar, compostos por cristais finos alinhados segundo uma direção, em geral do acamamento, por vezes apresentando bordas de Magnesita (Figura 99-6), como foi detectado nas análises de EDS (Figura 100). Ocorre principalmente como mineral intersticial entre os esferulitos na fácies ESF, se amoldando aos mesmos (Figura 99-1). Quando em grande volume, as lamelas de dolomita por vezes apresentam uma trama em forma de rede, sendo chamada nesse caso de dolomita reticulada (Figura 99-3). Pode ocorrer, também, associada às fácies SB, geralmente constituindo agregados menos alongados, com aspecto fragmentado. Assim como a dolomita romboédrica, é uma fase diagenética comum em todos os poços estudados.

A dolomita lamelar tem luminescência baixa, esverdeada, muito similar à das zonas mais externas dos cristais de dolomita romboédrica (Figura 99-2), o que indica que a dolomita lamelar é posterior à dolomita romboédrica. Frequentemente, é possível observar uma feição linear escura no meio das lamelas (Figura 99-4), que observadas em MEV, mostram-se como uma superfície a partir da qual ocorre o crescimento dos cristais de dolomita (Figura 99-5). Em alguns casos, o material escuro que compõe esses filamentos foi totalmente degradado, restando apenas seu molde. Comumente a dolomita lamelar apresenta uma associação com níveis de sílica criptocristalina, que ocorrem entre as lamelas e assume também uma geometria lamelar.

A geometria lamelar desses agregados calcíticos, muitas vezes gerando uma distribuição reticulada, bem como sua ocorrência como material intersticial à fácies ESF, e a observação de feições lineares que servem como superfícies a partir das quais ocorre o crescimento dos cristais de dolomita, levam a interpretação de que a dolomita lamelar possivelmente tenha origem na organomineralização influenciada de filamentos que compõe o substrato no qual nucleiam os esferulitos e a dolomita romboédrica. Essa mineralização deve ocorrer após a precipitação da dolomita romboédrica, provavelmente sob maior soterramento.

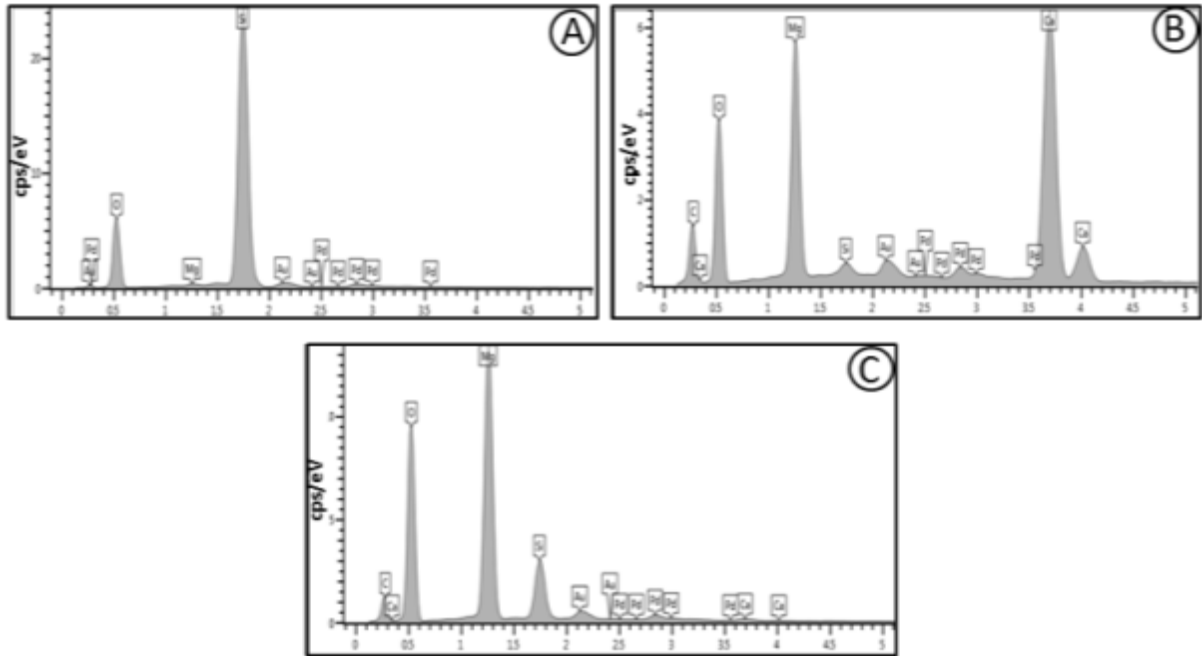
Figura 99 - Características gerais da dolomita lamelar



Legenda: 1) trama de dolomita lamelar (seta) envolvendo esferulito. Fotomicrografia com PP; 2) mesmo de 1, em imagem de catodoluminescência. Notar luminescência esverdeada da dolomita lamelar, que é muito similar a da camada mais externa dos cristais de dolomita romboédrica; 3) Agregados de dolomita lamelar, dispostos em uma trama reticulada (setas), que englobam dolomita romboédrica. Fotomicrografia com PP. 4) detalhe da feição linear escura no meio de dolomita lamelar. Fotomicrografia com PP; 5) Imagem em MEV (BEI) mostrando detalhe de uma dolomita lamelar com feição linear (seta amarela). Notar que os cristais de dolomita crescem em ambos os lados da lamela a partir dessa superfície (seta vermelha). 6) Imagem em MEV (BEI) mostrando lamelas de composição dolomítica (B) com bordas de magnesita (C), intercaladas com níveis de sílica também com geometria lamelar (A).

Fonte: A autora, 2018.

Figura 100 - Espectros obtidos pela análise de EDS dos pontos na Figura 99-6



Legenda: A) sílica; B) dolomita; C) magnesita. Os picos de ouro (Au) e paládio (Pd) são devidos à metalização das amostras.

Fonte: A autora.

5.3.1.1.4 Dolomita anédrica

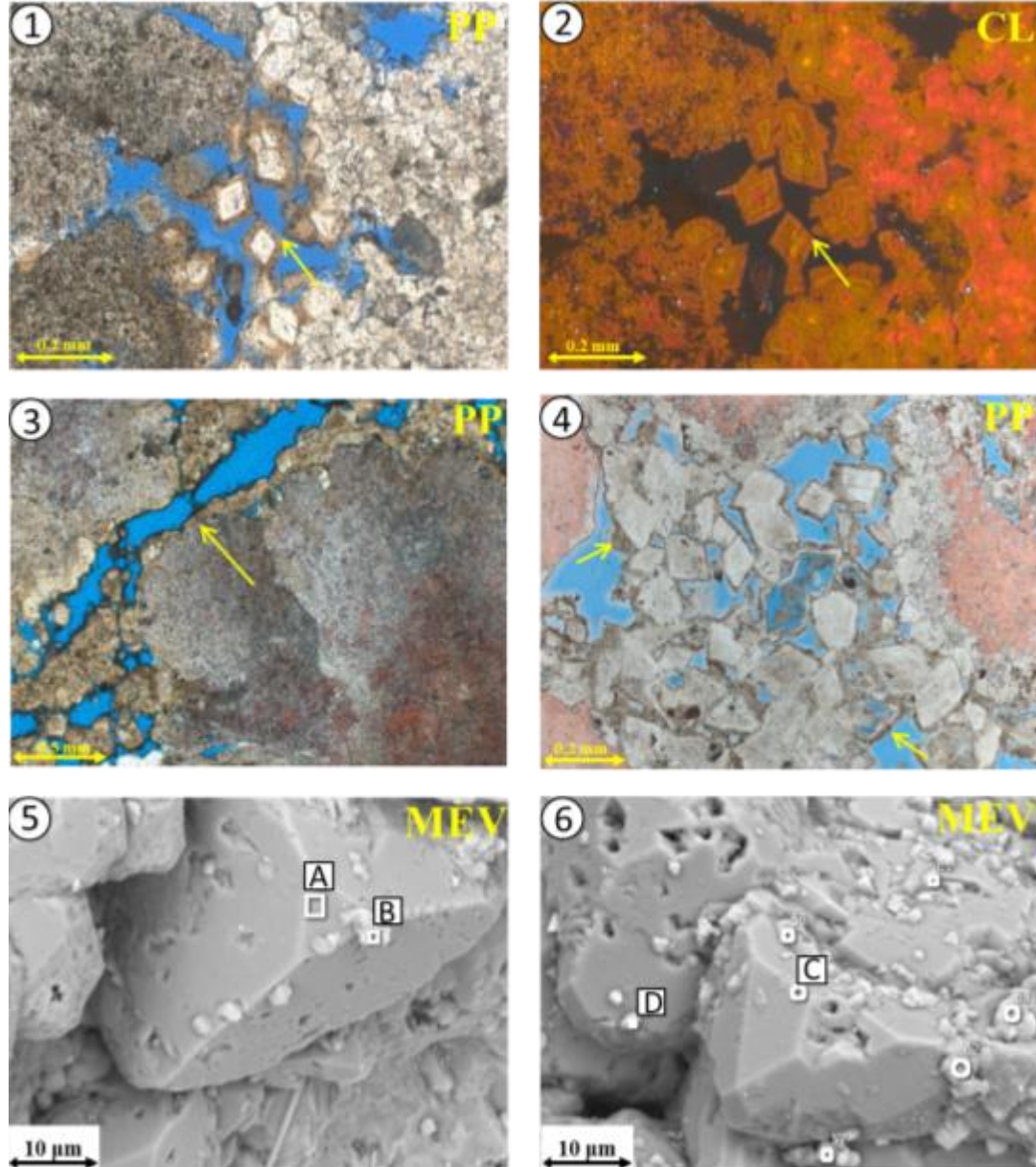
Essa fase diagenética consiste em cristais anédricos de dolomita, com cristalinidade, em geral, fina a média, em alguns casos chegando à grossa. Ocorre principalmente como franjas descontínuas (Figura 101-3) ao redor dos componentes do arcabouço (*shrubs*, esferulitos e grãos), ou como franja contínua, nesse caso envolvendo cristais de dolomita romboédrica, dolomita subédrica, e/ou dolomita lamelar (Figura 101-1/4). Por vezes, constituem cimentos com geometrias semelhantes a meniscos, e são comuns em amostras afetadas por processos de dissolução. Geralmente, apresenta uma coloração acastanhada, mas pode ocorrer também como cristais límpidos.

Tem uma luminescência fraca, de cor alaranjada, e não apresenta zonação dos cristais. Em MEV, observa-se que os cristais de dolomita anédrica tem morfologia irregular, e agregam nanocristais de sílica, como pode ser visto nas Figura 101-5/6 e Figura 102. É comum em todos

os poços, mas ocorre em maior volume nos poços C e D. Associa-se principalmente às fácies SB, GST e ESF.

A dolomita anédrica constitui uma fase digenética posterior às demais fases de dolomita acima descritas. Sua ocorrência comum na forma de franjas descontínuas ao redor dos constituintes do arcabouço, por vezes lembrando meniscos, e sua associação com nanocristais de sílica, sugerem a interpretação de que a dolomita anédrica possivelmente seja um cimento gerado no ambiente diagenético meteórico vadoso inferior, ou no ambiente freático raso. A interação da rocha com a água meteórica doce (pH mais ácido) que ocorre nesses ambientes explica também a associação desse cimento a feições de dissolução e a cristais de sílica. Além disso, sua distribuição vertical mostra concentrações progressivamente maiores em direção ao topo dos hemicírculos regressivos, como será discutido mais adiante.

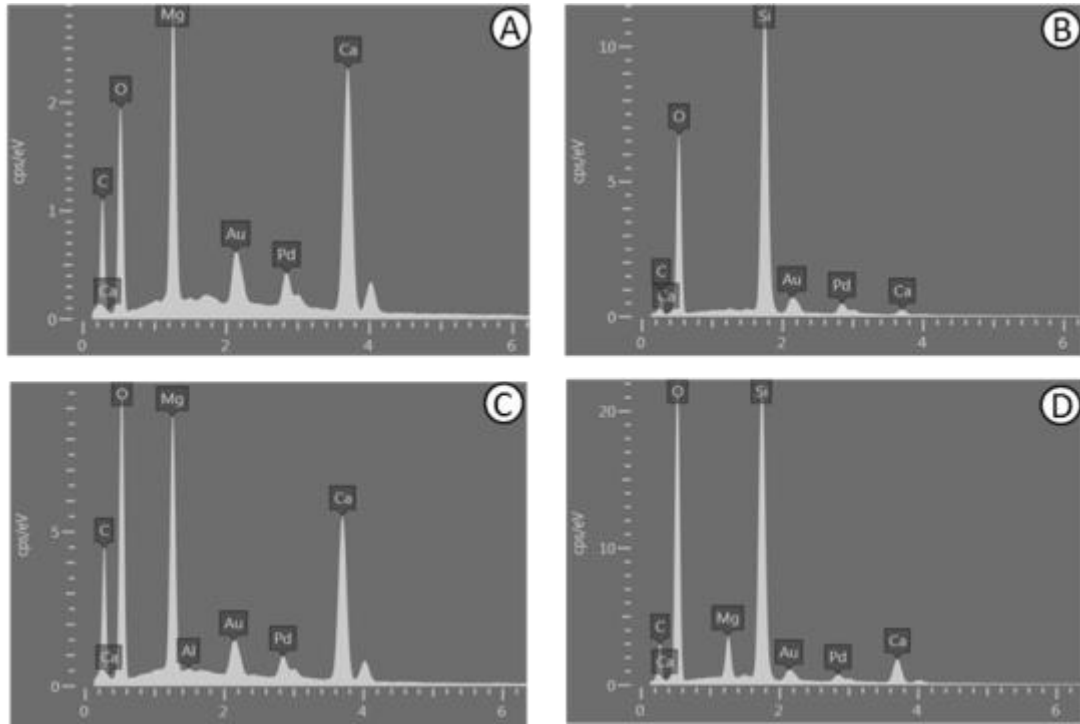
Figura 101 - Características gerais da dolomita anédrica



Legenda: 1) franja de dolomita anédrica de cor acastanhada envolvendo cristais de dolomita romboédrica (seta). Fotomicrografia com PP; 2) mesmo de 1, em imagem de catodoluminescência. Notar luminescência fraca, de cor alaranjada das franjas de dolomita anédrica; 3) franja descontínua de dolomita anédrica, de cor levemente acastanhada (seta). Fotomicrografia com PP. 4) franja delgada de dolomita acastanhada envolvendo cristais de dolomita romboédrica. Notar que alguns cristais romboédricos apresentam núcleos dissolvidos Fotomicrografia com PP; 5) Imagem em MEV (BEI) mostrando detalhe de uma dolomita anédrica (A) associada a nanocristais de sílica (B); 6) imagem em MEV (BEI) mostrando mais detalhes de dolomita anédrica associada a nanocristais de sílica. Notar que a sílica parece se alojar em microperfurações presentes na superfície dos cristais de dolomita anédrica.

Fonte: A autora, 2018.

Figura 102 - Espectros obtidos pela análise de EDS dos pontos na Figura 101-5/6



Legenda: A) dolomita; B) sílica; C) dolomita; D) sílica. Os picos de ouro (Au) e paládio (Pd) são devidos à metalização das amostras.

Fonte: A autora, 2018.

5.3.1.2 Sílica

Os minerais de sílica são abundantes nas amostras descritas, tendo sido observados basicamente 3 tipos, que apresentam diferentes texturas e cristalinidade: 1) sílica criptocristalina; 2) quartzo microcristalino; 3) quartzo macrocristalino.

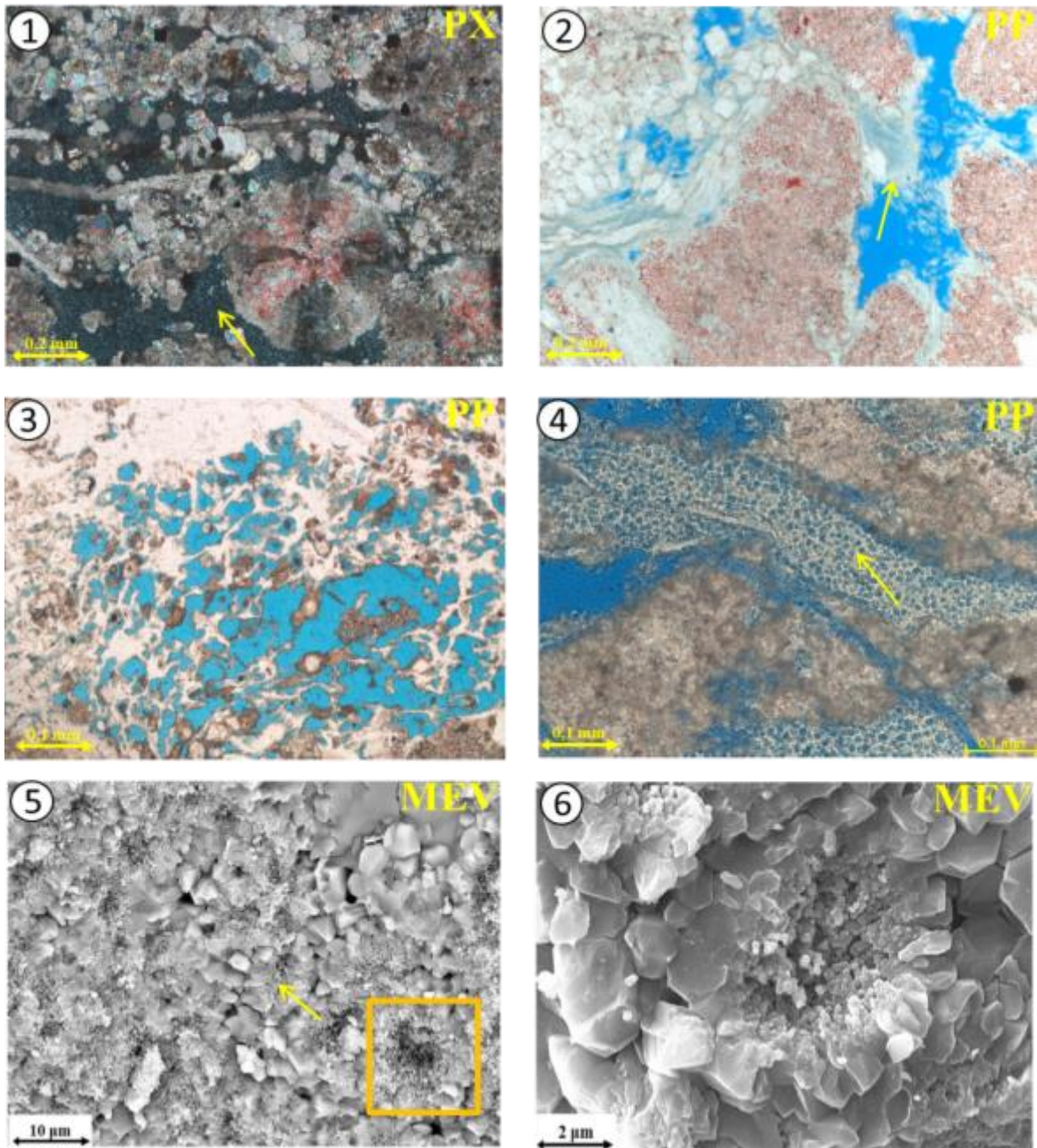
5.3.1.2.1 Sílica criptocristalina

Consiste em agregados maciços (Figura 103-1) ou de morfologia lamelar/reticulada (Figura 103-2/3), constituídos por cristais nanométricos de sílica, apenas observados em MEV. Em geral, compõe níveis estratiformes, associados principalmente às fácies ESF, LMT.lis e LMT.cre, mas pode ocorrer em forma irregularmente espaçada, preenchendo o espaço poroso. Frequentemente apresenta microporosidade, e, por vezes, cavidades arredondadas, de distribuição regular, sendo que, nesses casos, não foram observadas evidências da atuação de processos de dissolução (Figura 103-4).

Em MEV, foi observada uma distribuição organizada dos cristais de sílica, com pontos de nucleação de aproximadamente 2 μm , a partir da qual ocorre um aumento progressivo dos cristais de sílica, de forma concêntrica, como pode ser observado na Figura 103-5/6. Os pontos de nucleação representam cavidades, que não apresentaram feições de corrosão.

A ocorrência de sílica criptocristalina como níveis estratiformes, ou com geometria lamelar/reticulada, e o tamanho diminuto dos cristais sugerem uma origem diageneticamente precoce ou singenética para a mesma. A geometria organizada dos cristais de sílica, que parecem ser formados a partir de pontos de nucleação, ainda sugere a atuação de processos de organomineralização bioinduzida. Como já discutido, Bustillo (2010) propõe que pequenas mudanças no pH e na concentração de CO_2 , biologicamente induzidas por algas presentes em biofilmes, poderiam promover a precipitação de sílica. Assim, um processo semelhante pode ter ocorrido na Formação Barra Velha, onde os pontos de nucleação observados em MEV, hoje ocos, podem ter abrigado microrganismos que teriam induzido a precipitação de sílica. Por sua vez, a geometria lamelar/reticulada poderia representar a organomineralização influenciada de filamentos orgânicos, que ocorreria de forma semelhante à dolomita lamelar.

Figura 103 - Características gerais da sílica criptocristalina



Legenda: 1) sílica criptocristalina de aspecto maciço (seta) envolvendo dolomita lamelar e mosaico de dolomita romboédrica. Fotomicrografia com PX; 2) sílica criptocristalina de aspecto lamelar (seta) envolvendo *shrebs*. Fotomicrografia com PP; 3) lamelas compostas por sílica criptocristalina em arranjo reticulado. Fotomicrografia com PP; 4) nível composto por sílica criptocristalina microporosa. Notar cavidades arredondadas, de distribuição regular (seta). Fotomicrografia com PP; 5) Imagem em MEV (BEI) mostrando arranjo dos cristais de quartzo criptocristalino (seta); 6) detalhe de 5 (quadrado amarelo). Notar distribuição organizada dos cristais de sílica, com aumento progressivo dos mesmos, de forma concêntrica, a partir de um núcleo.

Fonte: A autora, 2018.

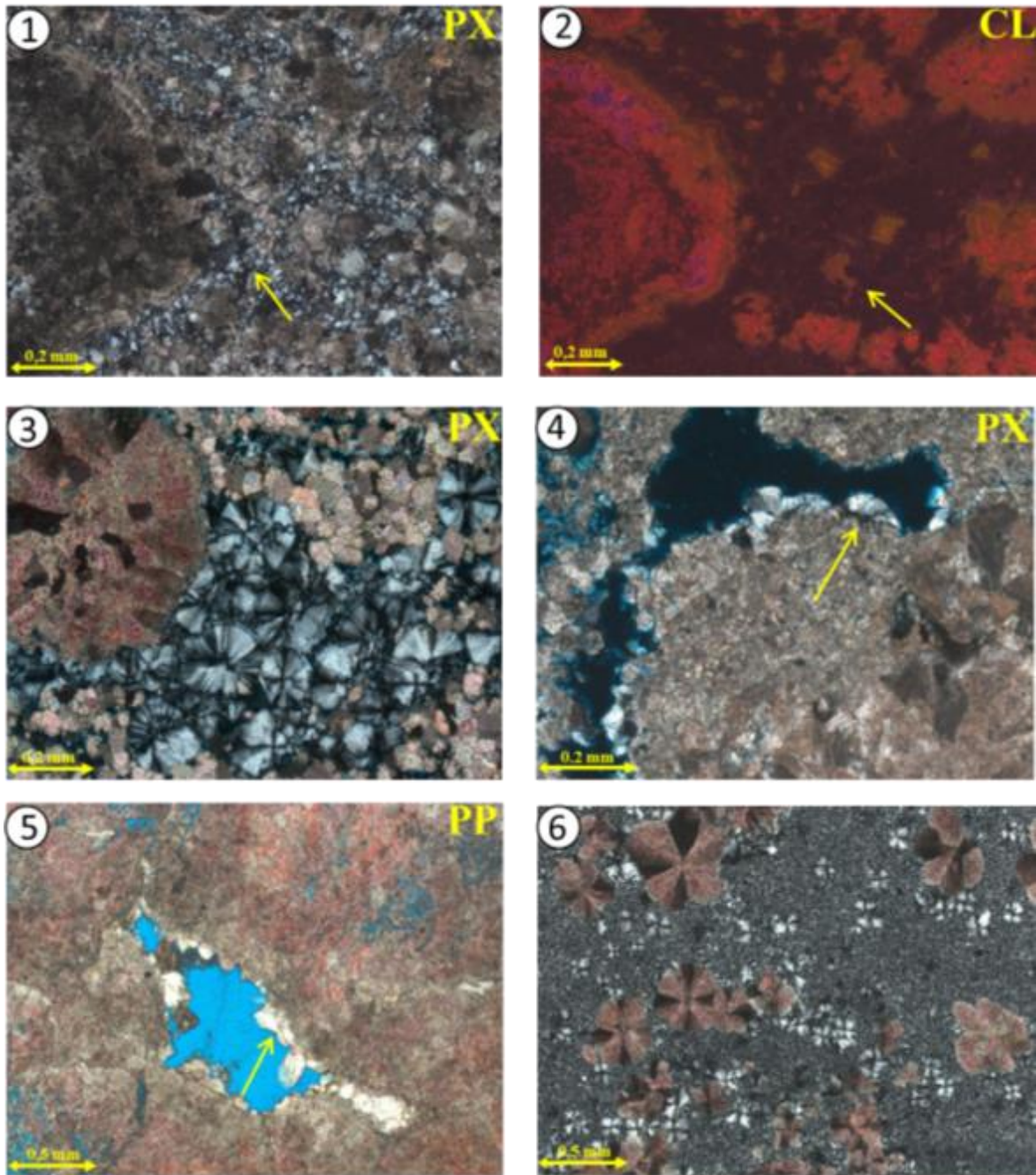
5.3.1.2.2 Quartzo microcristalino, calcedônia e quartzo macrocristalino

Quartzo microcristalino consiste na fase diagenética mais abundante dentre os minerais de sílica ocorrendo em todos os poços, associado preferencialmente às fácies SB e ESF. Todavia, é volumetricamente mais relevante no poço A. É composta por cristais de quartzo muito finos a finos (Figura 104-1), por vezes associados a agregados silicosos esféricos (Figura 104-3/6) de textura fibrosa radial (calcedônia). Quartzo microcristalino e calcedônia ocorrem principalmente como cimento, preenchendo o espaço poroso e/ou substituindo parcialmente o arcabouço (Figura 104-6), constituindo dessa forma níveis estratiformes ou nódulos. No entanto, franjas de quartzo microcristalino também são comuns (Figura 104-4/5). Em análise por catodoluminescência mostra-se como um mineral não luminescente, que engloba cristais de dolomita romboédrica, frequentemente os substituindo (Figura 104-2).

Já o quartzo macrocristalino é o menos abundante dentre os minerais de sílica. Consiste em cristais de quartzo de tamanho médio a grosso, em alguns casos chegando a muito grosso (Figura 105-4). É especialmente frequente na fácies SB, mas pode estar presente também nas fácies ESF e HESF/SB. Ocorre principalmente como nódulos e níveis estratiformes, preenchendo o espaço poroso, substituindo o arcabouço (Figura 105-3) e preenchendo fraturas (Figura 105-2). Associa-se frequentemente ao quartzo microcristalino, sendo possível verificar uma graduação entre eles (Figura 105-1).

Interpreta-se que os níveis onde ocorre cimentação e/ ou substituição parcial do arcabouço por quartzo microcristalino, calcedônia e/ou macrocristalino sejam diageneticamente precoces, e teriam origem em períodos mais úmidos, em condições de pH mais ácido da água do lago. Nessas condições, portanto, ocorreria a dissolução dos minerais carbonáticos e a precipitação de quartzo. As fraturas preenchidas por quartzo macrocristalino não são pervasivas ao longo das amostras analisadas, e podem estar relacionadas a processos de brechação que ocorreriam em períodos de exposição subaérea.

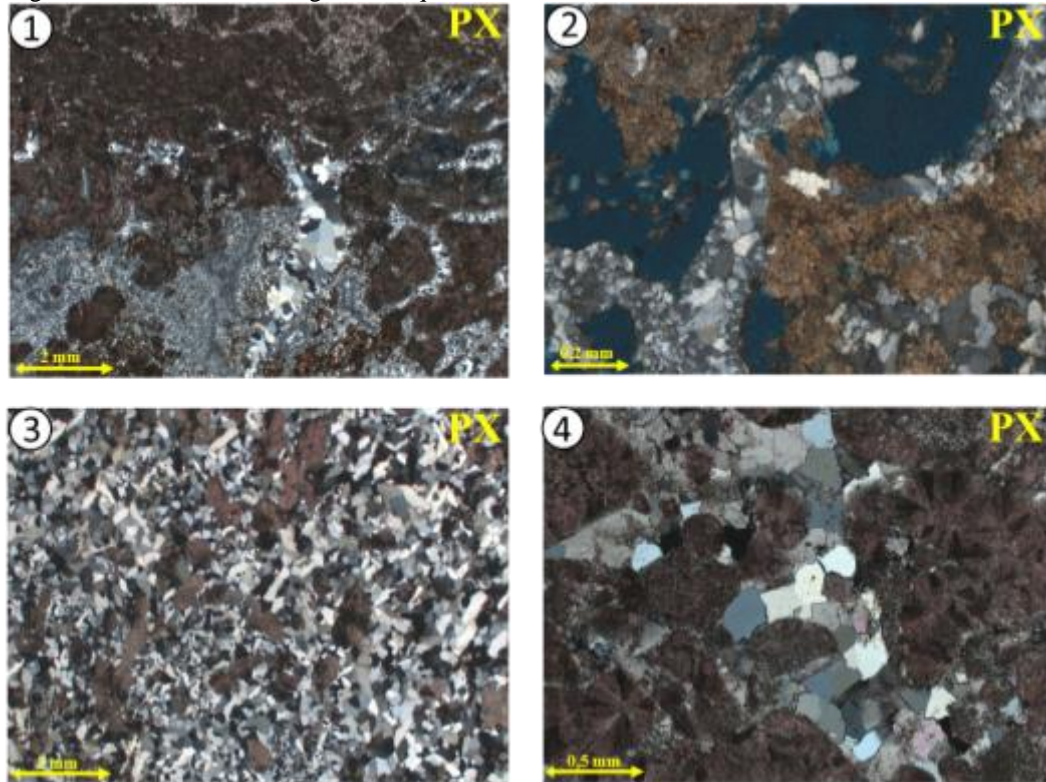
Figura 104 - Características gerais do quartzo microcristalino e calcedônia



Legenda: 1) cristais de quartzo microcristalino englobando mosaico de dolomita romboédrica. Fotomicrografia com PP; 2) mesmo de 1, em imagem de catodoluminescência. Notar que os cristais de sílica não são luminescentes, e parecem corroer cristais de dolomita romboédrica; 3) agregados esféricos fibrosos de quartzo microcristalino (calcedônia). Fotomicrografia com PP; 4) franja descontínua de quartzo microcristalino fibroso (seta) envolvendo *shrub*. Fotomicrografia com PX; 5) franja de quartzo microcristalino. Fotomicrografia com PP. 6) quartzo microcristalino e agregados esféricos de quartzo fibroso (calcedônia) preenchendo o espaço entre os esferulitos. Fotomicrografia com PP.

Fonte: A autora, 2018.

Figura 105 - Características gerais do quartzo macrocristalino



Legenda: 1) cristais de quartzo macrocristalino (cimento) associado quartzo microcristalino, que substitui parcialmente o arcabouço da rocha. Fotomicrografia com PX; 2) quartzo macrocristalino preenchendo fraturas e substituindo parcialmente o arcabouço da rocha. Fotomicrografia com PX; 3) nível intensamente silicificado, exibindo cimentação e substituição parcial do arcabouço por quartzo macrocristalino . Fotomicrografia com PX; 4) detalhe de cimento de quartzo macrocristalino blocoso preenchendo espaço entre os esferulitos. Fotomicrografia com PX.

Fonte: A autora, 2018.

5.3.1.3 Calcita

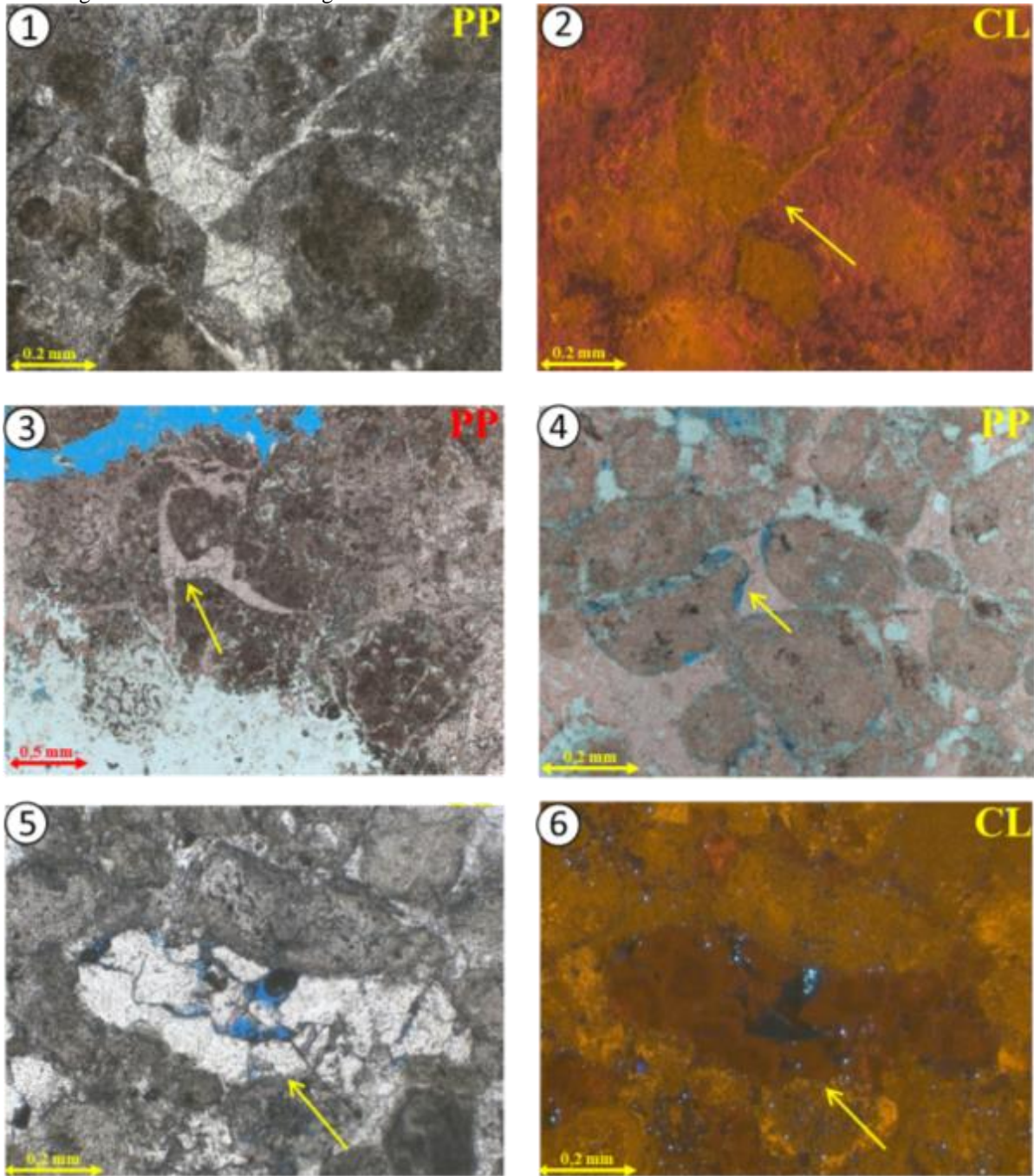
Calcita como mineral diagenético mostrou-se pouco frequente nas amostras analisadas, estando presente em maior volume nos poços C e D. Ocorre de duas formas, que representam fases diagenéticas distintas: 1) preenchendo microfraturas em *shrubs* (Figura 106-1); 2) como franja e/ou mosaico de calcita blocosa (Figura 106-4/5).

Quando ocorre preenchendo microfraturas, possui cristalinidade fina a média e luminescência forte amarelada (Figura 106-2). Esse cimento é interpretado como precoce, já que

as microfraturas são restritas a alguns níveis de *shrubs*, que são sobrepostos por novas camadas que não são afetadas pelas mesmas (Figura 106-3).

Quando ocorre como franja ou como mosaico, apresenta cristalinidade média a grossa, e apresenta luminescência fraca amarelo-alaranjada (Figura 106-6). Os mosaicos de calcita preenchem o espaço intergranular da fácies GST e mais raramente da fácies RUD, englobando cristais de dolomita romboédrica e dolomita anédrica. Além disso, parece ser posterior à compactação mecânica (Figura 106-4), e por vezes posterior à compactação química. Portanto, o cimento de calcita blocosa representa uma fase diagenética mais tardia, tendo sido gerada provavelmente na eodiagênese tardia e/ou na mesodiagênese.

Figura 106 - Características gerais dos cimentos de calcita



Legenda: 1) mosaico de calcita preenchendo microfratura. Fotomicrografia com PP; 2) mesmo de 1, em imagem de catodoluminescência. Notar luminescência forte amarelada; 3) mosaico de calcita preenchendo microfratura em *shrub* (seta). Notar que a estrutura não é pervasiva na amostra, ficando restrita ao mesmo nível. Fotomicrografia com PP; 4) Mosaico de calcita preenchendo porosidade intergranular de GST (seta). Notar que o cimento é anterior ao processo de dissolução que afetou parte dos grãos. Fotomicrografia com PP. 5) franja de calcita blocosa (seta). Fotomicrografia com PP; 6) mesmo de 5, em imagem de catodoluminescência. Notar luminescência fraca, de cor amarelo-alaranjada.

Fonte: A autora, 2018.

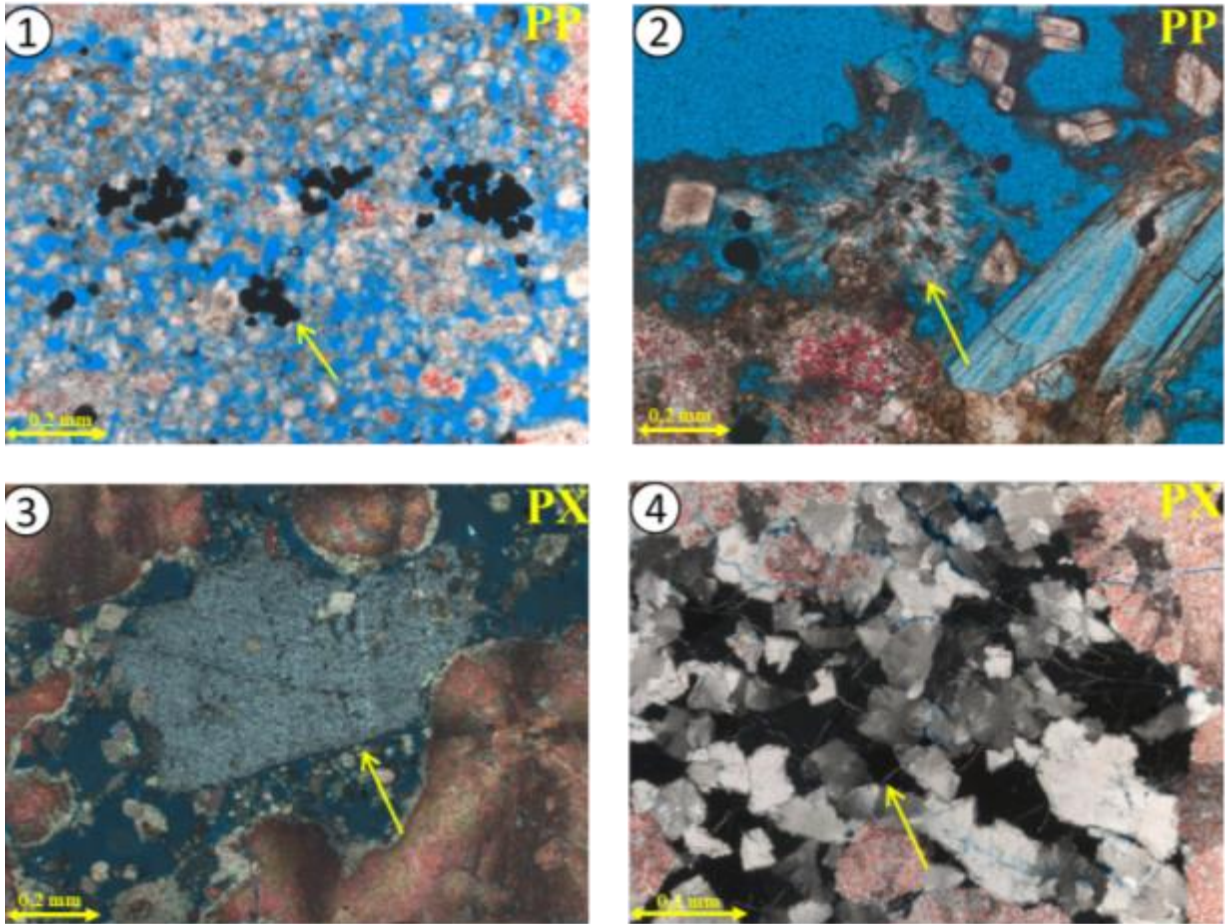
5.3.1.4 Minerais acessórios

Além dos minerais descritos acima, outros minerais diagenéticos foram identificados, sendo eles: pirita (FeS_2), dawsonita ($\text{NaAl}(\text{CO}_3)(\text{OH})_3$), barita (BaSO_4), criolita (Na_3AlF_6), fluorita (CaF_2), svanbergita ($\text{SrAl}_3(\text{PO}_4)(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$) e goyazita ($\text{SrAl}_3(\text{PO}_4)(\text{OH})_5 \cdot (\text{H}_2\text{O})$).

Pirita (Figura 107-1) e dawsonita (Figura 107-2 e Figura 108-1) são minerais que ocorrem em baixíssimo volume, mas de forma frequente nas amostras estudadas. Pirita consiste em cristais cúbicos muito finos a finos, de ocorrência dispersa ou em pequenos aglomerados, comumente preenchendo a porosidade ou substituindo parcialmente o arcabouço. Já a dawsonita ocorre como cimento com textura radial aciculada, que engloba cristais de dolomita e pirita.

Os demais minerais são raros nas amostras analisadas. Cimento de barita (Figura 107-3 e Figura 108-2) e criolita (Figura 107-4 e Figura 108-4) foram observados em associação com dolomita subédrica mesodiagenética. Já fluorita e svanbergita foram identificadas em MEV substituindo *shrubs* e esferulitos. Por fim, goyazita também foi observada em MEV, associada à sílica microcristalina (Figura 108-3).

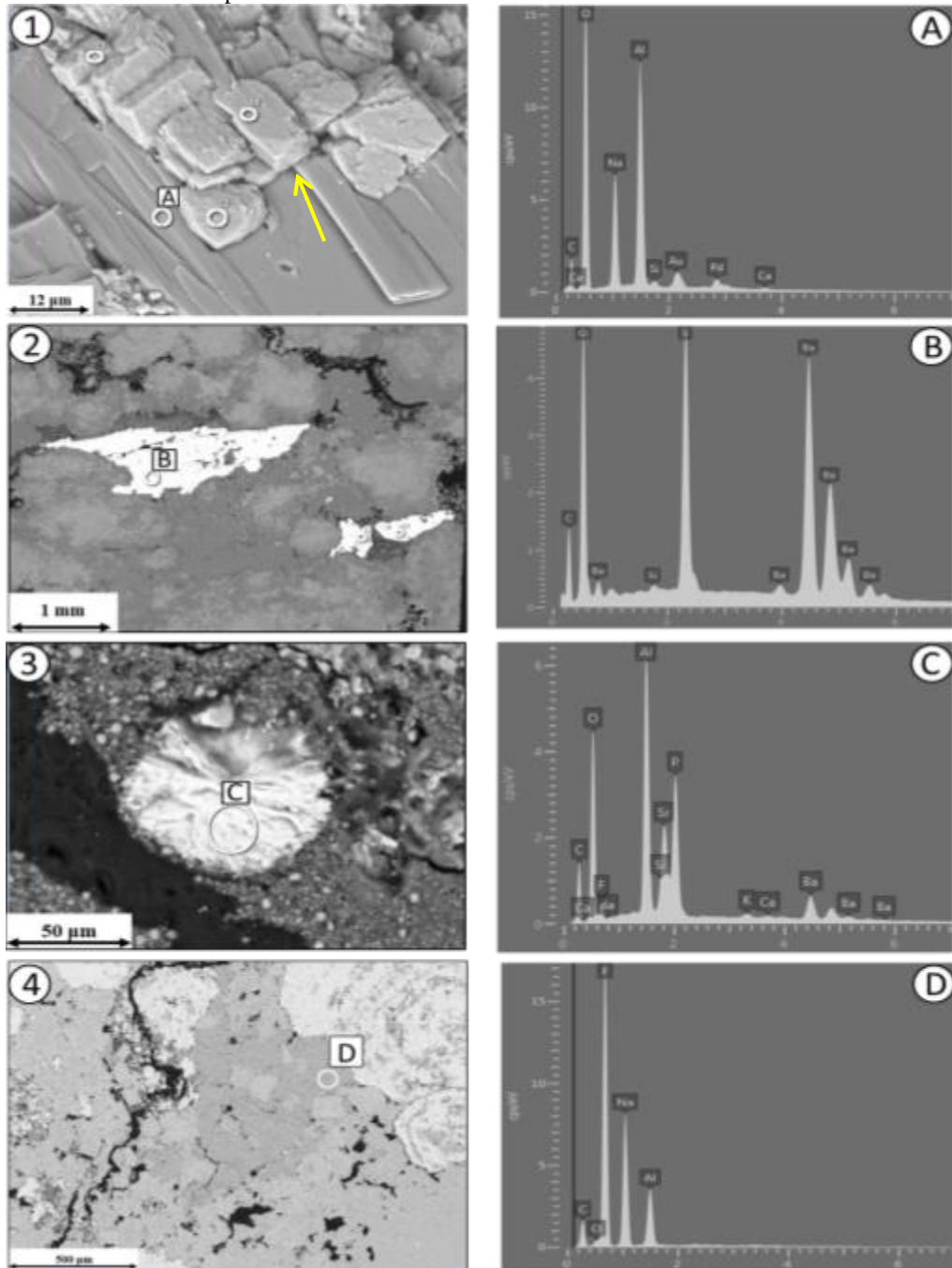
Figura 107 - Minerais acessórios observados na análise de lâminas delgadas



Legenda: 1) cristais cúbicos de pirita (seta), organizados em pequenos aglomerados. Fotomicrografia com PP; 2) dawsonita (seta) preenchendo porosidade intergranular. Fotomicrografia com PP; 3) cimento de barita (seta) englobando cristais de dolomita romboédrica. Fotomicrografia com PX; 4) Cimento de criolita (seta) englobando cristais de dolomita em sela mesodiagénéticos. Fotomicrografia com PX.

Fonte: A autora, 2018.

Figura 108 - Minerais acessórios observados na análise de MEV juntamente com os espectros obtidos pela análise em EDS



Legenda: 1) imagem em MEV (BEI) mostrando cristais de dolomita romboédrica (seta) englobados por dawsonita (A); 2) imagem em MEV (BEI) mostrando níveis de barita (B); 3) imagem em MEV (BEI) mostrando cristal de goyazita (c); 4) imagem em MEV (BEI) de cimento de criolita. Os picos de ouro (Au) e paládio (Pd) observados nos espetros são devidos à metalização das amostras.

Fonte: A autora, 2018.

5.3.1.5 Dissolução

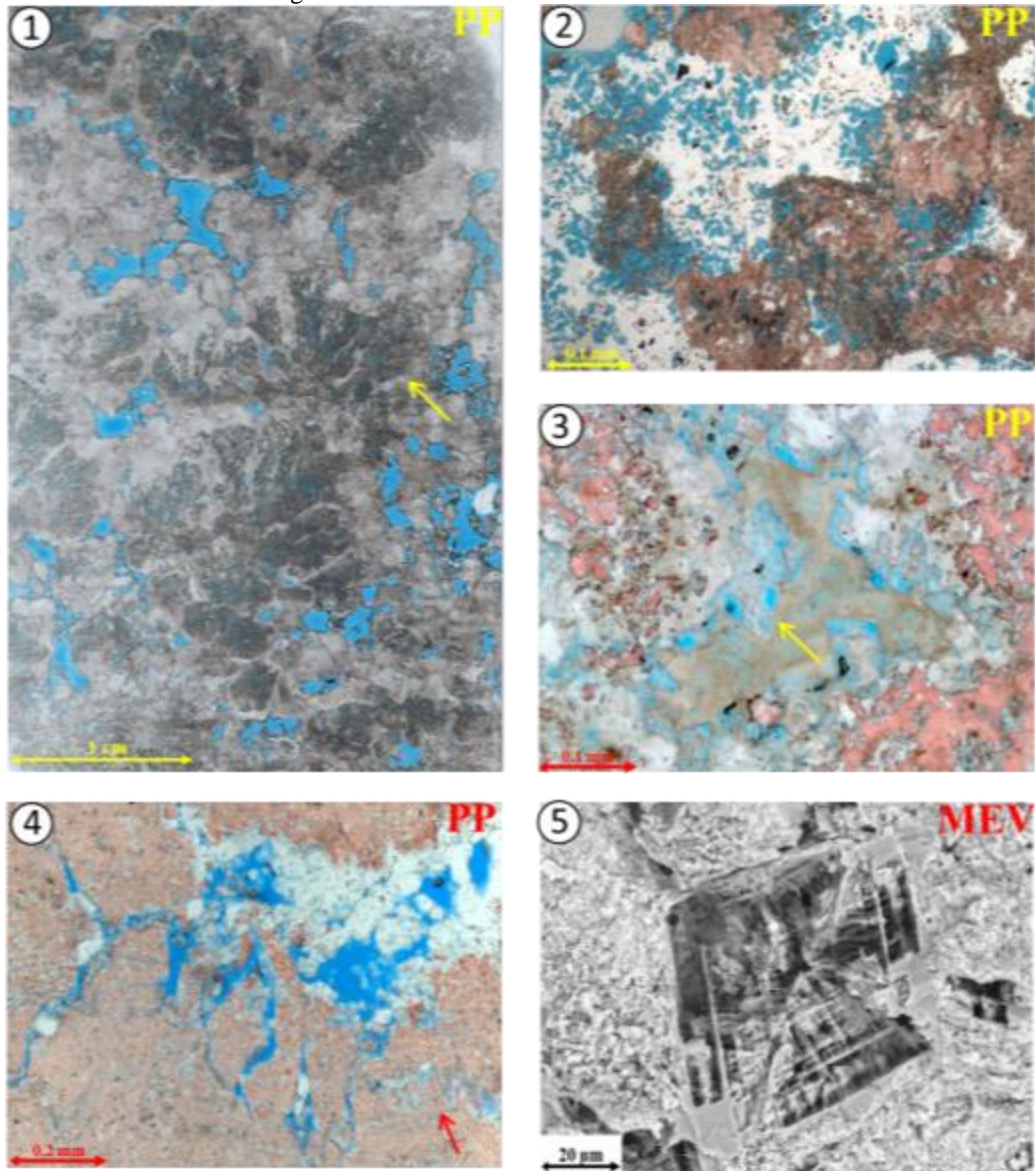
A dissolução do arcabouço e de minerais diagenéticos mostrou-se um processo comum nas amostras analisadas. No entanto, o mesmo não ocorreu em um estágio diagenético único. Com a análise das relações texturais das feições de corrosão, e também dos constituintes da rocha que foram parcialmente dissolvidos, foi possível estabelecer 3 estágios principais de ocorrência de dissolução: 1) estágio eodiagenético precoce; 2) estágio eodiagenético tardio; 3) estágio mesodiagenético. Os dois primeiros estágios são os mais relevantes para a área de estudos.

O estágio eodiagenético precoce corresponde ao processo de dissolução parcial do arcabouço em níveis bem marcados, que são sobrepostos por outros níveis que não são corroídos, como pode ser visto na Figura 109-1. É especialmente frequente na fácies SB. Portanto, corresponde a um processo diageneticamente precoce, provavelmente controlado por pequenas variações no nível do lago, que podem expor periodicamente as rochas carbonáticas, deixando-as suscetíveis à interação com fluidos meteóricos, que por sua vez promovem a dissolução parcial dos carbonatos.

O estágio eodiagenético tardio corresponde à dissolução parcial mais pervasiva da rocha, não afetando apenas seu arcabouço, mas também os minerais diagenéticos, como por exemplo, dolomita romboédrica (Figura109). Esses processos de dissolução provavelmente são causados por oscilações no pH da água intersticial, possivelmente controlada por mudanças geoquímicas da água do lago (provavelmente controladas por mudanças climáticas). É importante notar que a dissolução dos minerais carbonáticos e a precipitação de sílica podem estar associadas, já que existe uma relação inversa de solubilidades entre a calcita e a sílica, como foi ilustrado na Figura 41.

O estágio mesodiagenético é raramente observado nas amostras estudadas. Corresponde ao alargamento de estilólitos e em alguns casos, geração de porosidade secundária (*vugs* e brechas). Essas feições geralmente ocorrem associadas a cimentos de dolomita subédrica mesodiagenética, tendo sido provavelmente geradas pela atuação de fluidos hidrotermais durante a mesodiagênese (Figura 109-4).

Figura 109 - Feições de corrosão geradas por processos de dissolução do arcabouço e de minerais diagenéticos



Legenda: 1) SB apresentando intercalações de níveis de *shubs* com núcleos corroídos (seta), sobrepostos por níveis sem corrosão. Fotomosaico com PP; 2) SB com cimento de quartzo microcristalino. Notar porosidade móldica no cimento de quartzo, provavelmente devido à dissolução de partículas carbonáticas que estão associadas a ela. Fotomicrografia com PP. 3) cristais de dolomita romboédrica com núcleos corroídos. Fotomicrografia com PP; 4) estilolito alargado por processo posterior de dissolução (seta) Fotomicrografia com PP. 5) imagem em MEV (BEI) de um cristal de dolomita romboédrica com núcleo dissolvido. Notar que o cristal é zonado, sendo que cada zona apresentou diferentes suscetibilidades à dissolução.

Fonte: A autora, 2018.

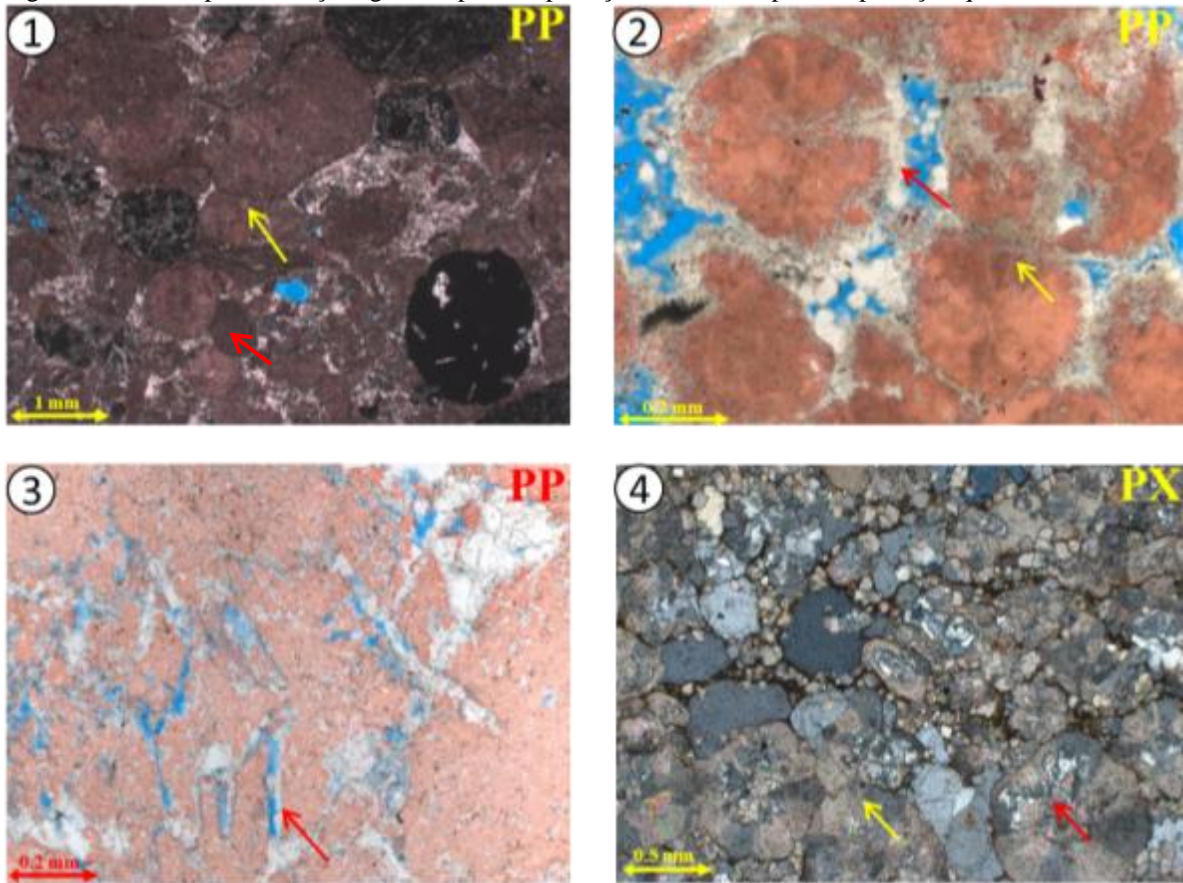
5.3.1.6 Compactação e substituição do arcabouço

Processos de compactação mecânica e química afetaram principalmente as fácies carbonáticas alóctones e a fácies ESF. A fácies SB mostrou raríssimas feições indicativas de compactação, provavelmente porque exibe um arcabouço mais rígido, que suportou melhor o efeito da pressão litostática.

As amostras estudadas foram principalmente afetadas por processos de compactação mecânica, que resulta em contatos plano-paralelos e côncavo-convexos. Já a compactação química é mais rara, e manifesta-se como contatos suturados entre os grãos e esferulitos, ou através de estilolitos.

Como já discutido nas sessões anteriores, o arcabouço das rochas carbonáticas estudadas é muito afetado por processos de substituição, notavelmente por dolomita e, em proporção um pouco menor, por sílica. *Shrubs* e esferulitos quase sempre se apresentam parcialmente dolomitizados, como pode ser visto nas figuras 111 e 112. O processo de dolomitização ocorre de forma pervasiva, a partir das bordas. Já a substituição por sílica é mais esparsa, mas tende a seguir a textura do agregado calcítico, como pode ser visto na Figura 112-7. Nessa figura é possível observar que a sílica parece se organizar em níveis concêntricos dentro dos esferulito, tendo maior expressão em sua borda. Por fim, outros minerais acessórios também ocorrem substituindo *shrubs* e esferulitos, dentre eles pode-se citar pirita, fluorita e svanbergita.

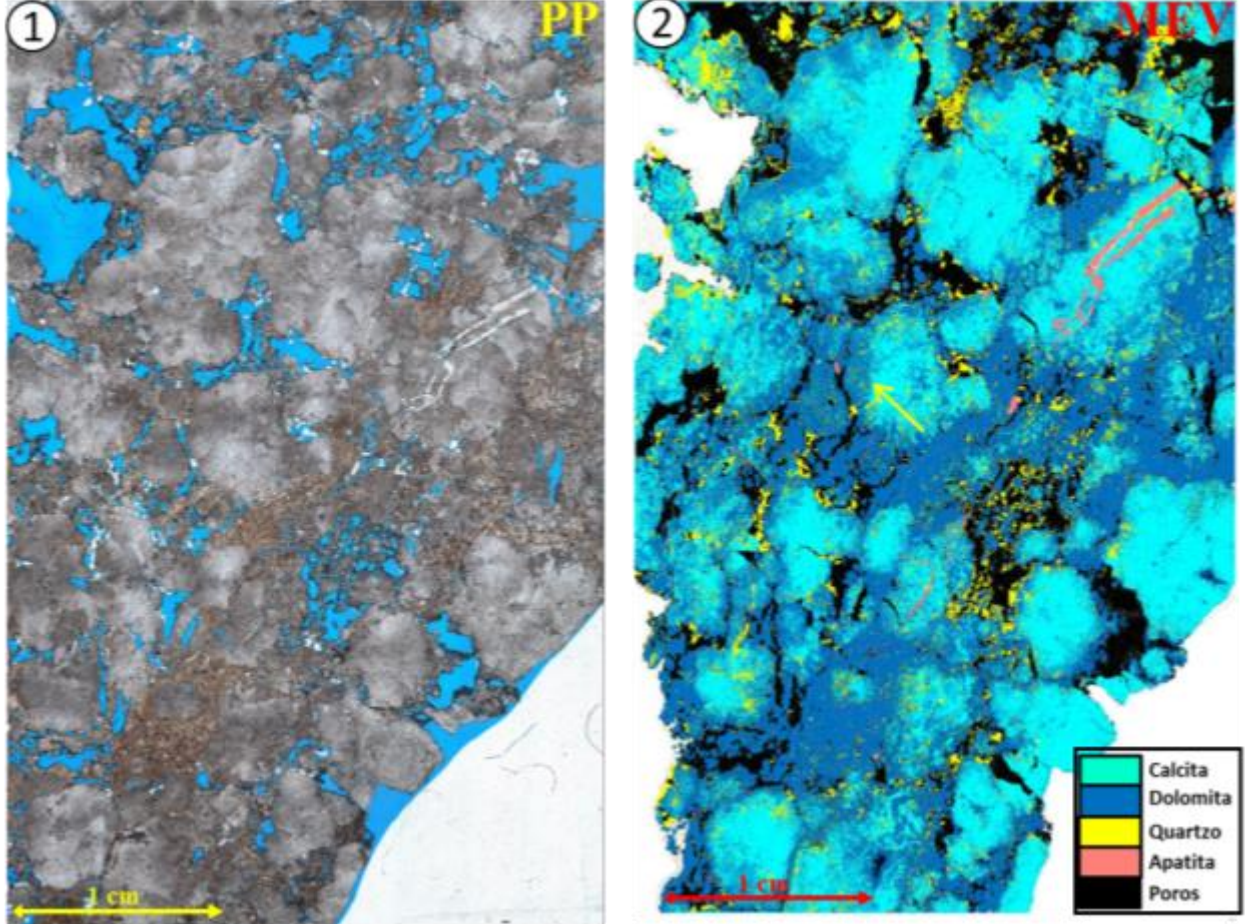
Figura 110 - Exemplos de feições geradas por compactação mecânica e por compactação química



Legenda: 1) GST.vulc com grãos apresentando contatos plano-paralelos (seta amarela) e côncavo-convexos (seta vermelha) gerados por compactação mecânica. Fotomicrografia com PP. 2) ESF com esferulitos apresentando contatos plano-paralelos (seta amarela), evidenciando processo de compactação mecânica. Notar também que os mesmos apresentam bordas dolomitizadas (seta vermelha). Fotomicrografia com PP. 3) Estilolito alargado por dissolução (seta). Fotomicrografia com PP. 4) ESF com esferulitos apresentando contatos suturados (seta amarela), evidenciando processo de compactação química. Notar também que os mesmos estão parcialmente silicificados (seta vermelha). Fotomicrografia com PX.

Fonte: A autora, 2018.

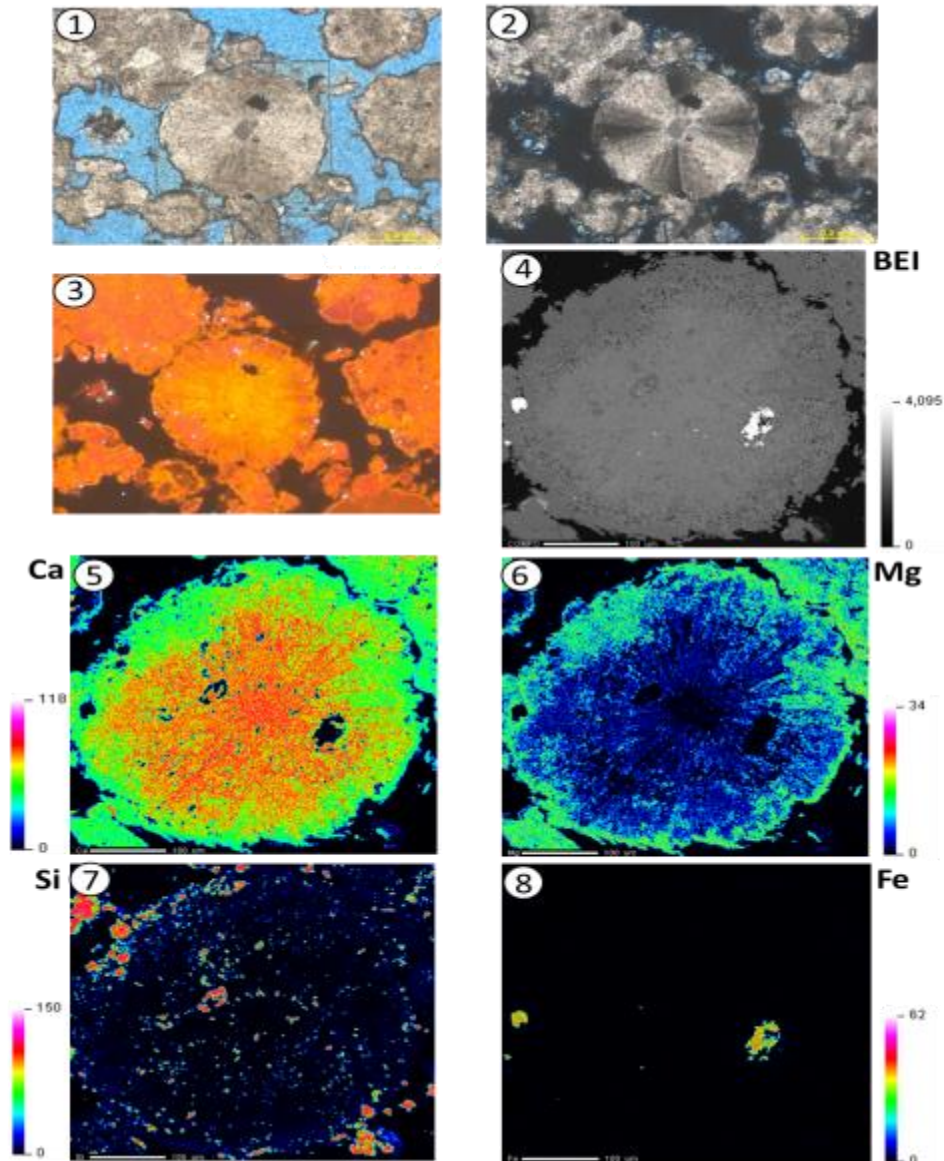
Figura 111 - Ocorrência de substituição parcial de *shrubs* por dolomita e quartzo



Legenda: 1) fotomosaico com PP de SB; 2) mapa composicional da lâmina ilustrada em 1. Notar que os *shrubs* são compostos por calcita (azul claro) e apresentam bordas intensamente substituídas por dolomita (azul escuro). Notar também que alguns *shrubs* apresentam substituição por quartzo (amarelo).

Fonte: A autora, 2018.

Figura 112 - Mapeamento composicional de um esferulito por análise de MSE, evidenciando substituição por dolomita, sílica e pirita



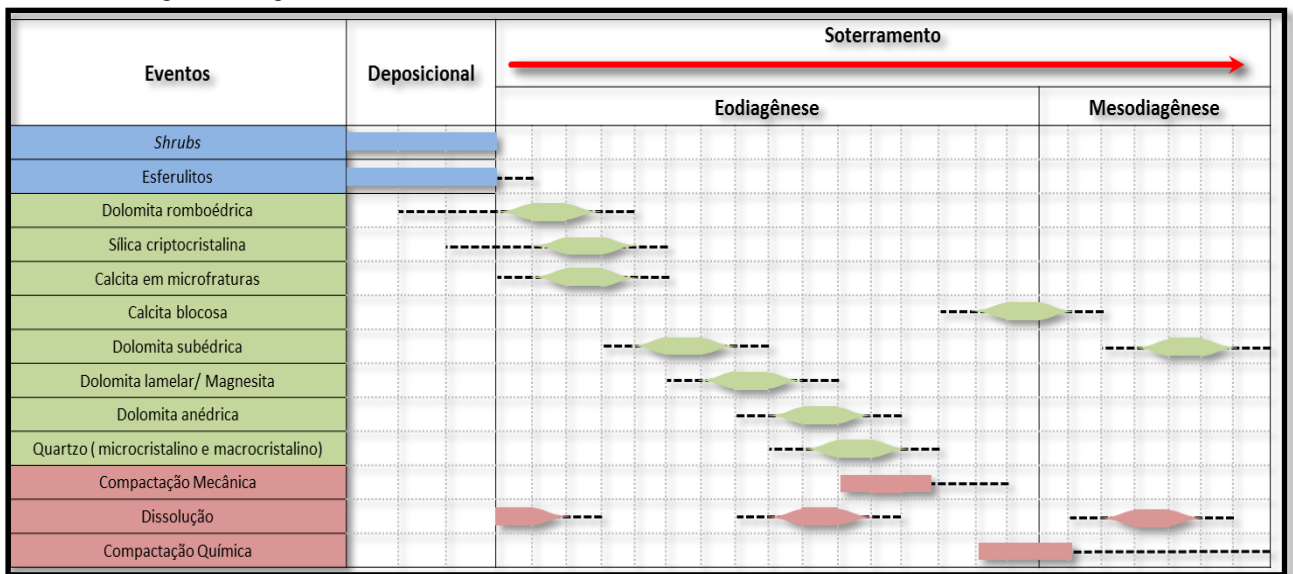
Legenda: 1) esferulito analisado. Fotomicrografia com PP; 2) mesmo de 1 com PX; 3) imagem do esferulito analisado em CL. Notar que as bordas do esferulito apresentam uma luminescência alaranjada (dolomita), enquanto a de seu núcleo é amarelada; 4) imagem em MEV (BEI) do esferulito mapeado. Notar bordas de coloração cinza escura (dolomita). Pontos claros correspondem à pirita; 5) mapa de Ca. Notar que maiores concentrações ocorrem no núcleo do esferulito. Notar também que a textura fibrosa é bem marcada no mapa, mostrando concentrações mais elevadas de Ca; 6) mapa de Mg. Notar maiores concentrações nas bordas do esferulito, e que o núcleo não apresenta Mg; 7) mapa de Si. Notar que pontos de maior concentração tem distribuição esparsa, mas de organização concêntrica, com maiores valores ocorrendo nas bordas. 8) mapa de Fe. Notar que o esferulito em si não apresenta Fe. Maiores concentrações ocorrem apenas na pirita.

Fonte: A autora, 2018.

5.3.2 Paragênese diagenética

Através das características dos minerais e dos processos diagenéticos, acima descritos, e de suas relações texturais, é possível ordenar os principais eventos diagenéticos que afetaram as rochas carbonáticas da Formação Barra Velha no intervalo estudado. Esse ordenamento, que também pode ser chamado de paragênese diagenética, é representado na tabela 7.

Tabela 8 - Paragênese diagenética da Fm. Barra Velha



Legenda: Resumo e ordenamento no tempo dos principais eventos diagenéticos identificados nas rochas carbonáticas da Fm. Barra Velha. As espessuras das barras representam a frequência/abundância de cada fase.

Fonte: A autora, 2018.

5.3.3 Características químicas de constituintes carbonáticos deposicionais e diagenéticos

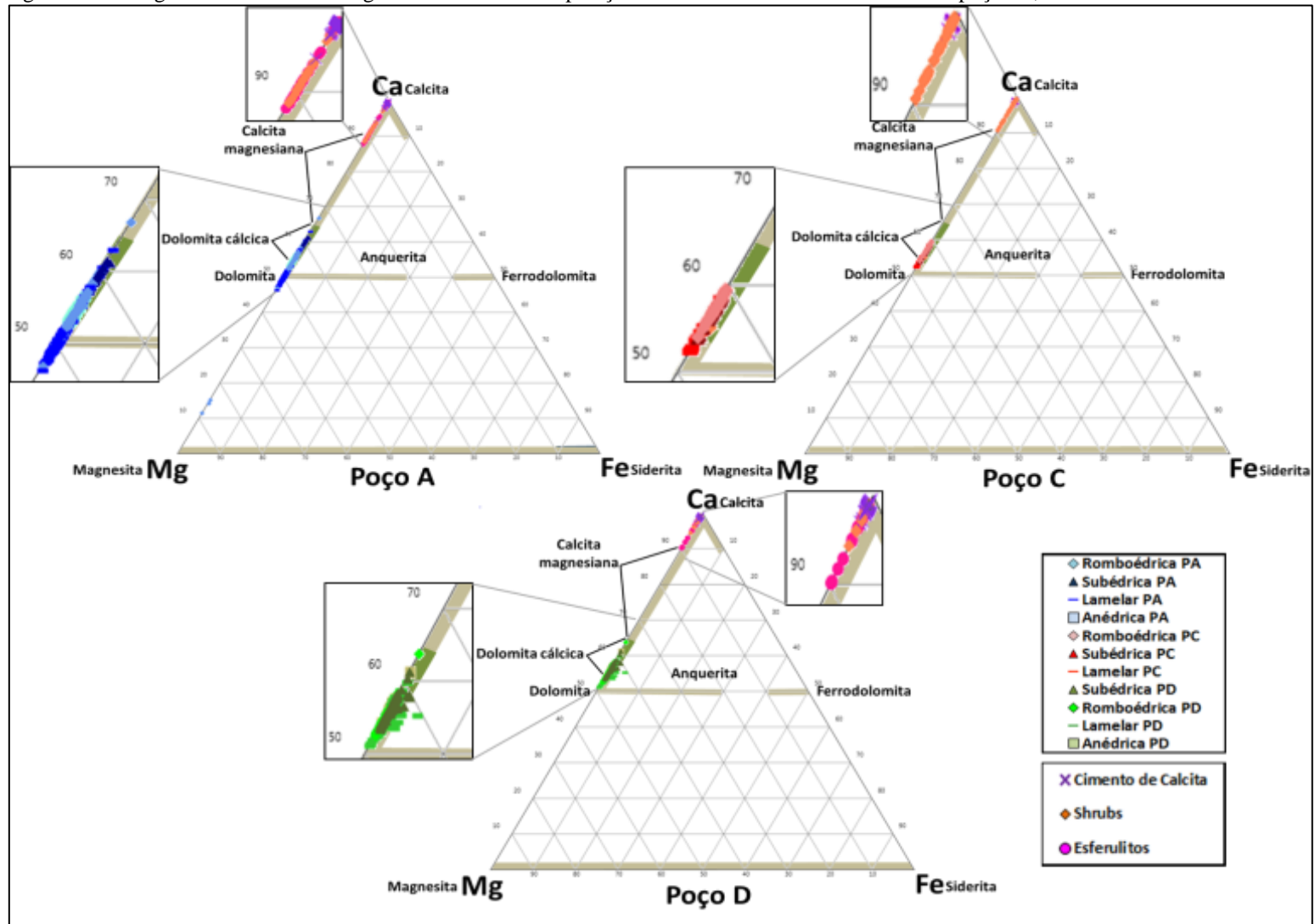
Serão apresentadas as principais características químicas dos constituintes carbonáticos deposicionais (*shrubs* e esferulitos) e diagenéticos das rochas carbonáticas estudadas. Para tanto, foram utilizadas as análises químicas por MSE realizadas em 22 amostras provenientes dos poços A, C e D.

Os anexos 1, 2 e 3 apresentam um resumo dos resultados obtidos nessas análises. Para a representação gráfica, as concentrações dos elementos que podem ocupar os sítios catiônicos na estrutura cristalina dos minerais carbonáticos (Ca, Mg, Sr, Fe, Mn, Na, Pb, S e F) foram normalizadas para a fórmula geral dos carbonatos $M_2(CO_3)_2$. Os demais elementos (Si, K e Al) são considerados contaminantes.

Para uma visão geral das características químicas dos minerais carbonáticos de cada poço, pode-se observar a figura 113, que apresenta tais composições plotadas no diagrama ternário clássico Ca-Mg-Fe, já apresentado na figura 21. Nesses diagramas é possível observar que tanto a calcita quanto a dolomita apresentam teores muito baixos de Fe, sendo que valores um pouco mais elevados são observados no poço D. A maior parte das análises realizadas em cristais dolomita mostraram que esses minerais são enriquecidos em cálcio, podendo ser classificados como dolomitas cálcicas. Apenas no poço A ocorrem cristais de dolomita romboédrica e dolomita lamelar com teores mais elevados de Mg. Os constituintes calcíticos mostraram-se principalmente cálcicos, com teores variados de Mg, mas raramente chegando a ter mais de 10% mol de Mg, como observado nas análises do poço A.

Levando em consideração esse panorama geral, serão apresentados mais detalhes sobre os constituintes carbonáticos analisados.

Figura 113 - Diagramas ternários Ca-Mg-Fe mostrando a composição das fases de dolomita e calcita dos poços A, C e D



Fonte: A autora, 2018.

5.3.3.1 Calcita

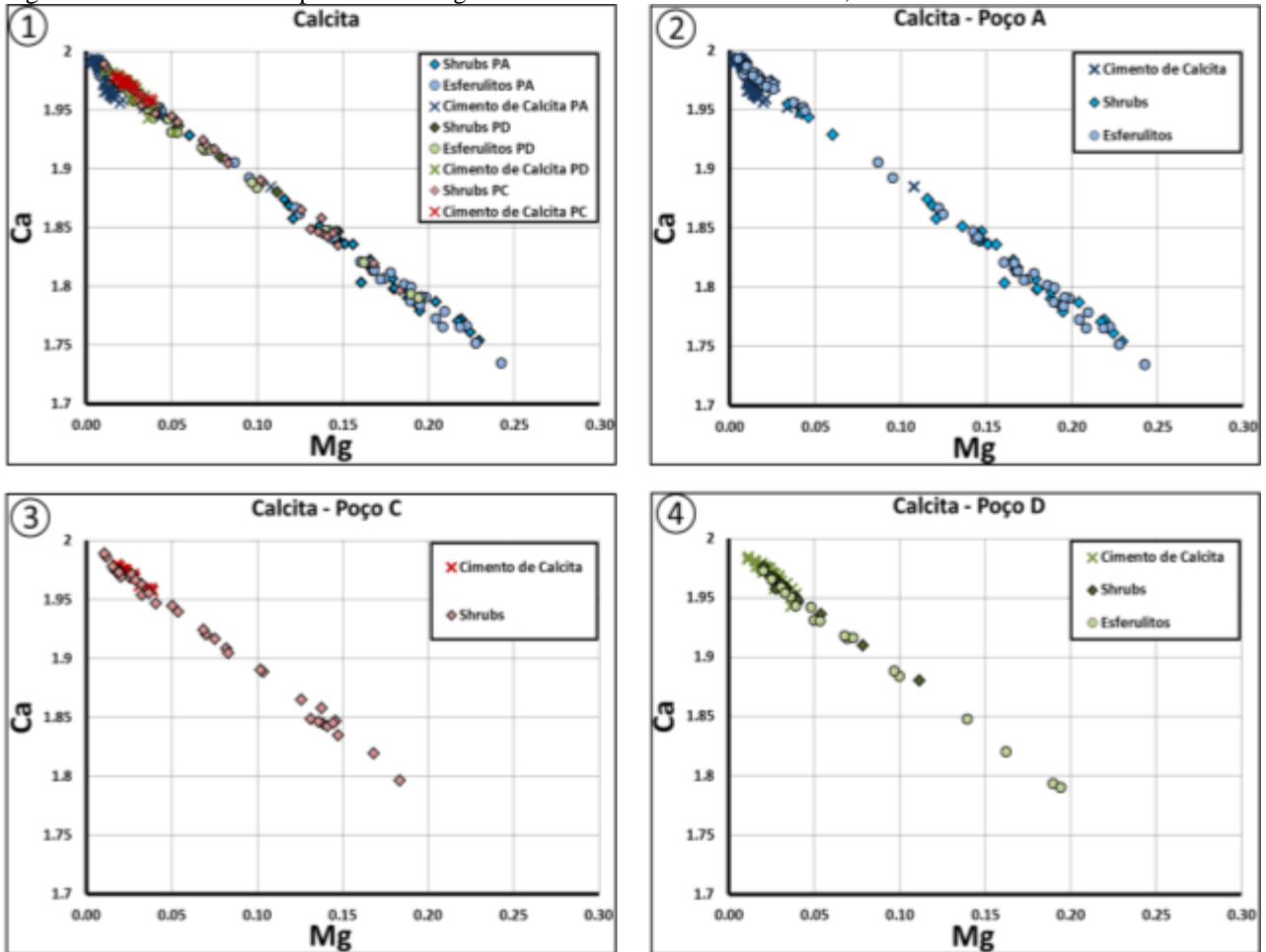
Como já discutido, os teores de Mg medidos nos cristais de calcita que compõe *shrubs*, esferulitos e cimentos apresentam teores relativamente baixos de Mg. No entanto, é possível observar diferenças significativas de teores quando comparamos os constituintes deposicionais e os cimentos de calcita, como pode ser observado na figura 114, que apresenta gráficos de dispersão Ca x Mg para os três poços.

Analisando os gráficos de dispersão, verifica-se que os cristais de cimento de calcita, nos três poços, apresentam teores muito baixos de Mg, não ultrapassando 2,5% mol. Já a calcita que compõe os esferulitos e *shrubs* apresenta conteúdo variado de Mg, sendo que uma parte considerável tem mais de 4% mol (0.08) de Mg, já sendo consideradas calcitas magnesianas. Todavia, é possível notar que o poço A contém um grupo de análises de *shrubs* e esferulitos mais magnesianos em comparação aos demais poços, podendo chegar até mais de 12% mol (0.24) de Mg.

O enriquecimento em Mg dos *shrubs* e esferulitos no poço A pode estar relacionado a sua localização estruturalmente mais alta do que a dos demais poços, conseqüentemente em batimetrias mais rasas, que podem ter favorecido uma maior saturação de Mg como resultado de processos evaporativos, que predominam durante os períodos secos. O processo de enriquecimento em Mg de salmouras com o avanço da evaporação foi apresentado na Figura 26.

Quanto aos demais elementos que podem compor a estrutura da calcita, não foi possível observar assinaturas claras. *Shrubs* e esferulitos, no entanto, apresentam contaminação por Si expressivamente maior do que as análises no cimento de calcita, que provavelmente devido a processos de substituição, os quais foram muito observados nas lâminas delgadas.

Figura 114 - Gráficos de dispersão Ca x Mg dos constituintes de calcita: *Shrubs*, esferulitos e cimento



Legenda: 1) composição dos constituintes calcíticos dos poços A, C e D; 2) composição dos constituintes calcíticos do poço A; 3) composição dos constituintes calcíticos do poço C; 4) composição dos constituintes calcíticos do poço D.

Fonte: A autora, 2018.

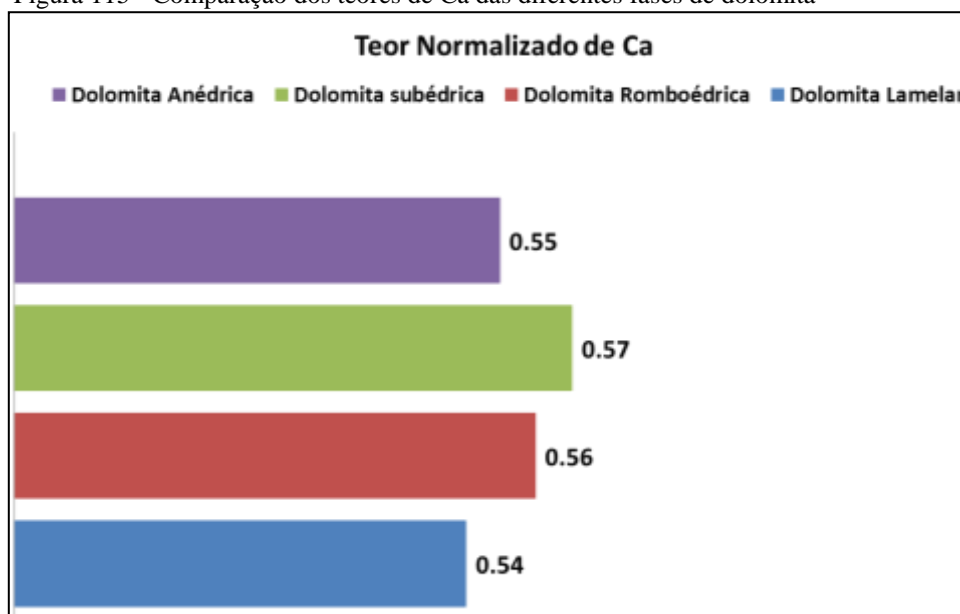
5.3.3.2 Dolomita

Como apresentado anteriormente, a dolomita ocorre na Fm. Barra Velha em diferentes fases diagenéticas, apresentando características morfológicas distintas. No entanto, as análises em microsonda eletrônica apontam que essas fases também apresentam diferenças químicas importantes.

A diferença mais evidente refere-se ao conteúdo de Ca nas diferentes fases de dolomita (Figura 115). Apesar de todas elas apresentarem, em média, enriquecimento em Ca, a dolomita subédrica apresentou teores maiores em relação às demais. Esse enriquecimento é mais evidente no poço A (figuras 116-2 e 117-2). Todavia, a dolomita lamelar apresenta menores teores de Ca, principalmente no poço A (figuras 116-2 e 117-2).

Nota-se também diferenças no teor de Ca entre os poços analisados (Figuras 116 e 117). Assim como acontece com os constituintes calcínicos, as fases de dolomita do poço A, de modo geral, apresentam menor conteúdo de Ca em relação aos demais poços. Essas diferenças são mais marcantes na dolomita romboédrica e na dolomita lamelar. Entretanto, a dolomita subédrica presente no poço A é significativamente mais cálcica do que a presente no poço B.

Figura 115 - Comparação dos teores de Ca das diferentes fases de dolomita

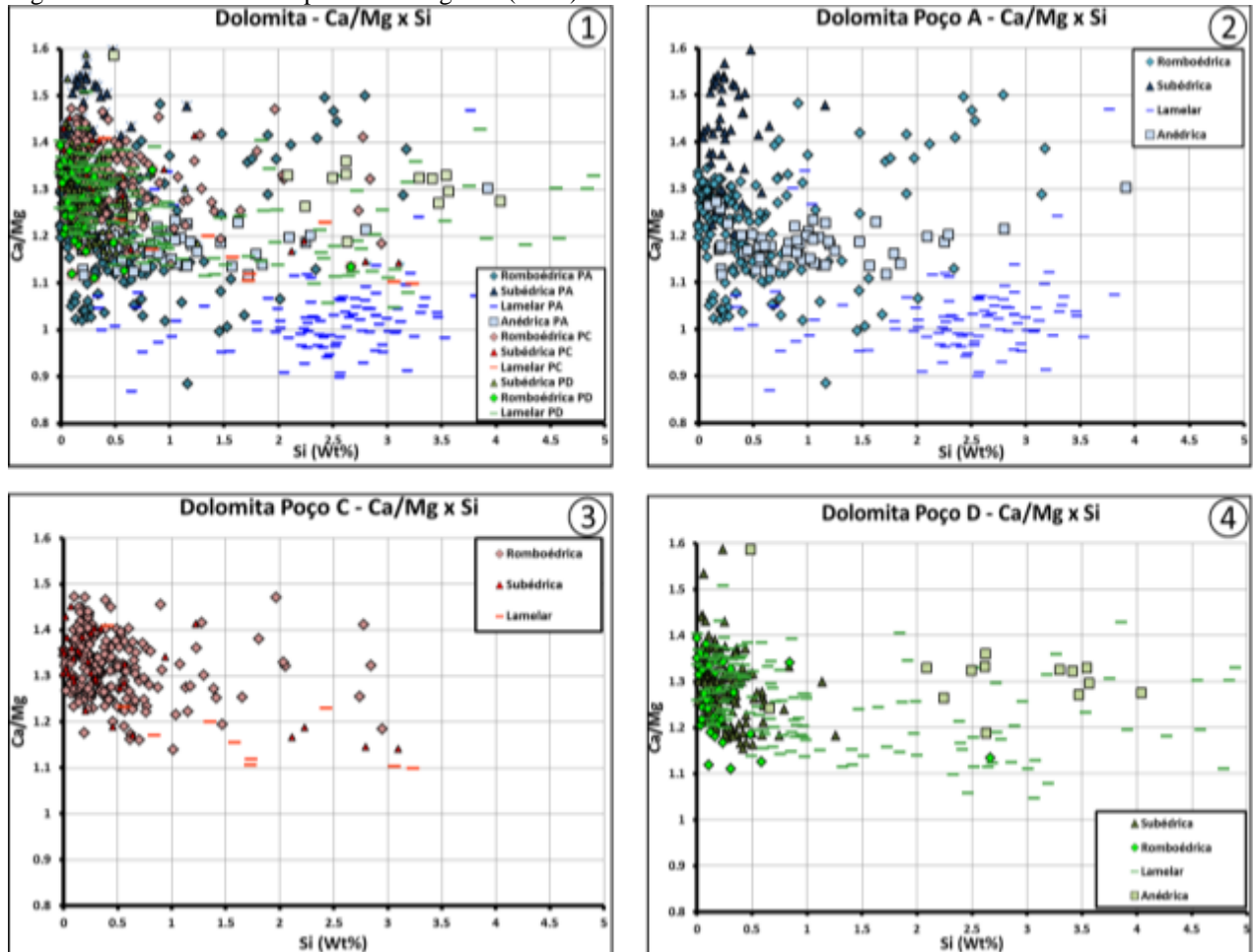


Fonte: A autora, 2018.

As fases de dolomita também apresentaram discrepâncias em relação à contaminação por Si. Na Figura 116 é possível notar que as análises realizadas na dolomita anédrica e na dolomita lamelar apontaram maiores valores de Si. Esse fato é coerente com as observações feitas em lâminas delgadas e em MEV, que mostrou que a dolomita anédrica ocorre associada à nanocristais de sílica (Figura 101-5/6), e que a dolomita lamelar associa-se frequentemente à sílica criptocristalina (Figura 99-6). Algumas análises em cristais de dolomita romboédrica

também mostraram maior contaminação por Si, e estão relacionadas às amostras que apresentaram cimentação por quartzo, como ilustrado na Figura 104-2.

Figura 116 - Gráficos de dispersão Ca/Mg x Si (Wt%) das fases de dolomita

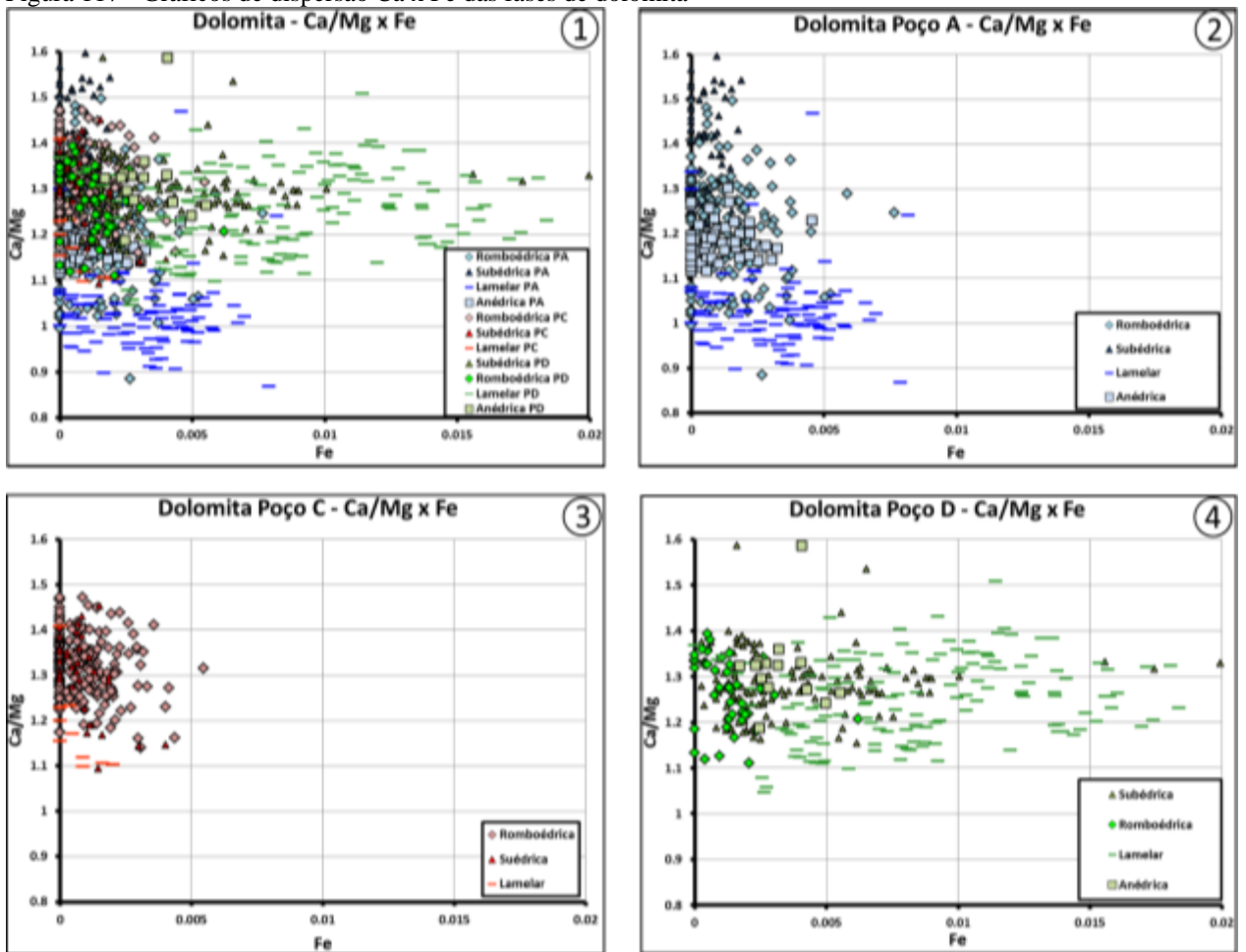


Legenda: 1) composição das fases de dolomita dos poços A, C e D; 2) composição das fases de dolomita do poço A; 3) composição das fases de dolomita do poço C; 4) composição das fases de dolomita do poço D.

Fonte: A autora, 2018.

Como ilustrado na Figura 113, todas as amostras exibiram baixos teores de Fe, chegando ao máximo a 1% mol (0.02). No entanto, ainda assim é possível observar variações do conteúdo de Fe entre as fases de dolomita, no poço A, mas principalmente em D, que mostrou os maiores teores desse elemento (Figura 117). Nos poços A e D, a fase de dolomita que apresentou maior conteúdo de Fe foi a dolomita lamelar. Contudo, as dolomitas subédrica e anédrica também apresentaram valores mais elevados de Fe no poço D. Já as análises em dolomita do poço C mostraram concentrações relativamente mais baixas de Fe, não chegando a 0.25 % mol.

Figura 117 - Gráficos de dispersão Ca x Fe das fases de dolomita



Legenda: 1) composição das fases de dolomita dos poços A, C e D; 2) composição das fases de dolomita do poço A; 3) composição das fases de dolomita do poço C; 4) composição das fases de dolomita do poço D.

Fonte: A autora, 2018.

5.3.4 Comparação das características químicas da dolomita e sua resposta em DRX

Como discutido anteriormente, a dolomita é um mineral carbonático com estrutura cristalina que apresenta a alternância de camadas de Mg^{2+} e Ca^{2+} , intercaladas a camadas de CO_3^{2-} . A calcita, por sua vez, pode apresentar conteúdos muito altos de magnésio, chegando a ter composições próximas a da dolomita, mas sem o ordenamento cristalográfico típico desse mineral (Gregg *et. al.*, 2015).

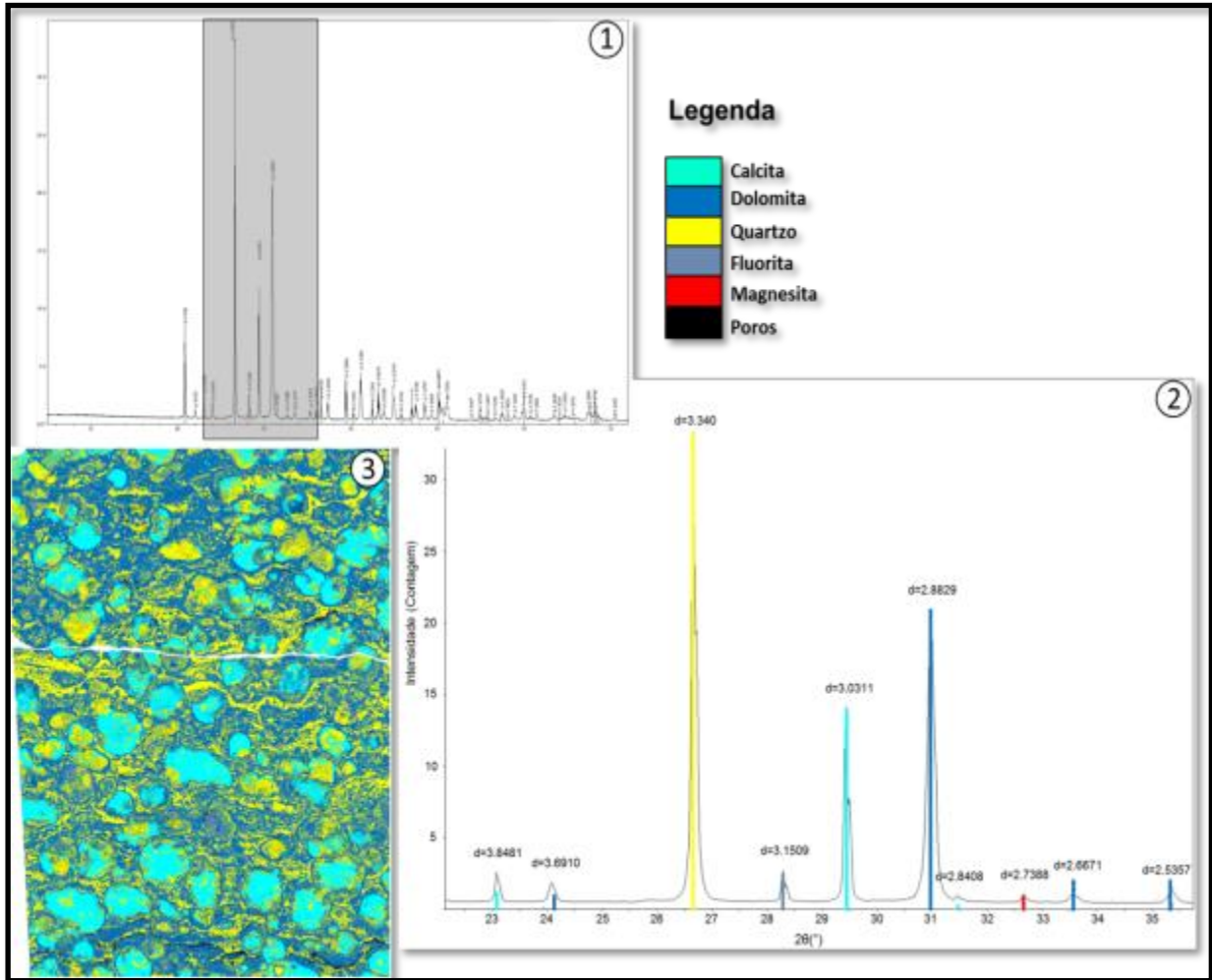
As análises químicas em microsonda eletrônica mostraram que as fases minerais identificadas como dolomita são enriquecidas em Ca. Assim, para comprovar a existência de ordenamento cristalino nesses minerais foram realizadas análises de DRX nessas amostras.

Em todas as amostras foram identificados picos correspondentes a dolomita, como exemplificado nas figuras 118 e 119, que mostram os difratogramas obtidos para uma amostra do poço A e outra do poço D respectivamente, comparadas com seus mapas composicionais.

A maior parte das amostras do poço A mostram uma assinatura semelhante à observada na Figura 118, onde é possível observar picos bem definidos correspondentes à calcita ($d=3.03$) e à dolomita ($d=2.88$).

Já nas amostras dos poços C e D, em alguns casos, o pico correspondente à dolomita mostrou um leve deslocamento ($d=2.89$) em relação ao padrão da dolomita ($d=2.88$), como pode ser observado na Figura 119. Esse deslocamento é explicado devido ao maior conteúdo de Ca na estrutura cristalina, sendo coerente com as análises em MSE, que mostraram maiores teores de Ca nas amostras dos poços C e D.

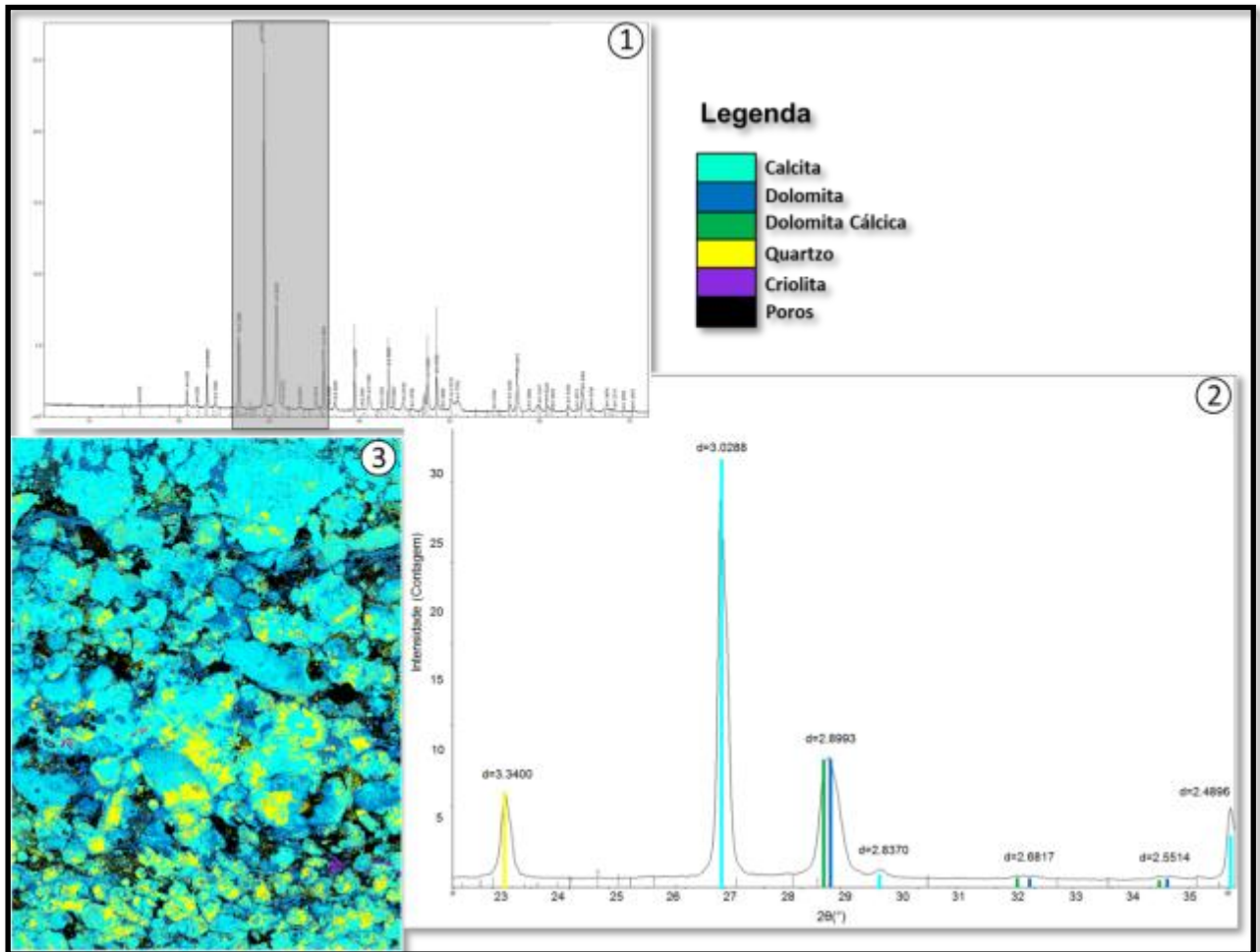
Figura 118 - Análise de difratometria de raios x de uma amostra do poço A e comparação com seu mapa composicional (MEV)



Legenda: 1) difratograma de raios x de uma amostra do poço A; 2) detalhe do difratograma apresentado em 1 (indicado em cinza). O eixo x representa o ângulo de reflexão (2θ), enquanto o eixo y representa a intensidade do sinal. Os valores de d (distância interplanar) correspondentes à cada pico (diagnósticos de cada mineral) são indicados; 3) mapa composicional da amostra (MEV). Notar que os minerais são representados com as mesmas cores no mapa e no difratograma.

Fonte: A autora, 2018.

Figura 119 - Análise de difratometria de raios x de uma amostra do poço D e comparação com seu mapa composicional (MEV)



Legenda: 1) difratograma de raios x de uma amostra do poço D; 2) detalhe do difratograma apresentado em 1 (indicado em cinza). O eixo x representa o ângulo de reflexão (2θ), enquanto o eixo y representa a intensidade do sinal. Os valores de d (distância interplanar) correspondentes à cada pico (diagnósticos de cada mineral) são indicados; 3) mapa composicional da amostra (MEV). Notar que os minerais são representados com as mesmas cores no mapa e no difratograma. O difratograma foi centralizado em relação ao pico de quartzo ($d=3.34$).

Fonte: A autora, 2018.

5.4 Modelagem numérica

Neste capítulo serão apresentados os resultados da modelagem numérica, que visou representar a distribuição das fácies deposicionais e dos produtos diagenéticos na área de estudos, com foco no intervalo selecionado para o estudo diagenético (Figura 94).

5.4.1 Análise dos dados de entrada do modelo numérico

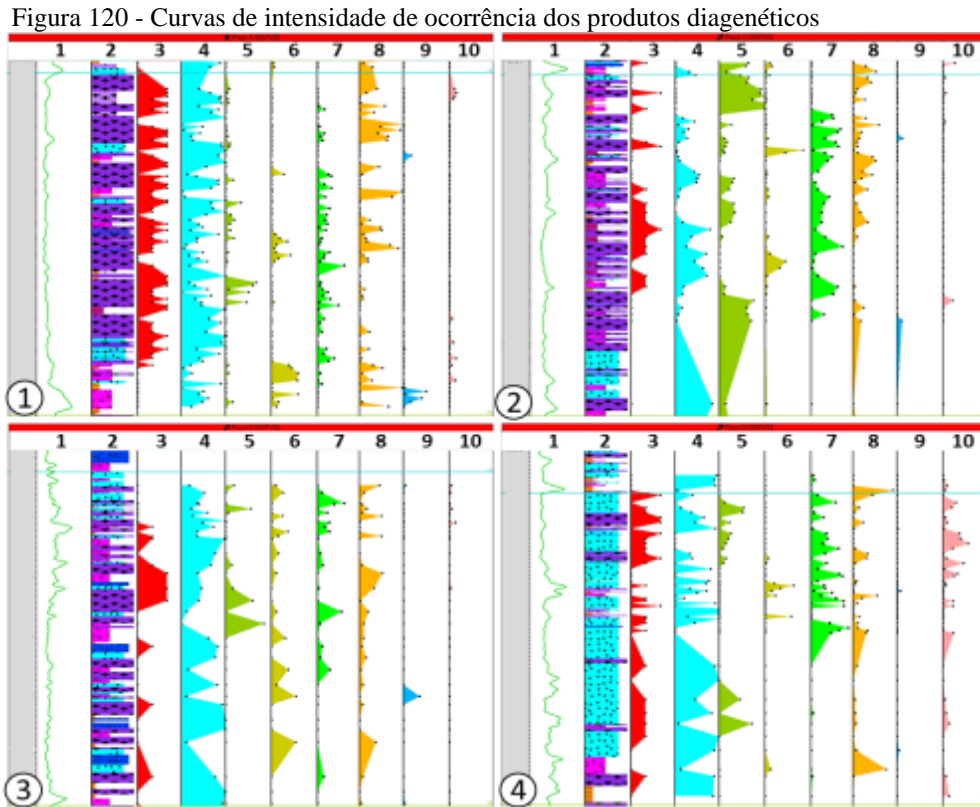
Os dados de entrada do modelo numérico consistiram no perfil de fácies sedimentares, construído através da descrição de testemunho e amostras laterais e da interpretação de perfis de imagem (FAC Imagem), e nos perfis de abundância dos produtos diagenéticos, que foram estimados visualmente durante a descrição petrográfica (Figura 120).

Apesar de todas as fases diagenéticas terem sido quantificadas, foram selecionadas para a modelagem aquelas que apresentaram maior abundância em todos os poços, e maior impacto no sistema permoporoso das rochas carbonáticas analisadas. A única exceção para esse critério foi a dolomita subédrica, pois, como discutido anteriormente, pode ter sua origem ligada a atuação de fluidos hidrotermais que percolaram falhas e fraturas. Portanto, para a sua modelagem, seria necessária uma análise estrutural mais detalhada da área, para então selecionar as possíveis estruturas e regiões onde esse cimento poderia ocorrer, a qual não foi foco desta dissertação.

Assim, as fases diagenéticas selecionadas para a modelagem numérica foram: dolomita romboédrica; dolomita lamelar; dolomita anédrica; quartzo (macrocristalino e microcristalino) e intensidade de dissolução.

A primeira etapa da modelagem numérica englobou a análise dos dados de entrada, com o objetivo de se verificar a variação vertical das fácies modeladas, bem como dos produtos diagenéticos. A figura 121 mostra as curva de variação vertical dos produtos diagenéticos considerando os 4 poços estudados. Tais curvas foram obtidas através do cálculo do valor médio da variável analisada para cada camada do *grid* 3D.

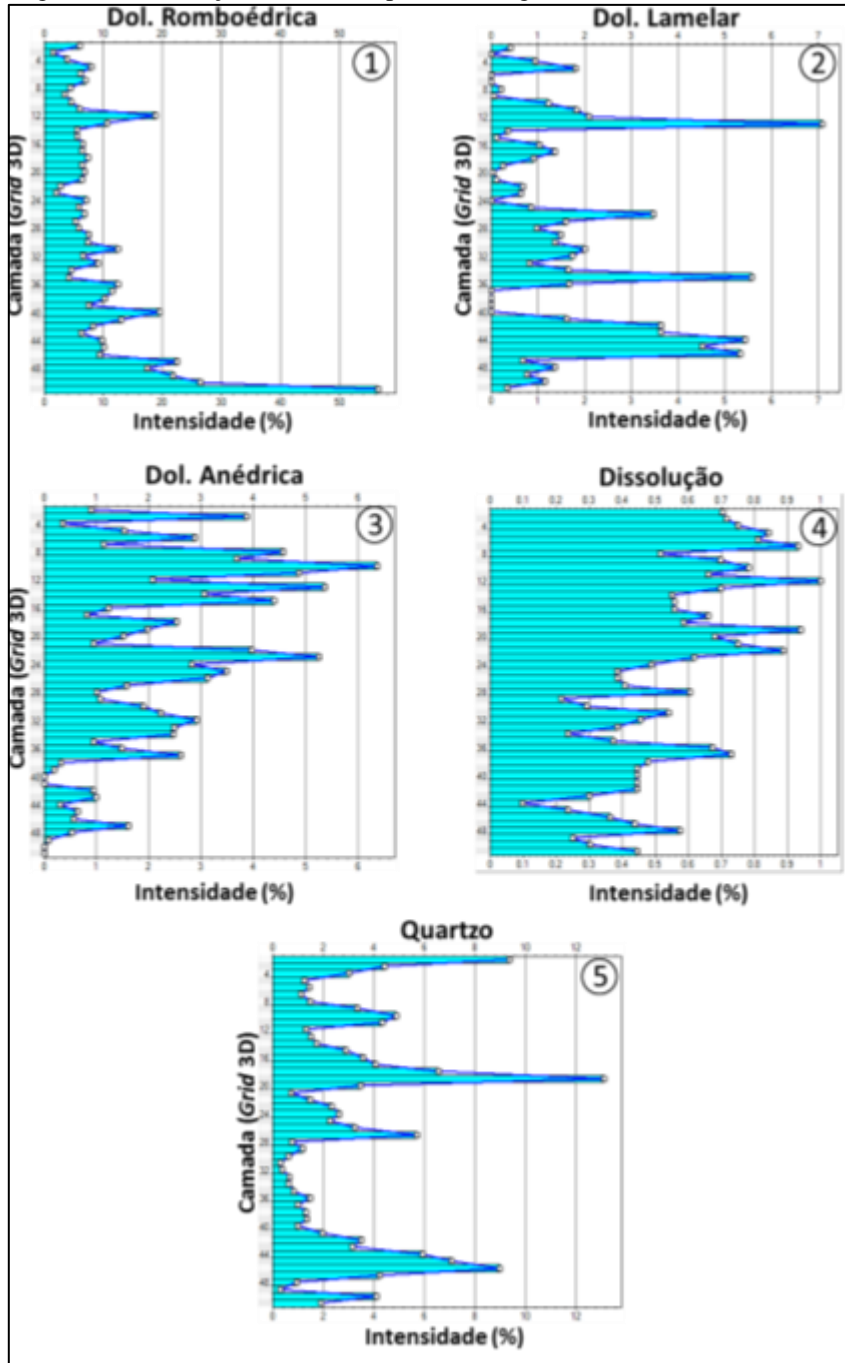
Analisando as curvas apresentadas na figura 121 pode-se observar que a dolomita romboédrica tem maior abundância na base do intervalo modelado, tendendo a ficar mais escassa em direção ao topo (Fig 121-1). Já a dolomita lamelar (Fig 121-2) e o quartzo (Fig 121-5) não apresentaram uma tendência vertical clara, ocorrendo alguns picos de maior intensidade em algumas camadas do modelo. A proporção de dolomita anédrica (Fig 121-3) e a intensidade de dissolução (Figura 121-4) apresentam uma clara tendência de aumento em direção ao topo do intervalo modelado. Essa distribuição é compatível com a interpretação estratigráfica do intervalo modelado, que consiste em um hem ciclo regressivo. Assim, da base para o topo ocorreriam paleobatimetrias progressivamente mais rasas, que favoreceriam a interação das rochas carbonáticas com fluidos meteóricos, gerando dissolução na zona vadosa superior e cimentação por dolomita anédrica na zona vadosa inferior/ zona freática superior.



Legenda: Perfis com os resultados das análises quantitativas executadas nas lâminas delgadas. Cada ponto em preto representa uma lâmina descrita. Trilhas: 1 – GR; 2 – Fac Imagem; 3 – Intensidade de dissolução; 4 – Dolomita romboédrica; 5 – Dolomita subédrica; 6 – Dolomita lamelar; 7 – Dolomita anédrica; 8 - Quartzo; 9 – Sílica amorfa; 10 – Calcita. Poços: 1) Poço A; 2) Poço C; 3) Poço B; 4) Poço D.

Fonte: A autora, 2018.

Figura 121 - Variação vertical dos produtos diagenéticos

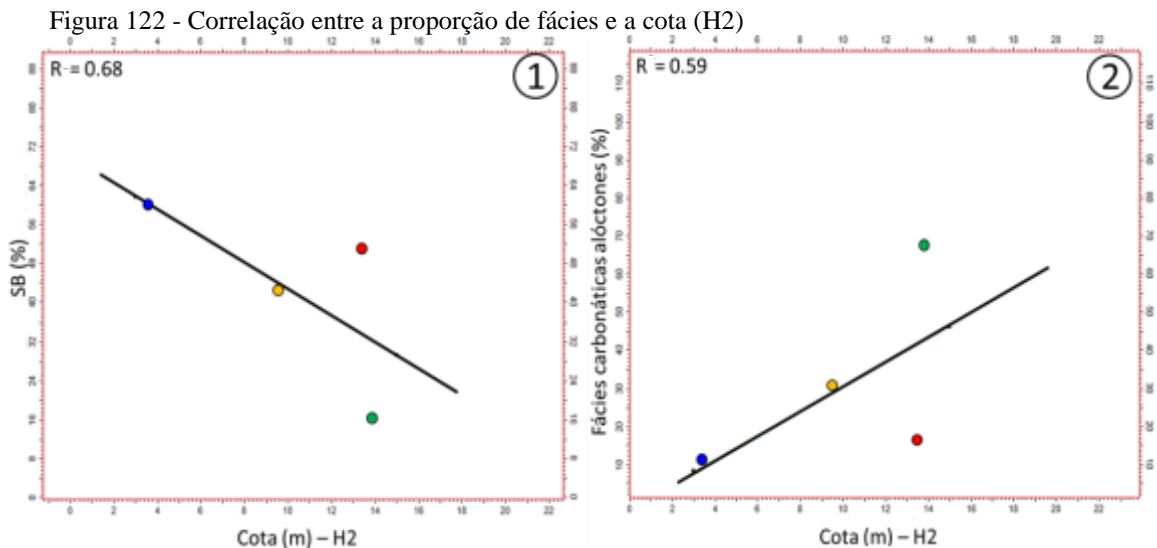


Legenda: Curvas de variação vertical da intensidade de ocorrência dos produtos diagenéticos selecionados para a modelagem numérica, considerando os quatro poços estudados. Para sua construção, é calculada a média das propriedades em cada camada do grid 3D. Notar que cada produto diagenético possui uma distribuição particular ao longo do intervalo modelado.

Fonte: A autora, 2018.

Além da análise da variação vertical das variáveis a serem modeladas, foram construídos mapas de tendência da distribuição areal das fácies sedimentares e dos produtos diagenéticos, que guiaram as simulações probabilísticas.

No caso das fácies sedimentares, foram feitos gráficos de dispersão entre a proporção média de fácies e a cota de cada poço. A Figura 122 mostra os gráficos de dispersão onde foram observadas as melhores correlações. Neles é possível observar uma correlação negativa entre a fácies SB e a cota (Figura 122-1). Ou seja, maiores proporções das fácies SB tendem a ocorrer nos poços localizados nas regiões estruturalmente mais altas. Já as fácies carbonáticas alóctones sem matriz micrítica (fácies GST, RUD, GST.vulc, GST.onc e RUD.onc) apresentam uma relação inversa, sendo mais frequentes nos poços localizados em porções estruturalmente mais baixas do reservatório (Figura 122-2).

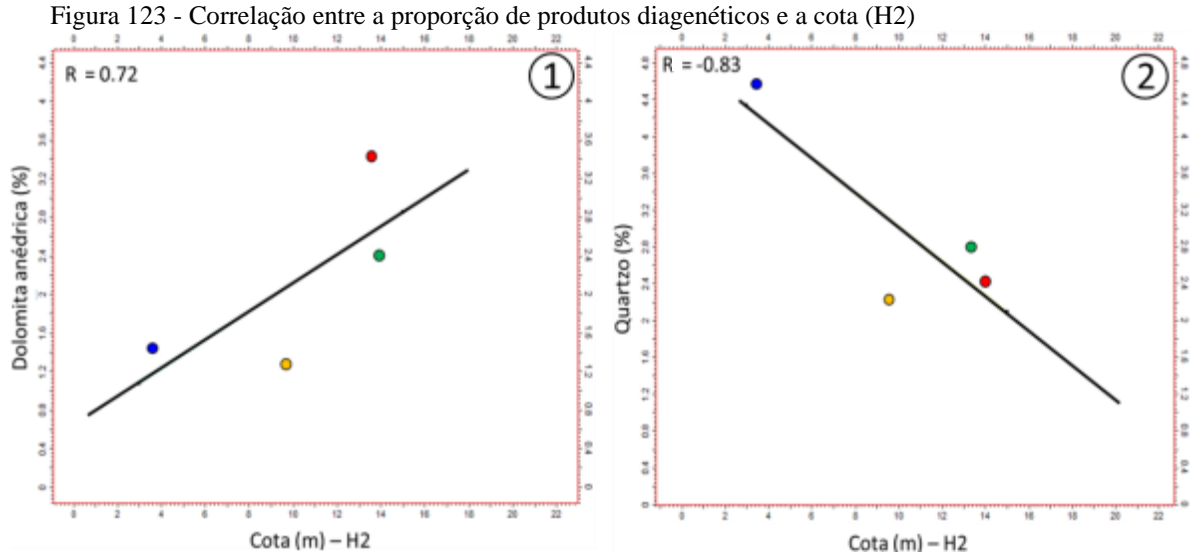


Legenda: Gráficos de dispersão mostrando a correlação entre a proporção média de fácies no intervalo modelado e a cota de cada poço no horizonte H2: 1) Gráfico de dispersão SB x Cota; 2) Gráfico de dispersão fácies carbonáticas alóctones sem matriz micrítica x Cota. Cada ponto representa um poço: azul – Poço A; amarelo – Poço B; vermelho – Poço C; verde – Poço D. O coeficiente de correlação (R), juntamente com a regressão ajustada são mostrados nas figuras.

Fonte: A autora, 2018.

Ajustadas as regressões, as equações das retas encontradas foram aplicadas ao horizonte sísmico H2, transformando, assim, os valores de cota em valores de proporção de fácies. Tais mapas são chamados de mapas de probabilidade de ocorrência de fácies.

O mesmo procedimento foi aplicado aos produtos diagenéticos. As melhores correlações foram obtidas para a dolomita anédrica e para o quartzo (Figura 123). A dolomita anédrica apresentou uma correlação positiva com a cota (Figura 123-1), enquanto o quartzo mostrou uma correlação negativa (Figura 123-2). Portanto, nos poços estruturalmente mais altos, ocorrem maiores concentrações de quartzo, e menores quantidades de dolomita anédrica.

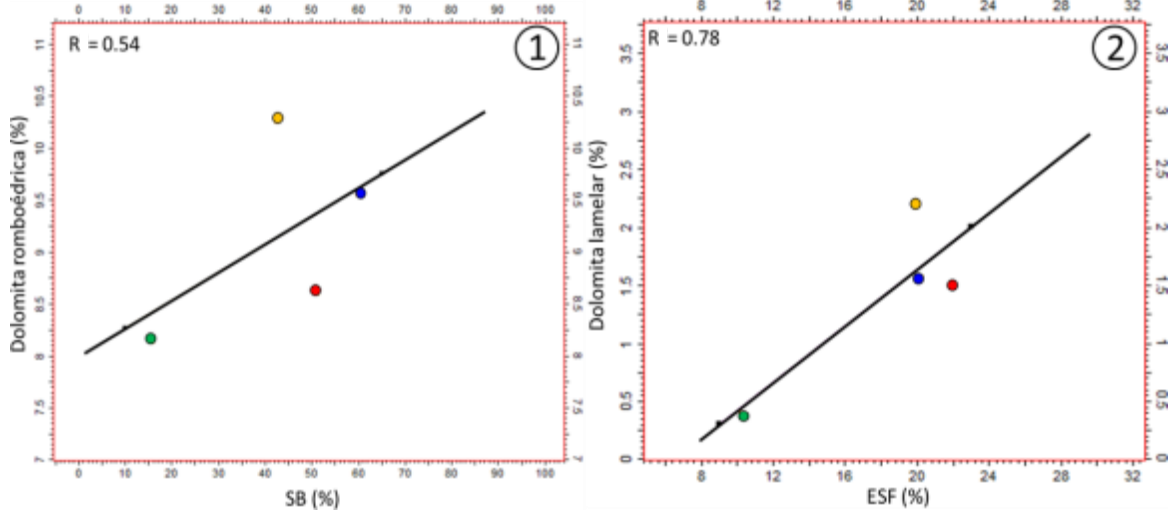


Legenda: Gráficos de dispersão mostrando a correlação entre a proporção média de produtos diagenéticos e a cota de cada poço no horizonte H2: 1) Gráfico de dispersão dolomita anédrica x Cota; 2) Gráfico de dispersão quartzo x cota. Cada ponto representa um poço: azul – Poço A; amarelo – Poço B; vermelho – Poço C; verde – Poço D. O coeficiente de correlação (R), juntamente com a regressão ajustada são mostrados nas figuras.

Fonte: A autora, 2018.

As demais fases diagenéticas não mostraram boa correlação com a cota. Assim, foram feitos gráficos de dispersão entre os produtos diagenéticos e as proporções de fácies presentes em cada poço (Figura 124). A dolomita romboédrica mostrou melhor correlação com a proporção de SB, apresentando uma correlação positiva com essa fácies (Figura 124-1). Já para a dolomita lamelar, obteve-se uma boa correlação positiva com a fácies ESF (Figura 124-2). Portanto, os mapas de tendência dessas fases diagenéticas foram construídos através da aplicação das equações da reta das regressões aos mapas de proporção das fácies SB e ESF, resultantes da modelagem numérica de fácies sedimentares, que será descrita a seguir.

Figura 124 - Correlação entre a proporção de produtos diagenéticos e a proporção de fácies



Legenda: Gráficos de dispersão mostrando a correlação entre a proporção média de produtos diagenéticos e a proporção média de fácies no intervalo modelado: 1) Gráfico de dispersão dolomita romboédrica x SB; 2) Gráfico de dispersão dolomita lamelar x ESF. Cada ponto representa um poço: azul – Poço A; amarelo – Poço B; vermelho – Poço C; verde – Poço D. O coeficiente de correlação (R), juntamente com a regressão ajustada são mostrados nas figuras.

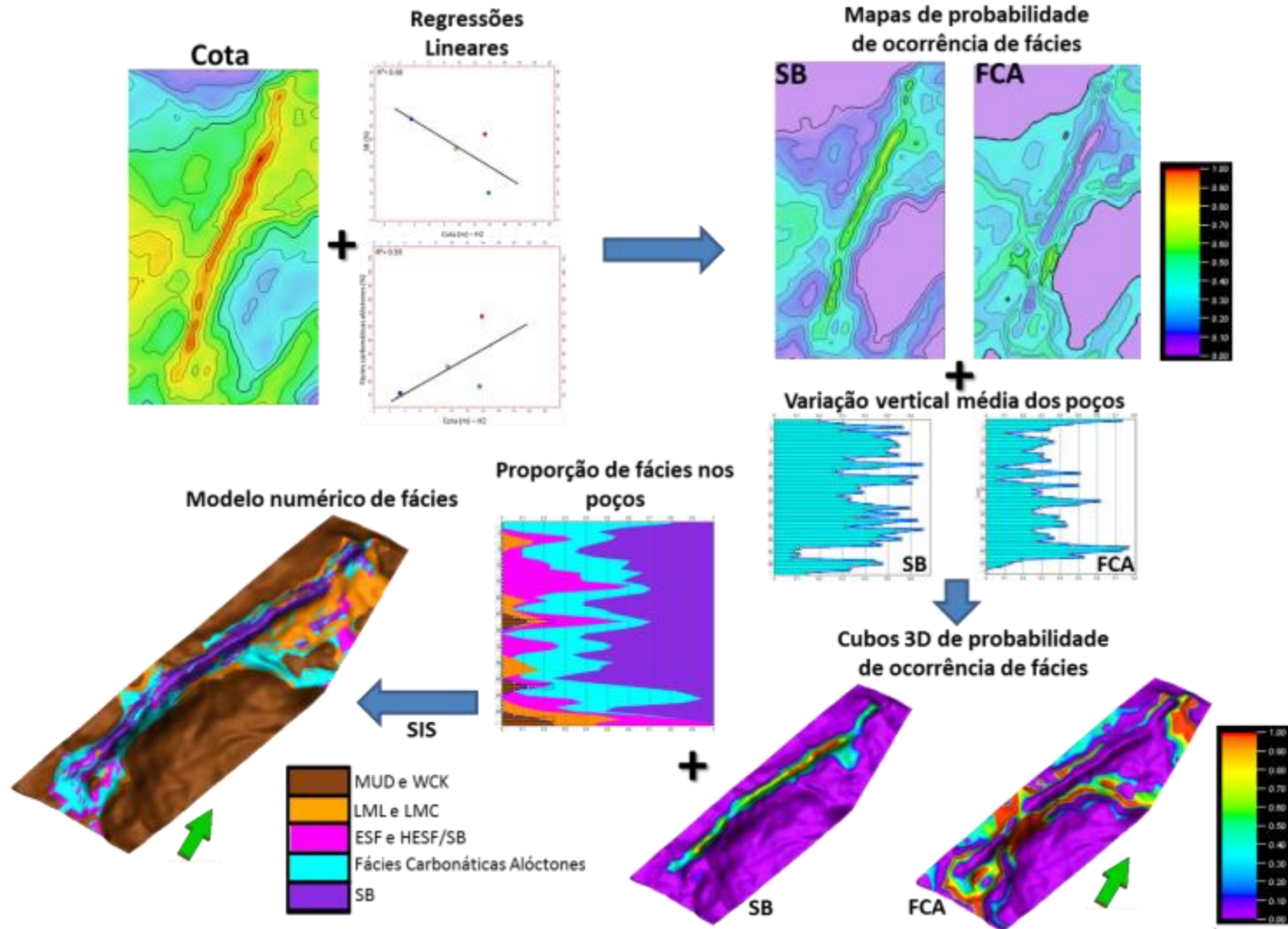
Fonte: A autora, 2018.

5.4.2. Modelagem numérica

A primeira etapa da modelagem numérica consistiu na construção do modelo de distribuição de fácies sedimentares na área de estudos. Para viabilizar a modelagem, as 15 fácies descritas foram agrupadas em 5 categorias, sendo elas: 1) fácies alóctones micríticas (MUD e WCK); 2) fácies autóctones micríticas (LMT.lis, LMT.cre e LMT.cro); 3) fácies alóctones sem matriz micrítica (GST, RUD, GST.vulc, GST.onc e RUD.onc); 4) fácies ESF; 5) fácies SB.

A figura 125 resume os procedimentos adotados para a construção do modelo de fácies. Como já apresentando, primeiramente foram construídos os mapas de probabilidade de ocorrência das fácies alóctones sem matriz micrítica e da fácies SB, através do procedimento acima descrito. Os mapas resultantes foram então combinados às respectivas curvas de variação vertical para o intervalo modelado. Como resultado, obteve-se 2 cubos de probabilidade de ocorrência das fácies supracitadas.

Figura 125 - Etapas realizadas na construção do modelo numérico de fácies sedimentares



Fonte: A autora, 2018.

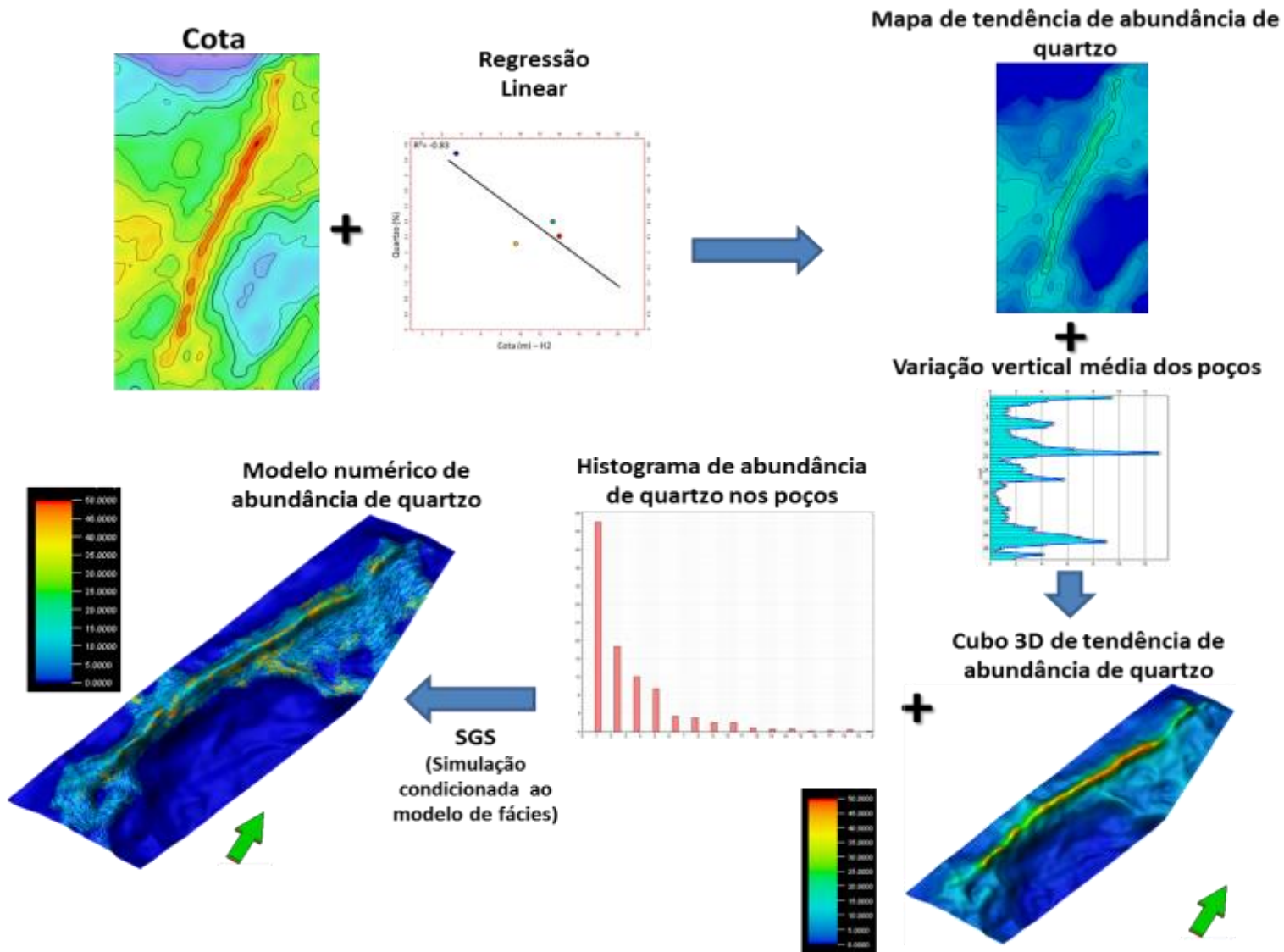
Por fim, o modelo numérico de distribuição de fácies sedimentares foi construído através do algoritmo de simulação estocástica sequencial SIS, utilizando como dados de entrada a proporção de fácies sedimentares e a variação vertical média dos poços amostrados, e tendo como guia da simulação os cubos de probabilidade de ocorrência de fácies obtidos na etapa anterior.

Para os produtos diagenéticos, foi adotado um procedimento muito semelhante do descrito para as fácies sedimentares, cujas etapas são resumidas da Figura 126, tendo como exemplo o quartzo. Após terem sido gerados os cubos de tendência das fases diagenéticas, foram gerados para cada uma delas um modelo de distribuição espacial por meio de simulações estocásticas sequenciais. Para as categorias de intensidade de dissolução (variável contínua) foi aplicado o algoritmo SIS. Já para as demais fases diagenéticas (variáveis contínuas), utilizou-se o algoritmo de simulação sequencial SGS. Como visto anteriormente, as fases diagenéticas tem ocorrência heterogênea nas diferentes fácies sedimentares. Em outras palavras, os histogramas que representam a frequência das fases diagenética em cada fácies sedimentar, calculados a partir dos dados dos poços estudados, são distintos. Por esse motivo, as simulações foram condicionadas pelo modelo de fácies construído anteriormente, de modo a honrar tais histogramas. Ao final dessa etapa, foram obtidos 5 modelos que indicam a distribuição das fases diagenéticas na área de estudo.

A etapa seguinte consistiu na combinação dos modelos de distribuição dos produtos diagenéticos, tendo como objetivo representar o resultado final das alterações diagenéticas sofridas pelas rochas carbonáticas em termos de qualidade de reservatório (Figura 127). Assim, através dessa combinação, pode-se estimar regiões onde houve o predomínio de processos de dissolução em detrimento da cimentação, resultando em um reservatório com melhor qualidade permoporosa, e também regiões onde houve o predomínio de processos que obliteraram a porosidade em relação aos processos de dissolução, gerando um reservatório de pior qualidade.

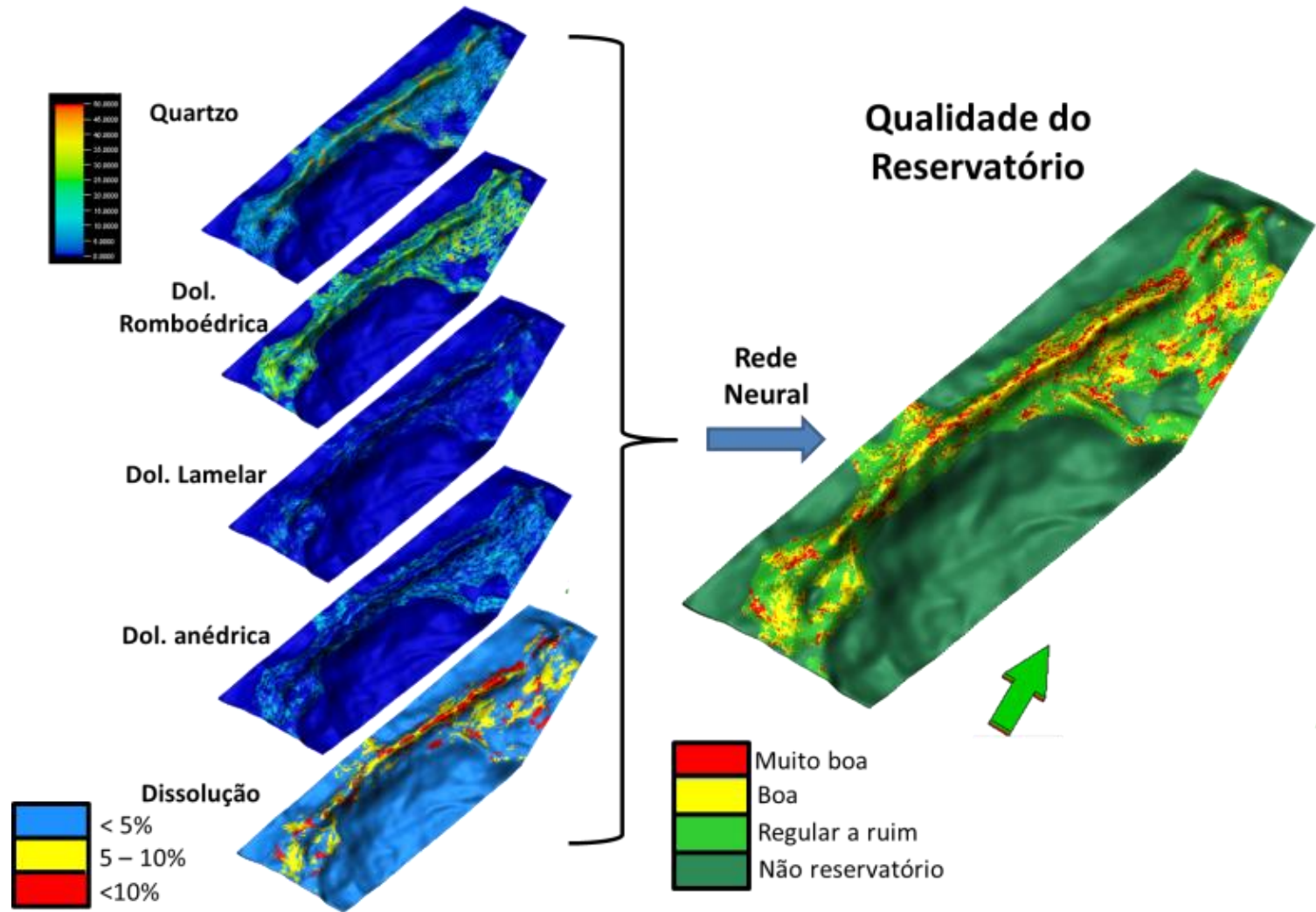
Essa combinação foi feita através de uma rede neural, que gerou três classes de qualidade de reservatório: 1) muito boa; 2) boa; 3) regular a ruim. A quarta classe (não reservatório) foi atribuída diretamente às fácies carbonáticas alóctones com matriz micrítica (WCK e MUD).

Figura 126 - Etapas realizadas na construção do modelo numérico de distribuição dos produtos diagenéticos – Exemplo do quartzo



Fonte: A autora, 2018.

Figura 127 - Combinação dos cubos 3D de distribuição de produtos diagenéticos e de intensidade de dissolução para gerar um indicador de qualidade do reservatório

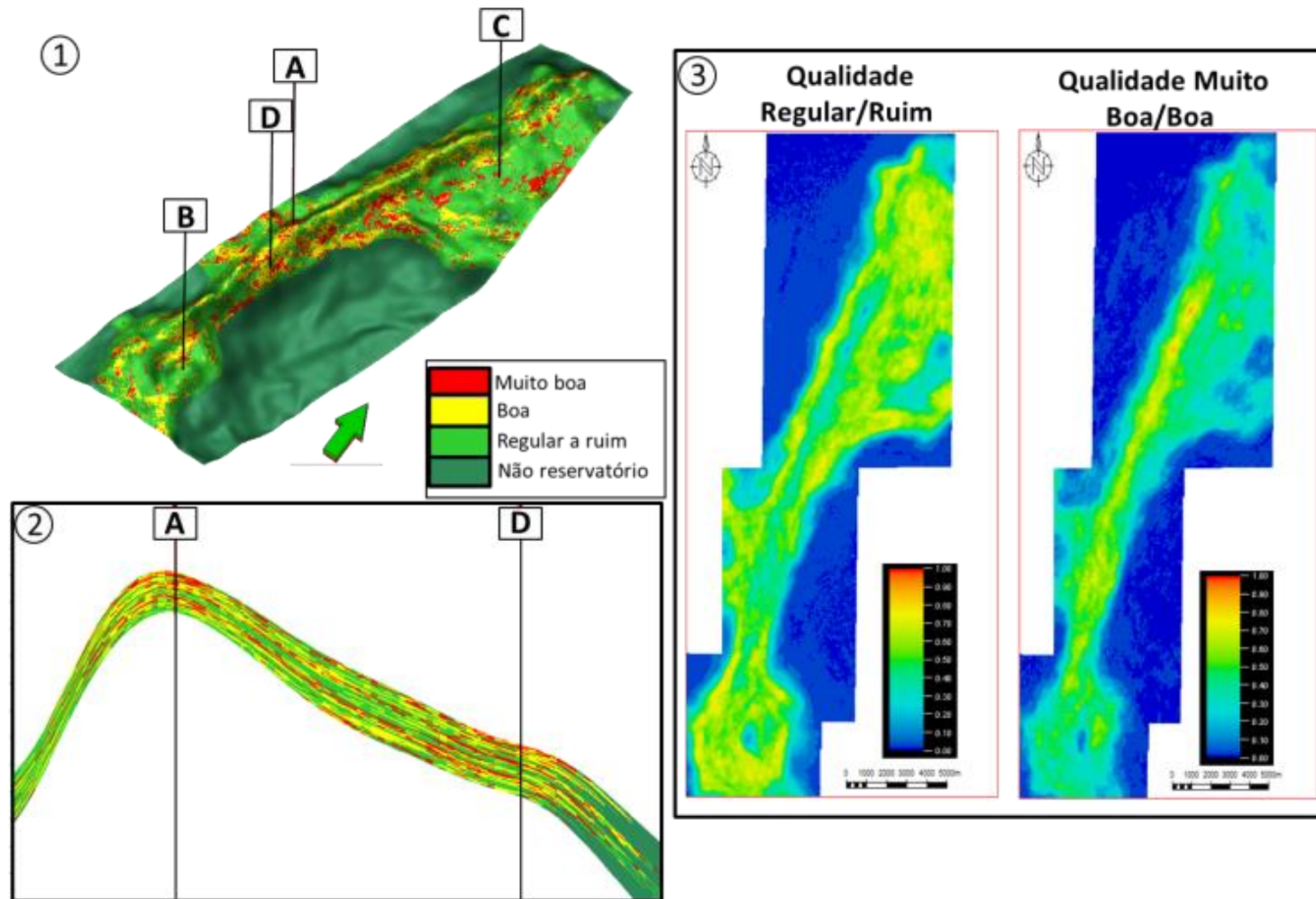


Fonte: A autora, 2018.

A figura 128 mostra os resultados do modelo numérico de categorias de qualidade de reservatório, onde são apresentados uma camada do modelo como exemplo (Figura 128-1), uma seção do modelo passando pelos poços A e D (Figura 128-2) e os mapas médios do intervalo para as categorias de qualidade regular/ruim (categoria 3) e muito boa/boa (categorias 1 e 2). Tanto nos mapas médios quanto na seção apresentada é possível ver que as melhores qualidades de reservatório ocorrem principalmente nos altos estruturais, onde os processos de dissolução ocorreram em maior intensidade.

As categorias de qualidade de reservatório nos poços estudados mostraram-se coerentes com as curvas de permeabilidade calculadas a partir do perfil de RMN (Figura 129). Assim, como essas categorias são resultado da combinação dos produtos diagenéticos neles quantificados, e não utilizaram os dados de RMN em sua construção, pode-se concluir que a análise diagenética foi eficaz na identificação de intervalos com melhor qualidade permoporosa.

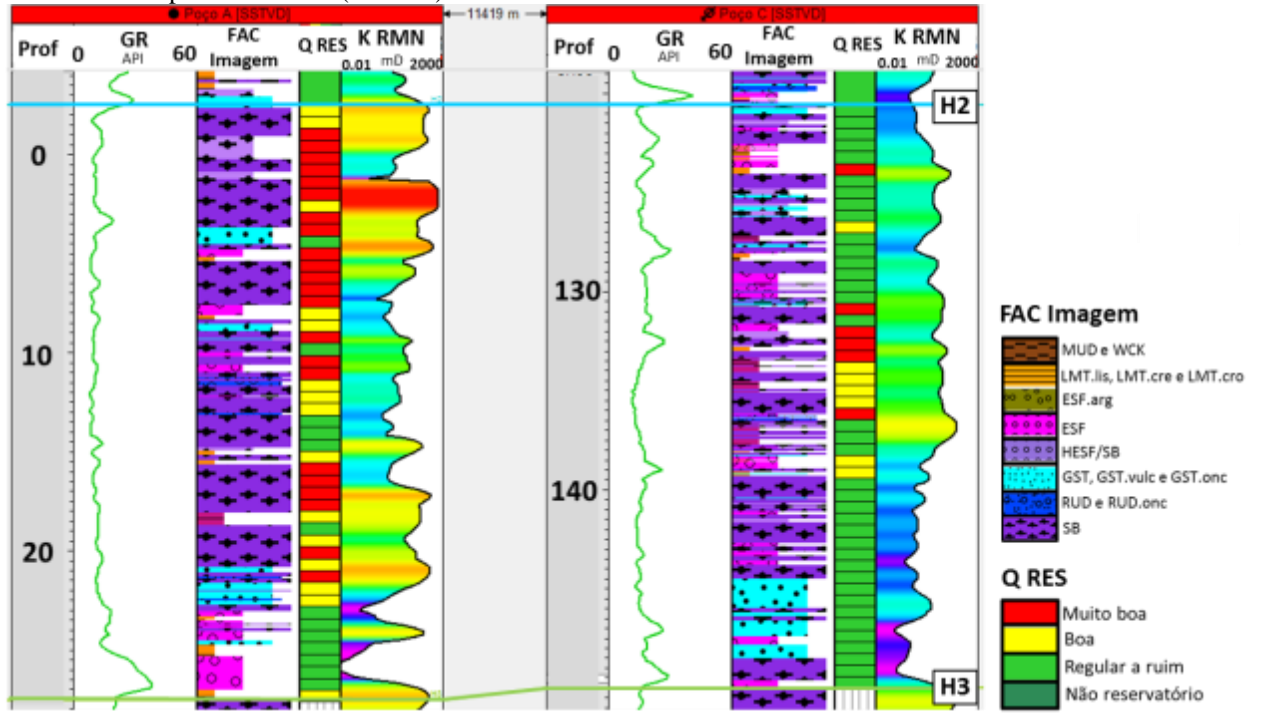
Figura 128 - Modelo numérico de categorias de qualidade do reservatório



Legenda: 1) Exemplo de uma camada do modelo 3D de qualidade do reservatório; 2) Seção do modelo 3D de qualidade do reservatório, passando pelos poços A e D; 3) Mapas de proporção simulada das categorias de qualidade do reservatório no intervalo modelado.

Fonte: A autora, 2018.

Figura 129 - Comparação entre modelo de categorias de qualidade do reservatório e a curva de permeabilidade (K RMN)



Fonte: A autora, 2018.