Pesquisas em Geociências, 44 (3): 431-451, set./dez. 2017
Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil
ISSN 1518-2398
E-ISSN 1807-9806

Modelo deposicional do Membro Ipubi (Bacia do Araripe, nordeste do Brasil) a partir da caracterização faciológica, petrográfica e isotópica dos evaporitos

Fabia Emanuela Rafaloski BOBCO[1], Karin GOLDBERG[2] & Tatiana Pastro BARDOLA[1]

[1] Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9.500, CEP 91.540-000, Porto Alegre, Brasil (fabia.bobco@ufrgs.br, tatiana.bardola@ufrgs.br).

[2] Departamento de Mineralogia e Petrologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9.500, CEP 91.540-000, Porto Alegre, Brasil (karin.goldberg@ufrgs.br).

Recebido em 05/2016. Aceito para publicação em 11/2017.
Versão *online* publicada em 16/3/2018 (*www.pesquisasemgeociencias.ufrgs.br*)

Resumo - As rochas evaporíticas se destacam nos estudos sedimentológicos e estratigráficos por sua associação com rochas geradoras de petróleo como rochas selantes e por seu significado paleoclimático e paleoambiental. A caracterização faciológica e petrográfica quantitativa permitiu a definição das fácies e hábitos dos evaporitos do Membro Ipubi da Bacia do Araripe, coletados em afloramentos localizados principalmente na região de Araripina, Pernambuco. Técnicas de difratometria de raios X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram utilizadas com o intuito de complementar a análise dos aspectos composicionais e texturais dos constituintes. Os sulfatos dominantes são gipsita e anidrita, localmente celestita. Foram identificadas macroscopicamente três fácies (Evaporito laminado, Evaporito maciço e Evaporito fraturado) e microscopicamente treze hábitos para os sulfatos. Dentre estes, os hábitos e as texturas primários são anidrita nodular, gipsita paliçada e *chevron*, estas duas últimas constituindo a textura laminada. Os demais sulfatos foram precipitados em condições pós-deposicionais rasas. As análises isotópicas de S e O nos sulfatos forneceram valores de $\delta^{34}S$ entre +10,27‰ e +17,99‰ e $\delta^{18}O$ entre +7,72‰ e +13,30‰, caracterizando a composição marinha da salmoura geradora dos depósitos. Os resultados obtidos indicam que os evaporitos do Membro Ipubi foram depositados em contexto subaquoso (salinas) e intrasedimentar em um *sabkha* costeiro.
Palavras-chave: sulfatos, Formação Santana, Aptiano-Albiano, *sabkha* costeiro.

Abstract - Depositional model of the Ipubi Member (Araripe Basin, northeastern Brazil) from facies analysis, petrographic and isotopic characterization of evaporites. Evaporitic rocks are paramount in sedimentological and stratigraphic studies due to their frequent association with petroleum source rocks as caprocks and significance as paleoclimatic and paleoenvironmental indicators. Facies analysis and quantitative petrography allowed the definition of facies and habits of the Ipubi evaporites in the Araripe Basin, collected in outcrops located mainly in the Araripina region, Pernambuco. X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) were used to complement the compositional and textural analysis of the constituents. The dominant sulfates are gypsum and anhydrite and locally celestite. Macroscopically three facies were identified (Laminated evaporite, Massive evaporite and Fractured evaporite) and microscopically thirteen sulfate habits. Among these, primary habits and textures are nodular anhydrite, palisade and chevron gypsum, the latter two constituting the laminated texture. Other sulfates were precipitated in shallow post-depositional conditions. S and O isotopic analyses in sulfates yielded $\delta^{34}S$ values between +10.27‰ and +17.99‰ and $\delta^{18}O$ between +7.72‰ and +13.30‰, attesting to the marine composition of the source brine. The results indicate that the Ipubi Member evaporites were deposited in subaqueous (salinas) and intrasedimentary settings in a coastal sabkha.
Keywords*:* sulfates, Santana Formation, Aptian-Albian, coastal sabkha.

1 Introdução

Os evaporitos possuem grande importância econômica, tanto pela sua extração e aplicação na indústria, quanto pela sua associação com o petróleo (como armadilhas, selos, e frequente associação com rochas ricas em matéria orgânica, potenciais geradoras). Adicionalmente, as características deposicionais dos evaporitos fornecem informações paleoclimáticas e paleoambientais.

A dificuldade do estudo de evaporitos decorre de: a) ausência de análogos atuais aos grandes depósitos antigos, levando a controvérsias acerca do ambiente deposicional; b) escassez de afloramentos de rochas evaporíticas, restritos a regiões de clima seco onde não há dissolução telodiagenética; e c) alta reatividade destas rochas durante a diagênese, que comumente oblitera as feições deposicionais, dificultando a compreensão de sua gênese.

O Membro Ipubi da Formação Santana (Aptiano-Albiano da Bacia do Araripe) é constituído por camadas descontínuas de gipsita associadas a folhelhos verdes e pretos (Assine, 2007). Poucos trabalhos acerca do ambiente deposicional foram realizados nestas rochas, com interpretações variáveis de *sabkhas* e lagunas (Oliveira *et al*., 1979), lago continental (Silva, 1988) e ambientes costeiros do tipo supramaré (Assine, 1992).

Este trabalho buscou caracterizar o ambiente deposicional no qual se formou esta sucessão evaporítica, através da integração de análise faciológica em afloramentos e testemunhos de sondagem, petrografia quantitativa, análise de isótopos estáveis de S e O, e análises complementares como difratometria de raios X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). O objetivo foi identificar o ambiente de sedimentação, propondo um modelo deposicional para os evaporitos.

2 Área, materiais e métodos

2.1 Contexto geológico

A Bacia do Araripe localiza-se nas regiões sul no estado do Ceará, oeste do estado de Pernambuco e leste do Piauí (Carvalho *et al*., 2012) e é considerada a maior das bacias interiores do Nordeste do Brasil com aproximadamente 9.000 km^2 (Assine, 1992).

Sua formação está associada aos eventos de rifteamento do Gondwana e à abertura do Atlântico Sul. Esta bacia está inserida nos terrenos precambrianos da Zona Transversal da Província Borborema (Assine, 2007) ao sul do Lineamento de Patos, e apresenta um complexo desenvolvimento geológico, com diversos modelos estratigráficos propostos desde seu estudo inicial (*e.g*. Small, 1913; Beurlen, 1962, 1963, 1971; Braun, 1966; Moraes *et al*., 1976; Lima, 1979). Assine (2007) definiu sequências e supersequências formadas em diferentes fases de desenvolvimento da bacia, compreendendo a Sequência Paleozoica, a Supersequência Pré-Rifte (Sequência J20-J30), a Supersequência Rifte (Sequência K10-K30), a Supersequência Pós-Rifte (Sequências K40-K60 e K70-K80).

O intervalo estudado está contido na Supersequência Pós-Rifte (Fig.1), a qual inclui duas sequências. A sequência K40-K60 é constituída pela Formação Barbalha (Assine, 1992), com intercalações de arenitos, folhelhos avermelhados e níveis delgados de conglomerados, formando dois ciclos fluviais delimitados por intervalos pelítico-carbonáticos lacustres. O primeiro intervalo lacustre é denominado "Camadas Batateira", e o segundo corresponde aos calcários laminados lacustres do Membro Crato. Lentes de evaporitos associadas a folhelhos verdes e pretos, sobrepostas aos calcários, foram interpretadas como depósitos de supramaré (Assine, 1992). Assine (2007) propõe que estas, por serem descontínuas, sejam chamadas de "Camadas Ipubi". Segundo o Código Brasileiro de Nomenclatura Estratigráfica (Petri *et al*., 1986), "uma série de pequenas massas descontínuas de rocha, com aproximadamente o mesmo caráter e posição estratigráfica, dentro de uma formação, pode ser definida e denominada como um membro". Sendo assim, neste trabalho optou-se pela denominação de Membro Ipubi (Beurlen, 1971) para estas rochas, termo utilizado na maioria dos trabalhos publicados e proposto como constituinte da Formação Santana juntamente com os membros Crato e Romualdo (Fig. 1). Este último, sobreposto ao pacote carbonático-evaporítico, é constituído por arenitos com fósseis marinhos interestratificados com folhelhos, numa sucessão granodecrescente. No topo do Membro Romualdo, siltitos e arenitos com fósseis de água doce indicam condições regressivas.

A outra sequência da Supersequência Pós-Rifte (K70-K80) não está inclusa no intervalo estudado.

2.2 Localização da área, materiais e métodos

A metodologia deste trabalho incluiu a análise faciológica, análise petrográfica quantitativa e análise de isótopos estáveis de S e O em sulfatos, além de análises complementares como difratometria de raios X (DRX) e microscopia eletrônica

de varredura (MEV).

Na análise faciológica, foram levantados perfis colunares em escala 1:100 em 18 afloramentos e um testemunho de sondagem do poço PS-11, com dados de granulometria, composição, grau de seleção, conteúdo fossilífero, estruturas sedimentares e grau de bioturbação.

Os dados obtidos foram coletados em duas áreas (Fig. 2): 1) a principal, na margem sudoeste da Bacia do Araripe, nos municípios de Araripina, Trindade e Ipubi, no Distrito Gesseiro de Pernambuco; e 2) a secundária, na porção norte-nordeste da bacia, nos municípios de Crato, Santana do Cariri, Nova Olinda e Barbalha, no estado do Ceará.

A análise petrográfica foi realizada por quantificação de 300 pontos por lâmina em 17 lâminas delgadas (15 provenientes de afloramentos e 2 do poço PS-11) coletadas nas camadas evaporíticas. O armazenamento e processamento dos dados petrográficos foi feito no *software* Petroledge® (De Ros *et al*., 2007). A composição dos carbonatos associados aos evaporitos foi determinada pelo tingimento com solução de Alizarina e Ferricianeto de Potássio (Tucker, 1988).

Com o propósito de caracterizar a assinatura isotópica do fluido precipitante dos evaporitos e identificar as razões isotópicas das diversas fases dos sulfatos, a análise isotópica de S e O foi executada em 18 amostras de sulfatos. O material foi enviado ao Departamento de Ciências da Terra e do Meio Ambiente da Universidade de Windsor, Canadá. As análises foram realizadas em um espectrômetro de massa de razão isotópica *Delta XP* (*Thermo Finnigan*, Alemanha), com precisão analítica de ± 0,2‰. Os valores obtidos para $\delta^{34}S$ e $\delta^{18}O$ são expressos em *per mil* (‰), relativos aos padrões *Canyon Diablo Troilite* (CDT) para S e *Vienna Pee Dee Belemnite* (VPDB) para O.

A análise de DRX foi realizada em 17 amostras de rochas evaporíticas. A verificação foi realizada a fim de comprovar a mineralogia dos sulfatos identificados em lâmina. As análises foram executadas no Laboratório de Difratometria de raios X do Instituto de Geociências da UFRGS, através do Método do Pó. O equipamento utilizado foi um difratômetro *SIEMENS – BRUKER-AXS D5000* com goniômetro θ-θ. A interpretação dos difratogramas foi feita com a base de dados DIFFRAC^{PLUS}. Somente minerais presentes em quantidade acima de 2% podem ser detectados neste procedimento.

Com intuito de confirmar a composição de diferentes fases minerais e detalhar o hábito de sulfatos, carbonatos e argilominerais, foram realizadas 14 análises de MEV em quatro lâminas quantificadas. O equipamento utilizado foi um microscópio eletrônico de varredura *Jeol 6610-LV* com detector EDS acoplado (Marca *BRUKER* modelo *Nano X Flash Detector 5030 (133eV)*, do Laboratório de Geologia Isotópica (LGI) do Instituto de Geociências da UFRGS.

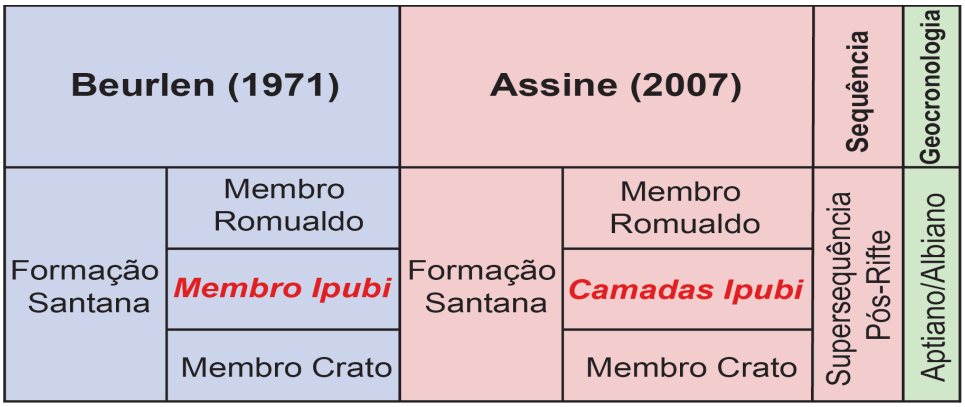

Figura 1. Quadro cronoestratigráfico comparando as proposições de Beurlen (1971) e Assine (2007) para o intervalo estudado (destaque em vermelho).
Figure 1. Chronostratigraphic chart comparing the proposals from Beurlen (1971) and Assine (2007) for the studied interval (highlighted in red).

3 Resultados

3.1 Análise faciológica

A descrição sedimentológica de 18 afloramentos e de um testemunho de sondagem permitiu a identificação macroscópica de três fácies evaporíticas (Evaporito laminado, Evaporito maciço e Evaporito fraturado).

Evaporito laminado (El): Nesta fácies a estrutura é formada pela alternância de lâminas claras e escuras horizontais, com espessuras milimétricas até 2 cm (Fig. 3A). É comum a presença de veios fibrosos milimétricos a centimétricos recortando a estrutura em diversas direções, e/ou rosetas mili-

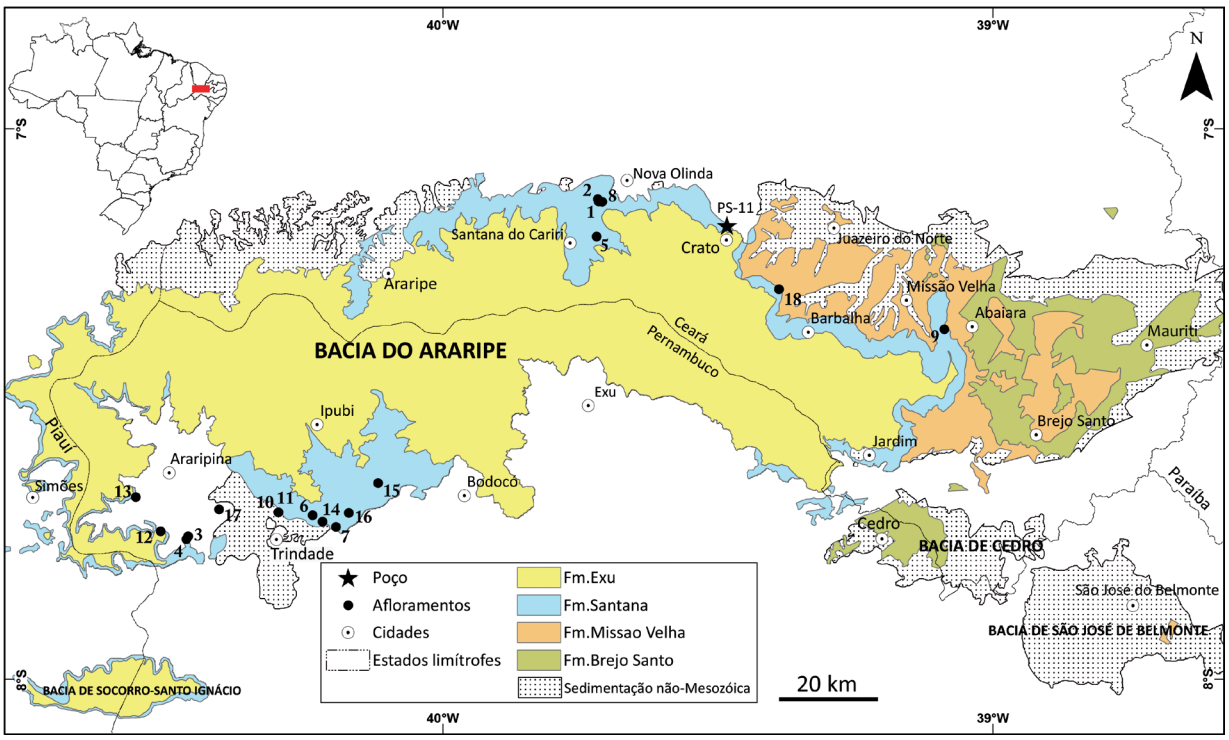

Figura 2. Localização das seções levantadas em 18 afloramentos e do poço PS-11 na Bacia do Araripe (base de dados GeoSGB - CPRM, 2004).
Figure 2. Localization of the logged sections in 18 outcrops and PS-11 well in the Araripe Basin (GeoSGB database - CPRM, 2004).

métricas a centimétricas, ao longo do plano da laminação ou cortando-o.

Evaporito maciço (Em): Esta fácies possui estrutura maciça, cristalinidade fina a grossa, e coloração branca, esverdeada, cinza ou amarronzada (Fig. 3B). Veios fibrosos, milimétricos a centimétricos de gipsita, e rosetas de gipsita com até 4 cm de diâmetro ocorrem associados.

Evaporito fraturado (Ef): Esta fácies caracteriza-se por uma rocha de coloração branca, intensamente recortada em diversas direções por veios de gipsita maciça ou fibrosa, incolor, com espessura milimétrica a centimétrica (Fig. 3C).

Não foi encontrado padrão na distribuição das fácies em relação aos afloramentos descritos. Desta forma, alguns afloramentos apresentam somente a fácies Evaporito laminado (El), outros somente Evaporito maciço (Em) e outros as duas fácies intercaladas. A fácies Evaporito fraturado (Ef) é bastante restrita, sendo resgistrada em poucos afloramentos e sem continuidade lateral. Já a presença de estruturas como rosetas de gipsita (Fig. 3D) e veios (Fig. 3E) é conspícua, presentes em praticamente todos os locais, inclusive no poço PS-11 (Fig. 3F).

3.2 Análise petrográfica

A análise petrográfica de 17 lâminas delgadas (15 provenientes de afloramentos e 2 do poço PS-11) buscou: 1) caracterizar as texturas e hábitos dos sulfatos; 2) quantificar a composição mineralógica; e 3) definir a paragênese dos sulfatos, relacionando-a aos demais constituintes.

3.2.1 Texturas

As texturas foram caracterizadas com base na relação e arranjo microscópico entre os cristais. As texturas identificadas para os evaporitos foram: Laminada, Maciça, Nodular/Mosaico e Fraturada. Os veios e rosetas identificados macroscopicamente também foram descritos petrograficamente.

Textura Laminada: A textura laminada é geralmente composta pela alternância de lâminas de gipsita paliçada, com espessura variando 0,4 mm a 8,8 mm (média: 4 mm), e lâminas de gipsita fibrosa com espessura entre 0,8 mm a 3,2 mm (média: 2 mm) (Fig. 4A).

Textura Maciça: A textura maciça é composta por cristais de gipsita equantes a alongados (Fig. 4B) de hábitos diversos (alabastrina; feixes fibrosos; fibrosa; mosaico; porfiroblástica e prismática) em proporções variáveis. Esta textura é gerada de duas formas: tanto pela substituição pervasiva das fases sulfáticas, quanto pela intensa precipitação nodular de sulfatos, restando apenas raros resquícios de matriz entre os cristais. No último caso, a

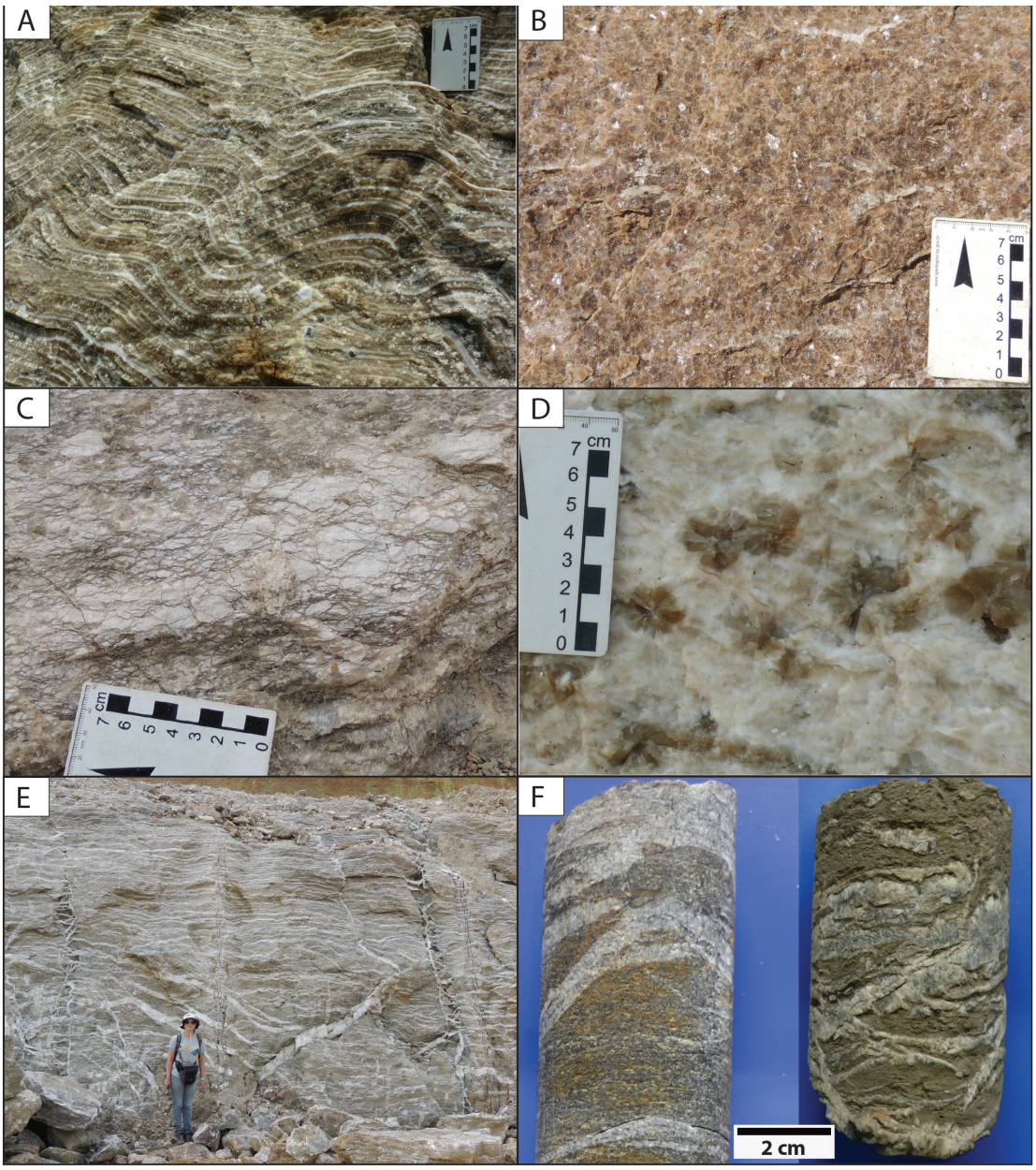

Figura 3. Aspecto macroscópico das fácies evaporíticas e feições associadas. A) Fácies Evaporito laminado (El), seção 3; B) Fácies Evaporito maciço (Em), seção 10; C) Fácies Evaporito fraturado (Ef), seção 7; D) Rosetas dispersas obliterando a estrutura do evaporito, seção 3; E) Veios com diversas direções recortando a estrutura do evaporito, seção 10; F) Veios de evaporito recortando a fácies Evaporito maciço (Em) (esquerda) e *mudstone* cinza (direita), poço PS-11.
Figure 3. Macroscopic aspect of the evaporitic facies and associated features. A) Laminated evaporite (El) facies, Log 3; B) Massive evaporite (Em) facies, Log 10; C) Fractured evaporite (Ef) facies, Log 7; D) Dispersed rosettes obliterating the evaporite structure, Log 3; E) Veins in different directions cutting the evaporite structure, Log 10; F) Evaporite veins cutting the Massive evaporite (Em) facies (left) and grey mudstone (right), well PS-11.

textura maciça pode constituir toda a lâmina ou ocorrer associada à textura mosaico. As texturas nodular e mosaico, descritas abaixo, são definidas com base na proporção de matriz entre os cristais.

Texturas Nodular/Mosaico: As texturas nodular e mosaico são caracterizadas pela presença de matriz micrítica ou argilosa entre os cristais (Fig. 4C). Elas ocorrem associadas e são definidas com base na proporção nódulos (cristais)/matriz. Atualmente, estes nódulos encontram-se parcialmente substituídos por gipsita mosaico, fibrosa, alabastrina e porfiroblástica, mas ainda mantém resquícios corroídos de anidrita. A textura é denominada nodular quando a matriz é abundante entre os nódulos. Caso contrário, quando somente filmes de matriz permanecem entre os cristais, denomina-se de textura em mosaico. Estas duas texturas são mais facilmente identificadas em luz natural, pois grande parte das lâminas analisadas está substituída para gipsita, obliterando a visuali-

zação da matriz em luz polarizada.

Textura Fraturada: A textura fraturada é definida por uma alta incidência de veios que alteram fortemente estrutura original da rocha (Fig. 4D). Caracteriza-se por cristais fibrosos de anidrita, geralmente com disposição caótica a circular, recortados por veios milimétricos a centimétricos de gipsita alabastrina com cristais límpidos. Os veios podem ser compostos também por gipsita em feixes fibrosos, mosaico, porfiroblástica, fibrosa e celestita.

Veios e rosetas: Os veios apresentam espessura milimétrica e são compostos por cristais límpidos (Fig. 4E). Recortam com frequência variável as texturas maciça e laminada, podendo criar um aspecto pseudolaminado em estruturas maciças. Os veios que recortam as texturas maciça e laminada são compostos por gipsita fibrosa, prismática e mosaico fino; e na textura fraturada, são preenchidos comumente por gipsita alabastrina. Estes veios podem recortar gipsita prismática-radiada totalmente dolomitizada, indicando que são tardios em relação ao restante da mineralogia. As rosetas são identificadas pela disposição radial de cristais prismáticos a equantes e porfiroblásticos de gipsita, com até 3,2 mm (Fig. 4F).

3.2.2 Composição mineralógica

A composição mineralógica foi determinada a partir da petrografia e complementada por DRX e MEV.

Os constituintes identificados nas lâminas quantificadas foram divididos em cinco categorias: sulfatos, carbonatos, matriz, bioclastos e outros constituintes minoritários. A proporção entre os diferentes constituintes está representada na figura 5. Os bioclastos carbonáticos (conchas de ostracodes) e fosfáticos (possivelmente ossos, dentes e escamas) compõem menos de 0,05%, por isso não foi possível representá-los no diagrama.

As análises de DRX apontam a ocorrência de quatro minerais distintos nas amostras analisadas: gipsita, anidrita, calcita e dolomita. A gipsita é registrada em todas as amostras, geralmente como mineral predominante, a anidrita está presente em seis amostras (sendo em somente duas o mineral mais abundante), a calcita e a dolomita ocorrem apenas em uma amostra cada, sempre associadas com a gipsita predominante.

As análises de MEV foram executadas visando à determinação de três constituintes não identificados em lâmina petrográfica (celestita, calcita lenticular e argilominerais do grupo da esmectita que compõe a matriz argilosa).

3.2.2.1 Sulfatos

Os sulfatos presentes incluem gipsita, anidrita e celestita. A gipsita ocorre como mineral mais abundante, a anidrita subordinadamente, exceto nos evaporitos com textura fraturada, e a celestita tem ampla ocorrência, porém em quantidade restrita.

Gipsita

A gipsita ocorre em dez hábitos: mosaico, alabastrina, paliçada, prismática-radiada, fibrosa, prismática, *chevron*, porfiroblástica, feixes fibrosos e rabo de andorinha. A maioria dos hábitos é comum nas lâminas analisadas, sendo os menos representativos gipsita rabo de andorinha, *chevron*, porfiroblástica e feixes fibrosos.

Gipsita mosaico: A gipsita mosaico (média: 32%; máximo: 84%) é composta de cristais equantes de diâmetro variável, com granulação fina, média e grossa. A gipsita mosaico fino (Fig. 6A) apresenta cristais anédricos a subédricos, com até 1 mm, contatos retos a irregulares e raros resquícios de anidrita. Pode substituir a gipsita paliçada e preencher veios. A gipsita mosaico médio (Fig. 6B) é formada por cristais anédricos a subédricos, com até 5 mm, apresentam contatos irregulares a retos e resquícios de anidrita em quantidade variável. A gipsita mosaico grosso (Fig. 6C) possui cristais de até 1,5 cm, anédricos a subédricos, com contatos irregulares a retos e resquícios de anidrita em quantidade variável. As gipsitas mosaico fino e médio são por vezes substituídas por calcita anédrica e dolomita. A gipsita mosaico é o constituinte principal da textura maciça, mas ocorre subordinadamente nas outras texturas também.

Gipsita alabastrina**:** A gipsita alabastrina (média: 17%; máximo: 75%) caracteriza-se por cristais límpidos, com diâmetro inferior a 0,05 mm, anédricos a subédricos, muitas vezes com contato difuso (Fig. 6D). Este hábito é registrado: 1) em veios, 2) compondo parcialmente ou predominantemente a lâmina petrográfica, e 3) substituindo a gipsita de qualquer hábito. Pode estar parcialmente substituída por jarosita.

Gipsita paliçada: A gipsita paliçada (média: 10%; máximo: 60%) compreende cristais colunares com faces curvas proeminentes, com arranjo em *zig-zag*, dispostos em paliçada, ou seja, paralelos uns aos outros, com 0,05 mm a 2 mm de comprimento, subédricos a euédricos e compondo lâminas (Fig. 6E). Normalmente os cristais contêm

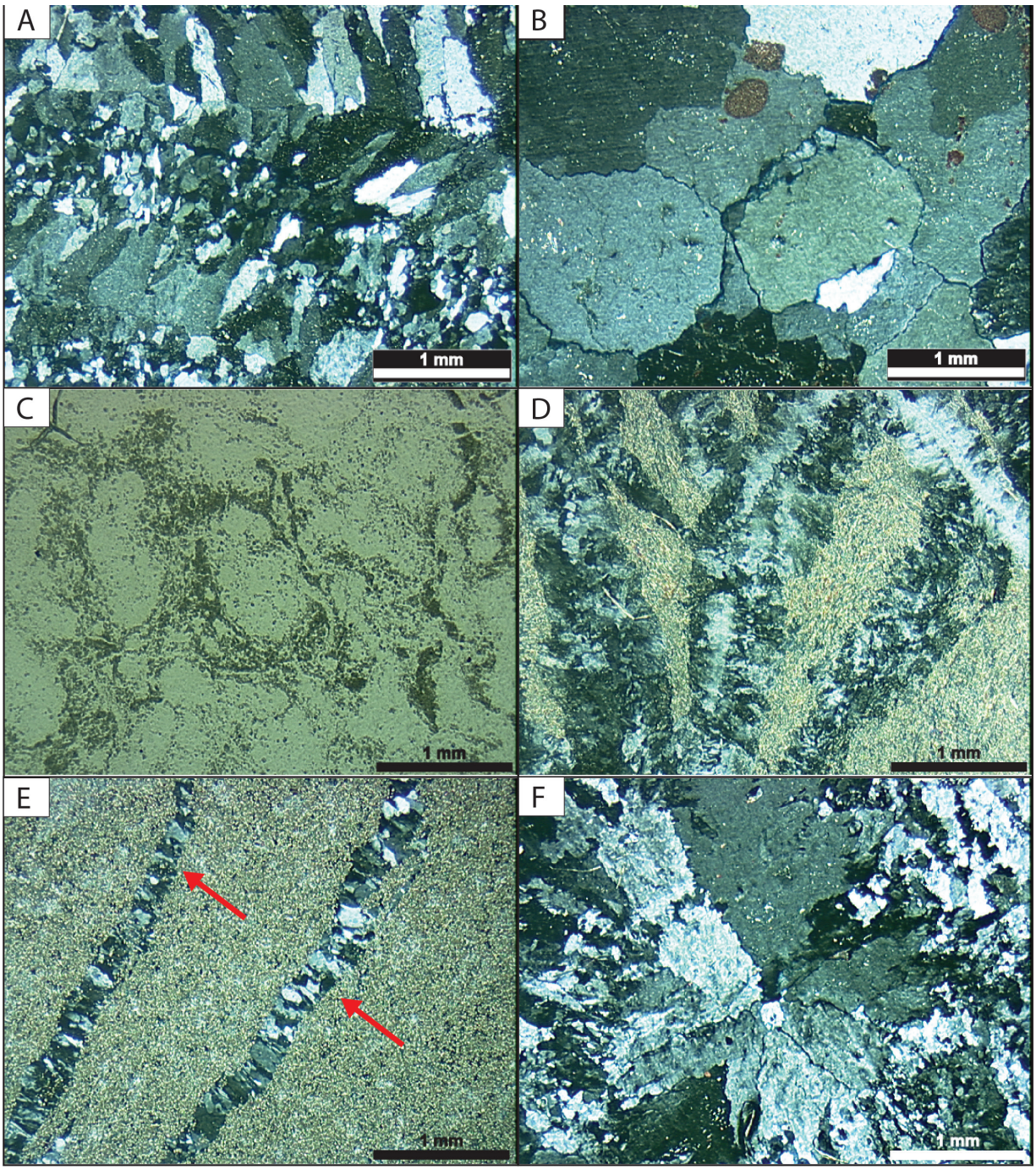

Figura 4. Aspecto microscópico das texturas evaporíticas. A) Textura laminada, lâmina 16-a (polarizadores cruzados, XP); B) Textura maciça caracterizada pela ausência ou rara presença de matriz, lâmina 16-f (XP); C) Texturas nodular/mosaico comumente associadas, diferenciadas pela proporção nódulos/matriz, lâmina 6-b (polarizadores descruzados, //P); D) Textura fraturada, lâmina 7-f (XP); E) Veios de gipsita (setas vermelhas) em gipsita dolomitizada, lâmina 16-d (XP); F) Roseta de gipsita, lâmina 16-c (XP).

Figure 4. Microscopic aspect of the evaporitic textures. A) Laminated fabric, thin section 16-a (crossed polarizers, XP); B) Massive fabric characterized by the absence (or rare presence) of matrix, thin section 16-f (XP); C) Commonly associated nodular/mosaic fabric, differentiated by the nodules/matrix proportion, thin section 6-b (uncrossed polarizers, // P); D) Fractured fabric, thin section 7-f (XP); E) Gypsum veins (red arrows) in dolomitized gypsum, thin section 16-d (XP); F) Gypsum rosette, thin section 16-c (XP).

abundantes resquícios de anidrita corroída. A gipsita paliçada compõe as lâminas escuras da fácies Evaporito laminado. Este é o hábito da gipsita *chevron*, descrita abaixo, quando visualizada com os polarizadores cruzados.

Gipsita prismática-radiada: Este hábito é caracterizado por cristais prismáticos alongados, dispostos de forma radiada, formando as rosetas (Fig. 6F; média: 7%; máximo: 49%). Os cristais individuais atingem em média 3 mm, podendo chegar a 1 cm, geralmente com resquícios de anidrita corroída em quantidade muito variável. Localmente dolomitizada.

Gipsita fibrosa: A gipsita fibrosa (média: 4%;

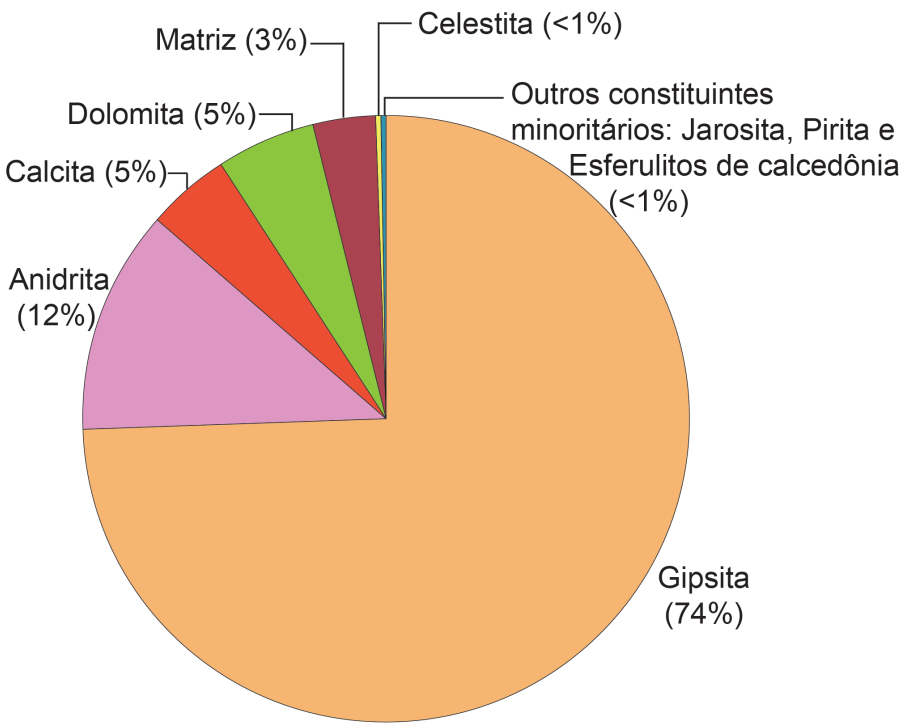

Figura 5. Diagrama relacionando as proporções dos constituintes totais descritos nas lâminas.
Figure 5. Diagram with the proportions of total constituents in the thin sections.

máximo: 29%) é composta por cristais fibrosos, com razão entre os eixos B e C inferior a 0,2 (o que a diferencia da gipsita prismática), subédricos a euédricos e normalmente límpidos (Fig. 7A). Este hábito ocorre em veios, compondo lâminas ou distribuídos aleatoriamente na lâmina.

Gipsita prismática: A gipsita prismática (média: 3%; máximo: 18%) compreende cristais geralmente límpidos, alongados, com razão entre os eixos B e C superior a 0,2, subédricos a euédricos, com faces arredondadas (Fig. 7B). Este hábito ocorre em veios e compondo lâminas como mineral principal. A gipsita prismática compõe as lâminas claras da fácies Evaporito laminado. Diferencia-se da gipsita paliçada pela ausência das inclusões de anidrita, da associação com o hábito *chevron* e das faces curvas características, além de formar veios, ao contrário da gipsita paliçada, que compõe somente lâminas.

Gipsita *chevron*: A gipsita *chevron* é registrada como "fantasmas" na gipsita paliçada (Fig. 7C), visíveis somente com os polarizadores descruzados. A ocorrência deste hábito é rara e restrita.

Gipsita porfiroblástica: A gipsita porfiroblástica (média: ≤ 1%; máximo: 3%) compreende cristais de gipsita com até 1,5 cm, contendo cristais menores de gipsita (Fig. 7D). Tanto os cristais menores quanto o cristal porfiroblástico geralmente são subédricos, comumente contendo abundantes resquícios de anidrita corroída.

Gipsita feixes fibrosos: Os feixes fibrosos de gipsita são compostos por vários cristais fibrosos a aciculares, muito finos a finos e com limite difuso, a alternância dos cristais geralmente confere uma extinção ondulante ao conjunto (Fig. 7E). Os cristais são límpidos e raramente apresentam resquícios de anidrita corroída. Este hábito (média: ≤ 1%; máximo: 12%) ocorre como cristais discretos, ou mais expressivamente substituindo a gipsita.

Gipsita rabo de andorinha: Os cristais de gipsita, subédricos, com até 0,2 mm e límpidos, possuem macla "rabo de andorinha" (Fig. 7F). Este hábito é registrado em quantidade ínfimas, substituindo a gipsita mosaico fino.

Anidrita

A anidrita apresenta dois hábitos: fibroso ou prismático (corroído). A anidrita fibrosa encontra-se somente em duas lâminas delgadas.

Anidrita fibrosa: Os cristais são fibrosos, localmente prismáticos, euédricos, com tamanho médio de 0,3 mm e até 0,5 mm de diâmetro (média: 6%; máximo: 58%, Fig. 8A). Este hábito ocorre apenas recortado por veios (evaporitos com estrutura e textura fraturada) (Fig. 8B). A disposição dos cristais em geral é caótica a circular.

Anidrita prismática (corroída): A anidrita prismática (média: 6%; máximo: 21%) é repre-

sentada por cristais com bordas corroídas, comumente menores do que 0,05 mm, e estão restritos a resquícios dentro de outros sulfatos (Fig. 8C). Nos cristais menos corroídos é possível identificar um hábito prismático alongado. A anidrita prismática aparece em quantidade variável e frequentemente substituída por cristais de gipsita com hábitos mosaico médio e grosso, paliçada, porfiroblástica, prismática, e celestita.

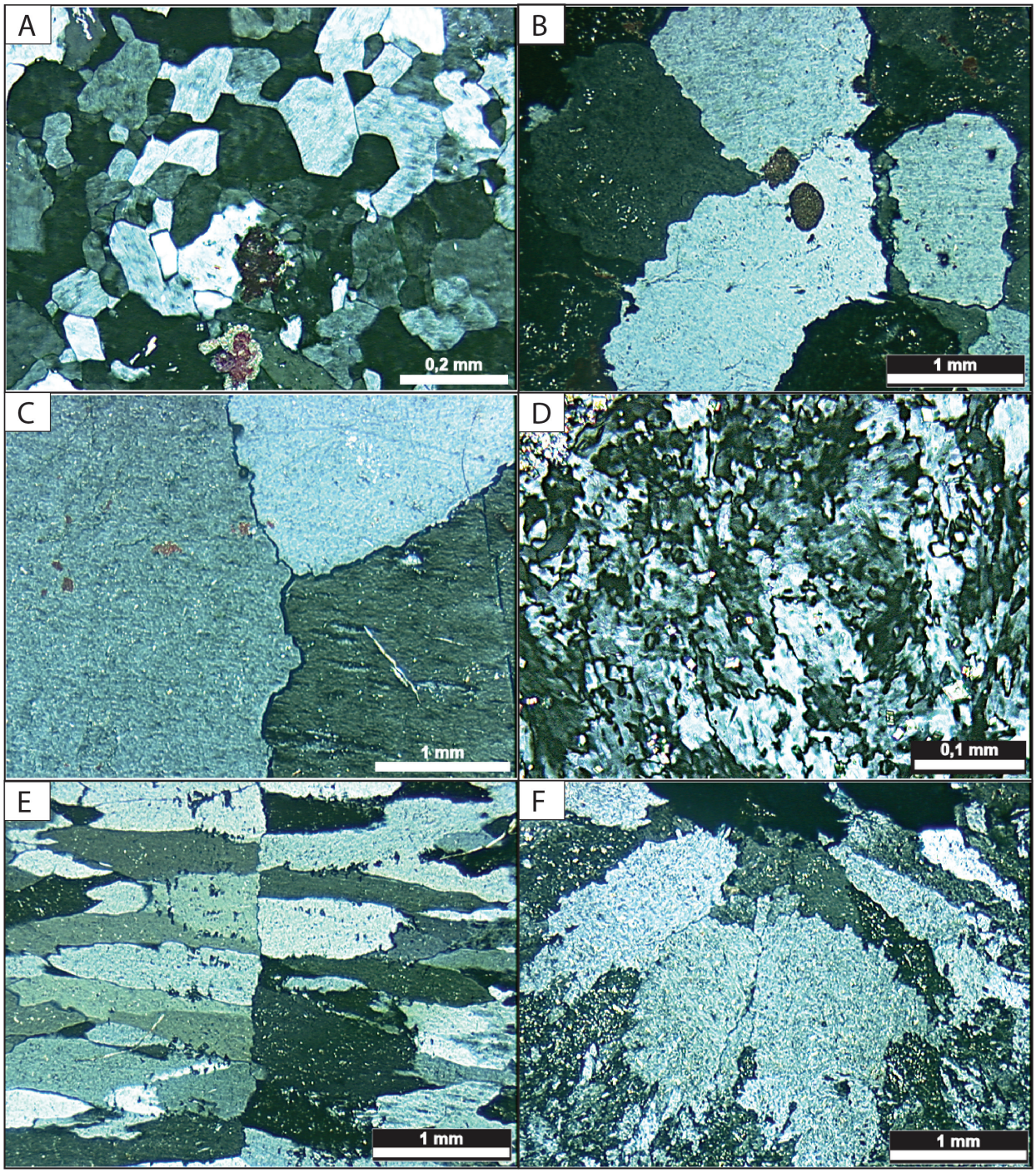

Figura 6. Principais hábitos da gipsita. A) Gipsita mosaico fino, lâmina 7-d (polarizadores cruzados, XP); B) Gipsita mosaico médio, lâmina 16-f (XP); C) Gipsita mosaico grosso, lâmina 16-f (XP); D) Gipsita alabastrina, lâmina 6-b (XP); E) Gipsita paliçada, lâmina 6-c (XP); F) Gipsita prismática-radiada, lâmina 18-a (XP).

Figure 6. Main habits of gypsum. A) Fine mosaic gypsum, 7-d thin section (crossed polarizers, XP); B) Medium mosaic gypsum, thin section 16-f (XP); C) Coarse mosaic gypsum, thin section 16-f (XP); D) Alabastrine gypsum, thin section 6-b (XP); E) Palisade gypsum, thin section 6-c (XP); F) Prismatic-radial gypsum, thin section 18-a (XP).

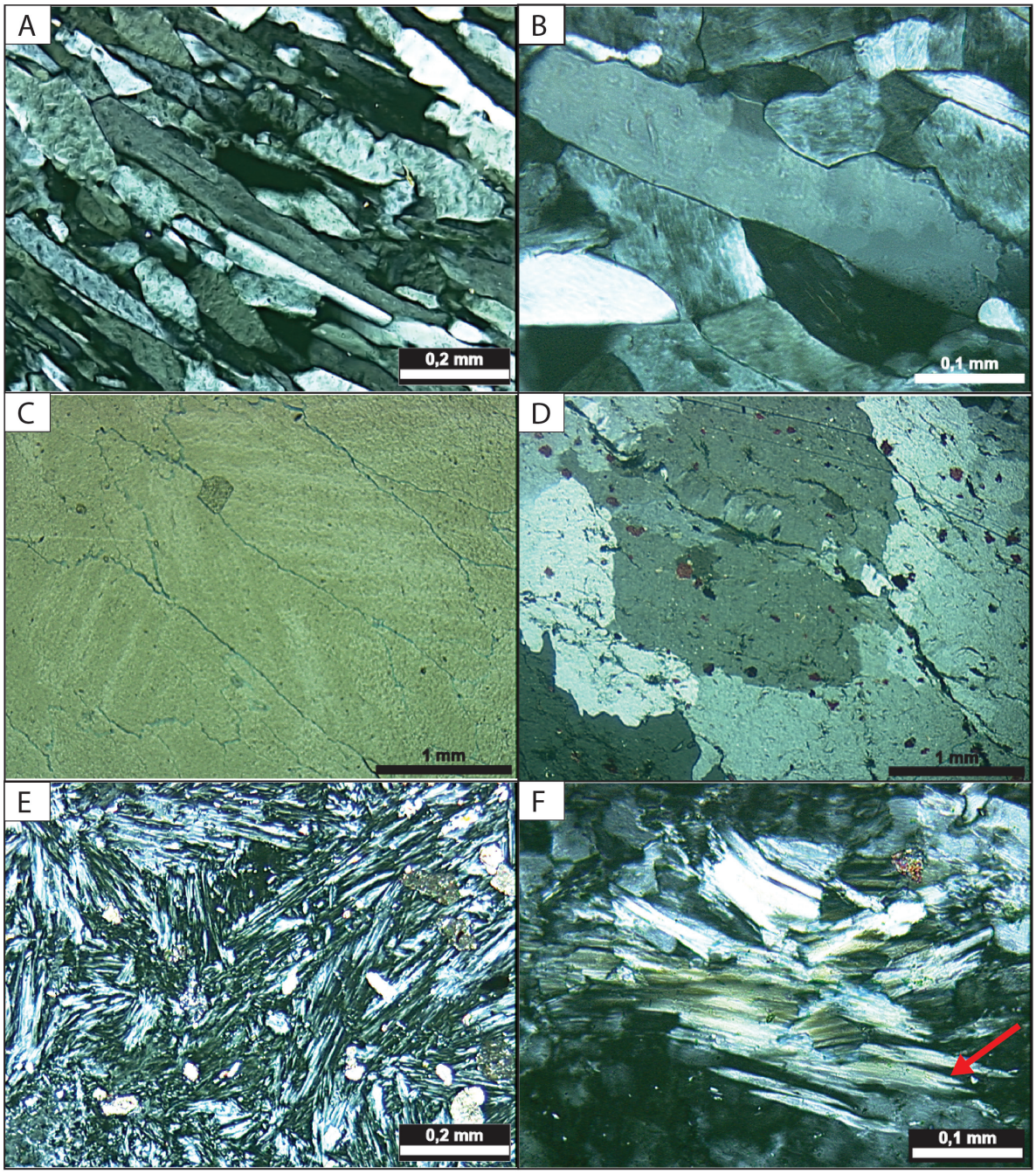

Figura 7. Principais hábitos da gipsita. A) Gipsita fibrosa, lâmina 7-e (polarizadores cruzados, XP); B) Gipsita prismática, lâmina 3-b (XP); C) Gipsita *chevron*, lâmina 3-b (polarizadores descruzados, //P); D) Gipsita porfiroblástica, lâmina 2-b (XP); E) Gipsita feixes fibrosos, lâmina PS-11-74,1; F) Gipsita rabo de andorinha (seta vermelha indicando a terminação característica do cristal), lâmina 16-c (XP).

Figure 7. Main habits of gypsum. A) Fibrous gypsum, thin section 7-e (crossed polarizers, XP); B) Prismatic gypsum, thin section 3-b (XP); C) Chevron gypsum, thin section 3-b (uncrossed polarizers, //P); D) Porphyroblastic gypsum, thin section 2-b (XP); E) Fibrous-bundled gypsum, thin section PS-11-74.1; F) Swallow-tail gypsum (red arrow indicating the characteristic crystal termination), thin section 16-c (XP).

Celestita

A celestita apresenta relevo alto e ocorre como cristais euédricos com diâmetro de até 1,2 mm (Fig. 8D). Normalmente é substituída por gipsita, porém também pode substituí-la. Raramente apresentam inclusões de anidrita corroída e restos de matriz argilosa. A celestita é encontrada em quase todas lâminas, no entanto como cristais discretos.

3.2.2.2 Carbonatos

Os carbonatos incluem calcita anédrica a subédrica, calcita lenticular, calcita esferulítica e dolomita romboédrica. A calcita lenticular e a calcita esferulítica ocorrem em apenas uma lâmina cada, e a dolomita em quatro lâminas.

Calcita anédrica a subédrica: Os cristais são anédricos a subédricos, com até 0,06 mm, e encontram-se dispersos ou em aglomerados (Fig. 9A; média: 3%; máximo: 19%). Este constituinte pode substituir parcialmente qualquer hábito da gipsita, assim como a matriz argilosa.

Calcita lenticular: A calcita lenticular (média: 1%; máximo: 24%) é caracterizada por cristais lenticulares dispersos, com diâmetro inferior a 0,05 mm (Fig. 9B). Substitui parcialmente a gipsita paliçada ao longo das laminações e a gipsita prismática-radiada nas rosetas.

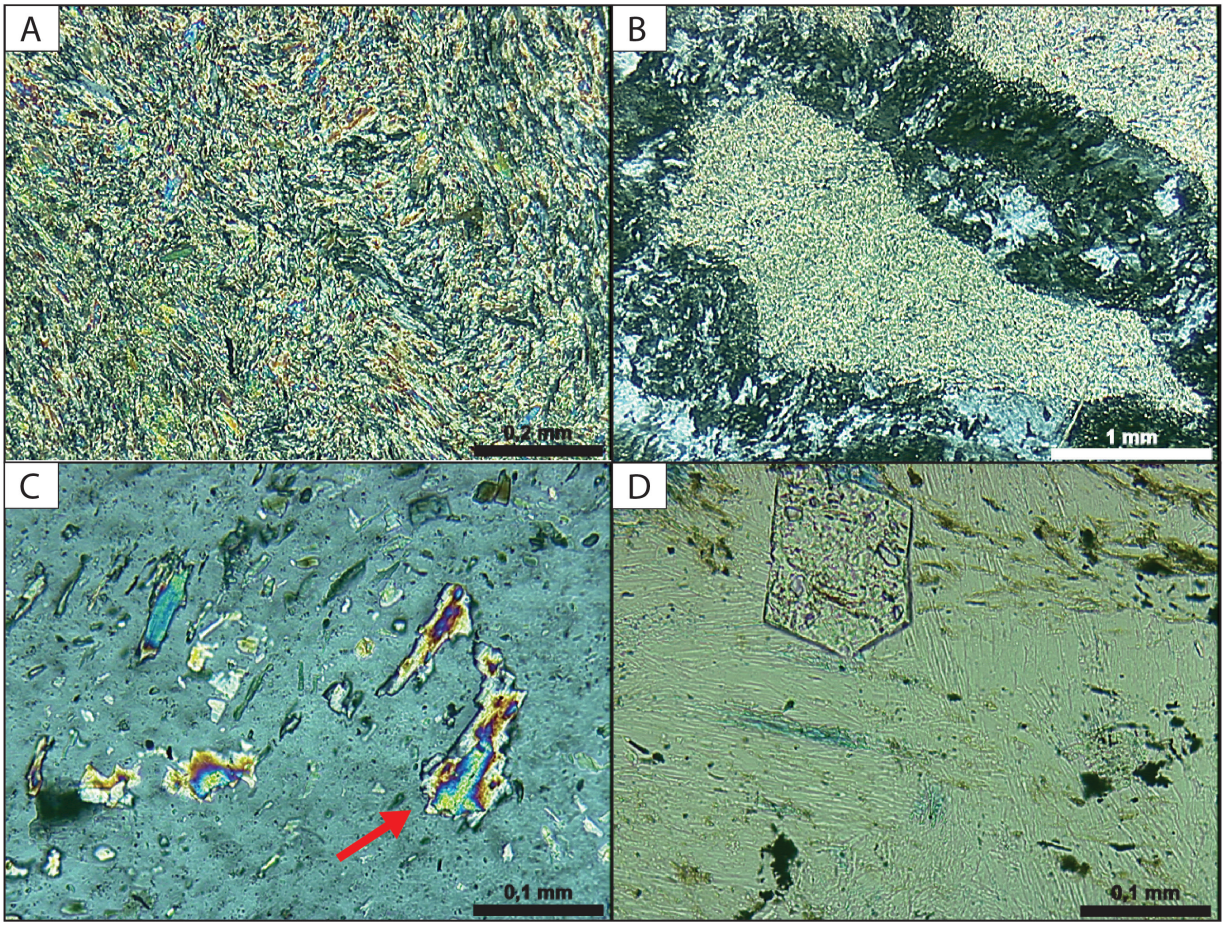

Figura 8. Principais hábitos da anidrita e da celestita. A) Anidrita fibrosa, lâmina 7-f (polarizadores cruzados, XP); B) Anidrita fibrosa 7-d (XP); C) Resquícios de anidrita prismática (corroída) (seta vermelha), lâmina 5-b (XP); D) Celestita euédrica (alto relevo em relação a gipsita), lâmina PS-11-74,1 (polarizadores descruzados, //P).
Figure 8. Main habits of anhydrite and celestite. A) Fibrous anhydrite, thin section 7-f (crossed polarizers, XP); B) Fibrous anhydrite, thin section 7-d (XP); C) Remnants of prismatic anhydrite (corroded) (red arrow), thin section 5-b (XP); D) Euhedral celestite (high relief with respect to gypsum), thin section PS-11-74.1 (uncrossed polarizers, //P).

Calcita esferulítica: Os esferulitos de calcita (média: ≤ 1%; máximo: 7%) possuem até 0,04 mm de diâmetro e substituem a calcita anédrica a subédrica (Fig. 9C).

Dolomita romboédrica: Os cristais são romboedros euédricos que variam de microcristalinos a até no máximo 0,075 mm (Fig. 9D; média: 5%; máximo: 56%), dispersos ou em aglomerados. Quando presente, substitui quase totalmente gipsita de qualquer hábito e localmente, matriz argilosa e micrítica.

3.2.2.3 Matriz

A matriz presente nos interstícios dos cristais de sulfatos pode ser argilosa ou micrítica. A matriz micrítica está presente em apenas duas lâminas.

Matriz argilosa**:** A matriz argilosa (média: 3%; máximo: 13%) é composta por argilominerais do grupo das esmectitas (identificados no MEV) e raros grãos de quartzo e micas de tamanho silte. A matriz ocorre como restos no entorno dos cristais de gipsita, deslocados pela precipitação de sulfato na geração das texturas nodular/mosaico ou também entre as laminações (Fig. 10A). A matriz pode estar parcialmente alterada para óxidos ou substituída, parcial- ou totalmente, por dolomita, pirita microcristalina, pirita framboidal ou jarosita.

Matriz micrítica: A matriz micrítica (média: ≤ 1%; máximo: 4%) ocorre no entorno dos cristais deslocantes de gipsita nas texturas nodular/mosaico (Fig. 10B). Encontra-se parcialmente substituída por dolomita romboédrica.

3.2.2.4 Bioclastos

Os bioclastos são raros e correspondem a dois tipos: fosfáticos e ostracodes. Aparecem em apenas uma lâmina cada e em quantidade menor que 1%.

Bioclastos fosfáticos: Os bioclastos fosfáticos possuem de 0,27 mm a 0,42 mm e correspondem a

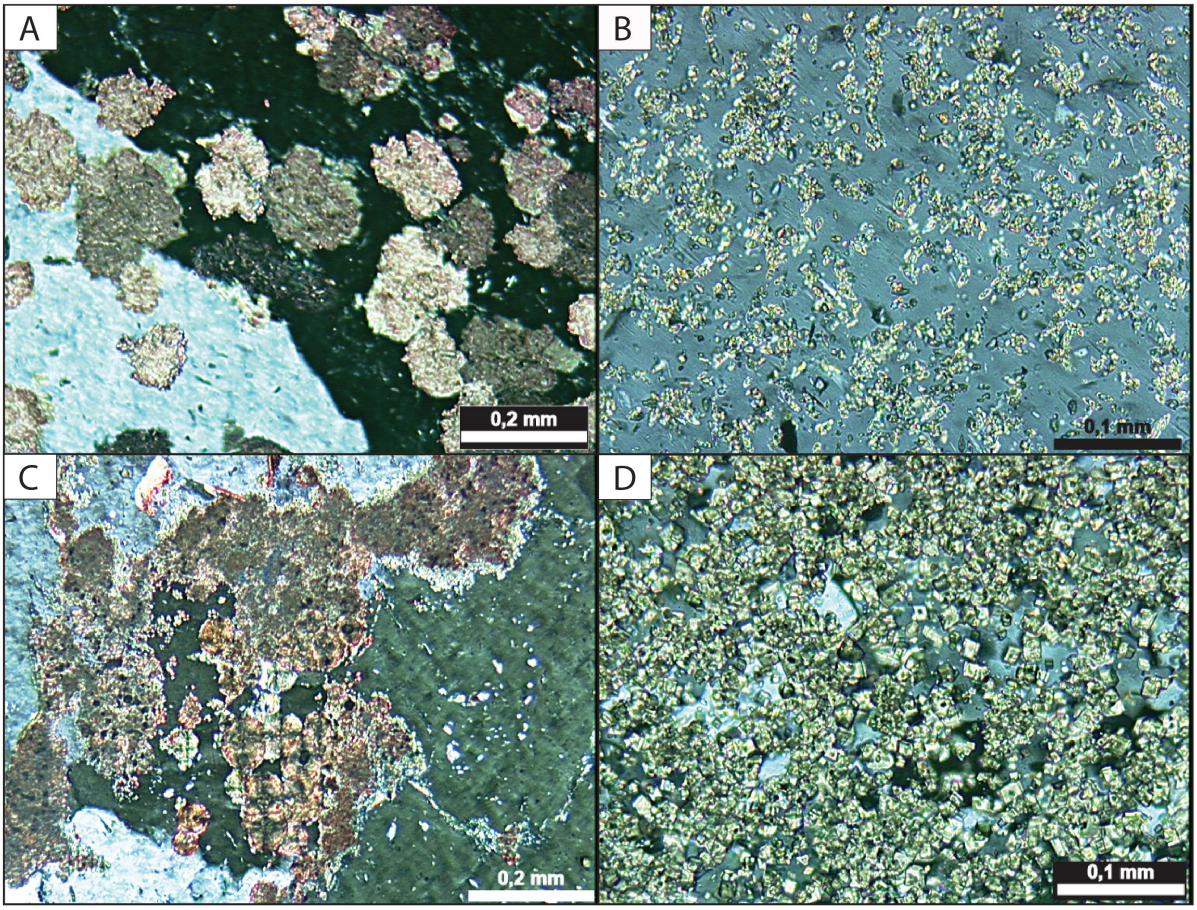

Figura 9. Principais hábitos dos carbonatos. A) Calcita anédrica substituindo gipsita, lâmina 2-b (polarizadores cruzados, XP); B) Calcita lenticular substituindo gipsita, lâmina 16-a (XP); C) Esferulito de calcita substituindo calcita microcristalina, lâmina 16-f (XP); D) Dolomita romboédrica substituindo gipsita, lâmina 16-d (XP).
Figure 9. Main habits of carbonates. A) Anhedral calcite replacing gypsum, thin section 2-b (crossed polarizer, XP); B) Lenticular calcite replacing gypsum, thin section 16-a (XP); C) Calcite spherulite replacing microcrystalline calcite, thin section 16 f (XP); D) Rhombohedral dolomite replacing gypsum, thin section 16-d (XP).

escamas de peixe (Fig. 10C). Estes bioclastos ocorrem associados à matriz argilosa e estão engolfados por gipsita mosaico médio.

Bioclastos de ostracodes: Os bioclastos de ostracodes possuem no máximo 0,2 mm e encontram-se intensamente quebrados e desarticulados (Fig. 10D). São encontrados associados à calcita esferulítica.

3.2.2.5 Outros constituintes minoritários

Os constituintes minoritários compreendem calcedônia, jarosita e pirita. Estes minerais diagenéticos têm ocorrências restritas (média ≤ 1%), sempre substituindo os demais constituintes e aparecem em apenas uma lâmina cada.

Calcedônia: A calcedônia (máximo: 1%) forma esferulitos esparsos com até 0,77 mm de diâmetro (Fig. 11A). Este constituinte substitui a gipsita e é substituído por calcita anédrica.

Jarosita: A jarosita (máximo: 2%) ocorre como cristais finos e anédricos, substituindo parcialmente gipsita e matriz argilosa (Fig. 11B).

Pirita: A pirita (máximo: ≤ 1 %) possui hábitos microcristalino, localmente oxidado (Fig. 11C), e framboidal (Fig. 11D). As duas formas estão sempre substituindo a matriz argilosa.

3.2.3 Análise isotópica

Os resultados da análise isotópica dos sulfatos indicaram valores positivos variáveis entre 10,27‰ e 17,99‰ para $\delta^{34}S$, e entre 7,72‰ e 13,30‰ para $\delta^{18}O$.

O gráfico que relaciona os valores de $\delta^{34}S$ e $\delta^{18}O$ nas diferentes fácies e nos veios (Fig. 12) demonstra que a assinatura isotópica do S e O não é controlada pela fácies. Duas das amostras de veios apresentam os valores mais baixos de $\delta^{34}S$. É possível identificar duas populações, uma delas com valores de $\delta^{18}O$ mais baixos (e de $\delta^{34}S$ levemente mais baixos) do que a outra, porém não há uma relação entre estas e qualquer das fácies específicas.

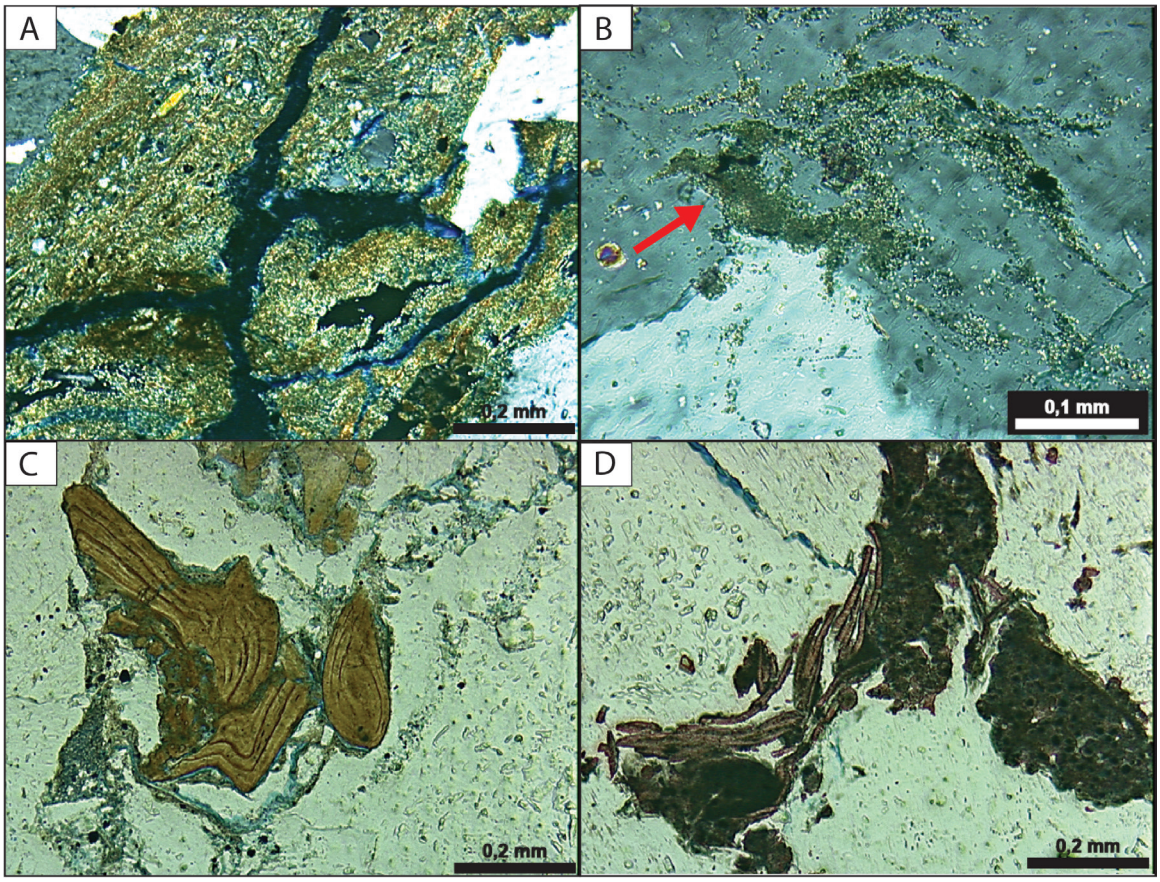

Figura 10. Principais feições da matriz e dos bioclastos. A) Matriz argilosa esmectítica, com raros grãos de quartzo e mica de tamanho silte, lâmina 5-b (polarizadores cruzados, XP); B) Matriz micrítica (seta vermelha), lâmina 3-a (XP); C) Fragmentos de escamas de peixe, lâmina 7-d (polarizadores descruzados, //P); D) Bioclastos de ostracodes, lâmina 16-f (//P).

Figure 10. Main features of matrix and bioclasts. A) Smectite clay matrix, with rare silt-sized quartz and mica grains, thin section 5-b (crossed polarizer, XP); B) Micritic matrix (red arrow), thin section 3-a (XP); C) Fragments of fish scales, thin section 7-d (uncrossed polarizer, //P); D) Ostracod bioclasts, thin section 16-f (//P).

4 Discussão dos resultados

4.1 Paragênese mineral

Com base nas principais texturas e hábitos dos sulfatos de cálcio, é possível estabelecer uma ordem de precipitação e interpretar as condições vigentes durante a deposição em virtude da preservação de feições sindeposicionais. Os demais constituintes também fornecem informações acerca do ambiente deposicional.

Todos os sulfatos possuem origem eodiagenética, por não apresentar feição indicativa de mesodiagênese. Por isso, considera-se que a anidrita e a gipsita foram precipitadas em condições deposicionais e pós-deposicionais precoces.

Associando estruturas, texturas e a relação com os demais constituintes foi possível separar em quatro fases distintas a sequência de precipitação dos sulfatos. A figura 13 sumariza a sequência paragenética descrita a seguir, contendo os respectivos hábitos dos sulfatos e os processos de substituição entre eles. Na primeira fase foi precipitada a gipsita paliçada e *chevron* em lâminas, e a anidrita nodular, que representam condições de precipitação em locais diferentes, porém possivelmente no mesmo contexto deposicional. Em uma segunda fase houve a substituição por gipsita prismática e fibrosa, compondo a textura laminada, e gipsita mosaico grosso a médio, compondo a textura nodular. A celestita provavelmente formou-se no início da segunda fase, pois apresenta inclusões de anidrita e matriz argilosa, porém aparece também parcialmente substituída pela gipsita. Na terceira fase, a substituição foi por gipsita porfiroblástica, mosaico fino, alabastrina, feixes fibrosos e gipsita rabo de andorinha. O últimos processos incluem a formação da gipsita fibrosa que compõe os veios e da gipsita prismática-radiada que constitui as rosetas.

Durante a precipitação da fase primária, foi gerada a textura laminada, a qual é composta por lâminas de gipsita paliçada (*chevron*) e lâminas de gipsitas fibrosa e prismática, estas últimas já formadas em uma segunda fase de precipitação. Por não apresentar inclusões de outros sulfatos e não haver outras fases nestas lâminas, acredita-se que as gipsitas prismática e fibrosa substituíram algum outro hábito de gipsita logo após a deposição, representando uma fase secundária, porém ainda sobre influência da salmoura primária (Paz & Rossetti, 2006). A textura laminada e a sua mineralogia são comumente bem preservadas. A mineralogia é composta predominantemente de gipsita, como comprovado por DRX.

A outra textura primária é a nodular/mosaico, a qual é caracterizada por nódulos formados pela precipitação de cristais de anidrita ou gipsita dentro de poros preenchidos por salmouras, próximos à superfície. Atualmente estes nódulos primários, em sua maior parte, encontram-se parcialmente substituídos por gipsita mosaico médio e grosso, porfiroblástica e prismática-radiada, porém com resquícios corroídos da anidrita primária, mantendo a forma original dos nódulos e resíduos deslocados de matriz. A gipsita porfiroblástica representa a terceira fase de substituição da gipsita, no entanto é comum que este hábito preserve as texturas mais precoces (Warren, 2006). Quando a substituição dos nódulos é por gipsita alabastrina, mosaico fino ou rabo de andorinha, não há mais a presença dos resquícios da anidrita primária, caracterizando a terceira fase de precipitação.

O sedimento presente entre os nódulos é composto por matriz argilosa (esmectitas), raros grãos de quartzo e micas e até fragmentos de escama de peixe e ostracodes. Localizadamente esta matriz encontra-se substituída por esferulitos carbonáticos, dolomita, calcita e pirita. A matriz micrítica também compõe o sedimento intersticial e ocorre parcialmente substituída por calcita ou dolomita.

A gipsita das fases secundária e terciária pode ser substituída por calcita e dolomita. Além disto, localizadamente verifica-se a substituição por esferulitos de calcedônia e celestita. A ocorrência de esferulitos de calcedônia *length-slow* é rara, porém comumente substitui evaporitos (Tucker, 2001). A celestita ocorre associada à gipsita ou contendo resquícios de anidrita e argilominerais quando presentes na textura nodular. As inclusões de anidrita e argilominerais indicam uma origem pós-deposicional para celestita, enquanto as feições de corrosão sugerem origem anterior à substituição da anidrita por gipsita.

A quarta fase de deposição dos sulfatos inclui a formação de veios fibrosos e rosetas de gipsita prismática-radiada, posteriores a todas as fases anteriores. Independentemente da origem, estes veios aparecem recortando todos os constituintes, inclusive as rosetas. Esta última fase representa as situações mais tardias em relação ao momento da deposição (Tucker, 2001).

4.2 Isótopos estáveis de S e O

A interpretação dos dados obtidos tem como referência os valores de $\delta^{34}S$ das fácies Evaporito laminado e Evaporito fraturado, que preservam a mineralogia e feições texturais mais semelhan-

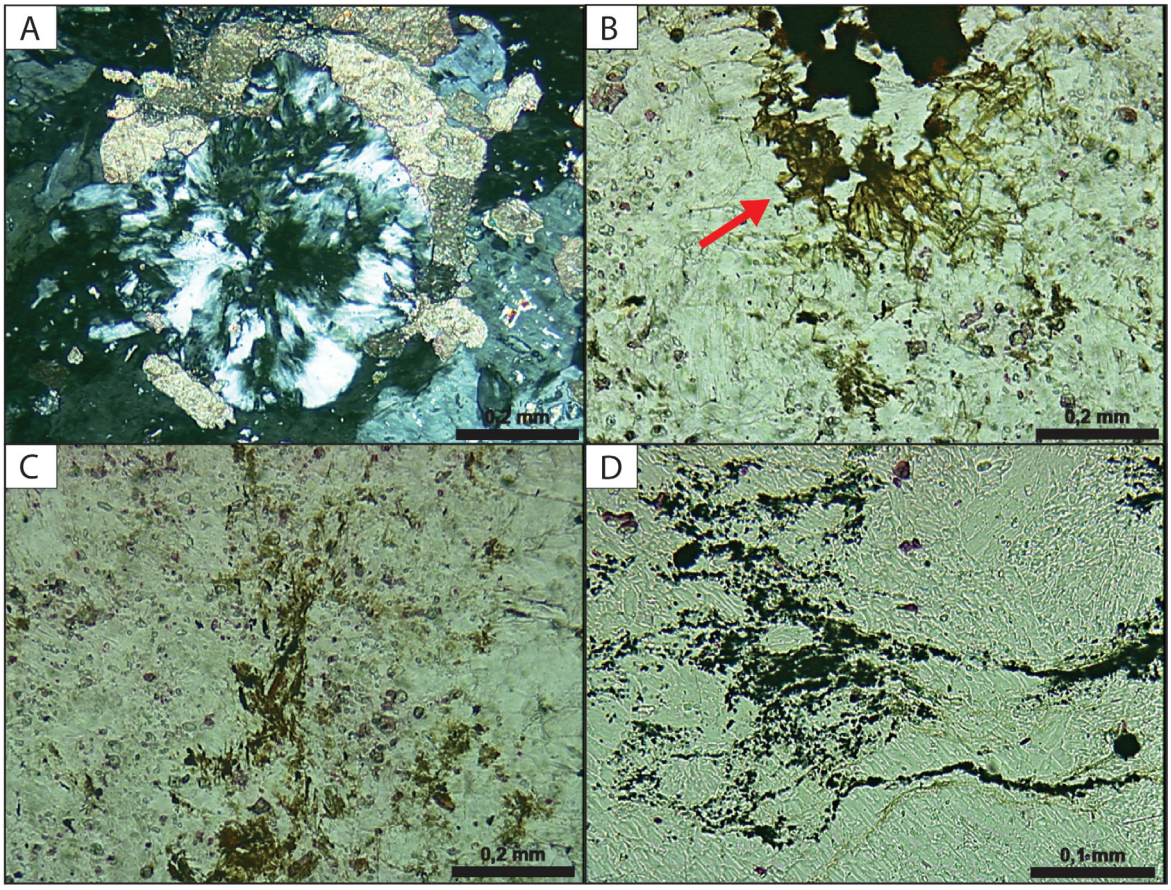

Figura 11. Principais feições dos constituintes minoritários. A) Esferulito de calcedônia substituindo gipsita e sendo substituído por calcita anédrica, lâmina PS-11-74,1 (polarizadores cruzados, XP); B) Jarosita (seta vermelha) substituindo gipsita, lâmina 5-a (polarizadores descruzados, //P); C) Pirita microcristalina oxidada para hematita, lâmina 5-a (//P); D) Pirita microcristalina e framboidal substituindo matriz argilosa, lâmina PS-11-73,1 (//P).

Figure 11. Main features of minor constituents. A) Chalcedony spherulite replacing gypsum, and being replaced by anhedral calcite, thin section PS-11-74.1 (crossed polarizer, XP); B) Jarosite (red arrow) replacing gypsum, thin section 5-a (uncrossed polarizers, //P); C) Microcrystalline pyrite oxidized to hematite, thin section 5-a (//P); D) Microcrystalline and framboidal pyrite replacing clay matrix, thin section PS-11-73.1 (//P).

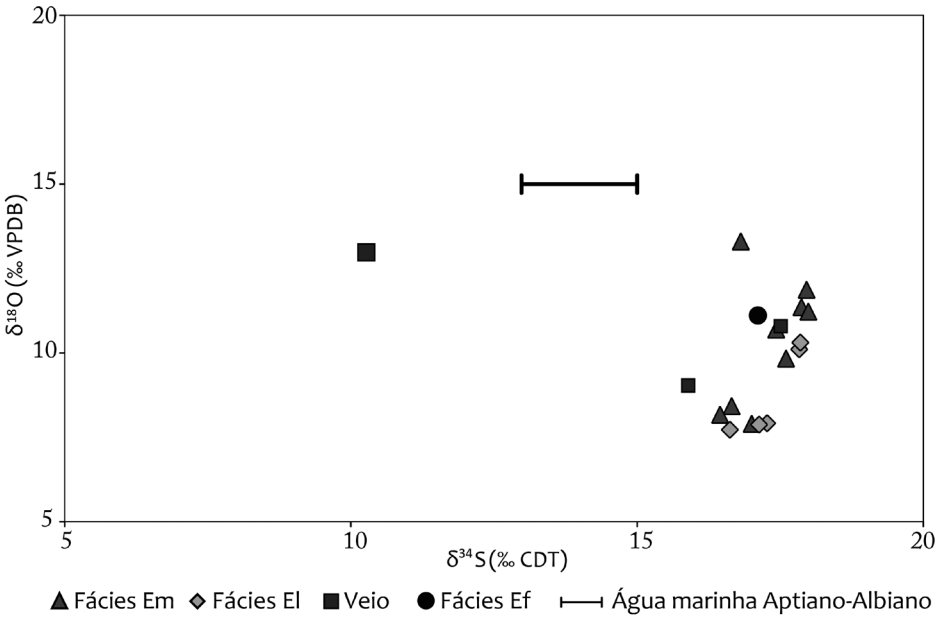

Figura 12. Valores de $\delta^{34}S$ (‰ CDT) versus $\delta^{18}O$ (‰ VPDB) para as diferentes fácies nos sulfatos: Evaporito maciço (Em), Evaporito laminado (El) e Evaporito fraturado (Ef), e veios de gipsita fibrosa.

Figure 12. $\delta^{34}S$ (‰ CDT) versus $\delta^{18}O$ (‰ VPDB) values for the different sulfate facies: Massive evaporite (Em), Laminated evaporite (El) and Fractured evaporite (Ef), and fibrous gypsum veins.

tes àquelas geradas nas condições deposicionais (Warren, 2006). Apesar dos sulfatos terem se formados em fases distintas, verifica-se que os valores isotópicos de todas as fácies, inclusive dos veios, são bastante próximos entre si, indicando que a assinatura isotópica da salmoura precipitante dos sulfatos foi originalmente mantida durante a diagênese (Worden *et al.,* 1997).

Com base nos valores de $\delta^{34}S$ obtidos, que variam entre +10,27‰ e +17,99‰, pode-se afirmar que são levemente mais altos, porém muito próximos aos valores registrados por Claypool *et al*. (1980) para as águas marinhas do intervalo Aptiano-Albiano (+13‰ a +15‰). Este aumento do $\delta^{34}S$ pode ser justificado pela redução do sulfato e remoção preferencial do ^{32}S através da atividade de bactérias na produção de sulfetos, elevando a concentração do ^{34}S na salmoura (Sharp, 2007).

Em relação ao $\delta^{18}O$, os valores obtidos entre +7,72‰ e +13,30‰ não podem ser diretamente comparados aos de Claypool *et al.* (1980) porque os padrões utilizados na análise isotópica foram diferentes (VPDB *vs*. SMOW). Entretanto, a assinatura isotópica de oxigênio fortemente positiva é indicativa de precipitação a partir de salmouras com alta evaporação, salinidade e temperatura (Sharp, 2007).

Apesar dos valores isotópicos de O serem altamente positivos, a ocorrência de folhelhos contendo conchostráceos entre as camadas de evaporitos do Membro Ipubi (Fig. 14) indica a esporádica presença de água doce no ambiente evaporítico. É improvável, entretanto, que a salmoura geradora dos sulfatos tenha origem exclusivamente continental, pelo fato de que a água doce apresenta baixos valores para $\delta^{34}S$ (-5‰ a +5‰) e $\delta^{18}O$ (-10‰ a +5‰) em relação à água marinha (Lu & Meyers, 2003).

4.3 Modelo deposicional

A partir da caracterização faciológica, mineralógica, textural e isotópica dos sulfatos, são interpretadas as condições atuantes no sistema evaporítico, resultando na proposição de um modelo deposicional e discussão de suas implicações.

As feições texturais e mineralógicas dos evaporitos do Membro Ipubi indicam que estes não sofreram modificações mesodiagenéticas. Silva (1988) afirma que os evaporitos foram soterrados a profundidades entre 350-380 m, corroborando a hipótese de não haver ocorrido mesodiagênese. Além disso, a gipsita se manteve dentro do seu campo de estabilidade, pois segundo Murray (1964) a conversão gipsita-anidrita normalmente ocorre em profundidades superiores a 600 m. Assim, a anidrita encontrada é originalmente deposicional.

A textura laminada preserva a gipsita paliçada e *chevron*, comuns em evaporitos subaquosos com crescimento alinhado. O crescimento alinhado destes minerais indica um ambiente subaquoso raso perene (< 10 m de profundidade) supersaturado em sulfato de cálcio (Warren, 2006). Resquícios de matriz argilosa preservados entre as laminações são feições comumente características de salinas. Nestas, o sulfato mais comum é a gipsita; os cristais crescem no substrato com alinhamento perpendicular à laminação, predominando o sedimento evaporítico em relação ao carbonático e siliciclástico (Warren & Kendall, 1985).

Nos *sabkhas* a deposição evaporítica acontece principalmente em planícies, dentro da coluna de sedimento em uma zona de até 1 m de profundidade (Warren & Kendall, 1985). A precipitação de anidrita nodular ocorre pelo aumento da concentração do fluido nos poros entre os grãos (Tucker, 2001), feição comum em ambiente de supramaré em *sabkhas* costeiros (Warren, 2006). Nestes ambientes pode haver mistura de matriz argilosa e micrítica predominantes em relação à matriz evaporítica (Warren & Kendall, 1985).

Nos *sabkhas* a maior parte da água marinha formadora dos depósitos flui durante a maré alta ou em tempestades. A água marinha acumula e escoa para o entorno do lençol freático; a subsequente evaporação acima do lençol freático forma anidrita nodular. Ou seja, os depósitos evaporíticos nos *sabkhas* são formados por uma ligação direta, porém efêmera, com a água marinha (Warren & Kendall, 1985).

As salinas podem ser preenchidas ao nível do mar por evaporitos, e em seguida evoluir para *sabkhas*. Assim, *sabkhas* em sequências antigas podem estar associados com salinas, como identificado nos evaporitos do Membro Ipubi. Sob queda relativa do nível da salmoura, uma sucessão primária de gipsita subaquosa precipitada nas salinas pode ser recoberta por depósitos de *sabkha* (Warren & Kendall, 1985).

Em relação à salinidade da salmoura que precipitou os evaporitos do Membro Ipubi, pode-se concluir que a concentração variou entre 140‰ e 250‰ e é hipersalina em relação à água do mar (> 50‰) (Warren, 2006), pois somente gipsita e anidrita precipitaram. Os sulfatos presentes sugerem também, a temperatura de precipitação. O gráfico da figura 15 indica que a precipitação da gipsita é favorecida em baixas temperaturas e baixas salinidades, enquanto a anidrita é favorecida por tem-

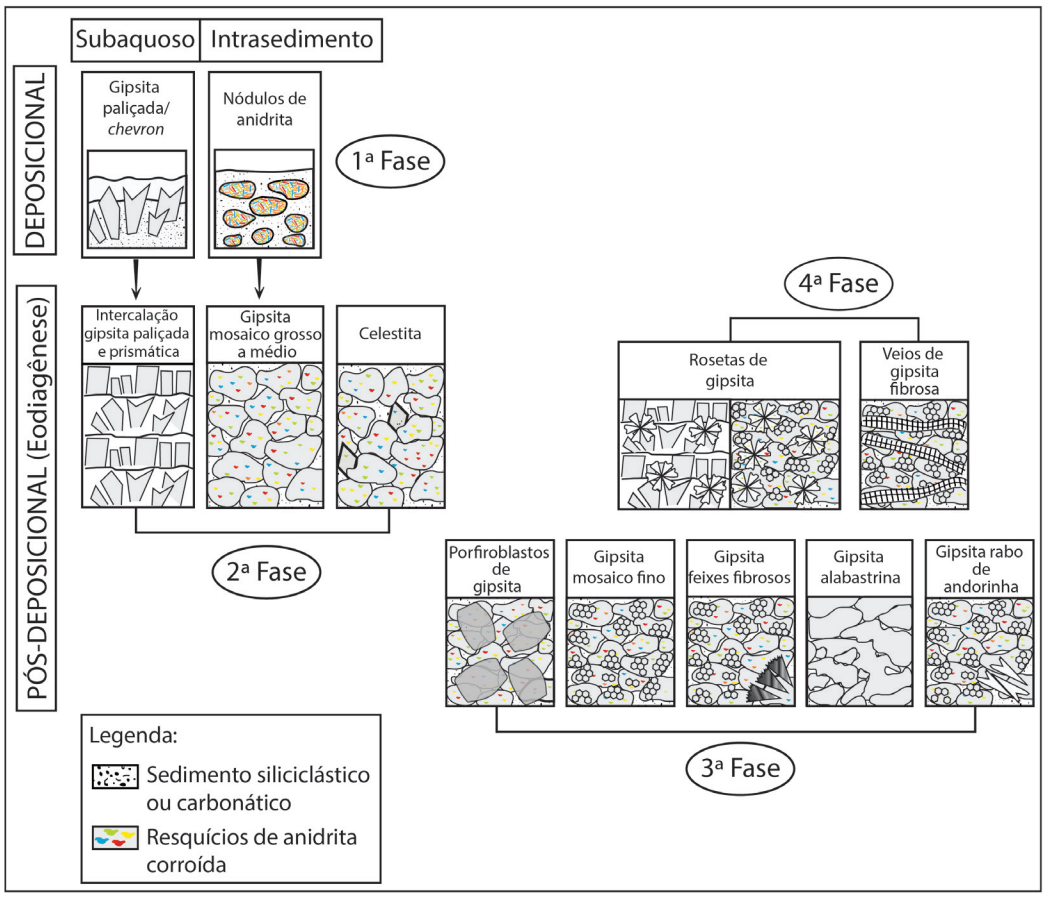

Figura 13. Sequência paragenética dos sulfatos (adaptado de Warren, 2006).
Figure 13. Paragenetic sequence of sulfates (adapted from Warren, 2006).

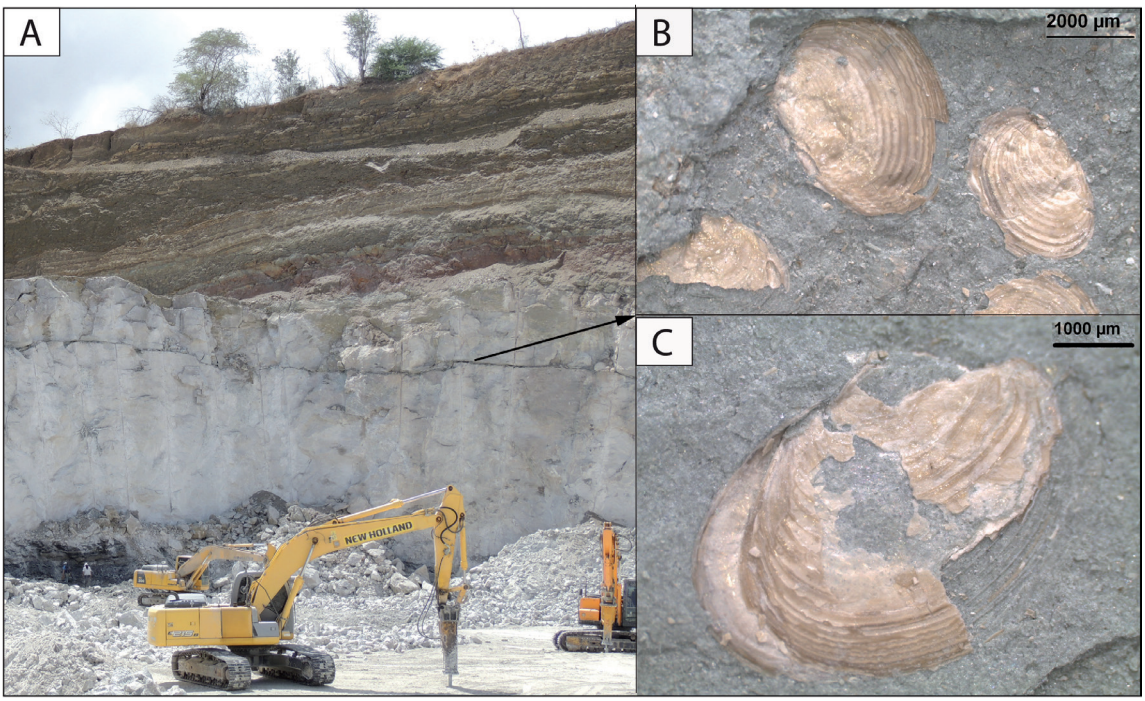

Figura 14. Camadas com conchostráceos nos evaporitos do Membro Ipubi. A) Folhelho verde com conchostráceos entre as camadas evaporíticas no afloramento 13; B) Conchostráceos; C) Detalhe dos conchostráceos, com as conchas e linhas de crescimento bem preservadas.
Figure 14. Layers with conchostracans in the Ipubi Member evaporites. A) Green shales with conchostracans separating evaporitic layers in the outcrop 13; B) Conchostracans; C) Detail of conchostracans, with pristine shells and growth lines.

peraturas e salinidades mais altas (Warren, 2006).

A ocorrência de camadas de folhelhos orgânicos, carbonatos e margas na base ou entre as camadas de evaporitos indica a recarga de água doce no ambiente evaporítico. Este contexto dulcícola inclusive propiciou o desenvolvimento de peixes e conchostráceos. Foram registrados restos de peixes, como esqueletos fósseis completos nas camadas de folhelhos orgânicos na base, além de escamas de peixes dentro das camadas evaporíticas. Conchostráceos foram encontrados em folhelhos entre as camadas evaporíticas (Fig. 14). Ostracodes também ocorrem em um nível bioclástico intercalado com os evaporitos. Segundo Coimbra *et al.* (2002), a assembleia de ostracodes da Formação Santana é abundante mas de baixa diversidade, estando associada a esporos, dinoflagelados, foraminíferos e micromoluscos típicos de ambientes mixo-halinos costeiros.

Com base nos dados isotópicos de S e O que evidenciam um contexto marinho com alta evaporação, na interpretação das feições texturais que indicam sulfatos laminados depositados em corpos d'água rasos e sulfatos nodulares precipitados nos poros intrasedimento e na associação com carbonatos micríticos, propõe-se que a sequência evaporítica do Membro Ipubi foi gerada em um ambiente de *sabkha* costeiro. Os evaporitos foram depositados em porções restritas de uma laguna carbonática, cuja localização da conexão marinha ainda é indefinida.

Analisando a distribuição espacial dos evaporitos do Membro Ipubi (na porção sul-sudoeste da bacia) e dos carbonatos do Membro Crato (na porção norte-nordeste), propõe-se que a deposição destas unidades esteja associada a um *sabkha* costeiro, de modo que as camadas evaporíticas (carbonáticas e sulfáticas) representam uma variação lateral de fácies neste sistema. Raramente a camada de sulfatos está sobreposta aos carbonatos, mesmo em testemunhos de sondagem. No poço descrito, a camada de sulfatos apresenta-se fragmentada e com apenas 4 m. Além disso, como indicado no mapa geológico da Bacia do Araripe de Assine (2007) os sulfatos ocorrem predominantemente na porção sudoeste da bacia, onde praticamente não há registro dos carbonatos, limitados à parte norte-nordeste da bacia.

No modelo deposicional proposto (Fig. 16), os carbonatos seriam formados na porção mais diluída do corpo aquoso, ou seja, em regiões mais sujeitas à circulação frequente de água pela proximidade da ligação com o mar. Já os sulfatos representariam áreas mais restritas do corpo aquoso, seja por estarem em porções marginais (Fig. 16A) ou por variações na topografia da bacia, em locais de circulação restrita que favoreceriam a concentração da salmoura (Fig. 16B) (devido a uma barreira fisiográfica, por exemplo). A ausência de feições típicas de exposição subaérea nos carbonatos e sulfatos sugere que os evaporitos do Membro Ipubi não precipitaram em várias pequenas salinas isoladas, e sim em porções restritas dentro de uma extensa laguna carbonática com características deposicionais de salinas. A precipitação de carbonato em áreas de maior diluição, e de sulfatos em regiões de maior concentração de íons segue a ordem de precipitação de evaporitos a partir da água do mar.

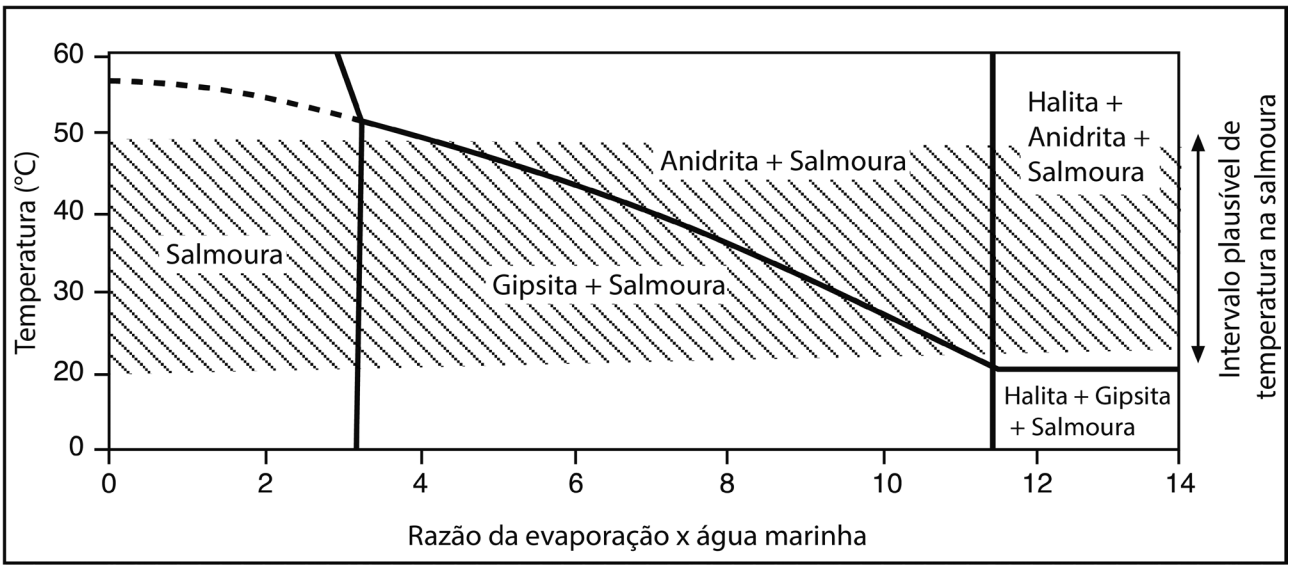

Figura 15. Relação entre salinidade versus temperatura para a precipitação de gipsita, anidrita e halita (modificado de Warren, 2006).

Figure 15. Relation between salinity and temperature for the precipitation of gypsum, anhydrite and halite (modified from Warren, 2006).

Portanto, sugere-se que os evaporitos do Membro Ipubi estão relacionados aos carbonatos do Membro Crato, representando uma variação lateral de fácies entre as duas unidades. Desse modo, os sulfatos não necessariamente representariam um ressecamento do corpo d'água que depositava os carbonatos, mas sim uma área lateral a ele, onde a salinidade era maior. Nesse caso, não somente estas duas unidades estão relacionadas, como fazem parte do mesmo sistema deposicional. A presença de depósitos de paleossolos e feições de superfícies kársticas no topo da camada de sulfatos em algumas áreas representam um provável hiato já descrito por Silva (1988), o que indica que a sucessão do Membro Romualdo pode não possuir uma relação genética com os depósitos evaporíticos, tendo sido depositada posteriormente aos sulfatos.

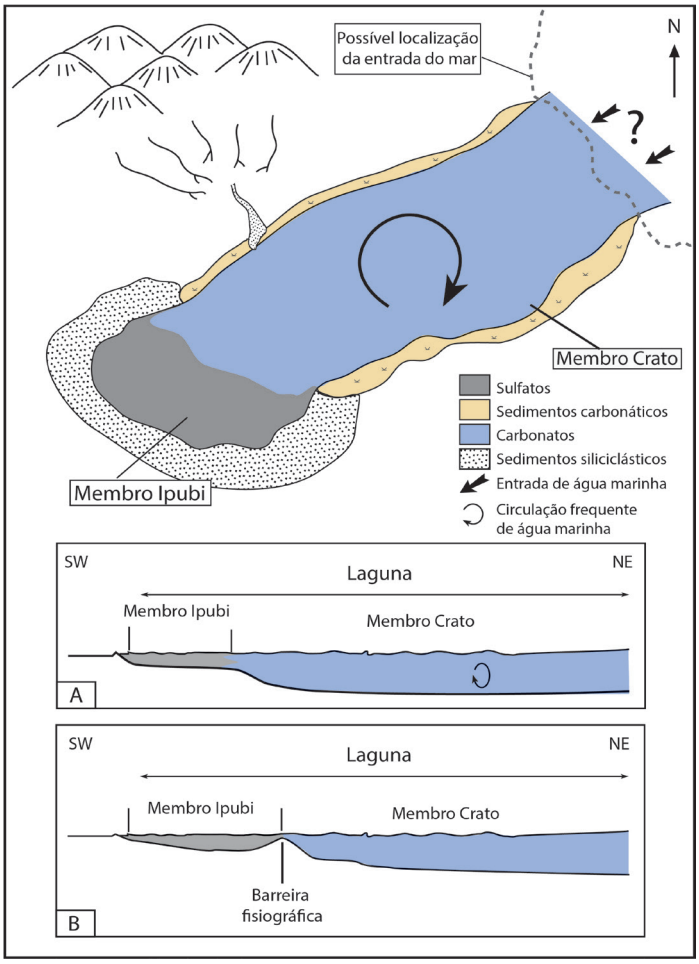

Figura 16. Esquema do modelo deposicional proposto para o Membro Ipubi. A precipitação dos sulfatos ocorre em porções restritas de uma extensa laguna carbonática em um *sabkha* costeiro. A laguna recebe influência marinha, cuja possível localização é demarcada pela linha pontilhada. A precipitação dos evaporitos pode estar relacionada a: A) concentração em porções mais rasas, nas imediações da margem da laguna; B) circulação restrita causada por uma barreira fisiográfica, por exemplo, que favoreceria a concentração da salmoura.

Figure 16. Schematic depositional model proposed for the Ipubi Member. Precipitation of sulfates occurs in restricted portions of an extensive carbonate lagoon in a coastal sabkha. The lagoon is submitted to marine influence; possible location of marine connection is indicated by the dotted line. The precipitation of evaporites may be related to: A) high concentration in shallower portions along the lagoon margins; B) restricted circulation caused by, for example, a physiographic barrier, favoring brine concentration.

5 Conclusões

As texturas e hábitos dos sulfatos estão relacionados a quatro fases de precipitação. A primeira fase, deposicional, e as outras três pós-deposicionais eodiagenéticas. Não há registro de nenhuma feição indicativa de mesodiagênese nas lâminas descritas.

A preservação de texturas primárias indica precipitação em dois contextos principais. A textura laminada, em parte constituída de cristais de gipsita paliçada/*chevron*, aponta um contexto subaquoso raso, comum em salinas. A textura nodular/mosaico, composta por nódulos de anidrita parcialmente substituídos por gipsita mosaico, sugere a precipitação intrasedimento em um contexto de *sabkha*.

Com base na presença gipsita e anidrita, sugere-se que a concentração da salmoura que precipitou os sulfatos variou de 140 a 250‰ e as tempe-

raturas superficiais variaram de 20-50 °C (Warren, 2006).

A assinatura isotópica positiva do $\delta^{34}S$ entre +10,27‰ e +17,99‰ indica origem marinha para salmoura geradora dos depósitos evaporíticos (Claypool *et al*., 1980). E a assinatura isotópica positiva do $\delta^{18}O$ entre +7,72‰ e +13,30‰ indica precipitação a partir de salmouras com alta evaporação, salinidade e temperatura (Sharp, 2007).

Através da integração dos dados sedimentológicos, petrográficos e isotópicos sugere-se que os evaporitos do Membro Ipubi foram precipitados em um único corpo d'água, por não serem identificadas feições de borda de bacia, em afloramento ou em lâmina petrográfica. Este corpo d'água estaria situado em uma região costeira com altas taxas de evaporação, como indicado pelas assinaturas isotópicas do $\delta^{34}S$ e $\delta^{18}O$. Com base na distribuição espacial dos depósitos evaporíticos do Membro Ipubi e carbonáticos do Membro Crato e na relação dos precipitados sulfatados e carbonáticos em sucessões evaporíticas já descritas, sugere-se que estas duas unidades tenham sido depositadas contemporaneamente dentro de um mesmo corpo d´água, provavelmente em uma laguna, em porções distintas de um *sabkha* costeiro.

Com base nas proposições acima, o Membro Ipubi pode constituir uma variação lateral do Membro Crato. Os carbonatos se depositariam em condições mais diluídas, enquanto os sulfatos estariam restritos à porção mais concentrada da laguna. Esta restrição pode estar relacionada a variações na topografia de fundo da laguna e/ou localização em relação à comunicação com o mar.

Agradecimentos Os autores gostariam de agradecer à Chevron do Brasil Ltda. pelo financiamento do projeto de pesquisa, através da Agência Nacional do Petróleo Brasileiro – ANP – compromisso com a pesquisa e o desenvolvimento, e pela permissão para publicar este trabalho. Agradecimentos especiais a toda equipe do projeto "Caracterização paleoclimática da sucessão Aptiana-Albiana na Bacia do Araripe, nordeste do Brasil". Este trabalho é parte do Trabalho de Conclusão de Curso de graduação da primeira autora desenvolvido no Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Referências

Assine, M.L. 1992. Análise estratigráfica da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências,* 22(3): 289-300.

Assine, M.L. 2007. Bacia do Araripe. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, 15(2): 371-389.

Beurlen, K. 1962. A geologia da Chapada do Araripe. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 34(3): 365-370.

Beurlen, K. 1963. Geologia e estratigrafia da Chapada do Araripe. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 17., 1963, Recife. *Anais...* Recife, SBG, (supl.), p. 1-47.

Beurlen, K. 1971. As condições ecológicas e faciológicas da Formação Santana na Chapada do Araripe (Nordeste do Brasil). *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 43(supl.): 411-415.

Braun, O.P.G. 1966. Estratigrafia dos sedimentos da parte interior da Região Nordeste do Brasil (Bacias de Tucano-Jatobá, Mirandiba e Araripe). *Boletim do Departamento Nacional da Produção Mineral, Divisão de Geologia e Mineralogia,* 236: 1-15.

Carvalho, I. de S., Freitas, F.I. de & Neumann, V. 2012. Chapada do Araripe. *In*: Hasui, Y., Carneiro, C.D.R., Almeida, F.F.M. de & Bartorelli, A. (Org.). *Geologia do Brasil.* São Paulo, Beca, p. 510-513.

Claypool, G.E., Holser, W.T., Kaplan, I.R., Sakai, H. & Zak, I. 1980. The age curves of sulfur and oxygen isotopes in marine sulfate and their mutual interpretation. *Chemical Geology*, 28: 199-260.

Coimbra, J.C, Arai, M. & Carreño, A. L. 2002. Biostratigraphy of Lower Cretaceous microfossils from the Araripe basin, northeastern Brazil. *Geobios*, 35(6): 687-698.

CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/ Serviço Geológico do Brasil. 2004. Banco de Dados GeoSGB. Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, escala 1:1.000.000. Disponível em <http://geosgb.cprm.gov.br/> Acesso em: 17 fev. 2016.

De Ros, L.F., Goldberg, K., Abel, M., Victoreti, F., Mastella, M. & Castro, E. 2007. Advanced Acquisition and Management of Petrographic from Reservoir Rocks using PETROLEDGE® System. *In*: AAPG ANNUAL CONVENTION AND EXHIBITION, 2007, Long Beach. *Expanded Abstracts*, p. 1-4.

Lima, M.R. 1979. Considerações sobre a subdivisão estratigráfica da Formação Santana, Cretáceo do nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geologia*, 9(2): 116-121.

Lu, F.H. & Meyers, W.J. 2003. Sr, S, and O_{SO4} isotopes and the depositional environments of the Upper Miocene evaporites, Spain. *Journal of Sedimentary Research*, 73(3): 444-450.

Moraes, J.F.S., Santos, J.S. & Mascarenhas, J.C. 1976. *Projeto Santana. Relatório Final da Etapa I*. Recife, DNPM/CPRM, v. I, 269p.

Murray, R.C. 1964. Origin and diagenesis of gypsum and anhydrite. *Journal of Sedimentary Research*, 34(3): 512-523.

Oliveira, A.A. de, Brito A. de L.F., Santos, M.E.C.M. & Carvalho, M.S.S. 1979. *Projeto Chapada do Araripe Relatório Final*. Recife, DNPM/CPRM, v. I, 246p.

Paz, J.D. & Rossetti, D.F. 2006. Petrography of gypsum-bearing facies of the Codó Formation (Late Aptian), Northern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 78(3): 557-572.

Petri, S., Coimbra, A.M., Amaral, G., Ojeda, H.O., Fúlfaro, V.J. & Ponçano, W.L. 1986. Código brasileiro de nomenclatura estratigráfica. *Revista Brasileira de Geo-*

ciências, 16(4): 376-415.

Sharp, Z. 2007. *Principles of stable isotope geochemistry*. Upper Saddle River, Pearson Education, 344p.

Silva, M.A.M. 1988. Evaporitos do cretáceo da Bacia do Araripe: ambientes de deposição e história diagenética. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, 2(1): 53-63.

Small, H.L. 1913. *Geologia e suprimento de água subterrânea no Ceará e parte do Piauí*. Rio de Janeiro, Inspetoria Federal de Obras contra as Secas, série 7D, Publicação nº 25, 80p.

Tucker, M.E. 1988. *Techniques in Sedimentology*. Oxford, Blackwell Science Publishing, 391p.

Tucker, M.E. 2001. *Sedimentary Petrology–An Introduction to the Origin of Sedimentary Rocks*. Oxford, Blackwell Science, 262p.

Warren, J.K. 2006. *Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons*. Berlin, Springer-Verlag, 1035p.

Warren, J.K. & Kendall, C.G.S.C. 1985. Comparison of sequences formed in marine sabkha (subaerial) and salina (subaqueous) settings-modern and ancient. *AAPG Bulletin*, 69(6): 1013-1023.

Worden, R.H., Smalley, P.C. & Fallick, A.E. 1997. Sulfur cycle in buried evaporites. *Geology*, 25(7): 643-646.

Manuscrito 614
Editores: Maria Luiz C. Rosa & Paulo A. Souza