

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas *Campus* de Rio Claro

MICHELE ANDRIOLLI CUSTÓDIO

**ARQUITETURA ESTRATIGRÁFICA DA FORMAÇÃO ROMUALDO,  
PÓS-RIFTE DA BACIA DO ARARIPE, BRASIL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Mario Luis Assine  
Co-orientadora: Profa Dra Fernanda Quaglio

Rio Claro – SP  
2017

551.7 Custódio, Michele Andriolli  
C987a Arquitetura estratigráfica da Formação Romualdo,  
Pós-Rifte da Bacia do Araripe, Brasil / Michele Andriolli  
Custódio. - Rio Claro, 2017  
78 f. : il., figs., tabs., fots.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Orientador: Mario Luis Assine  
Coorientador: Fernanda Quaglio

1. Geologia estratigráfica. 2. Aptiano/Albiano. 3.  
Estratigrafia de sequências. 4. Ciclo transgressivo-regressivo.  
5. Sequência pós-sal. 6. Paleogeografia do Cretáceo. I. Título.

MICHELE ANDRIOLLI CUSTÓDIO

ARQUITETURA ESTRATIGRÁFICA DA FORMAÇÃO ROMUALDO,  
PÓS-RIFTE DA BACIA DO ARARIPE, BRASIL

Dissertação de Mestrado  
apresentada ao Instituto de  
Geociências e Ciências Exatas do  
Câmpus de Rio Claro, da  
Universidade Estadual Paulista  
“Júlio de Mesquita Filho”, como  
parte dos requisitos para obtenção  
do título de Mestre em  
Geociências e Meio Ambiente.

Comissão Examinadora

Profº Drº Mario Luis Assine

---

Profº Drº Roberto Salvador Francisco D’Avila

---

Profº Drº Paulo César Fonseca Giannini

---

Rio Claro, SP, 07 de abril de 2017

## RESUMO

Os eventos geológicos relacionados à abertura do Oceano Atlântico Sul influenciaram profundamente o registro sedimentar da Bacia do Araripe. A Formação Romualdo, unidade superior do Andar Alagoas (neo-Aptiano a eo-Albiano), registra a ingressão marinha no interior do Nordeste do Brasil. A arquitetura estratigráfica desta unidade é crucial para entender a paleogeografia do Gondwana e como o Proto-Oceano Atlântico alcançou o interior do Nordeste do Brasil durante o Cretáceo. A Formação Romualdo constitui um completo ciclo transgressivo-regressivo limitado por duas discordâncias regionais. Na parte leste da bacia, a sequência deposicional da Formação Romualdo compreende depósitos marinhos marginais do trato de sistemas de mar baixo sucedidos por depósitos marinhos rasos com a superfície de máxima inundação marcada poucos metros acima do intervalo, correspondendo ao limite superior do trato de sistemas transgressivo. Outro nível de registro da ingressão marinha corresponde a um intervalo superior com camadas de coquinas e calcários coquinoídes preservando fósseis de invertebrados, o qual integra o trato de sistemas de mar alto. Sucedendo a ingressão marinha, uma incompleta sucessão regressiva de fácies marinhas marginais registra o retorno de ambientes continentais na bacia. A arquitetura estratigráfica baseada na correlação de várias seções define geometria em forma de cunha com o mergulho deposicional para sul/sudeste, e diminuição de espessura em direção a noroeste, com áreas fontes localizadas a norte e nordeste da bacia. A geometria em forma de cunha e as medidas de dados de paleocorrentes indicam também *onlap* costeiro para NNW. Neste contexto a ingressão marinha teria alcançado a Bacia do Araripe a partir de SSE.

**Palavras-chave:** Aptiano/Albiano, estratigrafia de sequências, ciclo transgressivo-regressivo, sequência pós-sal, paleogeografia do Cretáceo.

## ABSTRACT

Geologic events related to the opening of the South Atlantic Ocean deeply influenced the sedimentary record of the Araripe Basin. The Romualdo Formation, superior unit of Alagoas Age (neo-Aptian to eo-Albian) record the marine incursion in the Brazil northeast interior. The stratigraphic architecture of those units are crucial to understand the paleogeography of Gondwana as well as how the proto-Atlantic Ocean waters reached interior NE Brazil during the early Cretaceous. The Romualdo Formation constitute a facies-cycle wedge constrained by two regional unconformities. In the eastern portion of the basin, the Romualdo depositional sequence comprises marginal-marine deposits of lowstand systems tract, followed by a shallow marine dominated transgressive facies succession, with marine flooding surface marked few meters above of interval, corresponding to upper boundary of transgressive system tract. Another record level of marine ingression corresponds to upper interval with shell beds, preserving invertebrates fossils, which integrate the highstand system tract. Following the marine ingression, an incomplete regressive succession of marginal-marine facies records the return of continental environments to the basin. The stratigraphic framework based on the correlation of several sections defines a facies cycle wedge with depositional dip towards southeast, decreasing in thickness towards northwest, and with source areas located at the northern side of the basin. The facies-cycle wedge geometry altogether with paleocurrent data indicates a coastal onlap towards NNW. In such a context the marine ingression would have reached the western portion of the Araripe Basin from the SSE.

*Keywords:* Aptian/Albian, sequence stratigraphy, facies-cycle wedge, post-salt sequence, Cretaceous paleogeography.

## AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de mestrado durante todo o desenvolvimento de projeto.

Ao Programa de Geociências e Meio Ambiente do Instituto de Geociências e Ciências Exatas – IGCE, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, pelo apoio acadêmico, indispensável à realização desta dissertação de mestrado.

À Petrobras pelo apoio financeiro à pesquisa, no âmbito dos projetos “Análise Estratigráfica do Andar Alagoas nas Bacias do Araripe, Tucano/Jatobá, Parnaíba e Sanfranciscana” (0050.0023165.06.4; SAP-46.00321584) e “Relações entre Tectônica e Sedimentação em Bacias do Interior do Nordeste do Brasil” (Sigitec 2014/00519-9), realizados por meio de termos de cooperação Unesp/Fundunesp.

Ao Departamento de Petrologia e Metalogenia (DPM) da Universidade Estadual Paulista e ao professor responsável pelo Laboratório de Microscopia II, Prof. Dr. Guillermo Rafael Beltran Navarro, por possibilitar o uso dos microscópios para descrição das lâminas petrográficas.

Ao orientador Prof. Dr. Mario Luis Assine e co-orientadora Profa. Dra. Fernanda Quaglio, pelo apoio em trabalhos de campo, discussões e interpretações acerca do trabalho desenvolvido. Além do apoio acadêmico, todo o companheirismo ao longo destes dois anos.

Externo também meus agradecimentos aos doutores Prof. Lucas Warren, Prof. Marcello Guimarães Simões, Prof. Franz Theodor Fürsich e Prof. José Alexandre de J. Perinotto pela discussão dos resultados e sugestões apresentadas; e à Dra. Suzana Aparecida Matos pela colaboração em trabalhos de campo.

Ao apoio obtido em campo pelos pesquisadores e professores do Cariri: Coordenador e pesquisador do Geopark Araripe Idalécio de Freitas, Prof. Dr. Álamo Feitosa e, ao chefe do escritório do DNPM de Crato-CE, José Artur F. G. de Andrade.

À minha família que esteve presente, me dando apoio e incentivo em todos os momentos, os quais são fundamentais e essenciais.

Ao grupo de amigos que estiveram presentes, seja de forma direta e/ou indireta: Renata Paes, Vanessa Coelho, Victor Cabral, Filipe G. Varejão, Eder Merino, Juliana Okubo, Patricia Mescolotti, Milena Rosa, Wagner Oliveira.

### **Epígrafe**

“Se você quiser construir um navio, não convoque homens para coletar madeira, dar ordens e dividir o trabalho. Antes, ensine-os a se apaixonar e desejar o eterno e distante mar”.

*Antoine Saint-Exupéry*

## ÍNDICE

<b>1 – INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2 - MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	3
2.1 Pesquisa bibliográfica .....	3
2.2 Trabalhos de campo .....	3
2.3 Análise de fácies sedimentares .....	3
2.4 Análise de paleocorrentes .....	4
2.5 Levantamento de seções colunares .....	5
2.6 Petrografia .....	5
2.7 Estratigrafia de sequências .....	6
<b>3 – CONTEXTUALIZAÇÃO GEOLÓGICA</b> .....	7
3.1 Bacia do Araripe .....	7
3.2 – Formação Romualdo .....	12
3.2.1 Litoestratigrafia .....	12
3.2.2 Ambientes de sedimentação .....	14
3.2.3 Idades .....	16
<b>4 – FÁCIES SEDIMENTARES</b> .....	20
4.1 Fácies siliciclásticas .....	20
4.2 Fácies e Microfácies carbonáticas .....	28
<b>5 – ASSOCIAÇÃO DE FÁCIES</b> .....	42
<b>6 – ESTRATIGRAFIA DE SEQUÊNCIAS</b> .....	45
6.1 Limite Inferior da Sequência .....	47
6.2 Limite Superior da Sequência .....	50
6.3 Superfície Transgressiva .....	50
6.4 Superfície de Inundação Máxima .....	50
6.5 Trato de Sistemas de Mar Baixo .....	51
6.6 Trato de Sistemas Transgressivo .....	53
6.7 Trato de Sistemas de Mar Alto .....	57
6.8 Representação tridimensional dos tratos de sistemas .....	63
<b>7 - PALEOGEOGRAFIA</b> .....	64
<b>8 – CONCLUSÕES</b> .....	70
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	72



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa das bacias interiores do Nordeste do Brasil-----	2
Figura 2 - Mapa geológico da Bacia do Araripe-----	8
Figura 3 - Carta estratigráfica da Bacia do Araripe -----	11
Figura 4 - Arenitos conglomeráticos com estratificação cruzada acanalada -----	21
Figura 5 - Arenitos com estratificação cruzada acanalada -----	22
Figura 6 - Seção colunar Sítio Romualdo -----	23
Figura 7 - Arenito com estratificação sigmoide -----	24
Figura 8 - Fácies heterolítica -----	26
Figura 9 - Finos compostos predominantemente por folhelhos e siltitos -----	27
Figura 10 - Seção colunar Serra do Mãozinha-----	28
Figura 11 - Ocorrência de coquinas e calcários coquinoide -----	30
Figura 12 - Camadas de calcário coquinoide -----	31
Figura 13 - Fácies mudstone laminado -----	32
Figura 14 - Seção colunar Caldeirão Grande-----	32
Figura 15 - Fácies wackestone bioclástico -----	33
Figura 16 - Seção colunar Serra do Inácio -----	35
Figura 17 - Packstone peloidal com estratificação cruzada hummocky -----	36
Figura 18 - Fácies packstone peloidal -----	36
Figura 19 - Fácies típicas de packstone peloidal laminado -----	38
Figura 20 - Fácies laminito crenulado brechado -----	39
Figura 21 - Fácies ostracodito -----	41
Figura 22 - Tratos de sistemas deposicionais, parte leste da bacia-----	45
Figura 23 - Tratos de sistemas deposicionais, parte oeste da bacia -----	46
Figura 24 - Arcabouço estratigráfico da Formação Romualdo e <i>onlap</i> costeiro-----	47
Figura 25 - Limite inferior da sequência-----	48
Figura 26 - Seções colunares Pedra Branca -----	49
Figura 27 - Associação de fácies do TSMB -----	52
Figura 28 - Seção colunar Araripina -----	54
Figura 29 - Associação de fácies do TST -----	55
Figura 30 - Associação de fácies da base do TSMA -----	58
Figura 31 - Seção colunar Sobradinho e poço 1-PS-12-----	59
Figura 32 - Parâmetros organoquímicos e palinológicos-----	60
Figura 33 - Associação de fácies do topo do TSMA -----	62
Figura 34 - Blocos diagramas dos tratos de sistemas deposicionais-----	63
Figura 35 - Quadro comparativo dos sentidos de ingressão na Bacia do Araripe -----	65
Figura 36 - Dados de paleocorrentes da Formação Romualdo, Bacia do Araripe -----	66
Figura 37 - Dados de paleocorrentes das Bacias Tucano, Jatobá e Araripe -----	67
Figura 38 - Cenário paleogeográfico do Nordeste do Brasil-----	69

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Revisão dos vários grupos fósseis encontrados na Formação Romualdo -----	19
---	----

## 1 – INTRODUÇÃO

A Bacia do Araripe está situada no interior do Nordeste do Brasil, localizada entre duas importantes zonas de cisalhamento pré-cambrianas (lineamentos de Patos e Pernambuco), as quais sofreram reativação durante o Mesozoico (Brito Neves *et al.*, 2000) (Figura 1). A formação da bacia e o preenchimento sedimentar (registro estratigráfico) estão intimamente relacionados aos eventos tectônicos cretáceos tardios que resultaram na ruptura do Gondwana e abertura do oceano do Atlântico Sul (Assine, 1992, 2007; Matos, 1992; Ponte & Ponte Filho, 1996). Uma das primeiras consequências da evolução do Atlântico Sul foi uma transgressão marinha em escala regional ocorrida no interior do Nordeste do Brasil. A transgressão está registrada nos estratos da Formação Romualdo do Andar Alagoas da Bacia do Araripe.

A Formação Romualdo possui um dos mais importantes *Konservat-Lagerstätten* do mundo (Mabesoone & Tinoco, 1973; Maisey, 1991; Martill, 1997; Kellner & Campos, 1999; Kellner, 2002; Fara *et al.*, 2005; Martill, 2007; Vila Nova *et al.*, 2011; Martill, 2011; Martill *et al.*, 2012), um impressionante registro da paleobiota que viveu e floresceu no Gondwana durante o Cretáceo (Martill, 2007). Devido à alta qualidade de preservação de vários grupos de fósseis, os estudos científicos têm sido focados principalmente na paleontologia sistemática. A cronoestratigrafia é baseada em biozonas definidas com base em palinórfos (Regali, 1974; Lima, 1978; Coimbra *et al.*, 2002; Rios-Netto *et al.*, 2012). Por outro lado, há muito menos contribuições estratigráficas e sedimentológicas, e aquelas relacionadas à análise de fácies e estratigrafia de sequências são escassas (Assine 1992; 2007; Assine *et al.*, 2014).

O principal debate sobre a ingressão marinha na Formação Romualdo diz respeito à paleogeografia durante o Aptiano, ou seja, o sentido da ingressão do mar no interior do Nordeste do Brasil. Existem argumentos paleogeográficos contrastantes na literatura, com propostas de que a ingressão marinha teve diferentes caminhos. Neste cenário, assumem-se diferentes conexões da Bacia do Araripe com bacias circundantes e o mar do Tethys (Beurlen, 1963; 1966; 1971a; Braun, 1966; Mabesoone & Tinoco, 1973; Arai 2014). As propostas foram baseadas principalmente em dados paleontológicos e, na maioria dos casos, negligenciaram a estratigrafia e a geometria dos depósitos em uma abordagem mais integrativa (Assine, 1994, 2007; Assine *et al.*, 2016). Para a reconstrução do cenário paleogeográfico do interior do Nordeste do Brasil, durante o período de deposição da Formação Romualdo, não se deve descartar dados geológicos sobre a arquitetura

estratigráfica. Neste contexto, a distribuição vertical e lateral das fácies, a geometria dos sistemas deposicionais e a sua proveniência sedimentar são elementos chave.

No presente estudo é apresentada a primeira análise estratigráfica detalhada da Formação Romualdo. A análise estratigráfica permitiu interpretar as mudanças faciais laterais e a geometria da sequência deposicional. Usando uma abordagem de estratigrafia de seqüências, superfícies-chave e associações de fácies da unidade são aqui apresentadas. Isso permitiu propor uma arquitetura estratigráfica baseada na correlação de seções medidas que inclui um ciclo de fácies composto de três tratos de sistemas deposicionais. Desse modo, os resultados aqui apresentados são relevantes para fundamentar cenários paleogeográficos do Cretáceo e a ingressão marinha no interior do Nordeste do Brasil, durante o Aptiano.

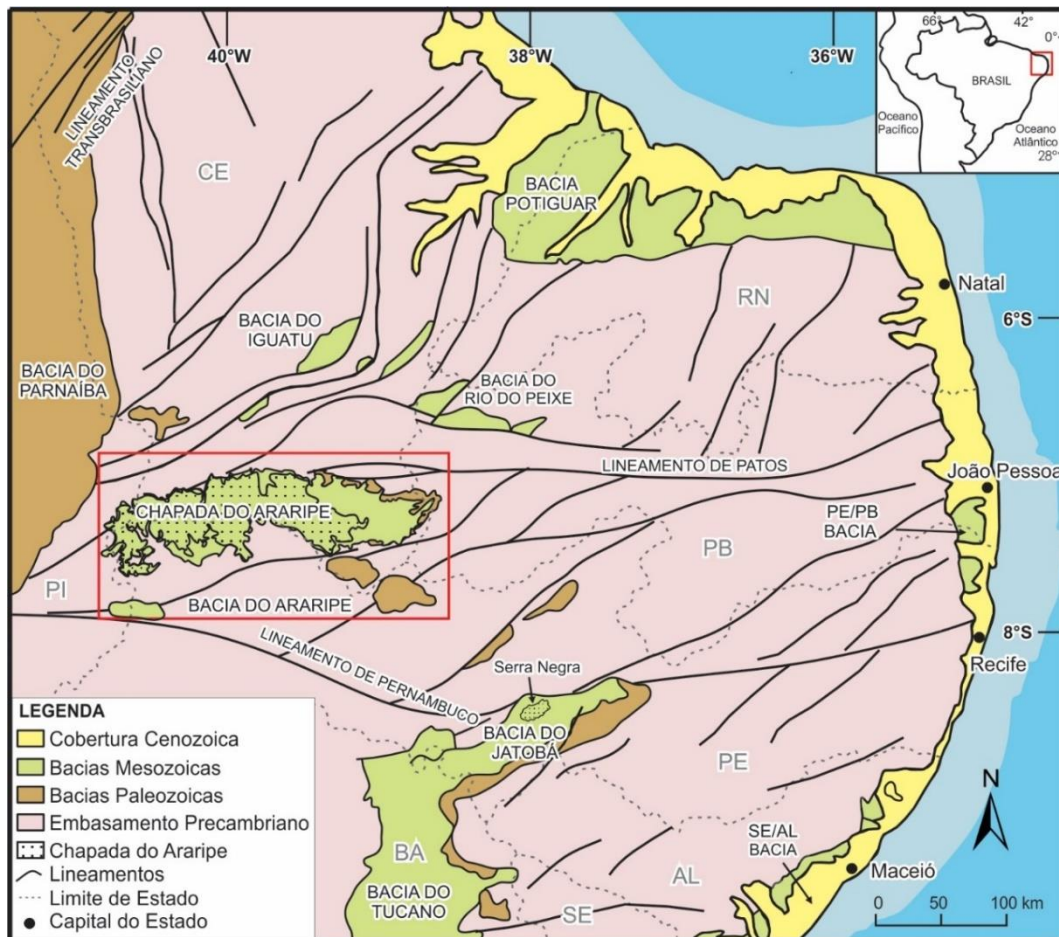


Figura 1 - Mapa das bacias interiores do Nordeste do Brasil, enfatizando a posição da Bacia do Araripe (modificado de Assine, 1990).

## **2 - MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 Pesquisa bibliográfica**

A pesquisa bibliográfica foi realizada compreendendo a revisão da literatura referente aos temas de interesse. Ênfase foi dada aos estudos dos aspectos sedimentares, paleontológicos e estratigráficos da Formação Romualdo e da Bacia do Araripe.

### **2.2 Trabalhos de campo**

Trabalhos de campo foram realizados durante o ano de 2015, subdividido em três etapas, respectivamente nos meses de abril, maio e outubro. Durante as etapas de campo foram feitas descrições sistemáticas dos afloramentos e levantamentos de seções colunares na escala de 1:100. As etapas de campo possibilitaram a coleta sistemática de amostras em afloramento e pedreiras, para a composição de coleção dos litotipos mais significativos. Tais amostras foram selecionadas para complementação dos métodos com análises petrográficas.

### **2.3 Análise de fácies sedimentares**

A análise de fácies sedimentares siliciclásticas seguiu a metodologia proposta por [Miall \(1999\)](#) e [Posamentier & Walker \(2006\)](#). A coleta dos dados de campo objetivou a descrição de parâmetros físicos, tais como composição mineralógica, granulação e textura das fácies sedimentares, estruturas deposicionais, maturidade textural e mineralógica.

Os parâmetros das fácies siliciclásticas foram descritos em afloramentos e seções colunares. Em função da existência de sedimentação mista na sucessão estudada foi realizada descrição separada dos litotipos siliciclásticos e carbonáticos. As fácies siliciclásticas foram descritas macroscopicamente, enquanto que as fácies carbonáticas foram descritas em escalas macroscópica e microscópica, conforme proposto por [Embry & Klován \(1971\)](#).

Para cada fácies analisada foram inferidos os processos formadores, tendo como principais parâmetros o tipo de transporte dos grãos e o fluxo sob o qual foram geradas as formas de leito. A associação de fácies, o reconhecimento e interpretação de elementos arquiteturais possibilitaram a determinação dos sistemas deposicionais.

Análise de fácies sedimentares é um método fundamental de caracterização de rocha com atributos litológicos, físicos e biológicos singulares e distintos das demais. Este método é

comumente aplicado para descrever rochas sedimentares ou sedimentos observados em afloramentos e testemunhos de sondagem (Catuneanu, 2006). Fácies sedimentar é caracterizada e distinguida das demais pela granulação, textura, estruturas sedimentares, geometria dos estratos e conteúdo fossilífero (Walker & James, 1992).

Para a caracterização litológica das fácies sedimentares foi utilizada nomenclatura baseada no código de fácies proposto por Miall (1978). A denominação adotada neste código utiliza letras e inclui duas partes: a primeira letra é escrita em maiúscula e corresponde ao litotipo. Letras minúsculas referem-se a estrutura e textura das fácies. Fácies não abordadas no trabalho de Miall (1978) foram adicionadas ao código no presente estudo.

## 2.4 Análise de paleocorrentes

O reconhecimento dos padrões de paleocorrentes é fundamental para o entendimento da evolução de bacias sedimentares, pois permite a definição de áreas fontes e o sentido do suprimento sedimentar (proveniência e mergulho deposicional). Os padrões de paleocorrentes foram analisados em conjunto com outros dados geológicos a fim de estabelecer conexões para a interpretação da paleogeografia (Assine, 1994).

A análise de paleocorrentes pressupõe que as estruturas sedimentares medidas em campo representam as condições hidrodinâmicas vigentes ao tempo de deposição dessas formas. Por exemplo, através da análise da dispersão dos dados de paleocorrentes é possível inferir, com alguma segurança, o tipo de sistema fluvial, a paleolinha de costa, as zonas de aporte sedimentar, entre outros (Warren, 2006).

As principais estruturas sedimentares utilizadas para o presente estudo foram as estratificações cruzadas acanaladas, principalmente da porção basal da unidade, devido as mesmas estarem mais bem representadas e preservadas.

Os dados obtidos foram analisados estatisticamente, sendo apresentados nas seções colunares sob a forma de rosetas de frequência, nas quais são indicados o número de medidas (n), a média vetorial ( $\bar{x}$ ) e o fator de consistência (f.c.). A dispersão das medidas (f.c.) reflete não somente a confiabilidade do vetor resultante, como também a dispersão original inerente ao sistema deposicional (Assine, 1994). Os dados de cada estação (ponto de medidas) foram representados graficamente em classes de trinta graus (30°) a partir do rumo norte, sendo a soma desses dados convertida em porcentagem e inserida em histogramas circulares de frequência (rosetas). Para obter valor estatisticamente significativo buscou-se efetuar no

mínimo 20 medições por estação. Com os azimutes medidos ( $\alpha$ ) e o número de medidas realizadas ( $n$ ) foram calculados, para cada estação, parâmetros estatísticos como vetor médio ( $x$ ) e o fator de consistência (f.c.), através das equações:

$$x = \arctg\left(\frac{\sum \text{sen}\alpha}{\sum \text{cos}\alpha}\right)$$

$$f = \sqrt{(\sum \text{sen}\alpha)^2 + (\sum \text{cos}\alpha)^2} / n$$

## 2.5 Levantamento de seções colunares

Foram levantadas sete seções colunares, de modo a cobrir da melhor forma possível as áreas de ocorrência da Formação Romualdo, no entorno da Chapada do Araripe. Algumas destas seções foram medidas em trabalhos de campo, realizadas ao longo de riachos que descem as escarpas da chapada, e em frentes de lavras. As seções colunares foram levantadas na escala de 1:100. As seções e afloramentos foram definidos com base em quatro principais critérios: exposição da unidade de estudo, estado de conservação, abrangência em área e acessibilidade.

## 2.6 Petrografia

O estudo petrográfico dos litotipos carbonáticos objetivou a descrição das microfácies e a natureza mineralógica do arcabouço, matriz e cimento. Parâmetros como os tipos de contatos entre os grãos, trama (*fabric*) e tipo de empacotamento foram definidos a partir da descrição da relação arcabouço-matriz. Para o estudo petrográfico das microfácies carbonáticas foi utilizada a classificação microscópica proposta por [Embry & Klovan \(1971\)](#).

A análise petrográfica complementou a análise de fácies, contribuindo para a caracterização das rochas carbonáticas e seus processos formadores. Foram confeccionadas 11 lâminas delgadas a partir de amostras representativas dos principais litotipos da Formação Romualdo.

## 2.7 Estratigrafia de sequências

Estratigrafia de sequências é um método que permite entender a arquitetura dos sistemas deposicionais, facilitando reconstruções paleogeográficas. A estratigrafia de sequências também permite interpretar a evolução dos sistemas deposicionais no tempo (Catuneanu *et al.*, 2011).

A principal ferramenta usada na análise da estratigrafia de sequências é a identificação de superfícies-chave que limitam sucessões definidas por padrões característicos de empilhamentos estratais (Catuneanu *et al.*, 2011).

O conceito de sequência estratigráfica foi originalmente definido por Sloss (1963) como uma unidade estratigráfica limitada por discordâncias. O conceito de sequência foi posteriormente revisto e definido como “uma unidade estratigráfica composta por uma sucessão relativamente concordante de estratos geneticamente relacionados, limitada no topo e na base por discordâncias e conformidades correlatas” (Mitchum *et al.*, 1977). O desenvolvimento contínuo do método de estratigrafia de sequências resultou em uma diversificação de conceitos e definições de diversos tipos de sequência. O trabalho de Catuneanu *et al.* (2009) visou a padronização de diferentes propostas apresentadas, em que foram definidos diferentes tipos de sequências.

A análise integrada de associações de fácies e dos ciclos sedimentares, especialmente observados nas exposições da Formação Romualdo, possibilitou a caracterização dos sistemas deposicionais e padrões de empilhamento diferenciados, o que auxiliou na definição da arquitetura estratigráfica da unidade.

No intuito de estabelecer a correlação entre as diferentes sucessões estudadas, foram identificadas as superfícies-chave de correlação estratigráfica que possibilitassem melhor compreensão dos padrões arquiteturais e correlação das associações de fácies na escala de bacia. Estas superfícies compreendem discordâncias regionais representativas da queda brusca do nível do mar e superfícies de inundação máxima. Logo, com o intuito de integrar todos esses elementos arquiteturais, foram empregadas técnicas de análise e correlação com base no método da estratigrafia de sequências.

### 3 – CONTEXTUALIZAÇÃO GEOLÓGICA

#### 3.1 Bacia do Araripe

A Bacia do Araripe está situada no interior do Nordeste do Brasil, na região limítrofe dos estados do Ceará, Piauí, Paraíba e Pernambuco. É uma bacia interior, poligenética, de forma alongada, com o maior eixo na direção E-W, compreendendo uma área aproximada de 9.000 km<sup>2</sup> (Assine, 1992) (Figura 2).

Inclui-se em um conjunto de pequenas bacias, referidas como bacias interiores do Nordeste, localizadas entre as bacias Potiguar, do Parnaíba e do Tucano-Jatobá. As bacias interiores do Nordeste são fortemente controladas pelas estruturas do embasamento pré-cambriano/eo-paleozoico, reativadas ao longo do Fanerozoico, em especial durante os eventos tafrogênicos do Cretáceo inferior (Reativação Wealdiana de Almeida, 1967). Entre o Neo-Jurássico (*Late Jurassic*) e o Eo-Cretáceo (*Early Cretaceous*) iniciou-se a formação das bacias interiores, como resultado da separação da América do Sul e África (Matos, 1992). A Bacia do Araripe é a mais extensa, dentre tais bacias, e a que apresenta história geológica mais complexa e empilhamento estratigráfico mais completo (Assine, 2007), estando implantada em terrenos pré-cambrianos da Zona Transversal da Província Borborema (Brito Neves *et al.* 2000), a sul do Lineamento de Patos.

Segundo Matos (1992), a Zona de Cisalhamento ou Lineamento de Patos teria sua extremidade oeste terminada em uma série de falhas curvadas formando uma geometria sigmoide, e que durante o Cretáceo Inferior, uma distensão geral de direção NW-SE inverteu as falhas originalmente transpressionais para falhas normais, o que reativou pequenos segmentos da antiga zona de cisalhamento, dando origem às bacias interiores do Nordeste brasileiro.

A Bacia do Araripe apresenta uma evolução policíclica, que pode ser dividida em três estágios tectônicos sucessivos: (1) o estágio Pré-Rifte, de presumível idade neojurássica, (2) o estágio Rifte (ou Sinrifte), de idade eocretácica (Andar neocomiano) e (3) o estágio Pós-Rifte, de idade mesocretácica (Andar Alagoas correspondente ao neo-aptiano/eoalbiano) (Ponte, 1992).

Segundo Assine (2007), o arcabouço estratigráfico da Bacia do Araripe constitui-se pela Supersequência Pré-Rifte, Supersequência Rifte e Supersequência Pós-Rifte, sendo a última, subdividida em sequências Pós-Rifte I e Pós-Rifte II. Tais sequências estratigráficas



são limitadas por discordâncias regionais, que representam o registro fragmentário de embaciamentos gerados em ambientes tectônicos distintos (Assine, 2007).

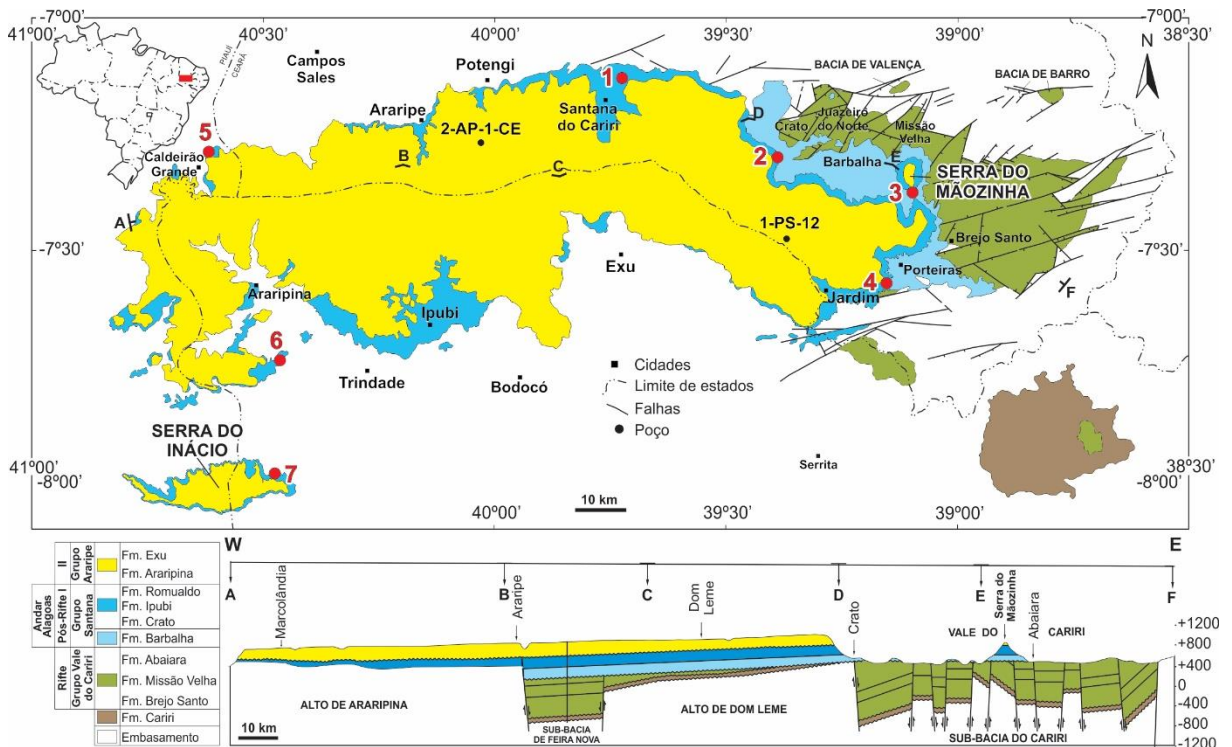


Figura 2 - Mapa geológico da Bacia do Araripe (modificado de Assine, 2007), com indicação das seções colunares apresentadas neste trabalho: 1 = Pedra Branca; 2 = Sítio Romualdo; 3 = Serra do Mãozinha; 4 = Sobradinho; 5 = Caldeirão Grande; 6 = Araripina; 7 = Serra do Inácio.

A sucessão paleozoica aflora na porção leste da bacia, definindo os contornos do Vale do Cariri, sendo representada pela Formação Cariri. Na parte oeste da bacia, esta unidade não aflora, ocorrendo apenas em subsuperfície, como na Sub-Bacia de Feira Nova. É constituída por arenitos imaturos, de granulação média a muito grossa, com grãos angulosos a subangulosos, interpretados como fácies geradas em sistemas fluviais entrelaçados. Esta sequência é correlacionada com a Formação Tacaratu da Bacia do Jatobá, de idade paleozoica (Assine, 2007).

A supersequência Pré-Rifte foi formada num período de subsidência mecânica produzida por estiramento litosférico visco-elástico, sendo composta pelas formações Brejo Santo e Missão Velha (Assine, 2007).

Segundo Braun (1966), a Formação Brejo Santo é constituída por folhelhos e lamitos vermelhos, nos quais se encontram ostracodes típicos do Andar Dom João. A presença de formas exclusivamente não marinhas indica sedimentação lacustre em ambientes propícios à formação de *red beds*. A Formação Missão Velha, que sobrepõe concordantemente a

Formação Brejo Santo, caracteriza-se por arenitos quartzosos, por vezes feldspáticos e/ou caolínicos, localmente conglomeráticos, portadores de abundantes troncos e fragmentos de madeira silicificada. A associação faciológica remete à interpretação de planícies fluviais de sistemas entrelaçados caracterizados por canais rasos e de alta energia (Assine, 2007).

A Supersequência Rifte teve início no Eo-Cretáceo, durante o qual se depositou a Formação Abaiara. No estágio rifte a deposição sedimentar ficou confinada aos *grabens* e *semigrabens* entalhados pelo tectonismo Vealdeniano (Ponte, 1994).

Segundo Assine (1992) a sucessão Rifte é composta por folhelhos e siltitos vermelhos na base e por intercalações de camadas decimétricas de arenitos finos com lâminas de carbonatos argilosos. Esta unidade possui ostracodes típicos do Andar Rio da Serra/Aratu (Ponte & Appi, 1990). Atribui-se a este intervalo origem continental em sistemas de lagos rasos associados a sistemas fluviais (Assine, 1992).

A supersequência Pós-Rifte, de idade neaptiana-eoalbiana, resulta de subsidência flexural térmica ocorrida na Bacia do Araripe e subdivide-se em Pós-rifte I e II. Distingue-se estrutural e estratigraficamente das duas sequências sotopostas, sobre as quais se assenta em discordância angular. Trata-se esta da discordância pré-Alagoas, uma descontinuidade regional reconhecida em todas as bacias da margem leste brasileira. Na Bacia do Araripe envolve uma lacuna no registro sedimentar cuja duração se estende do Andar Buracica ao Alagoas inferior (Assine, 2007).

A estratigrafia do Grupo Santana foi reavaliada recentemente por Neumann & Assine (2015) e Assine *et al.* (2014). Tais autores consideraram que o Grupo Santana inclui as formações Barbalha, Crato, Ipubi e Romualdo. A Formação Barbalha compreende dois ciclos fluviais com granodecrescência ascendente, que variam de arenitos grossos a folhelhos escuros, por vezes betuminosos. O nível de folhelho betuminoso é papiráceo e fossilífero, bastante rico em ostracodes, conchostráceos e palinórfos, datados de idade Alagoas pela ocorrência de ostracodes pertencentes à biozona RT-011 (Assine, 1992). O paleoambiente de deposição é interpretado como sendo flúvio-lacustre (Ponte & Appi, 1990). Assine *et al.* (2014), usou o termo Formação Romualdo para incluir todos os estratos localizados acima das camadas de gipsita da Formação Ipubi e abaixo das camadas de arenitos das Formações Araripina e Exu.

O trabalho de Assine *et al.* (2014) divide o Andar Alagoas da Bacia do Araripe em três sequências deposicionais: 1) SD1 – correspondente a metade inferior da Formação Barbalha; 2) SD2 – compreendendo a parte superior da Formação Barbalha e as Formações Crato e

Ipubi; 3) SD3 – inclui toda a Formação Romualdo. O empilhamento estratigráfico de tais sequências ocorre como um *onlap* costeiro de sudeste para noroeste e deposição de fácies marinhas diretamente sobre o embasamento a oeste.

O Andar Alagoas na Bacia do Araripe registra a sedimentação da sequência Pós-rifte I, representada pelo Grupo Santana. Esta sequência é caracterizada pelo aumento do espaço de acomodação e paleomergulho deposicional para SE, distinguindo-se das fases anteriores (Assine, 2007). A sequência neoaptiano-eoalbiana (Pós-rifte 1), constituída pelo Grupo Santana, ocorre em quase toda a extensão da Chapada do Araripe e, descontinuamente, ao longo do Vale do Cariri (Bagni, 2010).

O Grupo Santana (Pós-Rifte I) (Figura 3) composto pelas Formações Barbalha, Crato, Ipubi e Romualdo, aflora em torno de quase todo o sopé da Chapada do Araripe, tanto na porção norte e leste, correspondente ao Estado do Ceará, quanto na porção sul, correspondente ao Estado de Pernambuco (Chagas, 2006). É a unidade mais estudada da Bacia do Araripe devido ao seu rico e abundante conteúdo fossilífero, bem como por sua complexidade faciológica. Esta complexidade de fácies sedimentares levou a uma subdivisão da unidade, com base tanto em diferenças litológicas quanto ao conteúdo paleontológico. O Grupo Santana, na porção oeste da bacia, repousa diretamente sobre o embasamento pré-Cambriano / Paleozoico inferior (Assine, 1992).

O intervalo inicial da Sequência Pós-Rifte I iniciou pela deposição de dois grandes ciclos fluviais e finalizando com depósitos terrígenos e margosos no topo (Chagas, 2006; Assine, 2007), na Formação Barbalha. O fim dos ciclos fluviais e o subsequente início da predominância de depósitos lacustres, calcários e margosos, marca o início da Formação Crato.

O registro fossilífero, nesta unidade, é abundante e muito diversificado (Mabesoone & Tinoco, 1973). Considerado como um *fossilagerstätten*, a Formação Crato registra uma assembleia fossilífera composta por pequenos peixes, insetos, crustáceos, aracnídeos, quelônios, lagartos, pterossauros, ostracodes e fósseis vegetais em excelente estado de preservação (Silva Santos & Valença, 1968; Mabesoone & Tinoco, 1973; Neumann, 1999).

A Formação Ipubi, situa-se sobre a Formação Crato sendo caracterizada localmente por geometria tabular e depósitos descontínuos de evaporitos, em grande parte composto por gipsita, com espessura variável, atingindo até 30 metros, intercalados com folhelhos pretos e verdes (Nascimento Jr. *et al.*, 2016).. A gipsita apresenta textura primária do tipo paliçada,

internamente formada por cristais colunares. Os depósitos de gesso também possuem anidrita com texturas nodulares e radiais (Nascimento Jr. *et al.*, 2016).

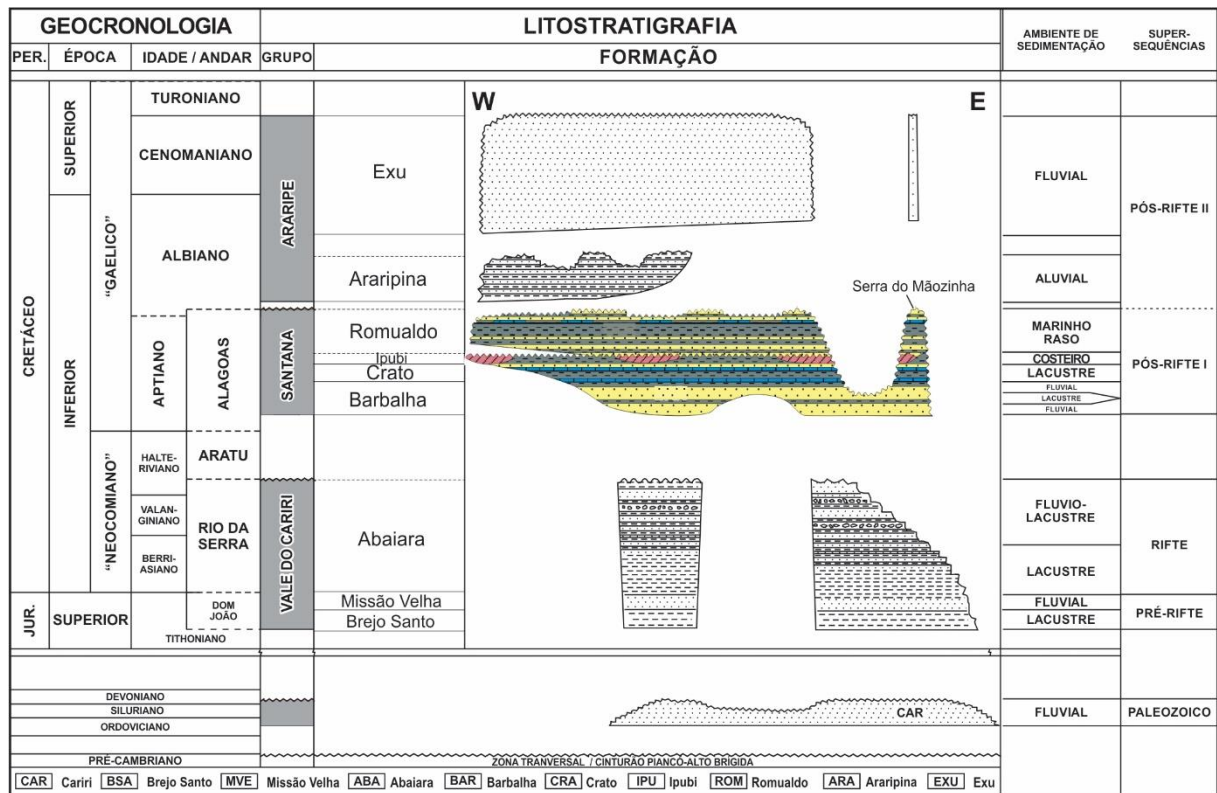


Figura 3 - Carta estratigráfica da Bacia do Araripe (modificado de Assine, 2007).

O contato entre as formações Ipubi e Romualdo é marcado por uma descontinuidade, a qual é difícil ser identificada quando os evaporitos não estão presentes (Assine, 2007). Quando presente, esta descontinuidade pode ser reconhecida no topo dos evaporitos como um delgado depósito de conglomerados ou arenitos grossos (Assine, 2007). O truncamento da descontinuidade pode ser diretamente nos evaporitos ou indiretamente sobre os folhelhos escuros associados à Formação Ipubi (Nascimento Jr. *et al.*, 2016). Secundariamente, quando os evaporitos estão ausentes, esta descontinuidade pode, algumas vezes, ser identificada por uma superfície de paleocaliche (Silva, 1986).

A sequência Pós-rifte II, de idade albiано-cenomaniano é composta pelas Formações Araripina e Exu. Esta sequência se difere da anterior pelo padrão tectônico e mergulho deposicional para WSW. Silva (1986) estabeleceu uma nova unidade estratigráfica, a Formação Araripina. A sedimentação predominante na sequência Pós-rifte II gerou siltitos e arenitos, com predominância de arenitos finos a grossos com evidências de tectonismo

sindeposicional. Os arenitos fluviais da Formação Exu aparecem recobrando a Formação Araripina (Assine, 2007).

## 3.2 – Formação Romualdo

### 3.2.1 Litoestratigrafia

A Formação Santana foi definida originalmente por Beurlen (1962), que estabeleceu descrição detalhada da estratigrafia da unidade, dividindo-a em três membros. Reconheceu um membro basal (Membro Crato) que abrangia uma série de calcários laminados; um membro intermediário (Membro Ipubi) dominado por evaporitos de principalmente gipsita e anidrita; e um membro superior (Membro Romualdo). Desde então, há inúmeras controvérsias com relação a sua nomenclatura.

Os trabalhos subsequentes adotaram, de maneira geral, a subdivisão em membros ainda que haja divergência dos diversos autores no que concerne à divisão, nomenclatura e relações de contato entre as unidades litoestratigráficas (Assine, 1990).

A Formação Santana definida por Beurlen (1962) foi elevada de categoria por Neumann (1999) para Grupo Santana, englobando as Formações Crato, Ipubi e Romualdo. A presente dissertação, assim como Neumann (1999) e Neumann & Assine (2015), adota Formação Romualdo.

Das escassas contribuições estratigráficas e sedimentológicas à Formação Romualdo, especialmente aquelas relacionadas à análise de fácies e estratigrafia de sequência (Assine, 2007, 1990; Assine *et al.*, 2014; Chagas, 2006; Pereira *et al.*, 2016; Moura, 2007; Arai & Coimbra, 1990), poucos descrevem em detalhe as variações laterais e verticais de fácies considerando, muitas vezes, apenas dados pontuais de afloramentos e poços. No entanto, descreveram de forma generalizada os principais litotipos presentes na Formação Romualdo, dos quais são descritos como folhelhos intercalados com margas e calcários com abundante conteúdo de concreções carbonáticas fossilíferas. Os folhelhos estão associados com fósseis de gastrópodes, bivalves e camarões. Alguns gastrópodes são muito comuns em alguns pontos da bacia, onde eles compreendem coquinas de gastrópodes. Além destes, são descritos arenitos finos a grossos com estratificação cruzada acanalada e marcas de *ripple*, conglomerados e concentrações bioclásticas, presentes no topo da unidade (Chagas, 2006).

Além dos autores citados acima, Mabesoone & Tinoco (1973) fazem uma abordagem sedimentológica da Formação Romualdo. Tais autores descrevem a unidade como uma sequência com espessura aproximada de 150 m e composta por calcários, margas intercaladas

com folhelhos e siltitos, nas quais está presente uma fauna de peixes fósseis. Nos depósitos de calcários, os autores descrevem microspato com alguns resquícios de microfósseis e, em apenas alguns casos, presença de micrita com restos de fósseis bem preservados. Os depósitos de arenitos são descritos, superficialmente, como camadas com ocorrências locais.

Vários estudos comprovam a existência de dois *fossilagerstätten* com características próprias, os quais correspondem às Formações Crato e Romualdo (Maisey, 1991; Martill, 2007). A Formação Romualdo contém uma das mais importantes concentrações de fósseis do Mesozoico no Gondwana (*Konservat Lagerstätten*) (Maisey, 1991; Martill, 1993, 1997, 2001; Kellner & Campos, 1999; Kellner, 2002; Fara *et al.*, 2005; Martill, 2007; Vila Nova *et al.*, 2011; Martill, 2011; Martill *et al.*, 2012). Esta unidade contribui consideravelmente para o conhecimento e entendimento da paleobiota cretácea do Gondwana (Maisey, 2000). Como evidenciado no trabalho de Fara *et al.* (2005) e Valença *et al.* (2003), grande parte destas concentrações de fósseis se concentra em concreções, as quais ocorrem preferencialmente em dois horizontes estratigráficos, localizados principalmente na parte inferior da Formação Romualdo. A variação em tamanho das concreções está entre 20 e 40 cm, em média, e frequentemente contém fragmentos de fósseis de peixes com *Tharrhias*, *Vinctifer* e *Rhacolepis*, sendo este o mais comum (Fara *et al.*, 2005). Concreções maiores (mais de 1 m de comprimento) contêm grandes peixes predadores ou raros fragmentos de vertebrados terrestres (Martill, 1993).

No trabalho de Valença *et al.* (2003), é apresentado um resumo do conteúdo de fósseis presentes nas concreções carbonáticas: ossos de répteis como crocodilos, tartarugas, pterossauros e alguns dinossauros (Broin, 1994; Hirayama, 1998; Kellner & Campos, 2000); além dos ossos de peixes descritos por Fara *et al.*, 2005. Muitos invertebrados, microfósseis (Coimbra *et al.*, 2002), gimnospermas e algumas angiospermas foram identificadas (Carvalho & Santos, 2005), bem como ocorrências de âmbar (Valença *et al.*, 2003).

Ainda que baseado apenas em duas amostras, o trabalho de Heimhofer *et al.* (2017) propõe uma reconstrução da história diagenética das concreções carbonáticas fossilíferas da Formação Romualdo. Tais autores se basearam em assinaturas geoquímicas preservadas internamente em zonas concêntricas, associando-as às observações sedimentológicas e tafonômicas. Identificaram duas fases diferentes de carbonato suportando cenários de fases de crescimento distintas.

### 3.2.2 Ambientes de sedimentação

A Formação Romualdo tem sido estudada desde o início do século XIX em virtude do rico conteúdo fossilífero presente na unidade. Porém, a partir da década de 1960, intensificaram-se as pesquisas de cunho geológico. Tais estudos, no entanto, divergem quanto à interpretação do paleoambiente deposicional e quanto ao sentido das ingressões marinhas ocorridas na Bacia do Araripe, pois enquanto alguns autores afirmam, com base na paleontologia e na estratigrafia que este ambiente se relaciona a condições marinhas rasas (Santos, 1982), demais autores afirmam tratar-se de ambiente lacustre (Moura, 2007). Além disto, diversos autores afirmam que a ingressão marinha na Bacia do Araripe provém de NW, pela Bacia do Parnaíba (Arai, 2014) enquanto outros afirmam ingressão por SE (Beurlen, 1971a).

Dentre os trabalhos que consideram o ambiente deposicional da Formação Romualdo como marinho, destaca-se o de Beurlen (1966) que descreve os primeiros organismos indubitavelmente marinhos desta unidade, descrevendo equinóides (*Faujasia araripensis* e *Pygurus tinocoi*), que se assemelham às associações cretáceas da América Central e do Norte, sugerindo uma ingressão marinha na região do Araripe pelo norte, através da Bacia do Parnaíba (Formação Codó). Em trabalho subsequente, Beurlen (1971a) refere-se a Formação Romualdo como uma sequência de margas com concreções calcárias, nas quais ocorrem muitos restos de peixes fósseis associados a ostracodes.

Silva Santos & Valença (1968) corroboram a interpretação de Beurlen (1966) e atribuem para a Formação Romualdo ambiente lagunar com periódicas ingressões marinhas indicadas pelo estudo faciológico das camadas do topo e pela presença de ostracodes e dinoflagelados. No Sítio Romualdo observaram uma sequência constituída de arenitos e siltitos calcíferos de cor creme claro-amarelada, com estratificação cruzada bem pronunciada, contendo finas intercalações de folhelhos verde-escuros e leitos de calcário argiloso, com concreções carbonáticas. Do mesmo modo, Santos (1982) apresenta uma composição faunística coerente com ambiente marinho raso. A composição faunística estudada por Santos (1982) apresenta gastrópodos esparsos, exemplares de *Cerithium* e *Turritella*, sendo encontrados no mesmo nível estratigráfico das concreções com peixes. Neste mesmo trabalho, Santos (1982) afirma haver maior influência marinha no final da sequência, sendo marcada pelas ocorrências de invertebrados e vertebrados marinhos.

Viana & Agostinho (1995) também interpreta como ambiente marinho (ou lagunar) a deposição da Formação Romualdo. Esta interpretação é baseada na análise do conteúdo de

carbono orgânico presente nos folhelhos da unidade. Da mesma forma, [Arai & Coimbra \(1990\)](#) interpretam que o paleoambiente da Formação Romualdo envolve ambientes costeiros mixohalinos (laguna?) devido a identificação da assembleia fóssil composta por grãos de pólen, esporos, dinoflagelados, ostracodes, testas de foraminíferos rotalídeos e moluscos. Segundo estes autores, a influência marinha manteve-se presente com intensidade variável no decorrer da deposição. Tais autores indicam também inquestionável influência marinha, pela ocorrência do gênero *Spiniferites Mantell* e *Subtilisphaera Jain*. Desta forma, a característica geral da associação fossilífera encontrada por [Arai & Coimbra \(1990\)](#) não deixa dúvidas quanto à pertinência dos registros das ingressões marinhas no Andar Alagoas.

Os resultados dos estudos nos fósseis de peixes presentes nos ictiólitos, não indicam especificamente ambiente marinho ou não-marinho para a Formação Romualdo ([Maisey, 1991](#)). Segundo [Neumann \(1999\)](#), a conjectura de ambiente lagunar costeiro com periódicas incursões marinhas, indicadas pela presença de ostracodes e dinoflagelados ([Silva Santos & Valença, 1968](#); [Mabesoone & Tinoco, 1973](#) e [Santos, 1982](#)), não é necessariamente correta. Para [Neumann \(1999\)](#), a única evidência de uma incursão marinha nesta formação é a presença de equinoides ([Beurlen, 1962](#)) que estão situados no nível das coquinas, sobrejacente às concreções com ictiólitos.

Assim como os autores citados acima, [Sales \(2005\)](#) considera, para a Formação Romualdo, paleoambiente transicional (lagunar), associado a incursões marinhas albianas, com ciclos deposicionais distintos e sucessivos com eventos de sedimentação episódica. Na metade superior da unidade, o autor descreve a presença de moluscos, dinoflagelados, foraminíferos e equinoides, acumulados em concentrações fossilíferas, interpretados como depósitos de tempestade, concentrações autóctones e resíduos transgressivos. Do mesmo modo, [Chagas \(2006\)](#) utilizando a categoria de membro, interpreta a sucessão de litofácies carbonato-pelíticas como ambiente lagunar transicionando para ambientes marinhos rasos de águas muito calmas, evidenciado pela preservação de peixes marinhos nas concreções carbonáticas.

O trabalho de [Martill \(2007\)](#) usa o termo Formação Santana para designar a Formação Romualdo, adotada no presente trabalho. O autor aplica este termo aos estratos acima da descontinuidade sedimentológica no topo da Formação Ipubi e sotoposta a sequência de camadas maciças de arenitos e conglomerados das Formações Arajara (Araripina) e Exu.



Assine (2007) interpreta as coquinas situadas no topo da Formação Romualdo como *lags* residuais, relacionadas à superfície de ravinamento por onda, correspondendo o intervalo de coquinas à superfície de inundação máxima marinha na sequência.

### 3.2.3 Idades

A Formação Romualdo carece de fósseis para a datação bioestratigráfica de alta precisão e ausência de datação radiométrica devido à falta de rochas ígneas adequadas (Martill, 2007). Apesar disso, há inúmeros trabalhos que apresentam e discutem datações mais precisas dos depósitos dessa unidade, a maioria dos quais tendem a posicioná-la no Cretáceo Inferior (Braun, 1966; Mabesoone & Tinoco, 1973; Lima, 1978). Braun (1966) atribui idade Aptiano-Albiano para o Grupo Santana, baseado em dados de microfauna, tais como *Candonopsis sp.*, *paraschuleridea sp.*, *heterocypris sp.*, *bisulcocypris*, similares aos da Formação Riachuelo (Bacia de Sergipe), pertencentes a paleozona Z-7.

Uma grande variedade de grupos de fósseis tem sido usada para datar as várias formações dentro da bacia de Araripe. A seguir é apresentada uma revisão dos vários grupos fósseis encontrados na Formação Romualdo com uma discussão das suas utilidades biocronoestratigráficas (Tabela 1). Embora macro e microfósseis sejam abundantes na formação, poucos de tais grupos fósseis são rotineiramente utilizados como indicadores bioestratigráficos.

O nível das concreções fossilíferas (*Konservat Lagerstätten*) tem sido citado como Aptiano (Silva Santos & Valença, 1968; Mabesoone & Tinoco, 1973), Aptiano/Albiano (Braun 1966; Santos, 1982; Brito, 1984; Maisey, 1991; Tomé *et al.*, 2014), Albiano (Beurlen, 1964; Lima, 1978; Berthou *et al.*, 1994), possivelmente Cenomaniano (Martill, 1993) e Turoniano (*Upper Cretaceous*) (Beurlen, 1962). Um range da ordem de 30 milhões de anos (Martill, 2007).

No trabalho de Silva Santos & Valença (1968), a Formação Romualdo é considerada como membro superior do Grupo Santana. Em termos cronoestratigráficos, tais autores baseando-se na paleoicofauna dos gêneros *Rhacolepis*, *Ophiopsis*, *Aspidorhynchus* e *Microdon* para posicionar a unidade como exclusivamente pertencente ao Aptiano.

O trabalho de Brito (1984) aborda os limites do Andar Alagoas e o estágio marinho durante o Eo-Cretáceo (Neoaptiano / Eoalbiano). Segundo o autor, o limite inferior do Andar Alagoas é marcado por uma assembleia de ostracodes não marinhos de difícil classificação (? *Cytheridae*). A passagem do Alagoas é marcada pela existência de fósseis de peixes presentes

em formações das bacias cretáceas do NE do Brasil, tais como Romualdo, Codó, Marizal, seção superior da Muribeca e a base da parte inferior da Formação Riachuelo (Bacia Sergipe-Alagoas). Dentre os peixes fósseis, o mais comum é *Vinctifer* (*Aspidorhynchus*), o qual foi proposto como Biozona *Vinctifer*, correspondendo como a passagem do Alagoas para, provavelmente, Aptiano Superior. A parte superior da Formação Romualdo (denominada pelo autor como Formação Santana) da Chapada do Araripe, a qual é marcada por equinóides e moluscos marinhos, corresponde ao Neoptiano alcançando o Eoalbiano (Brito, 1984).

Embasados no conteúdo fossilífero do poço 2-AP-1-CE (Figura 2 e Figura 6), perfurado na parte centro norte da Chapada do Araripe, Arai & Coimbra (1990) afirmam que os registros fossilíferos pertencem a parte superior do Andar Alagoas (Neoptiano/Eoalbiano). O conteúdo fossilífero analisado encontra-se em amostras de folhelhos do poço no intervalo 396-399m; tendo sido efetuadas análises palinológicas e de microfósseis calcários, com ênfase em ostracodes.

Durante o Aptiano-Albiano, as bacias do Nordeste do Brasil foram caracterizadas pela ocorrência conspícua de cistos dinoflagelados pertencentes ao gênero *Subtilisphaera*. Isto é reportado no trabalho de Arai *et al.* (2000), os quais apresentam dados paleontológicos das bacias do Nordeste do Brasil (São Luís, Potiguar, Araripe e Ceará) que marcam a Ecozona *Subtilisphaera*, a qual compreende o limite Aptiano-Albiano.

Uma síntese crono-litoestratigráfica acerca da Formação Romualdo e demais unidades pertencentes à Bacia do Araripe foi proposta por Berthou *et al.* (1994). Na tentativa de uma discussão crítica acerca da estratigrafia da bacia, o autor adicionou uma nomenclatura confusa às unidades. De interesse, no entanto, são as idades que o autor atribuiu às unidades, embora sem fornecer dados que as sustentassem. Para as unidades do Grupo Santana, o autor atribuiu para a Formação Crato idade Aptiano Superior a Albiano Inferior; Formação Ipubi considerou como Albiano Inferior a Médio e inclui o nível das concreções fossilíferas como pertencentes ao Ipubi e não à Formação Romualdo. Finalizando os dados cronológicos, Berthou *et al.* (1994) atribuíram idade Albiano Médio a Superior à Formação Romualdo.

Palinologia revisada para grande parte do Grupo Santana foi proposta por Regali (2001) e, posteriormente por Rios-Netto *et al.* (2012). A Formação Romualdo (denominada pelos autores como Formação Santana) se enquadra na palinozona *Complicatisaccus Cearensis*, com base na ocorrência contínua de *S. variverrucata*, a qual corresponde a uma idade aptiana. Tais dados estão em contraste com os resultados palinológicos de Pons *et al.*

(1994) e Coimbra *et al.* (2002) que propõem uma idade albiana para a Formação Romualdo, baseada na análise bioestratigráfica de conjuntos de pólen, esporos e ostracodes.

A idade Albiana para os sedimentos da Formação Romualdo é interpretada por Beurlen, 1964; Lima, 1978; Coimbra *et al.*, 2002 e Heimhofer & Hochuli (2010). Segundo Beurlen (1964), a presença de espécies dos *Cassiopinae* (gastrópodes), nova subfamília dos *Turriteliidae*, encontrados nos sedimentos da Formação Romualdo, marcam idade Albiana inferior. A idade Albiana é reforçada nos trabalhos de Lima (1978) e Regali (1990), os quais, embasados em dados de palinórfos, distribuídos por oito poços rasos, em toda a área da Bacia do Araripe, atribuem idade Albiana à Formação Romualdo. O conjunto de palinórfos presentes permite posicionar a unidade no Eo a Mesoalbiano, Zona *Complicatisaccus cearensis*. A distribuição de Lima (1978) tem início com a ocorrência de várias espécies de *Stellatopollis* (encontrados na parte inferior da Zona *C. cearensis*) e termina com a presença de *Dicotetradites Sp.*, *Gnetaceaepollenites ornatus*, *G. perforatus* – entre outros – que se situam na base da parte superior dessa mesma zona. Por essa correlação, destaca-se a discordância no topo do Neoptiano (base da Zona *C. cearensis*) (Regali, 1990). Embasados na biozona *Elasterosporites protensus*, Valença *et al.* (2003) consideram idade albiana para a Formação Romualdo.

No trabalho de Heimhofer & Hochuli (2010), a análise cronobioestratigráfica da Formação Romualdo (denominada pelos autores como Formação Santana) é baseada na assembleia de esporófitos (pólen e esporos), dos quais, os principais representantes são *Stellatopollis barghoornii*, *Dichastopollenites cf. sp* e *Retimonocolpites aff. sp*, presentes no topo da unidade. Considerando as abordagens bioestratigráficas, os autores afirmam ser improvável uma extensão do Aptiano ao topo da Formação Romualdo, pois tal idade não corresponde aos agrupamentos palinómórficos observados.

Martill (1993) observou que a datação das várias unidades foi imprecisa e considerou que as concreções da Formação Romualdo poderiam ser pertencentes ao Cenomaniano.

Os dados acima apresentados revelam que há ainda, grande incerteza quanto à datação da Formação Romualdo carecendo, portanto, de estudos mais acurados acerca da idade desta unidade, sendo crucial para o entendimento cronoestratigráfico da incursão marinha ocorrida na Bacia do Araripe durante o Cretáceo.

IDADES	AUTORES	ARGUMENTOS
<b>Albiano</b>	Beurlen (1964)	<i>Gastrópodes (Cassiopinae)</i> , nova subfamília dos <i>Turriteliidae</i>
	Lima (1978)	Palinomorfos - Zona <i>Complicatisaccus cearensis</i> (espécies <i>Stellatopollis</i> ; <i>Dicotetradites sp</i> ; <i>Gnetaceaepollenites ornatus</i> ; <i>G. perforatus</i> )
	Coimbra <i>et al.</i> (2002)	Conchostráceos, moluscos, dinoflagelados e microforaminíferos
	Valença <i>et al.</i> (2003)	Biozona <i>Elasterosporites protensus</i>
	Heimhofer & Hochuli (2010)	Pólen e esporos - <i>Stellatopollis barghoornii</i> , <i>Dichastopollenites cf. sp</i> e <i>Retimonocolpites aff. Sp</i>
<b>Aptiano / Albiano</b>	Braun (1966)	Paleozona Z-7 - Dentes e fragmentos de ossos de peixes; crustáceos <i>Candonopsis sp.</i>
	Santos (1982)	Concreções com peixes - Biozona Vinctifer ( <i>Aspidorhynchus</i> )
	Brito (1984)	Biozona Vinctifer ( <i>Aspidorhynchus</i> ); Ostracode <i>Cytheridae</i> ?
	Arai <i>et al.</i> (2000)	Dinoflagelados - Ecozona <i>Subtilisphaera</i>
	Tomé <i>et al.</i> (2014)	Ostracodes - <i>Pattersoncypris angulata</i> ; <i>P. micropapillosa</i> e <i>P. salitrensis</i>
<b>Aptiano</b>	Silva Santos e Valença (1968)	Inclusão de peixes fósseis pertencentes aos gêneros <i>Rhacolepis</i> , <i>Ophiopsis</i> , <i>Aspidorhynchus</i> e <i>Microdon</i> .
	Mabesoone & Tinoco (1973)	Fauna pertencente ao gênero <i>Rhacolepis</i>
	Arai & Coimbra (1990)	Dinoflagelados - Ecozona <i>Subtilisphaera</i>
	Regali (2001)	Palinozona <i>Complicatisaccus cearensis</i> ( <i>S. variverrucata</i> )
	Rios-Netto & Regali (2007)	Palinozona <i>Complicatisaccus cearensis</i> ( <i>S. variverrucata</i> )

Tabela 1. Revisão dos vários grupos fósseis encontrados na Formação Romualdo com o posicionamento cronoestratigráfico.

## 4 – FÁCIES SEDIMENTARES

Foram definidas e descritas doze fácies sedimentares baseadas na litologia e estruturas sedimentares. Uma subdivisão foi necessária a fim de distinguir fácies siliciclásticas de carbonáticas. Foram caracterizadas e descritas cinco fácies siliciclásticas: (i) arenitos conglomeráticos com estratificação cruzada acanalada; (ii) arenitos com estratificação cruzada acanalada; (iii) arenito com estratificação cruzada sigmoidal; (iv) fácies heterolítica e (v) folhelhos e siltitos. Estudos petrográficos permitiram reconhecer sete fácies e microfácies carbonáticas: (vi) coquinas ou calcários coquinoídes / *rudstone*; (vii) *mudstone* laminado; (viii) *wackestone* bioclástico; (ix) *packstone* peloidal com estratificação cruzada *hummocky*; (x) *packstone* peloidal laminado; (xi) laminito crenulado brechado e; (xii) ostracodito.

### 4.1 Fácies siliciclásticas

#### **Arenitos conglomeráticos com estratificação cruzada acanalada**

*Descrição* – Arenitos conglomeráticos St(g) possuem granulação de médios a grossos, creme-amarronzados, mal selecionados, seixos e grânulos dispersos, com grau de arredondamento variável (arredondados a angulosos) e baixo grau de esfericidade dos grãos. É frequente a associação desta fácies a fragmentos angulosos de granito, quartzo, feldspato e argilito (Figura 4 A). As estruturas presentes são estratificações cruzadas acanaladas (*trough cross-bedding*), de médio porte, dispostas em sets decimétricos (Figura 4 B). No limite inferior dos arenitos há contato erosivo bem-definido com os depósitos sotopostos (Figura 4 C). Os arenitos aparecem dispostos em forma de lentes, apresentando extensão lateral da ordem de 15 m (Seções Colunares Pedra Branca e Serra do Inácio) (Figura 4 D). Estes corpos possuem espessura decimétrica, normalmente variando de 40 a 60 cm.

*Interpretação* - Depósitos de migração de dunas subaquosas de cristas sinuosas (3D) sob a ação de correntes unidirecionais em regime de fluxo inferior (Prothero & Schwab, 2014). A presença de pseudomatriz argilosa pode ser interpretada como produto da compactação de clastos argilosos.

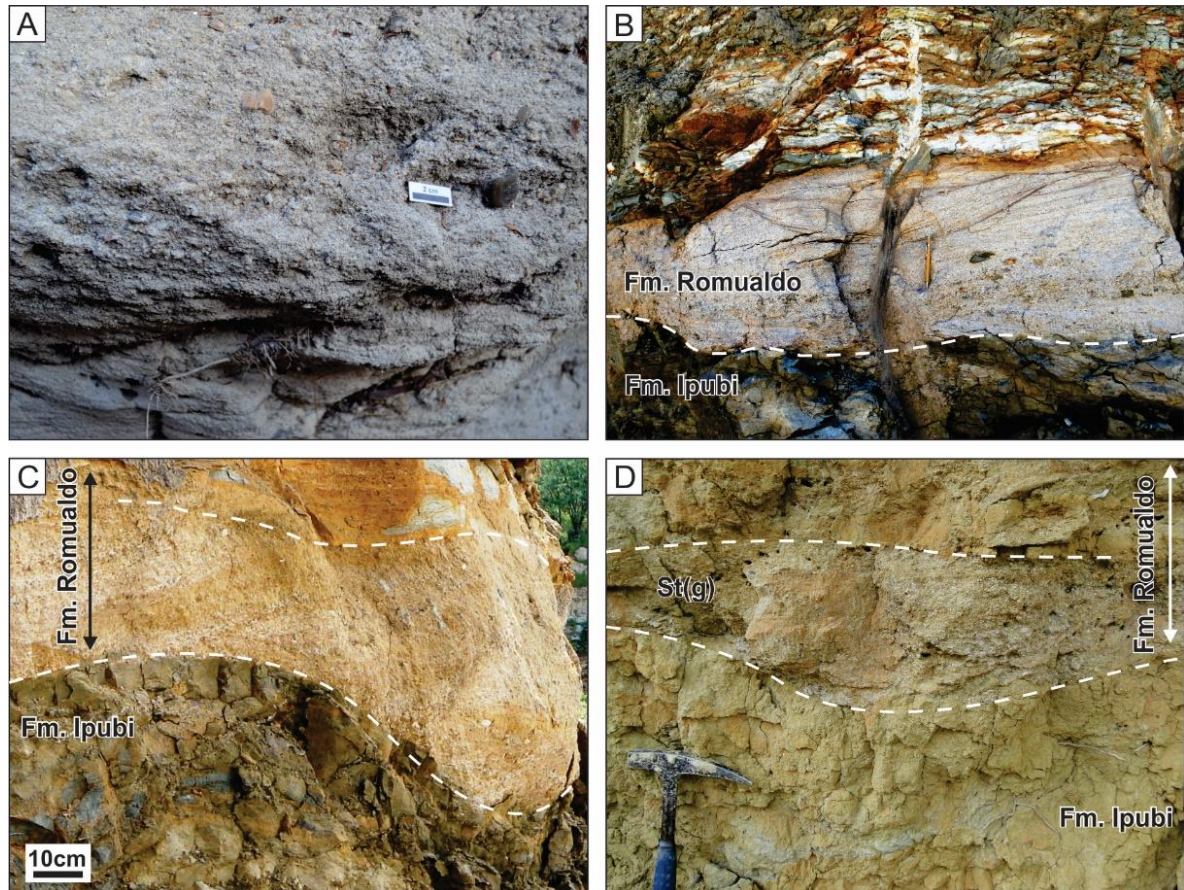


Figura 4 - Arenitos conglomeráticos com estratificação cruzada acanalada St(g). A) Arenito muito grosso com fragmentos dispersos e angulosos de granito, feldspato e quartzo – Seção Serra do Mãozinha; B) Arenitos com estratificação cruzada acanalada com concentração de fragmentos de feldspato, quartzo e argilito na base – Seção Pedra Branca; C) Base erosiva com arenitos conglomeráticos (Fm. Romualdo) sobrepostos, em contato discordante a folhelhos da Fm. Ipubi – Seção Pedra Branca; D) Lentes de arenitos com adelgaçamento lateral e base erosiva (contato estratigráfico – Formações Ipubi / Romualdo) – Seção Serra do Inácio.

### Arenitos com estratificação cruzada acanalada

*Descrição* – Arenitos finos a médios, creme-esbranquiçados variando de tons marrom-alaranjados a cinza esverdeados, com níveis cinza escuros onde há pseudo-matriz argilosa a silto-argilosa. Os arenitos apresentam estratificação cruzada acanalada ( fácies St), com espessura média de 30 cm (Figura 5 A). As estratificações em cortes longitudinais exibem formas de cruzadas assintóticas, com placas de mica depositadas nos *foresets* (Figura 5 B). Os arenitos finos apresentam moderada a boa seleção e os grãos se apresentam arredondados, enquanto que nos arenitos médios predominam grãos arredondados a subarredondados. Nos arenitos médios são observados intraclastos de argila dispostos na base dos *sets*, base da Seção Sítio Romualdo (Figura 5 C e Figura 6). Os intraclastos são arredondados, de tamanhos

milimétricos a centimétricos (0,5 a 10 cm). Em algumas porções de estratos cruzados, observam-se superfícies de reativação com frequentes clastos de argila na base.

*Interpretação* - As estratificações cruzadas acanaladas indicam a migração de dunas com crista sinuosa (3D) em fluxo unidirecional, sob regime de fluxo inferior. A migração de formas de leito é resultante do transporte de carga de fundo com grãos de areia sendo carreados por arrasto e rolamento e os grãos finos por saltação. As superfícies de reativação representam mudanças de curta duração nas condições de fluxo que causaram a modificação na geometria da forma do leito.

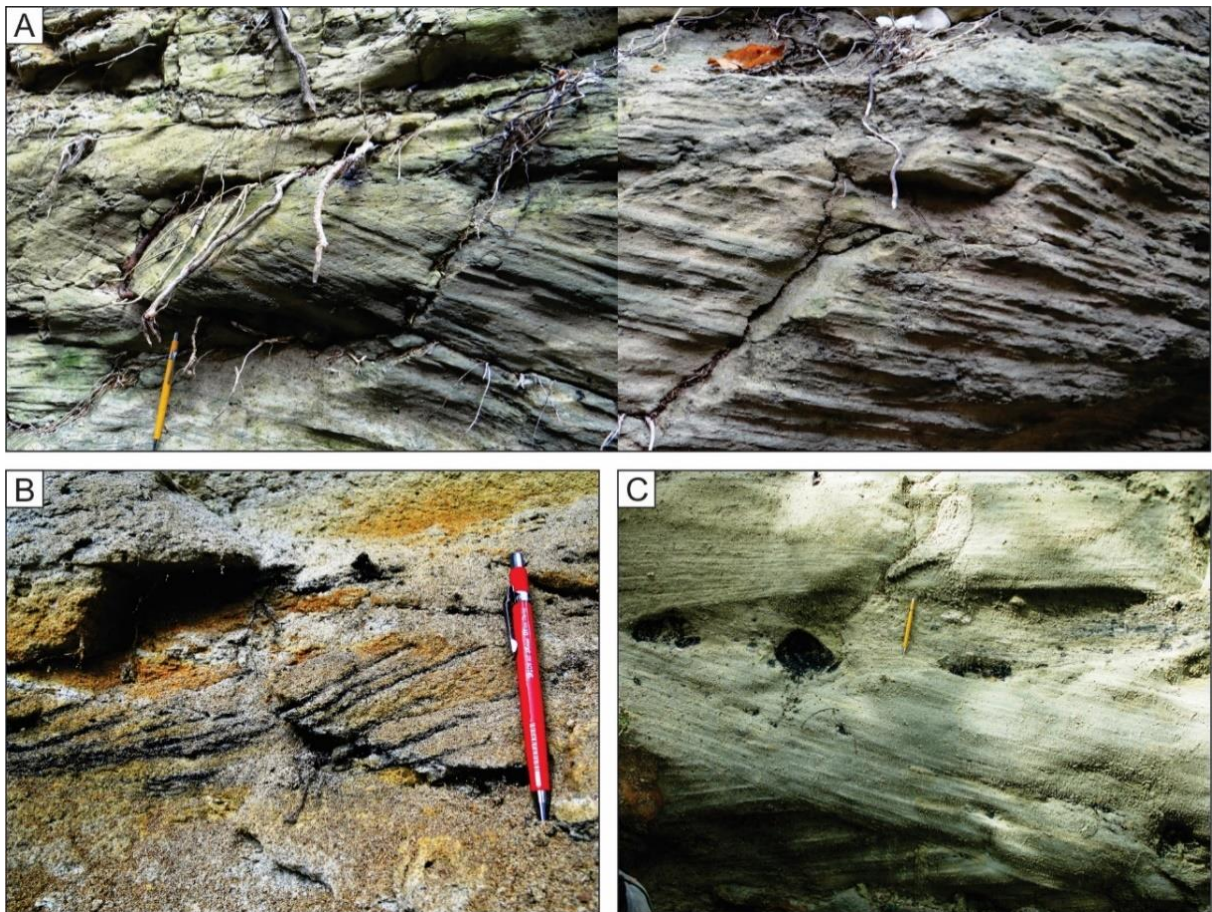


Figura 5 - Arenitos com estratificação cruzada acanalada (St). A) Arenito médio com estratificação cruzada acanalada de médio porte (30 cm) – Seção Sobradinho; B) Arenito fino a médio com micas depositadas nos *foresets* – Seção Sobradinho; C) Arenito fino com cruzada acanalada centimétrica com intraclastos de argila – Seção Sítio Romualdo.

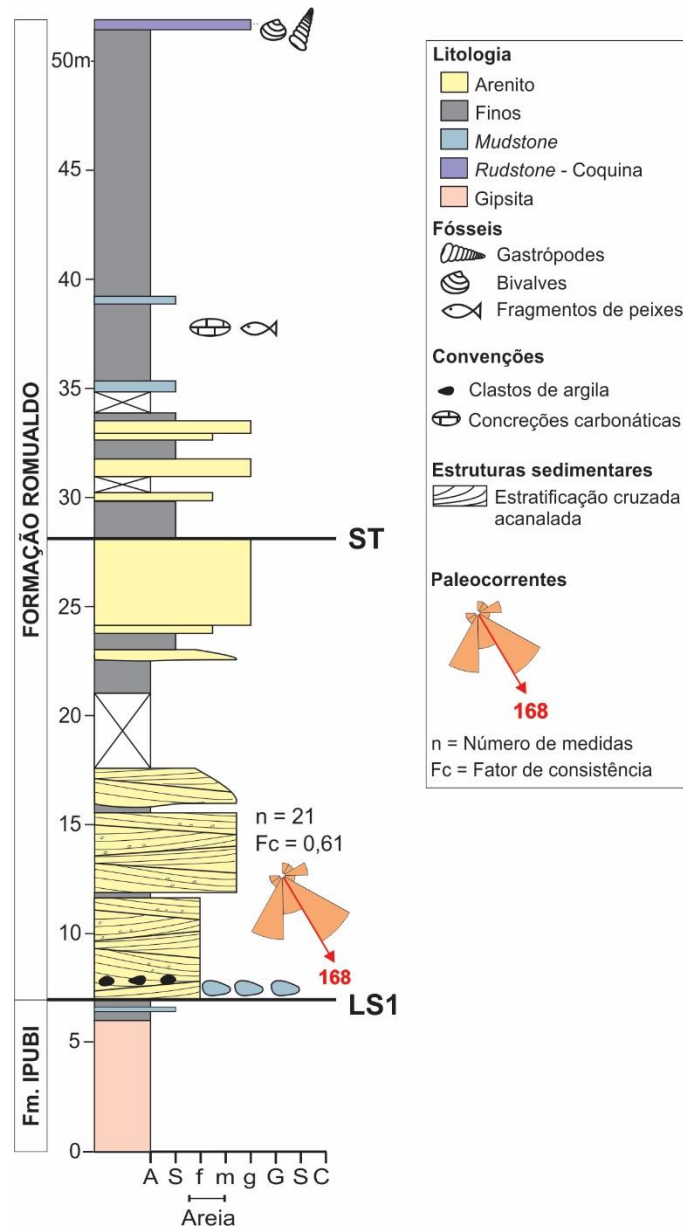


Figura 6 - Seção Sítio Romualdo (Coordenada: X = 457.144, Y = 9.194.025; Zona 24M).

### Arenito com estratificação cruzada sigmoide

*Descrição* - Arenitos muito finos a médios, coloração creme com grãos arredondados moderadamente selecionados. A estratificação cruzada sigmoide (*sigmoid cross stratification*) é a estrutura diagnóstica ( fácies Ssg) que se apresenta em sets com espessuras decimétricas. As sigmoides apresentam *foresets* com ângulo de mergulho médio de 20°, que tendem a se horizontalizar lateralmente. As geometrias características desta fácies são estratos arenosos amalgamados, justapostos lateralmente, com extensão lateral de 2 m, e espessura de 40 cm. Os estratos arenosos se adelgaçam lateralmente, apresentando base e topo planos e tangenciais



às superfícies limitantes, representados por camadas centimétricas (de 2 a 5 cm) de folhelho preto entre dois estratos superpostos (Figura 7 A). Fragmentos vegetais carbonizados foram observados no interior dos estratos (Figura 7 B), e como clastos arredondados de argila (Figura 7 C).

*Interpretação* - As estratificações cruzadas sigmóides com formas de barras arenosas podem ser atribuídas a processos de maré. Os fluxos das marés, quando canalizados, têm períodos distintos de águas estagnadas que resultam na deposição de finos. As acelerações dos fluxos das correntes de marés associadas aos processos trativos elevam a carga sedimentar no sistema. As barras amalgamadas podem ter sido formadas em águas muito rasas, com as estratificações sigmóides geradas durante a aceleração das condições de fluxo. A fácies de arenito com estratificação cruzada sigmoide sugere que à medida que o regime de fluxo inferior é alcançado, com aumento do poder da corrente, a estratificação cruzada das dunas se transforma de côncava para sigmoide, com *topset*, *foreset* e *bottomset* distintos.

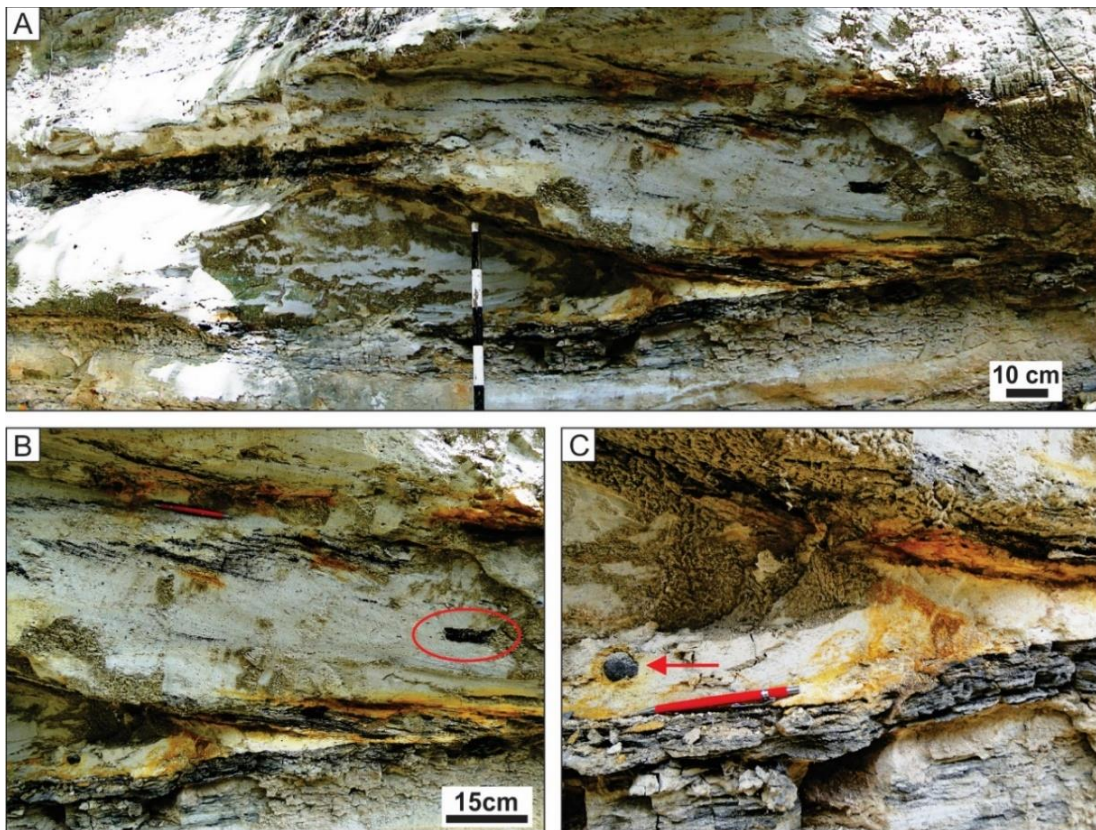


Figura 7 - Arenito com estratificação sigmoide (Ssg) – Seção Sobradinho. A) Estratos sigmóides de espessura centimétrica, limitados por lâminas delgadas de argila; B) Detalhe dos arenitos em estratos sigmóides com fragmentos de vegetais (destaque); C) Em detalhe, clastos arredondados de argila.

### **Fácies heterolítica**

*Descrição* - A fácies heterolítica (H) é aqui considerada um conjunto de litologias que ocorrem associadas em uma combinação recorrente de camadas delgadas de arenitos e finos. Os arenitos apresentam acamamentos *flaser*, ondulado (*wavy*) e lenticular (*linsen*). Intercalações de camadas delgadas de arenitos e pelitos são frequentemente referidas como fácies heterolíticas. Pelitos cinza-escuros intercalados entre arenitos muito finos a finos, bem selecionados, esbranquiçados a acinzentados, com laminações horizontal, ondulada e cruzada cavalgante – *ripples*. Localmente, é constituída por arenitos finos, bem selecionados, creme-esbranquiçados, intercalados a lâminas de folhelhos pretos. Os arenitos estão dispostos na forma de camadas centimétricas, podendo apresentar-se com acamamento ondulado ou horizontal, e até mesmo com estruturas incipientes. Os acamamentos presentes se diferem quanto à continuidade da camada arenosa. O acamamento *flaser* é caracterizado por areia com laminação cruzada contendo películas de lama, comumente nas calhas das marcas onduladas (Figura 8 A). O acamamento ondulado (*wavy*) é transicional entre *flaser* e lenticular (Figura 8 C) e é caracterizado por proporções aproximadamente equivalentes de lama e areia (Figura 8 B - D). Por outro lado, o acamamento lenticular (*linsen*) é caracterizado por lentes centimétricas de areia isoladas em meio a lama, apresentando laminação cruzada interna.

*Interpretação* - Estes tipos de acamamento são comuns em planícies de maré, onde há flutuações no suprimento sedimentar ou nível da atividade da corrente (ou da onda).

### **Folhelhos e Siltitos**

*Descrição* - Esta fácies compreende os pelitos, os quais são constituídos predominantemente por folhelhos cinzas, verdes e pretos (pirobetuminosos), com tons de cinza variando de claro a escuro e folhelhos apresentando fissibilidade característica. Além destes, os finos (Fácies F) consistem em folhelhos e siltito calcíferos, destacando-se a presença de um intervalo de folhelhos cinza escuros e pretos, ricos em matéria orgânica. A principal estrutura sedimentar identificada nesta fácies é laminação milimétrica.

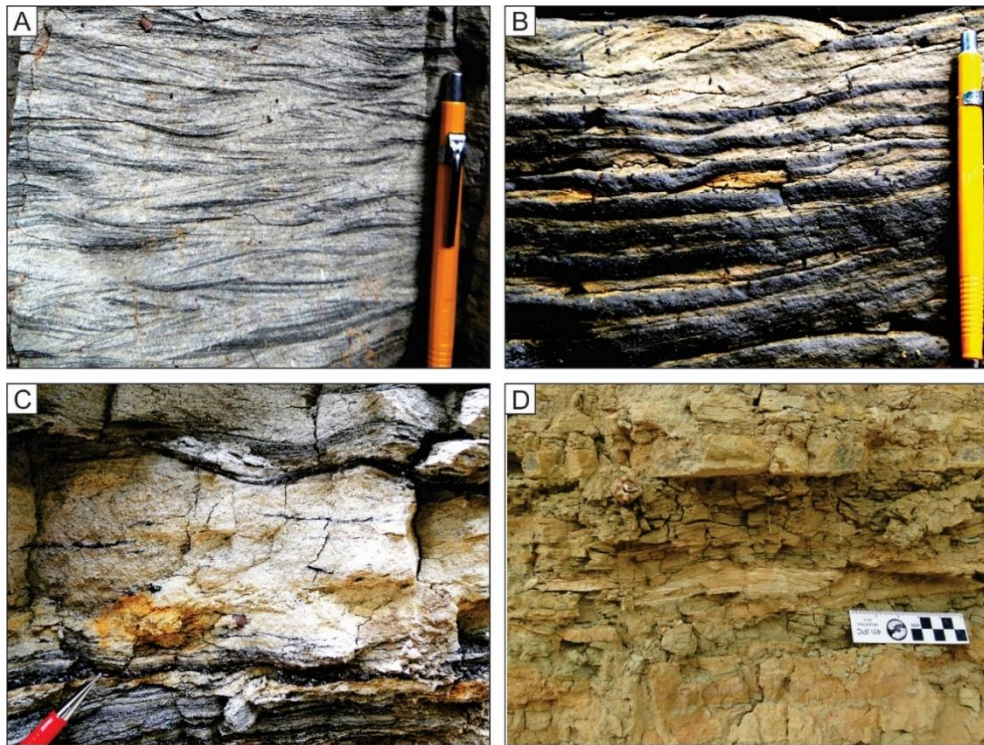


Figura 8 - Fácies heterolítica (H) com acamamento *flaser*, ondulado e lenticular. A) Arenito fino com acamamento *flaser*, marcado por drapes de argila; B) Arenito com acamamento *wavy*: camadas milimétricas a centimétricas de lama intercaladas com camadas arenosas; C) Arenito creme, fino com acamamento *flaser* a ondulado; D) Fácies heterolítica associada a arenito com laminação cruzada cavalgante. A-C (Seção Sobradinho); D (Seção Serra do Inácio).

É nesta fácies que ocorrem as concreções fossilíferas (Figura 9 A), as quais representam o principal jazigo fossilífero da Formação Romualdo, denominado de *Konservat-Lagerstätten* (Maisey, 1991; Martill, 1997; Kellner & Campos, 1999; Kellner, 2002; Fara *et al.*, 2005; Martill, 2007; Vila Nova *et al.*, 2011; Martill, 2011; Martill *et al.*, 2012). Nos níveis em que as concreções ocorrem, é observada uma deformação das laminações milimétricas. Muitas das concreções contêm crustáceos, como camarões (Viana & Agostinho, 1995; Santana *et al.*, 2013; Pinheiro *et al.*, 2014), peixes (Beurlen, 1962, 1971b; Silva Santos & Valença, 1968; Mabesoone & Tinoco, 1973; Martill, 1988; Maisey, 1991, 2000; Kellner & Campos, 1999; Kellner, 2002; Fara *et al.*, 2005; Martill *et al.*, 2008), pterossauros (Price, 1971; Vila-Nova *et al.*, 2011; Martill, 2011; Aires *et al.*, 2014) e tartarugas (Price, 1973; Meylan, 1996; Hirayama, 1998; Kellner & Campos, 1999; Oliveira, 2007; Oliveira *et al.*, 2007; Romano *et al.*, 2013). Os camarões ocorrem preservados em folhelhos e, em alguns casos, apresentam moldes das partes moles preservadas. Além dos fósseis acima descritos, há ocorrência de macro- e microinvertebrados dispersos na fácies de finos (Figura 9 B). Dentre

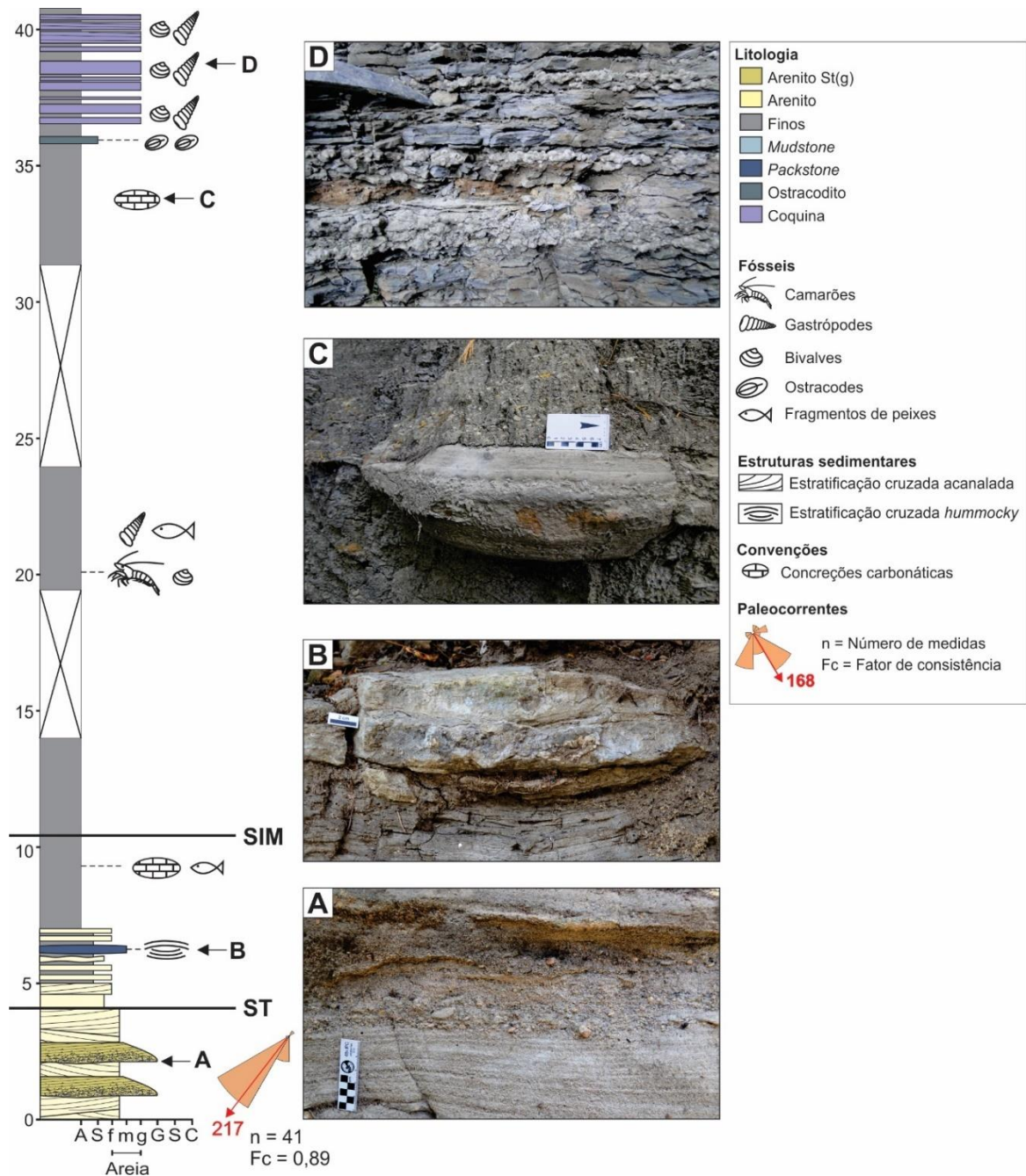
eles, são descritos bivalves, gastrópodes, palinomorfos, (pólen, esporos e dinoflagelados) e microfósseis calcários, com ênfase especial a ostracodes (Arai & Coimbra, 1990).

A fácies F, nas seções Serra do Mãozinha (Figura 10) e Sobradinho, tem ocorrência expressiva, atingindo espessura aproximada de 35 m. Nestas seções, as concreções fossilíferas são comuns e com tamanhos que variam de 9 a 80 cm (Figura 9 C). O principal intervalo contendo concreções fossilíferas na Seção Sobradinho tem uma espessura aproximada de 6 m e se encontra na porção inferior da sucessão de folhelhos.

*Interpretação* - A deposição das argilas e siltes escuros ricos em matéria orgânica ocorre em ambientes redutores sob ausência de fluxos. O processo sedimentar envolvido na deposição dos folhelhos está relacionado à decantação dos sedimentos em suspensão.



Figura 9 - Finos compostos predominantemente por folhelhos e siltitos. A) Vista geral de afloramento contendo intercalação de folhelhos e siltitos com concentrações bioclásticas de gastrópodes; nível de referência com concreções carbonáticas decimétricas – Seção Serra do Mãozinha; C) Folhelho preto, rico em matéria orgânica associado com níveis concrecionários – Seção Sobradinho.



## 4.2 Fácies e Microfácies carbonáticas

A análise das fácies e microfácies carbonáticas possibilitou o detalhamento estratigráfico da Formação Romualdo, de modo a melhorar a variação vertical das fácies. A descrição microscópica focou na distinção dos calcários finos, os quais em escala de

afloramento não apresentavam atributos físicos distinguíveis a olho nu, enquanto que, as coquinas eram plausíveis de distinção macroscopicamente.

### **Coquinas e calcários coquinoídes - *Rudstone***

*Descrição* – Coquinas / calcários coquinoídes (Cq) são caracterizados pela concentração/acumulação fossilíferas, baixa a moderadamente selecionada e por vezes sustentada ora por matriz ora bioclastos sustentados. Frequentemente correspondem a *rudstones* dominados por moluscos (bivalves e gastrópodes), sendo denominados por coquinas ou calcários coquinoídes. Por vezes, os calcários coquinoídes apresentam cristais de quartzo detrítico e em alguns casos, há ocorrências de arenitos híbridos (*calcareous sandstones*). Esta fácies é característica da parte superior da Formação Romualdo, com ampla dispersão geográfica na bacia. Nesta fácies ocorrem depósitos com empacotamento muito frouxo a denso. O empacotamento frouxo é marcado por equinoídes, bivalves, gastrópodes dispersos pela matriz (Figura 11 A), enquanto que o denso é caracterizado pela rara ou ausência de matriz, sendo grão suportado (Figura 11 B). As espécies de equinoídes foram previamente identificadas: *Pygurus tinocoi* (Beurlen, 1966), *Bothryopneustes araripensis* (Beurlen, 1966); *Douvillaster benguellensis* (Manso & Hessel, 2012) e *Hemiaster proclivus* (Manso & Hessel, 2012).

Os bivalves são encontrados frequentemente com valvas desarticuladas, sendo também observados exemplares com valvas articuladas e fechadas, possuindo tamanhos milimétricos a centimétricos. Pavimentos de bioclastos são comuns nesta fácies, conferindo a rocha nítida orientação dos gastrópodes e bivalves (Figura 12 A). Por vezes, a fácies Cq apresenta estratificação incipiente com gastrópodes orientados e depositados paralelamente aos *foresets* (Figura 12 B) e, frequentemente concordante ao acamamento e, em menor quantidade, obliquamente ao plano de acamamento. Em análise microscópica, nos calcários coquinoídes há peloides e/ou pellets (?) que por vezes ocorrem preenchendo câmaras e nos interstícios dos bioclastos (Figura 12 C). Os peloides são formados de calcita microcristalina (micrita), de forma elíptica a subsférica, sem estrutura interna e de tamanhos submilimétricos (0,1 – 0,5 mm). Uma particularidade desta fácies é a presença de depósitos com granodecrescência ascendente, com bioclastos maiores e empacotamento denso na base, gradando para bioclastos menores e empacotamento frouxo no topo, apresentando base erosiva (Figura 12 D).

*Interpretação* – Coquinas ou calcários coquinoídes que apresentam biofábrica com gradação, bioclastos desarticulados, conchas de bivalves orientados com concavidade para cima, juntamente com um depósito com base erosiva, sugerem fortemente que tal depósito foi formado por processo de fluxo de tempestade (Fürsich & Oschmann, 1993). Uma das dificuldades no trato com peloides é o estabelecimento de sua origem. Podem ser derivados de intraclastos que por abrasão foram reduzidos a peloides. Podem representar células de microorganismos. Grãos sem limites definidos podem ainda ser derivados de aglutinação de micrita (Lopes, 1995). Vale ressaltar que, morfologicamente, os peloides e pellets são muito semelhantes em escala microscópica, sendo de difícil distinção entre ambos. Em termos de origem, os peloides podem apresentar origem diversa, enquanto que, os pellets são peloides de origem fecal e podem apresentar seleção muito boa.

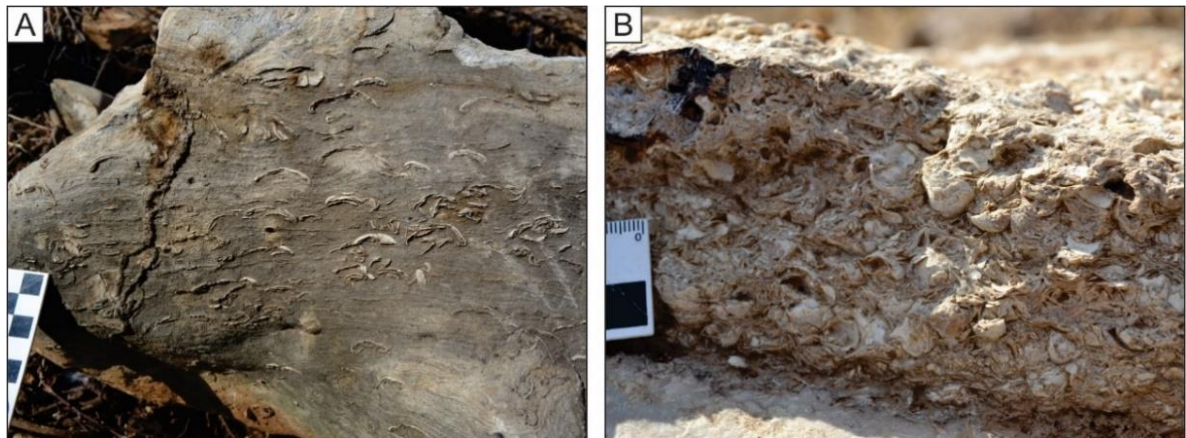


Figura 11 - Ocorrência de coquinas e calcários coquinoídes. A) Calcário coquinoíde com pavimentos de equinoides desarticulados e orientados segundo o acamamento da rocha, apresentando empacotamento frouxo – “Sítio Professor” em Araripina/PE; B) Coquina de molusco (principalmente bivalves e secundariamente gastrópodes) em Araripe/CE, clasto suportado apresentando empacotamento denso.

### ***Mudstone laminado***

*Descrição* – Lamito carbonático laminado com menos de 10% de bioclastos, composto predominantemente por ostracodes. A fácies de *mudstone* laminado (MI) é caracterizada basicamente pela alternância de lâminas submilimétricas de micrita e lâminas de calcita microespática, com proporção aproximada de 2:1, podendo preservar filmes delgados de lâminas organo-argilosas oxidadas (Figura 13 A). A porosidade presente na rocha é preferencialmente secundária, sendo observadas porosidade móldica e intragranular. Os ostracodes ocorrem orientados preferencialmente segundo o acamamento da rocha e possuem

tamanho submilimétricos, aproximadamente de 0,1 a 0,5 mm. Por vezes, a laminação da rocha aparece deformada no entorno do ostracode (Figura 13 B). Frequentemente são observados ostracodes articulados e secundariamente desarticulados. De ocorrência restrita, esta fácies ocorre na base da Seção Caldeirão Grande (Figura 14), em meio a uma sucessão composta predominantemente por *wackestones* laminados (fácies W).

*Interpretação* - A fácies M1 pode ser interpretada como produto da precipitação de lama carbonática e argila. Filmes delgados de argila com óxido/hidróxido metálico sugerem condições oxidantes. A micrita é produzida dentro da bacia de deposição e mostra pouca ou nenhuma evidência de transporte significativo. Geralmente 5- a 20- $\mu\text{m}$  de tamanho, a calcita microespática é produzida pela recristalização (neomorfismo) da micrita, podendo atingir 30  $\mu\text{m}$  (Folk, 1962). A presença de valvas desarticuladas de bivalves sugere transporte após a deposição.

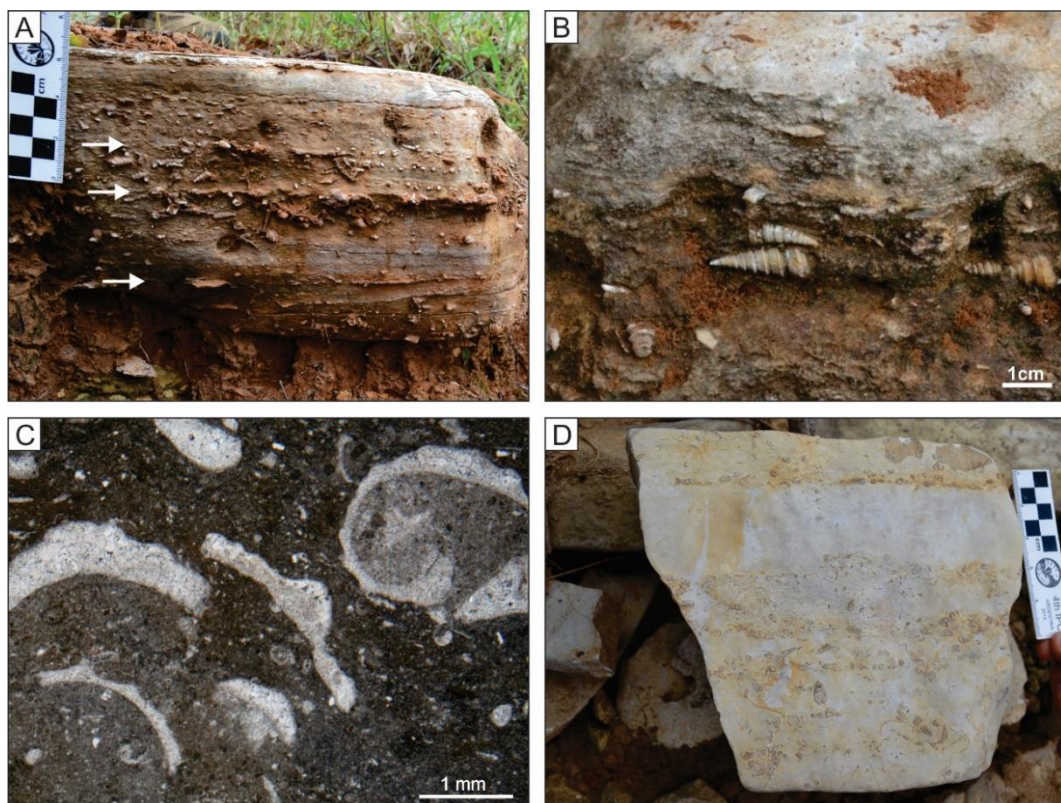


Figura 12 - Camadas de calcário coquinoide. A) Calcário coquinoide com pavimentos de bioclastos – Sítio Torrinha, Araripina/PE; B) Gastrópodes centimétricos orientados paralelamente segundo o acamamento da rocha; C) Lâmina petrográfica contendo gastrópodes e bivalves, por vezes com câmaras preenchidas por peloides – Seção Sobradinho; D) *Rudstone* bioclástico com gastrópodes e bivalves apresentando granodecrescência ascendente; detalhe para bivalve articulado e fechado – Seção Serra do Inácio.



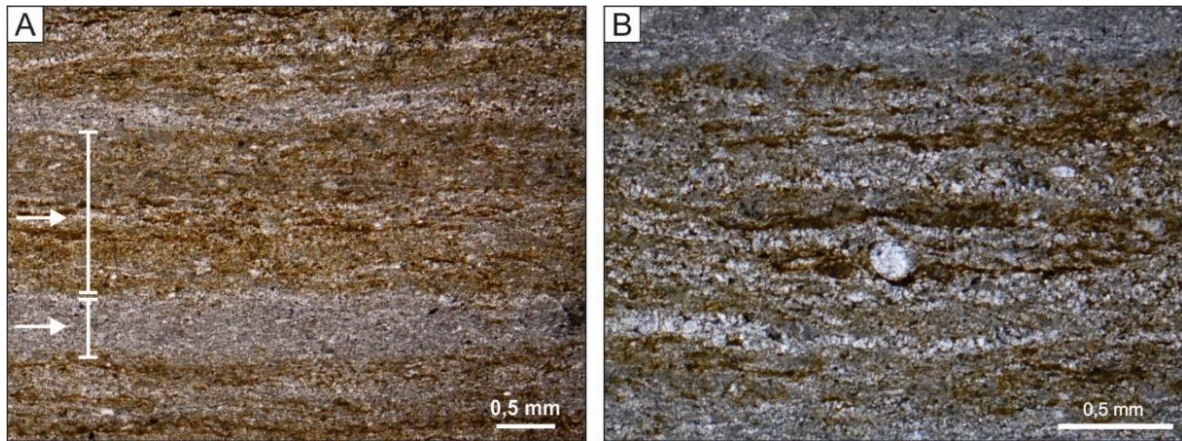


Figura 13 - Fácies *mudstone* laminado (MI). A) Laminação marcada pela alternância de lâminas submilimétricas de micrita e lâminas de calcita microespática; B) Delgadas lâminas organo-argilosas oxidadas marcando a laminação da rocha com níveis deformados no entorno de ostracodes.

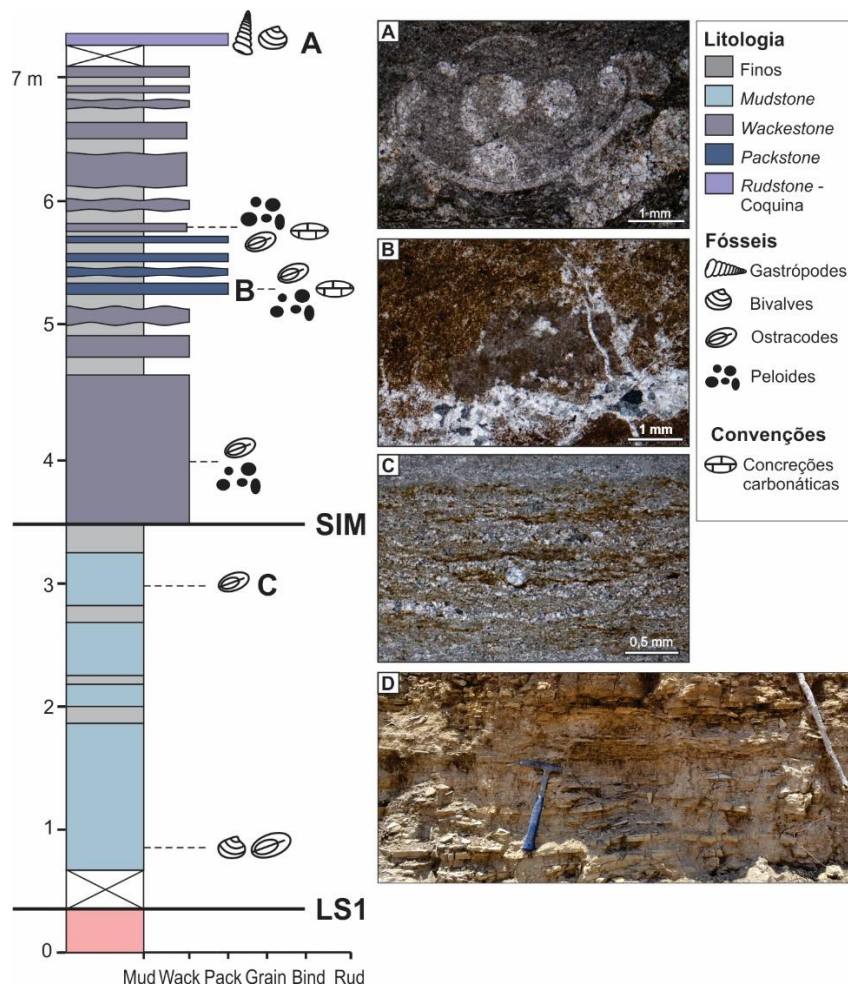


Figura 14 - Seção Caldeirão Grande. A) *Rudstone*/Coquinas e calcários coquinoídes (Cq); B) *Packstone* peloidal laminado (PI); C) *Mudstone* laminado (MI); D) Vista geral do afloramento. Coordenadas: X = 324.004, Y = 9.194.457; Zona 24M).

### ***Wackestone* bioclástico**

*Descrição* - Rocha carbonática suportada pela matriz com mais de 10% de bioclastos no arcabouço, no caso predominam peloides; secundariamente ocorrem ostracodes e bivalves. A fácies de *wackestone* (W) é caracterizada por duas camadas distintas com laminação incipiente: 1) matriz constituída por peloides e/ou pellets (?) esféricos e alongados, com porções constituídas por calcita recristalizada euédrica a subédrica; 2) calcita microespática. As camadas que contêm aglomerados peloidais de textura grumosa/coagulada, não apresentando orientação preferencial, sendo os componentes mais frequentes na rocha. Localmente os peloides apresentam empacotamento denso, os quais caracterizam aspecto homogêneo, assimilando-se a uma matriz micrítica. Os ostracodes são esféricos a elípticos, sob nicóis cruzados apresentam extinção ondulante, ocorrem articulados e encontram-se dispersos na matriz micrítica. Alguns componentes apresentam porosidade móldica e intragranular, conferindo à rocha porosidade secundária (Figura 15 A). Os bivalves são raros, sendo preservados alguns exemplares com as valvas desarticuladas (Figura 15 B), estando dispersos pela matriz. Em alguns casos, restaram somente os moldes das valvas, marcados pela porosidade móldica. É importante ressaltar a ocorrência de recristalização e preenchimentos de câmaras de gastrópodes e valvas de bivalves por calcita espática.

*Interpretação* - A fácies W pode ser interpretada como produto de precipitação de lama carbonática.

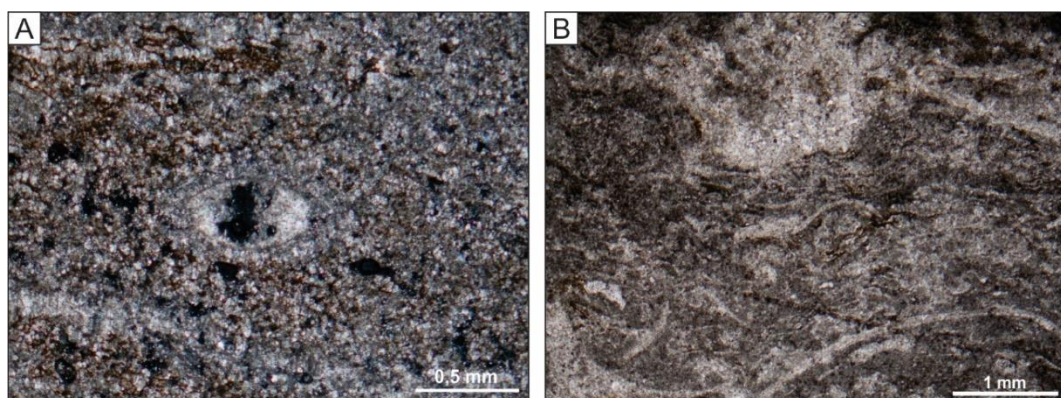


Figura 15 - Fácies *wackestone* bioclástico (W). A) Detalhe de ostracodes em meio a fácies *wackestone* bioclástico; B) Fragmentos de gastrópodes, bivalves e ostracodes, em algumas porções há evidência de recristalização e preenchimento das câmaras e valvas por calcita espática. Lâminas referentes a Seção Caldeirão Grande.

### ***Packstone peloidal com estratificação cruzada hummocky***

*Descrição* - Rocha carbonática suportada pelos grãos contendo pouca matriz em meio ao arcabouço, os grãos albioquímicos são predominantemente peloides; secundariamente ocorrem ostracodes, bivalves, fragmentos vegetais e foraminíferos, sendo denominada como *packstones* com estratificação cruzada *hummocky* (Ph), observados nas Seções Serra do Inácio (Figura 16), Pedra Branca e Serra do Mãozinha (Figura 17B). A estratificação cruzada *hummocky* (HCS) é caracterizada por uma laminação cruzada de baixo ângulo (<10-15°) suavemente ondulada, com a parte convexa para o topo, formando um montículo, e a parte côncava para a base, formando a calha (Figura 17 A/B) (Prothero & Schwab, 2014).

Os peloides ocorrem individualizados e como agregados peloidais, os quais compõem o arcabouço da rocha. As camadas que os contêm apresentam aglomerados peloidais de textura grumosa/coagulada (Figura 18 A), apresentando uma incipiente orientação.

Os ostracodes são esféricos a elípticos, sob nicóis cruzados apresentam extinção ondulante, ocorrem articulados, ocorrendo orientados segundo o acamamento da rocha e possuem tamanho submilimétricos, aproximadamente de 0,1 a 0,5 mm. Alguns componentes apresentam porosidade móldica e intragranular, conferindo à rocha porosidade secundária (Figura 18 B). Alguns ostracodes aparecem com uma cavidade, a qual se encontra preenchida por peloides e matriz micrítica.

De ocorrência secundária, os bivalves são menos frequentes comparados aos ostracodes. Ocorrem preferencialmente com valvas desarticuladas, sendo observadas as valvas com a parte convexa para cima e para baixo, orientadas preferencialmente segundo o acamamento da rocha. Em alguns casos, restaram somente os moldes das valvas, marcados pela porosidade móldica. De tamanho variado, os bivalves possuem exemplares de 0,3 até 2,5 mm. Fragmentos vegetais ocorrem preferencialmente na porção inferior da Seção Serra do Inácio. Esta fácies possui uma particularidade, por ser composta por fragmentos vegetais, minerais clásticos (Figura 18 C), peloides / pellets (?) e raros ostracodes. Consiste em um *packstone* levemente laminado onde os fragmentos vegetais encontram-se dispersos na rocha, com tamanhos variados e oxidados marcados pela coloração avermelhada típica (Figura 18 C). Outra particularidade ocorre na Seção Serra do Mãozinha pois há ocorrência pontual de um componente de foraminífero (Figura 18 D). O foraminífero tem tamanho aproximado de 0,3 mm e formato similar aos foraminíferos miliolídeos.

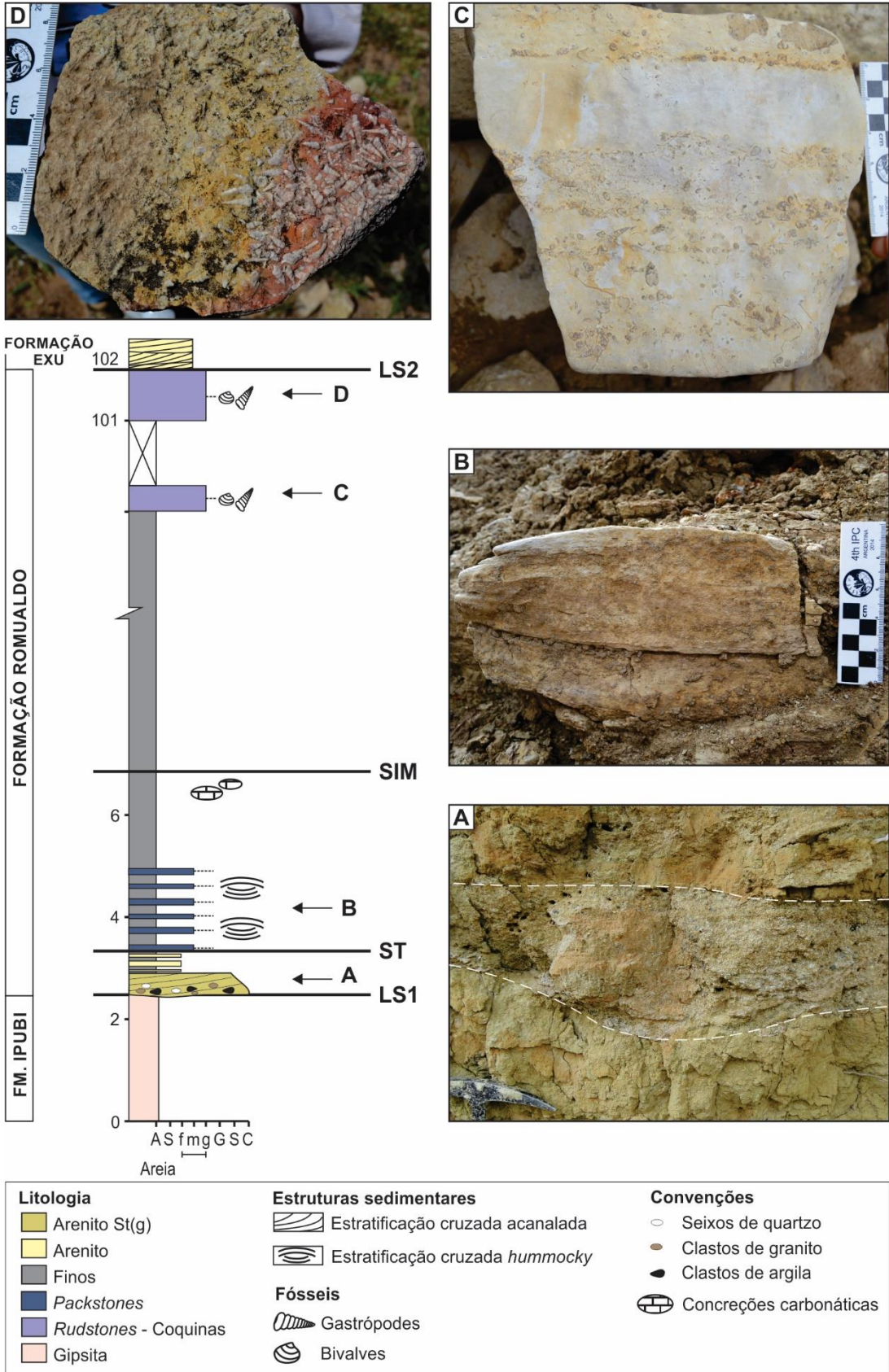


Figura 16 - Seção colunar Serra do Inácio. A) Arenito conglomerático St(g) com clastos de feldspato, quartzo e argila; B) Packstone peloidal com estratificação cruzada hummocky (Ph); C) Packstone bioclástico com gastrópodes e bivalves apresentando granodecrescência ascendente e bivalve em posição de vida; D) Coquinas de gastrópodes (Cq). (Coordenadas: X = 337.813, Y = 9.116.933; Zona 24M).

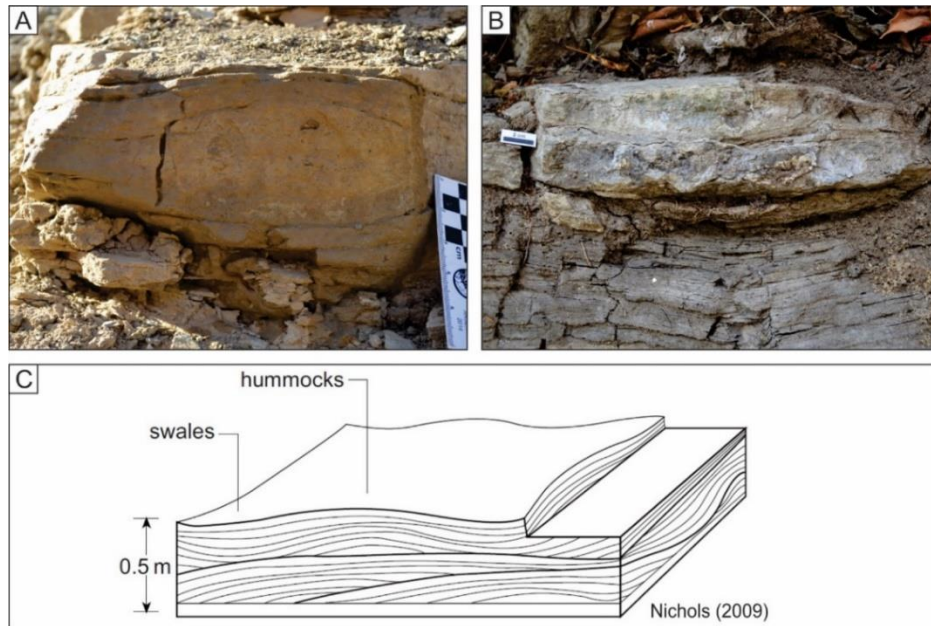


Figura 17 - *Packstone* peloidal com estratificação cruzada *hummocky* (Ph). A) Estratificação cruzada *hummocky* – Seção Serra do Inácio; B) *Packstone* com estratificação cruzada *hummocky* deformando folhelhos cinza – Seção Serra do Mãozinha; C) Esquema tridimensional representativo da estratificação cruzada *hummocky*, apresentado por Nichols (2009).

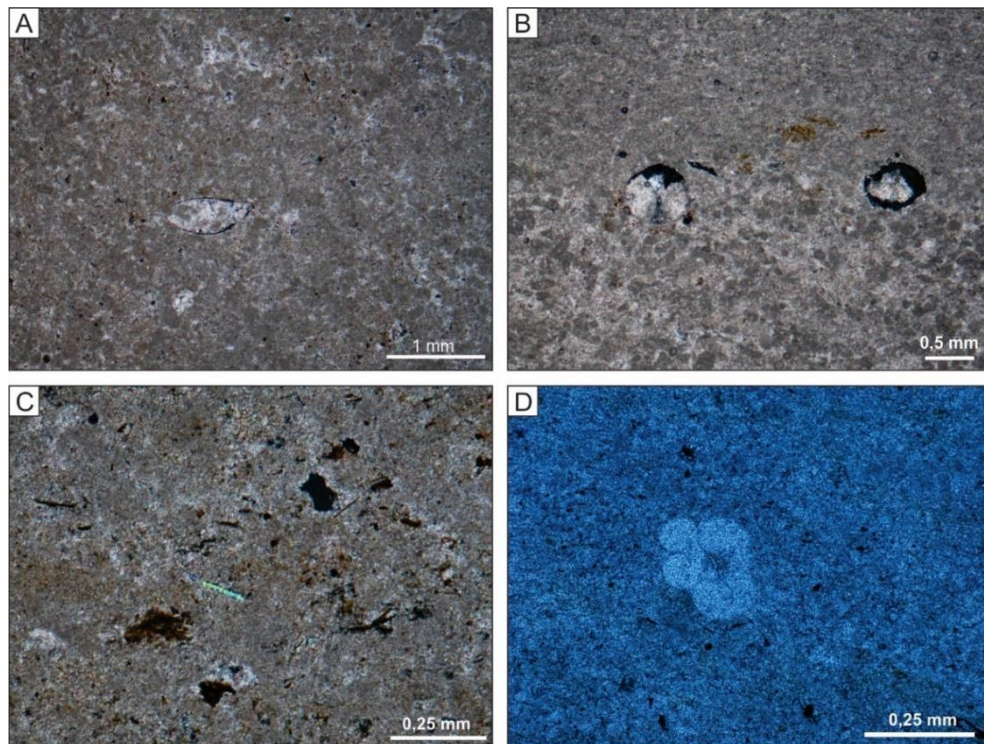


Figura 18 - Fácies *packstone* peloidal (Ph). A) Aglomerado peloidal com típica textura grumosa e ostracode apresentando porosidade móldica, estando preenchido por peloides; B) Intercalação entre camadas de aglomerados peloidais e camadas com peloides individualizados, com detalhe para ostracodes apresentando porosidade móldica; C) *Packstone* peloidal com presença de minerais clásticos e fragmentos vegetais; D) Foraminífero miliolídeo disperso na fácies *packstone* peloidal – Serra do Mãozinha. A – C: Fácies presente na Seção Serra do Inácio.

*Interpretação* - A estratificação cruzada *hummocky* está no registro sedimentar como produto de ondas de tempestade e deposição em zona de transição entre os níveis de base de ondas de tempo bom e o de ondas de tempestade. A sua geometria pode refletir uma mudança de correntes unidirecionais fortes para fluxo oscilatório (ondas de tempestade). O típico depósito que contém esta estrutura é denominado de tempestito e indicam deposição dos sedimentos em área mais proximal (águas mais rasas) (Kidwell *et al.*, 1986). A presença de foraminífero afirma influência marinha na Formação Romualdo.

### **Packstone peloidal laminado**

*Descrição* - Rocha carbonática suportada pelos grãos com matriz de micrita. Composta predominantemente peloides e secundariamente, ostracodes. A fácies de *packstone* (PI) laminado é caracterizada por três camadas distintas com laminação incipiente: 1) matriz constituída de peloides / pellets (?) esféricos e alongados, aglomerados e, por vezes, individualizados; 2) outra camada constituída por lâminas organo-argilosas oxidadas (Figura 19 A); 3) cimento espático, constituído de calcita recristalizada euédrica a subédrica. A laminação exhibe uma leve ondulação e, por vezes, ocorre no entorno de ostracodes, os quais se encontram por vezes, compactados apresentando leve deformação (Figura 19 B).

Os principais componentes são os peloides / pellets (?), os quais ocorrem tanto individualizados, quanto como agregados com textura grumosa (Figura 19 C). Ocorrem com tamanhos submilimétricos e sem estrutura interna (Figura 19 D). Secundariamente, há ostracodes com tamanhos variados, da ordem de 0,6 mm. Tais ostracodes conferem porosidade secundária a rocha pois, apresentam porosidade móldica. Os bivalves são raros, sendo preservados exemplares desarticulados, estando dispersos pela matriz. As valvas são observadas com a parte convexa para cima e para baixo, orientadas preferencialmente segundo o acamamento da rocha. De tamanho variado, os bivalves possuem exemplares de 0,3 até 2,5 mm. Em alguns casos, restaram somente os moldes das valvas, marcados pela porosidade móldica. Também foram identificados fragmentos de ossos de peixes, que ocorrem raramente e têm dimensões milimétricas.

*Interpretação* - A fácies *packstone* é interpretada como produto de precipitação de lama carbonática. Filmes delgados de argila oxidada sugerem condições oxidantes. Geralmente 5- a

20- $\mu\text{m}$  de tamanho, a calcita microespática é produzida pela recristalização (neomorfismo) da micrita, podendo atingir 30  $\mu\text{m}$  (Folk, 1962).

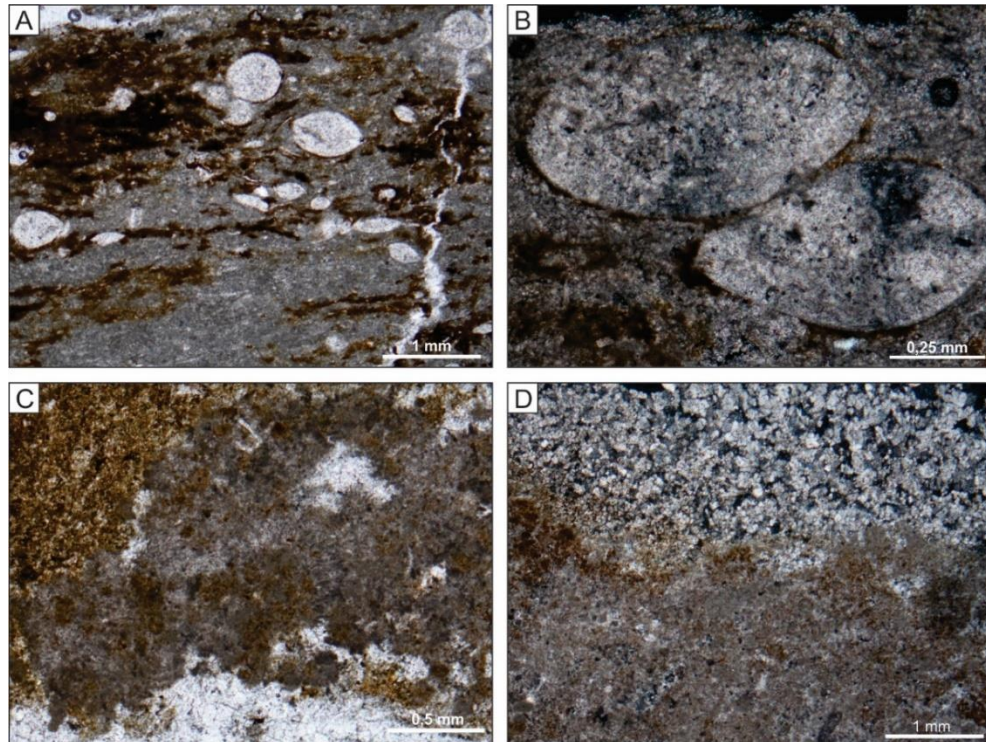


Figura 19 - Fácies típicas de *packstone* peloidal laminado (PI). A) Delgadas lâminas organo-argilosas oxidadas intercaladas com níveis ricos em agregados peloidais. Em detalhe são observados ostracodes orientados paralelamente ao acamamento da rocha; B) Detalhe de ostracodes compactados e deformados; C) Textura grumosa representada por peloides aglomerados; D) Laminação marcada pela alternância de camadas peloidais e camadas de calcita espática. Lâminas referentes a região de Caldeirão Grande/PI.

### Laminito crenulado brechado

*Descrição* - A fácies laminito crenulado brechado (Lcb) é marcada pela sua heterogeneidade, apresentando predominantemente laminitos ondulados brechados. Os laminitos ondulados são caracterizados pela alternância de laminação carbonática irregular, milimétrica a centimétrica, ocasionalmente preservando filmes orgânicos. Tais laminitos ocorrem intensamente fraturados, em forma de clastos subangulosos (Figura 20 A). Ocasionalmente, ainda que fraturados, exibem estruturas em forma de domos (Figura 20 B).

As porções carbonáticas da rocha são principalmente formadas por calcita euédrica a subédrica, micrita e peloides / pellets (?) com estrutura grumosa. Os cristais de calcita euédrica a subédrica, possuem tamanhos que variam de 0,1 a 1 mm, ocorrem nos interstícios e como preenchimento de microfraturas.

Uma particularidade desta fácies é a presença localizada de concentração de grãos clásticos de quartzo e k-feldspato, com tamanhos que variam de 0,5 mm a 1,0 mm, associados aos intraclastos peloidais (Figura 20 C). Os cristais de quartzo são anédricos, com extinção ondulante e por vezes ocorrem como quartzo microcristalino. Os cristais de k-feldspato, ainda que menos frequentes, ocorrem dispersos na rocha, em forma de cristais subédricos com bordas “corroídas”. Dentre os bioclásticos, há predominância de ostracodes e bivalves. Os ostracodes são raros na rocha, ocorrem articulados com calcita no seu interior, com tamanhos que variam de 0,5 a 1,7 mm. Os bivalves são encontrados com as valvas desarticuladas, de tamanhos da ordem de 0,3 a 2,5 mm (Figura 20 D).

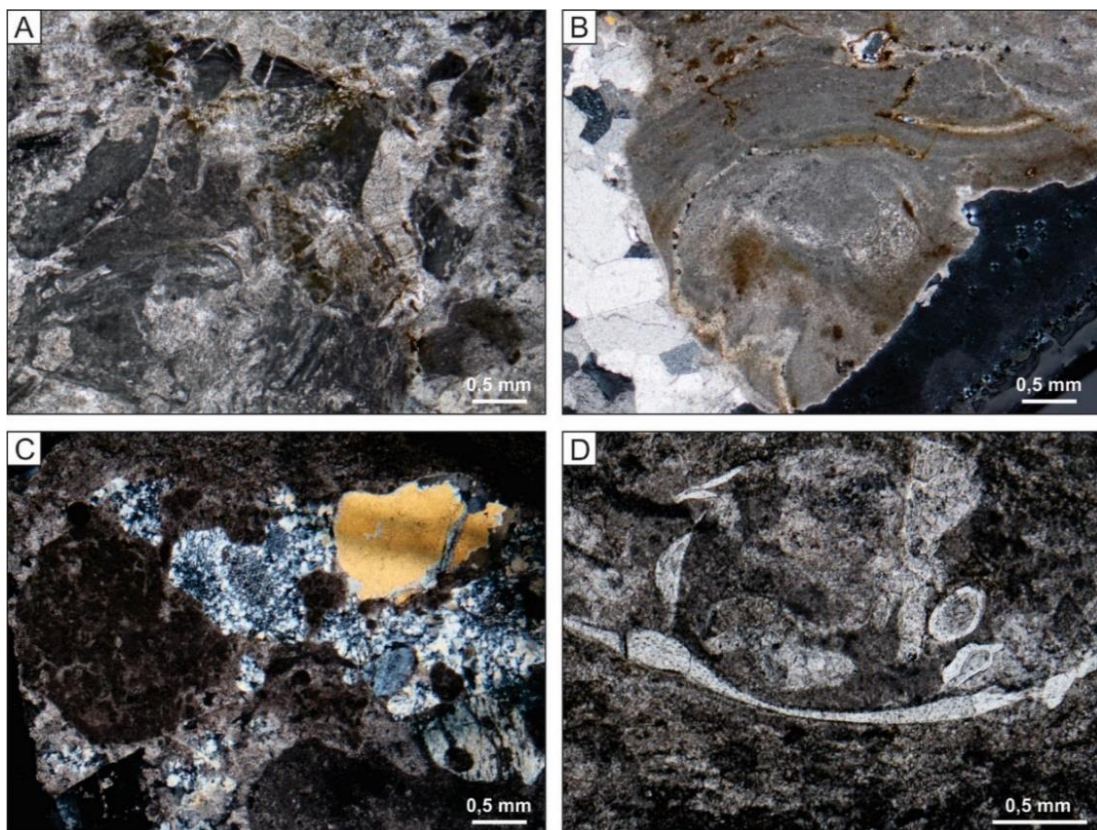


Figura 20 - Fácies laminito crenulado brechado (Lcb). A) Clastos subangulosos de laminitos com cimento espático nos interstícios; B) Laminitos apresentando estrutura em forma de domo, associado com cristais eudrais a subedrais de calcita; C) Intraclastos peloidais com textura grumosa e grãos detríticos de quartzo e k-feldspato; D) Valvas desarticuladas de bivalves.

*Interpretação* - Os laminitos são interpretados como esteiras microbiais. Estes são depósitos organossedimentares formados pela interação entre comunidades microbianas bentônicas e sedimentos detríticos ou químicos (Burne & Moore, 1987). Os componentes e aspectos



texturais mais comuns dos laminitos microbianos são micrita – formada por células e biofilmes calcificados; textura grumosa – gerada pelo aprisionamento de micrita; peloides e agregados microbiais calcificados e partículas alóctones aprisionadas por esteiras microbianas (Riding, 2000). A concentração de grãos clásticos dispersos na rocha indica um influxo de suprimento sedimentar de origem continental.

### **Ostracodito**

*Descrição* - Rocha carbonática suportada por ostracodes com matriz microcristalina ( fácies O). Caracteriza-se pela concentração de ostracodes em lâminas onduladas que atingem até 2 mm de espessura. Os ostracodes ocorrem preferencialmente articulados e secundariamente desarticulados, perfazendo uma orientação incipiente, estando orientados horizontalmente, segundo o acamamento da rocha (Figura 21 A). Em geral, os componentes de ostracodes ocorrem com calcita recristalizada em seu interior.

Em lâmina são observadas lentes delgadas de argila, as quais acompanham a laminação da rocha (Figura 21 B). Além dos ostracodes, ocorrem também intraclastos de *grainstones*. Os intraclastos são fragmentos de ostracodes desarticulados que compõem o arcabouço, sendo portando classificados como *grainstones* de ostracodes (Figura 21 C). Os mesmos encontram-se dispersos pela rocha e atingem tamanhos de até 1 mm. Demais grãos albioquímicos foram identificados, dentre eles, fragmentos de ossos de peixe. Os fragmentos são raros, com tamanhos que alcançam aproximadamente 5 mm de comprimento. Caracteristicamente, sob nicóis descruzados, apresentam coloração amarelada, tendo seu interior composto por lamelas (Figura 21 D).

*Interpretação* - A fácies ostracodito é interpretada como produto da compactação de camadas ricas em ostracodes. Devido ao soterramento e a concentração de ostracodes, foi possível gerar lâminas distintas compostas ora por ostracodes, ora por folhelhos. A origem da concentração de ostracodes pode estar relacionada a eventos de ondas de tempestade de curta duração, seguidos por eventos de parada, os quais ocasionaram a deposição de camadas de folhelhos. Os intraclastos de *grainstone* com ostracodes indica retrabalhamento de sedimento inconsolidados ou semiconsolidados. Tal retrabalhamento pode ter sido originado por eventos energéticos episódicos, tais como ondas induzidas por ação de tempestades, que causaram a erosão e transporte dos intraclastos.

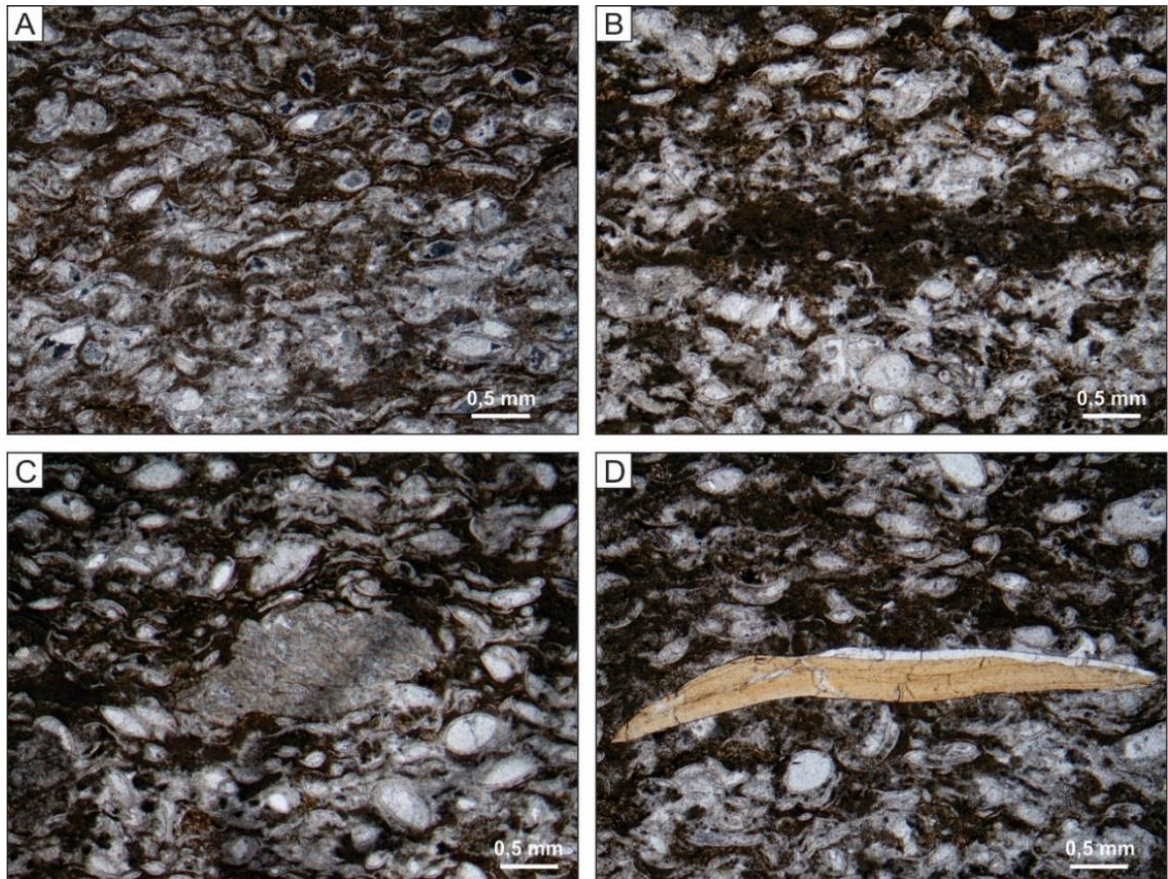


Figura 21 - Fácies ostracodito (O). A) Concentração de ostracodes em lâminas onduladas, orientados horizontalmente; B) Lentes de matriz de micrita em meio as concentrações de ostracodes; C) Intraclastos de *grainstones* com ostracodes desarticulados que sustentam o arcabouço; D) Fragmento milimétrico de osso de peixe, tendo como característica coloração amarelada sob nicóis descruzados.

## 5 – ASSOCIAÇÃO DE FÁCIES

Muitas das fácies sedimentares podem ser originadas em ambientes diversos. O ponto chave para a interpretação é analisar e associar todas as fácies geneticamente relacionadas, de modo a obter informações que as fácies individualmente não podem fornecer, ou seja, é necessário reconhecer e agrupar fácies geradas num mesmo contexto deposicional em associações de fácies. Desse modo, foram caracterizadas associações de fácies representativas de determinados ambientes deposicionais: i) arenitos de planícies costeiras (transicionais); ii) arenitos marinhos rasos (*shoreface* / transição *offshore*); iii) folhelhos marinhos rasos (*shoreface* / transição *offshore*); iv) folhelhos marinhos plataformais (*offshore*) e v) coquinas / calcários coquinoídes marinhos.

### **Arenitos de Planícies Costeiras (Transicionais)**

Esta associação de fácies ocorre predominantemente no trato de sistemas de mar baixo (TSMB), não sendo observada nos demais tratos de sistemas. É uma associação característica das regiões proximais da bacia. Os depósitos representativos desta associação são caracterizados por arenitos conglomeráticos com estratificação cruzada acanalada (St(g)), com fragmentos angulosos de granito, feldspatos e clasto de argila. A base de tais depósitos apresenta feições erosivas, as quais possui continuidade lateral da ordem de metros. Em termos de espessura, os depósitos apresentam valores variáveis, da ordem de 10 a 60 cm de espessura. Os estratos referentes a tais depósitos apresentam geometrias que se adelgaçam lateralmente. Além destas, há nesta associação fácies heterolíticas (H) compostas pela intercalação de delgadas camadas de arenitos finos com *ripples* intercaladas a finas camadas de folhelhos e siltitos, os quais, em geral, ocorrem sobrepostos aos depósitos de arenitos conglomeráticos da base. De ocorrência restrita, foram observadas fácies heterolíticas representadas por delgadas camadas de folhelhos intercalados com calcários apresentando laminação ondulada, com presença de nódulos carbonáticos esparsos. Tais depósitos apresentam espessura aproximada de 3 metros e são observados na base da Seção Pedra Branca.

### **Arenitos Marinheiros Rasos (*Shoreface* / *Transição Offshore*)**

Esta associação de fácies ocorre em todos os tratos de sistemas deposicionais, sendo predominante nos trato de sistemas de mar baixo (TSMB) e trato de sistemas de mar alto (TSMA), especificamente nas regiões distais da bacia. Estes depósitos são representados por uma associação faciológica composta por arenitos com estratificação cruzada acanalada (St), arenitos com estratificação cruzada sigmoide (Ssg), fácies heterolíticas (H). Os depósitos de arenitos e heterolíticas apresentam feições tipicamente geradas por ação de correntes de marés. Tais feições são: superfícies de reativação, clastos/bolas de argila arredondados presentes em meio aos depósitos arenosos, estratos com geometrias sigmoidais e também acamamentos *flaser*, ondulado e lenticular. Em geral, os depósitos arenosos apresentam granulação muito fina a média, bem selecionados e, por vezes, com finas lâminas de argila e micas depositadas nos *foresets*, com espessuras que variam de centimétricas a decimétricas.

### **Folhelhos Marinheiros Rasos (*Shoreface* / *Transição Offshore*)**

Esta associação é composta por fácies de finos, tais como folhelhos e siltitos. Em geral, tais depósitos ocorrem intercalados aos depósitos de arenitos marinho raso, sendo observados em todos os tratos de sistemas deposicionais. Estes depósitos são caracterizados por litologias siliciclásticas finas (folhelhos e siltitos), de coloração cinza clara, sendo associados com fragmentos milimétricos de fitoclastos, peixes, ostracodes, bivalves e gastrópodes. Há ocorrência destes depósitos ao longo de toda a unidade, desde as regiões distais até as regiões proximais da bacia. Em termos de ambientes, estes depósitos correspondem a regiões *shoreface* / *transição offshore*.

### **Folhelhos Marinheiros Plataformais (*Offshore*)**

Os depósitos de folhelhos marinhos plataformais correspondem, nos sistemas deposicionais, às associações de fácies tipicamente marinhas das regiões distais da bacia. Tais depósitos têm como característica principal a coloração cinza escura a preta, devido à presença de conteúdo de matéria orgânica. Os folhelhos apresentam finamente laminados e associados à concreções carbonáticas fossilíferas, aos fragmentos e moldes de fósseis. Os fósseis associados são bivalves, ostracodes, gastrópodes, peixes e moldes de camarões. É comumente observado que tais folhelhos marinhos plataformais sucedem os intervalos de

folhelhos marinhos rasos. Em termos de ocorrência, estes depósitos são dominantes ao trato de sistemas transgressivo, tanto em expressão vertical quanto lateral. Esta recorrência a este intervalo deve-se ao fato de ser o trato que ocorre a mais expressiva transgressão marinha e, portanto, detém a maior espessura da lâmina d'água, o que, em termos de processos sedimentares, favorece a decantação de argila e preservação de fósseis em um fundo anóxico.

### **Coquinas / Calcários Coquinoídes**

A associação de fácies contendo coquinas / calcários coquinoídes é observada essencialmente no trato de sistemas de mar alto (TSMA), parte superior da sequência deposicional. Os depósitos são caracterizados por concentrações bioclásticas, compostas essencialmente por fósseis de invertebrados, tais como bivalves e gastrópodes e, secundariamente por equinoídes. Em termos de geometria, tais depósitos apresentam base irregular, por vezes, erosivas, com camadas delgadas que variam de espessura lateralmente. A associação não ocorre como depósitos únicos, mas como uma sucessão de camadas delgadas de coquinas intercaladas com folhelhos e siltitos, tendo no seu total uma espessura que pode atingir aproximadamente 1 m. Estes depósitos possuem ocorrência expressiva ao longo da bacia, abrangendo das regiões distais à proximais, caracterizados como marco estratigráfico. Em sentido a margem da bacia, os depósitos ocorrem depositados diretamente sobre o embasamento cristalino.

## 6 – ESTRATIGRAFIA DE SEQUÊNCIAS

A Formação Romualdo alcança 100 m em espessura e compreende uma sequência deposicional limitada por duas discordâncias regionais (LS1 e LS2). Para este estudo, sete seções colunares foram medidas detalhadamente, leste e oeste, respectivamente (Figuras 22 e 23).

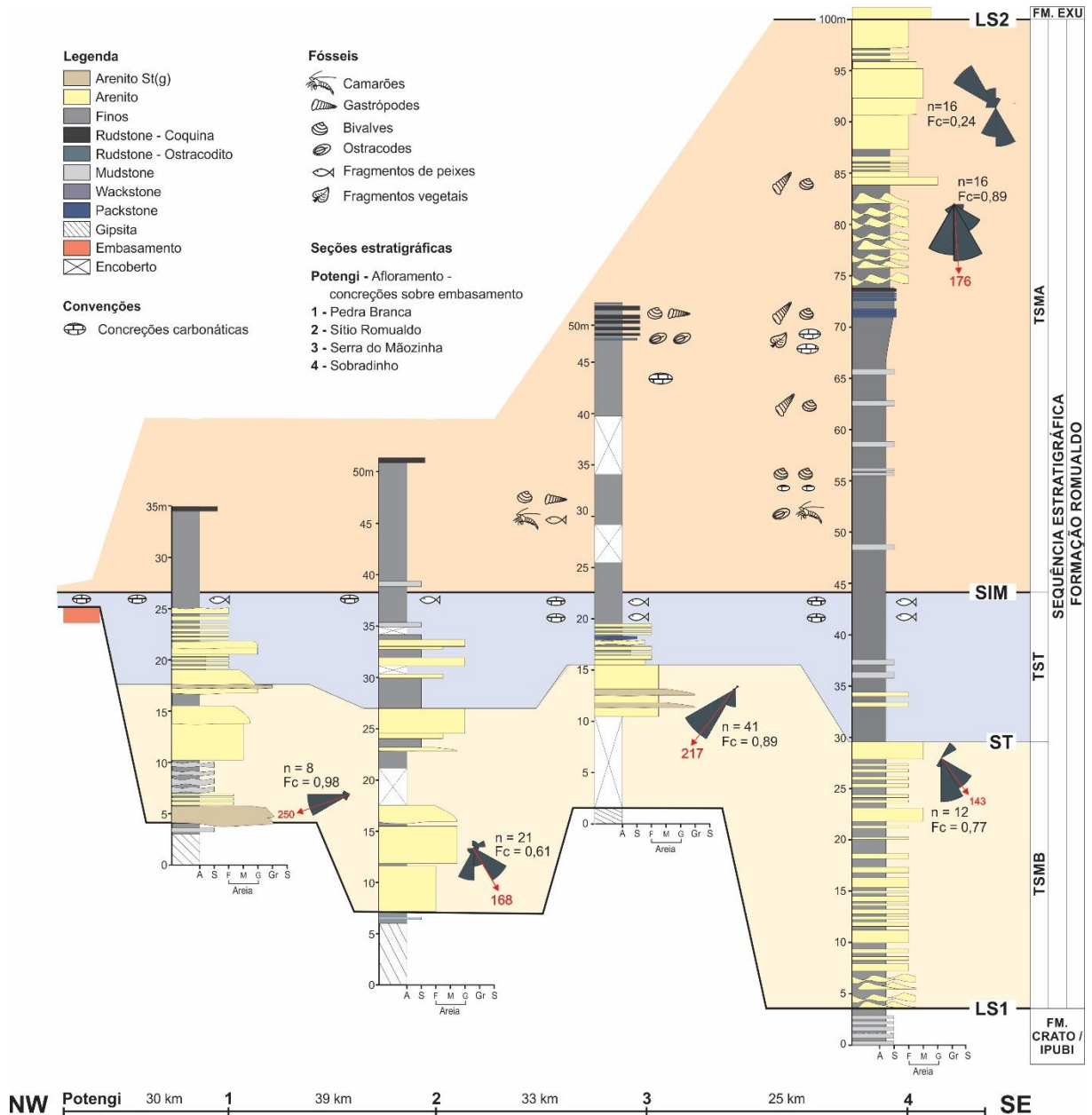


Figura 22 - Tratos de sistemas deposicionais em seções colunares levantadas na parte leste da bacia (localização da seção na figura 2).

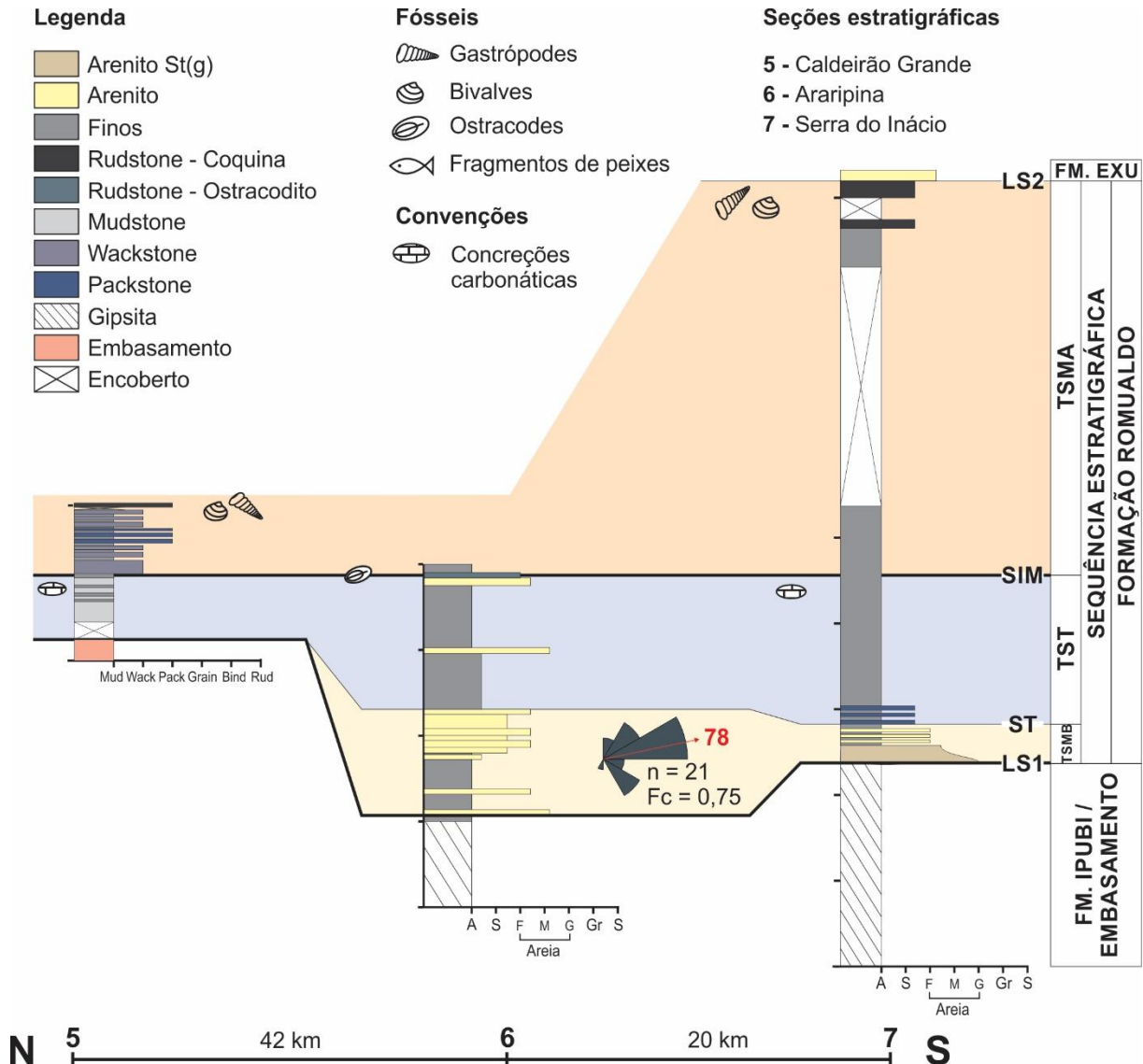


Figura 23- Tratos de sistemas deposicionais em seções colunares levantadas na parte oeste da bacia (localização da seção na figura 2).

Informações de paleocorrentes foram também adquiridas de arenitos com estratificação cruzada acanalada e foram, pela primeira vez, incorporados a análise estratigráfica da Formação Romualdo. Dentre as seções geológicas, a Seção Sobradinho registra a seção colunar mais completa já descrita para a Formação Romualdo. Esta seção, portanto, pode ser assinada como a seção-tipo litoestratigráfica para a unidade. A sucessão estratigráfica representa um ciclo transgressivo-regressivo, em que fácies de arenitos de planícies costeiras (transicionais) e arenitos de ambientes marinho raso (*shoreface* / transição *offshore*) são recobertas por folhelhos marinhos plataformais, que por sua vez são sucedidos por depósitos costeiros influenciados por marés (Figura 24).

A arquitetura da sequência deposicional exibe um acunhamento das fácies com um *onlap* costeiro em direção a norte/nordeste (Figura 24), no sentido oposto ao das paleocorrentes fluviais da Formação Barbalha, unidade basal do Grupo Santana (Assine 1994; Chagas *et al.* 2007; Assine 2007; Scherer *et al.* 2015). O paleomergulho deposicional no rumo a sul/sudeste é compatível com medidas de paleocorrentes em fácies de arenitos de planícies costeiras e daqueles influenciados por marés da sequência Romualdo (Figuras 22 e 23).

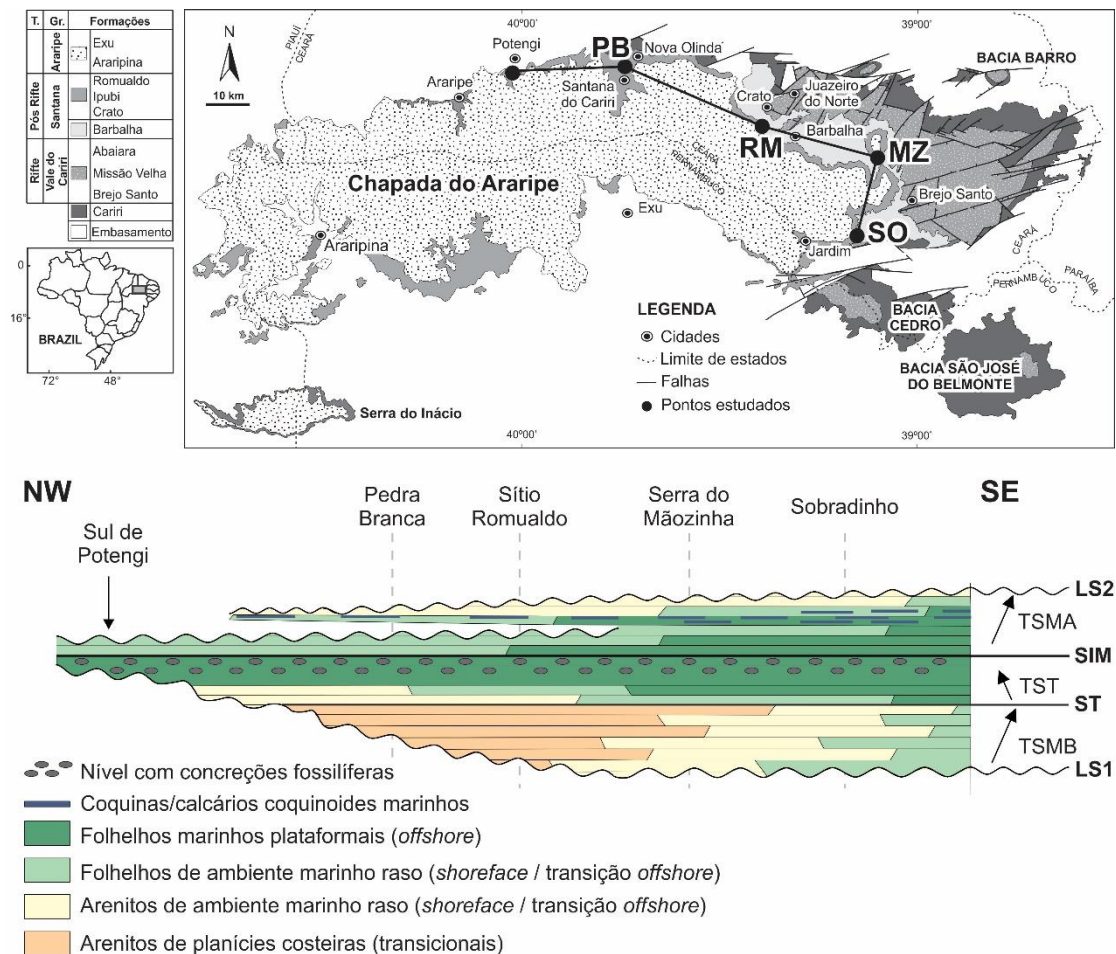


Figura 24 - Arcabouço estratigráfico da Formação Romualdo na Bacia do Araripe constituída por uma sequência deposicional limitada por desconformidades, com *onlap* costeiro de ESE para WNW (modificado de Assine *et al.* 2014).

## 6.1 Limite Inferior da Sequência

O limite inferior da sequência (LS1) é uma desconformidade nas regiões proximais da bacia, onde depósitos de planícies costeiras (transicionais) da parte inferior da Formação Romualdo estão em contato erosivo com as fácies evaporíticas da Formação Ipubi, sendo identificados na Seção Pedra Banca (Figuras 25 A/B e 26).



Em sentido ao depocentro da bacia, a sequência se inicia com fácies de folhelhos e arenitos de ambiente marinho raso (*shoreface*/transição *offshore*). Na região sudeste da bacia (Seção Sobradinho), os evaporitos da Formação Ipubi estão ausentes e os depósitos marinhos rasos repousam diretamente sobre fácies carbonáticas e siliciclásticas da Formação Crato.

O LS1 é uma superfície estratigráfica-chave que muda de expressão ao longo da bacia e corresponde à discordância no topo das camadas de gipsita como características paleocársticas, previamente reconhecida por [Silva \(1986\)](#). Lateralmente, LS1 é uma superfície coplanar com a superfície transgressiva (ST) no sentido das margens norte e noroeste da bacia, onde folhelhos de ambientes marinhos plataformais (transição *offshore/offshore*) com concreções fossilíferas da Formação Romualdo jazem diretamente sobre rochas metamórficas e ígneas do embasamento Precambriano ([Assine et al. 2014, 2016](#)).

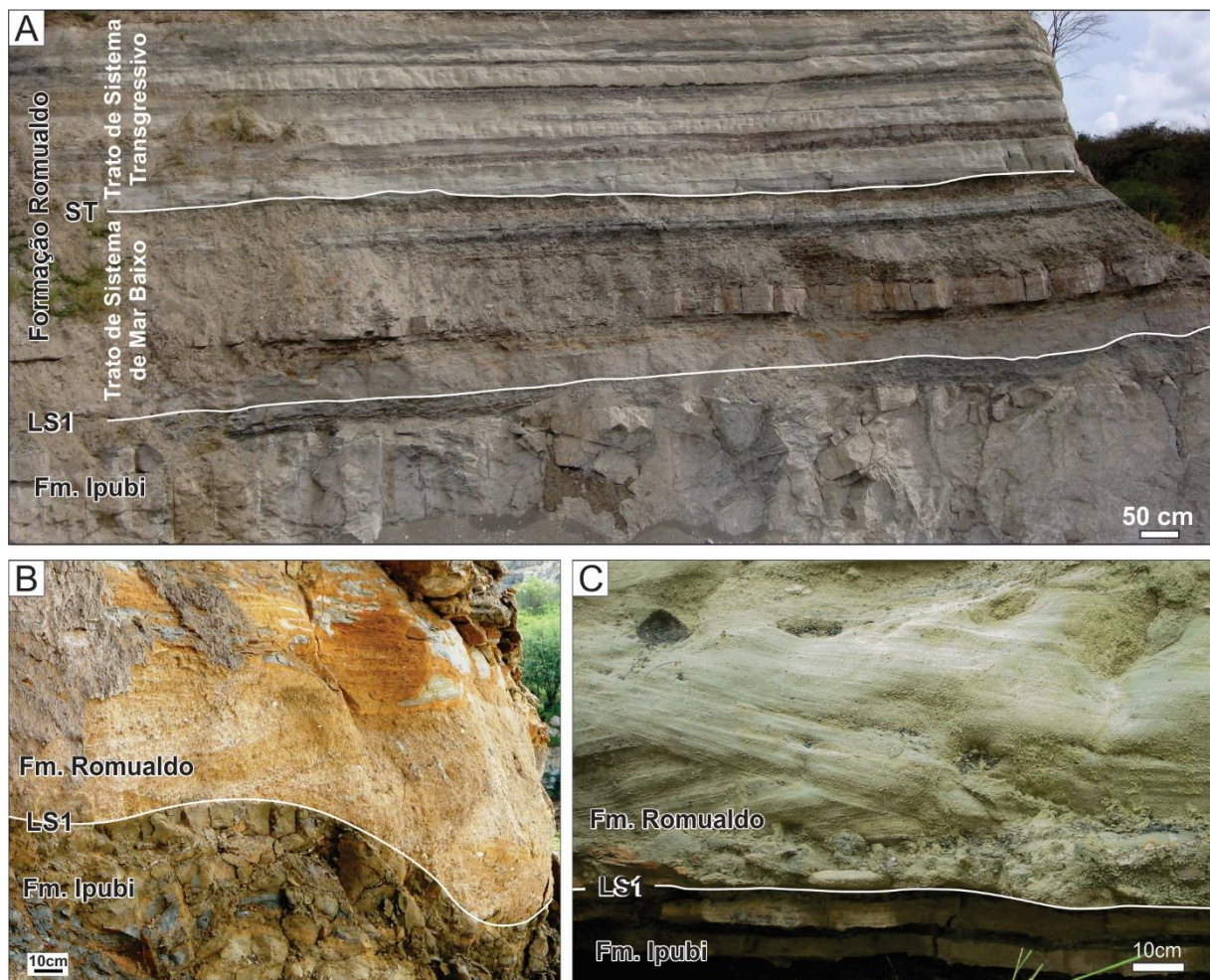


Figura 25 - Limite inferior da sequência (LS1), contato inferior entre a Formação Romualdo e Ipubi. A) Vista geral do contato entre o TSMB e TST, limitados pela Superfície Transgressiva (ST) – Frente de Lavra Mina Pedra Branca (CE); B) LS1 – Desconformidade identificada na Seção Pedra Branca, onde arenitos conglomeráticos (Formação Romualdo) sobrepõem em contato abrupto os folhelhos da Formação Ipubi; C) LS1 - Desconformidade identificada na Seção Sítio Romualdo, onde arenitos com estratificação cruzada (Formação Romualdo) jazem sobre fácies da Formação Ipubi.

A variação lateral do LS1 evidenciada por paraconformidade nas porções distais da bacia, que passa para uma desconformidade nas áreas proximais, registra uma mudança lateral na intensidade da erosão, que aumenta para a borda da bacia.

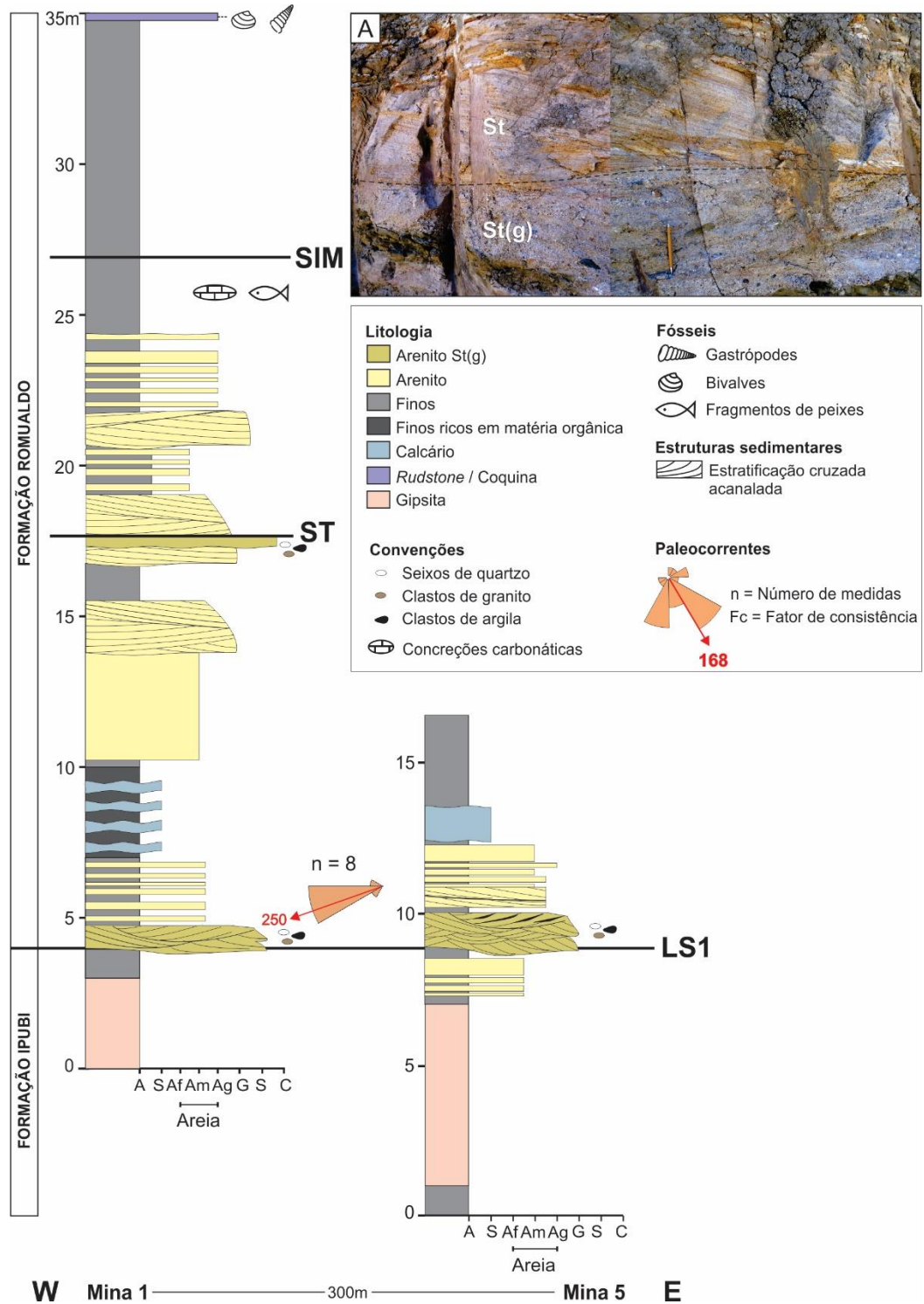


Figura 26 - Seções colunares Pedra Branca (Mineração Chaves S/A – Mina 1 e 5). A) Vista geral da frente de lavra da Mina 5, mostrando o contato litoestratigráfico entre as Formações Ipubi e Romualdo. (Coordenadas: Mina 1 - X = 420.598, Y = 9.211.802; Mina 5 - X = 420.664, Y = 9.212.086; Zona 24M).

## 6.2 Limite Superior da Sequência

Uma importante discordância define o limite superior da sequência (LS2). Esta é uma discordância regional que separa as sequências pós-rifte I e II (Assine, 2007). A sequência deposicional Romualdo é sobreposta por depósitos aluviais do Grupo Araripe (Formações Araripina e Exu). Esta discordância é comumente uma desconformidade que muda lateralmente para uma discordância levemente angular, especialmente na região oeste da bacia, onde modificações tectônicas causaram inclinação de blocos anteriormente à deposição do Grupo Araripe. Este limite é dado pelos depósitos de arenitos grossos e avermelhados da Formação Exu depositados sobre arenitos da Formação Romualdo, como observados na Seção Sobradinho. A identificação deste limite em campo é dificultada pela constante presença dos depósitos de tálus no entorno da escarpa da Chapada do Araripe (Assine, 1992).

LS2 representa uma importante discordância regional, que registra uma inversão de áreas-fonte de sedimentos na Bacia do Araripe. Paleocorrentes com sentido para oeste nas fácies fluviais da Formação Exu contrastam com paleocorrentes fluviais com sentido para sudeste no Grupo Santana (Formação Barbalha), revelando uma reorganização da paleogeografia da bacia que esteve associada com o soerguimento diferencial do Nordeste do Brasil do Albiano ao Cenomaniano (Assine, 1994; 2007).

## 6.3 Superfície Transgressiva

A superfície transgressiva (ST) define o limite superior do trato de sistema de mar baixo (TSMB). Sobre esta superfície ocorrem fácies de arenitos de planícies costeiras (transicionais) e de arenitos e folhelhos de ambiente marinho raso (*shoreface* a transição *offshore*), do trato de sistemas transgressivo (TST).

## 6.4 Superfície de Inundação Máxima

Esta superfície estratigráfica foi originalmente caracterizada como o nível de preservação das concreções carbonáticas (Assine, 1992) e, posteriormente, uma interpretação alternativa considerou que a SIM poderia estar posicionada ao nível das coquinas (Assine, 2007).

Ambos os níveis correspondem a ingressões marinhas ocorridas durante a deposição da Formação Romualdo, no entanto, o intervalo contendo as concreções carbonáticas corresponde a mais proeminente ingressão marinha na Bacia do Araripe, ou seja, a superfície

de inundação máxima (SIM). Esta interpretação é embasada tanto nas descrições das fácies sedimentares quanto nos dados palinofaciológicos e organogeoquímicos, os quais mostram elevados valores de palinomorfos marinhos e elevadas taxas de carbono orgânico total (Teixeira *et al.*, no prelo), indicativo de ambiente redutor. A ocorrência do intervalo de concreções marinhas depositados diretamente sobre o embasamento indica o mais proeminente avanço marinho na bacia. Folhelhos ricos em matéria orgânica indicam baixa energia com fundo anóxico.

A superfície de inundação máxima (SIM) é aqui considerada um marco estratigráfico regional representado por um intervalo de folhelhos pretos ricos em concreções carbonáticas fossilíferas. Esta superfície marca o contato entre os tratos de sistema transgressivo e de mar alto. O intervalo de folhelho com concreção é mundialmente conhecido como *Konservat-Lagerstätten* (Figura 9), devido à ampla diversidade e abundante assembleia fossilífera (Maisey, 1991; Martill, 1997; Kellner & Campos, 1999; Kellner, 2002; Fara *et al.*, 2005; Martill, 2007; Vila Nova *et al.*, 2011; Martill, 2001; 2011; Martill *et al.*, 2012). Os fósseis presentes nas concreções calcárias estão geralmente bem preservados, comumente registrando tecidos moles (Kellner, 2002). As concreções carbonáticas possuem tamanhos centimétricos a decimétricos e, em geral, preservam fósseis de peixes.

Os parâmetros palinofaciológicos e organogeoquímicos obtidos em análises de amostras de folhelhos com concreções da Seção Sobradinho mostram porcentagens altas de palinomorfos marinhos, e como valores altos de carbono orgânico total (COT) (Teixeira *et al.*, no prelo).

## 6.5 Trato de Sistemas de Mar Baixo

O trato de sistemas de mar baixo (TSMB) corresponde à parte inferior da sequência estratigráfica e ocorre diretamente sobre o LS1. Comumente é o contato da Formação Romualdo com as Formações Crato e Ipubi. O TSMB é limitado no topo pela superfície transgressiva (ST) marcada por mudança abrupta de fácies. As fácies de arenitos de planície costeira (transicionais), arenitos e folhelhos de ambientes marinho raso (*shoreface* / transição *offshore*) correspondem aos depósitos sedimentares típicos do TSMB (Figura 27), sendo que fácies de planícies costeiras (transicionais) dominam nas regiões proximais da bacia (Figura 24).

A sequência inicia com arenitos médios a grossos, em parte conglomeráticos, com abundantes fragmentos de feldspato e fragmentos de rochas (granito e gnaiss). Esta fácies imatura comumente ocorre como depósitos conglomeráticos com feições de erosão na base e incorporam intraclastos erodidos de camadas de fácies finas sotopostas (Figura 27A).

Fácies heterolíticas, com espessuras que variam de 1-3 m, compostas de interlaminações de folhelhos preto com abundância de ostracodes e calcários laminados (*wackestones* e *packstones* ricos em ostracodes) estão localmente presentes como na Seção Pedra Branca (Figura 27B). Segundo Dias-Brito et al. (2015b), (a) os microfósseis indicam ambientes de água doce, (b) nódulos carbonáticos ocorrem principalmente em laminações ricas em matéria orgânica e contêm aglomerados de esferulitos e esferas microbiais, (c) alguns *packstones* são compostos por conchas de ostracodes.

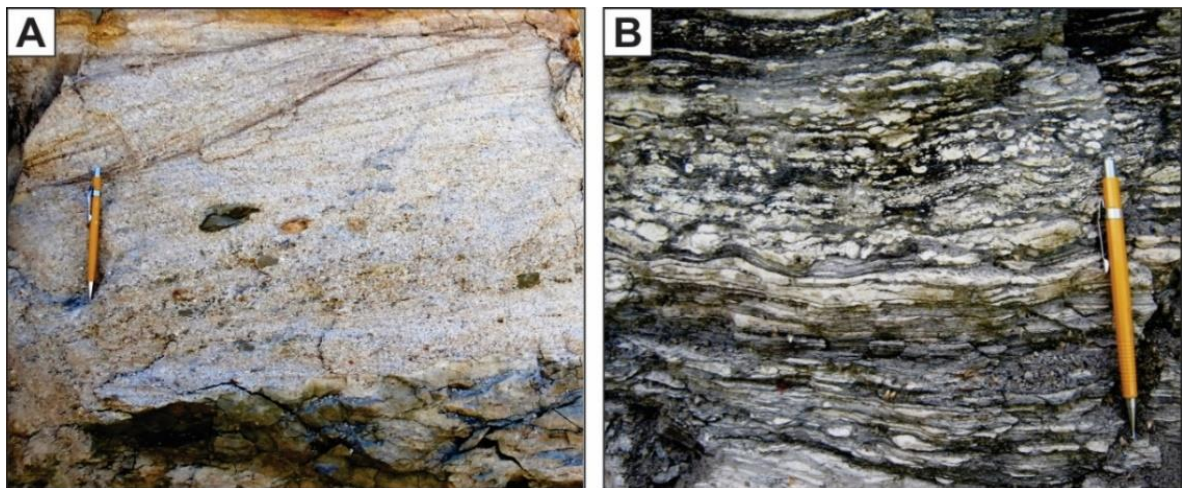


Figura 27 – Associação de fácies do TSMB. A) Arenitos de planícies costeiras (transicionais), com estratificação cruzada acanalada, mostrando clastos de argila, granito, feldspato e quartzo (Seção Pedra Branca); B) Fácies heterolíticas compostas por folhelhos intercalados com calcários e nódulos carbonáticos.

Fácies de arenitos de planícies costeiras (transicionais) e fácies de arenitos de ambientes marinhos rasos (*shoreface* / transição *offshore*) ocorrem na área da Seção Sítio Romualdo, onde, sobre as fácies evaporíticas Ipubi, a sequência inicia com nível de clastos tabulares de calcário na base (*flat-pebble carbonate conglomerate*). Sobre este nível de conglomerado delgado, interpretado como depósitos residuais transgressivos (*lag*), ocorrem arenitos com estratificação cruzada acanalada (St), que apresentam bolas de argila entre os *sets*.

Fácies de arenitos e folhelhos de ambiente marinho raso (*shoreface* / transição *offshore*) predominam em sentido a sudeste (Seção Sobradinho), nas regiões distais da bacia. Na Seção Sobradinho, a porção inferior do TSMB é principalmente composta por folhelhos

com intercalações de camadas de arenitos finos a médios, lenticulares e de espessuras decimétricas, exibindo *sets* com geometrias sigmoides e argila nos *foresets*. A recorrência de camadas de folhelhos e arenitos é tão frequente em alguns intervalos, que formam fácies heterolítica com acamamento ondulado, comumente mostrando laminações cruzadas cavalgantes. Medidas de paleocorrentes em arenitos de ambiente marinho raso da região sudeste revelaram paleofluxo no rumo sul-sudeste.

A análise das fácies do TSMB revela variação lateral da região proximal (norte/noroeste) para distal (sudeste). Esta variação é destacada pela predominância de fácies de planícies costeiras (transicionais) na área proximal, enquanto que na distal dominam fácies de arenitos e folhelhos de ambiente marinho raso (*shoreface* / transição *offshore*). A sucessão estratigráfica vertical mostra padrão agradacional a progradacional que caracteriza o trato de sistema de mar baixo (TSMB). A presença de fácies de planícies costeiras (transicionais) no início do estabelecimento do TSMB em regiões a norte-nordeste indica elevado aporte sedimentar proveniente desta região e proximidade da área fonte. O posicionamento da área fonte é reforçado pelas medidas de paleocorrentes obtidas nos estratos dos arenitos de planícies costeiras e arenitos com influência de marés do TSMB. Tais medidas possuem rumo sul / sudeste e, por vezes, paleocorrentes com sentido leste (Seção Araripina – Figura 28 B), indicando área fonte no quadrante oeste da bacia.

## 6.6 Trato de Sistemas Transgressivo

A base do trato de sistemas transgressivo (TST) é marcada pela superfície transgressiva (ST). A espessura do TST diminui um pouco de sudeste (15 m) para noroeste (10 m), onde arenitos de ambiente marinho raso gradualmente se tornam mais comuns em direção à margem da bacia (Figuras 22 e 24). O TST é caracterizado por fácies de folhelhos marinhos plataformais (*offshore*) (Figura 29A) e arenitos e folhelhos de ambiente marinho raso (*shoreface* / transição *offshore*) (Figura 29B).

O TST adelgaça para margem da bacia ao sul da cidade de Potengi, onde folhelhos marinhos plataformais (*offshore*) com concreções carbonáticas fossilíferas jazem diretamente sobre o embasamento Precambriano.

Para sudeste, folhelhos cinza/verde, intercalados com raras camadas de espessura centimétrica de arenitos finos a médios, sobrepõem as fácies do trato de mar baixo. Camadas de calcários de espessura centimétrica podem ocasionalmente ocorrer, algumas vezes apresentando

estratificação cruzada *hummocky*, em que foraminíferos miliolídeos indicam ambientes marinhos protegidos (Dias-Brito *et al.* 2015a).

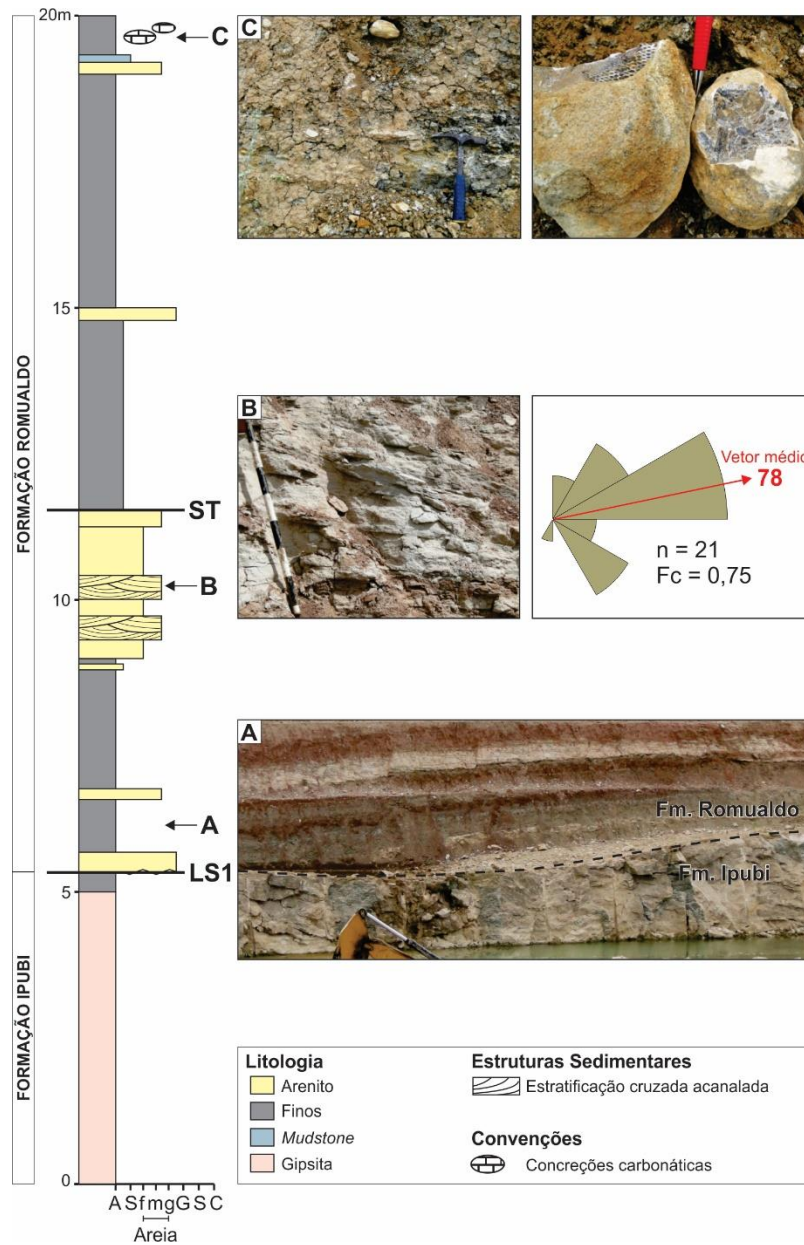


Figura 28 - Seção Araripina (Mineração Vale do Gesso – Araripina/PE). A) Contato litoestratigráfico entre as Formações Ipubi e Romualdo; B) Arenito médio com estratificação cruzada acanalada (St) e medidas de paleocorrentes com vetor médio para NE; C) Folhelho (F) esverdeado com concreções carbonáticas fossilíferas. (Coordenadas: X = 338.744; Y = 9.143.699; Zona 24M).

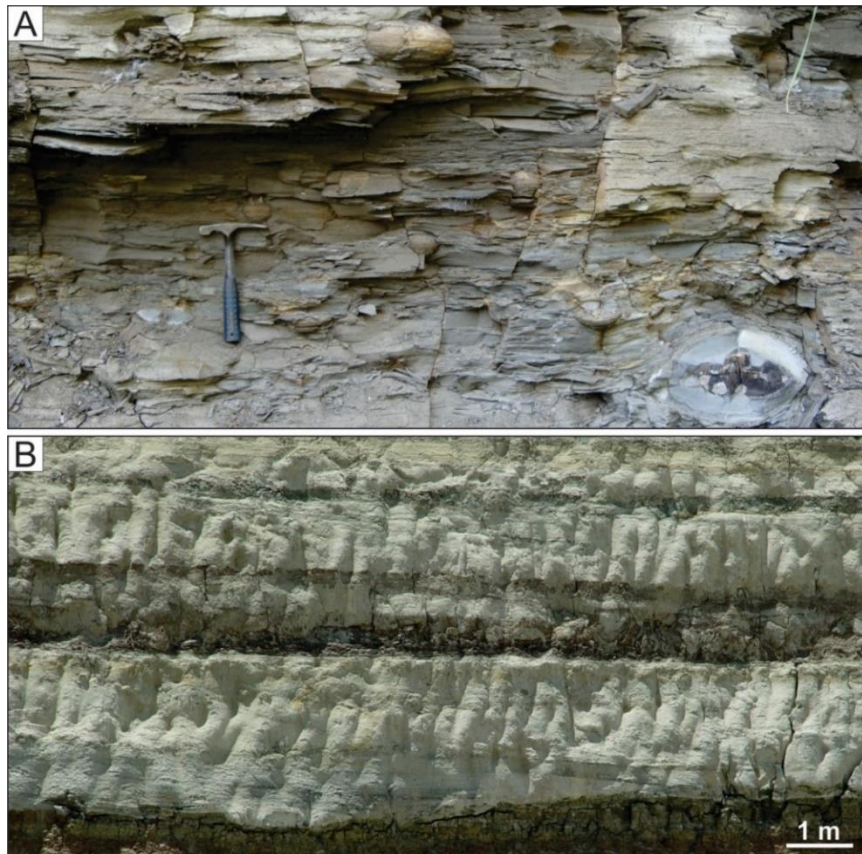


Figura 29 – Associação de fácies do TST. A) Folhelhos pretos marinhos plataformais com concreções carbonáticas fossilíferas (Seção Sobradinho); B) Arenitos de ambiente marinho raso, com estratificação cruzada acanalada (Seção Pedra Branca).

O topo é regionalmente definido pela presença de um intervalo de 3-5 m de camadas de folhelhos marinhos plataformais com concreções carbonáticas centimétricas a decimétricas, como verificado na Seção Sobradinho (Figuras 22 e 29 A), sugerindo um aumento da coluna d'água através de toda a bacia. Os folhelhos pretos transgressivos se formaram durante a rápida transgressão e expansão da bacia em sentido à margem, causando ambientes 'famintos' em água profunda por causa do aumento do nível do mar e retenção dos sedimentos (Wignall, 1991; Wignall & Maynard, 1993).

Os folhelhos marinhos plataformais contêm concreções carbonáticas fossilíferas elipsoidais (tamanhos cm-dm) (Figura 29 A), em que os fósseis encontrados são muito bem preservados, incluindo peixes, pterossauros, dinossauros, crustáceos e restos de plantas (referências citadas acima nas fácies finos (F)). Este intervalo é um dos mais importantes *Konservat-Lagerstätten* do mundo, bem conhecido devido a excelente preservação dos fósseis, particularmente peixes preservados em 3D (Martill, 1988; Maldanis *et al.*, 2016).

As faunas preservadas nas concreções incluem espécies de peixes marinhos tais como *Lepidotes* (Semionotidae), *Aspidorhynchus* [=Vinctifer] (Aspidorhynchiformes), *Microdon*



(Pycnodontiformes), *Cladocyclus* (Ichthyodectiformes), e *Rhinobatos* (Rhinobatidae), e peixes de águas salobras como os elopids do gênero *Brannerion*, *Paraelops*, *Notelops* (Silva Santos & Valença, 1968).

Fara *et al.* (2005) conduziu uma investigação muito detalhada baseada nas escavações controladas no nível de folhelhos com estas concreções carbonáticas diagenéticas, próximo a cidade de Santana do Cariri (CE) em um lugar denominado “Parque dos Pterossauros”, localizado a aproximadamente 6 km a sul da Seção Pedra Branca. Outro fato interessante descoberto é que a estratigrafia controla a distribuição dos peixes formando assembleias, do mais velho ao mais novo, dominado por (a) *Tharrhias*, (b) *Tharrhias* e *Cladocyclus* e (c) *Vinctifer*. Além disso, uma camada de calcário de aproximadamente 60 cm de espessura localmente denominada de “Matracão” e concreções afossilíferas separa a assembleia mais nova (*Vinctifer*) das duas mais velhas. Em outra escavação controlada, Vila-Nova *et al.* (2011) encontrou basicamente a mesma sucessão de tipos de concreções e assembleia de peixes na área do Sítio Romualdo (mesma localidade da seção Sítio Romualdo aqui apresentada), mas a regionalidade deste controle estratigráfico permanece a ser provado.

Um estudo detalhado da análise de fácies orgânicas de amostras sistematicamente obtidas da Seção Sobradinho (Teixeira *et al.*, no prelo) confirmou o padrão transgressivo. Palinomorfos marinhos (dinocistos) ocorrem na seção colunar, principalmente no intervalo rico em concreções fossilíferas. Folhelhos pretos com valores elevados de carbono orgânico total (COT – até 12%) e matéria orgânica predominantemente amorfa, com baixo conteúdo de fitoclastos e palinomorfos continentais, evidenciam condições de hipoxia/anoxia durante a fase de baixo aporte sedimentar e redução da entrada de detritos de plantas terrestres. Resultados similares foram verificados também na área de Pedra Branca por Heimhofer *et al.* (2008).

Apesar da queda na salinidade e entrada de água doce na bacia como previamente proposto por Beurlen (1971a), estes eventos de anoxia provavelmente tiveram grande importância para a preservação dos peixes e para a formação das concreções fossilíferas (Martill, 1988, 1997). Os eventos de mortandade dos peixes foram atribuídos à entrada de água contendo sulfeto em zona fótica euxínica (Heimhofer *et al.*, 2008). Recentemente, a gênese de concreções carbonáticas fossilíferas foi considerada produto de ações microbianas e controlada por processos combinados de fermentação e metanogênese, criando uma zona de redução de sulfato em torno da carcaça em putrefação (Heimhofer *et al.*, 2017).

Apesar do crescente conhecimento acerca da formação de concreções fossilíferas, muitos detalhes sobre os ambientes deposicionais são obscuros. Por exemplo, a presença de correntes de fundo deve ser considerada porque os carbonatos intercalados a folhelhos com concreções, como na Seção Sítio Romualdo são calcários ricos em ostracodes com estratificação cruzada *hummocky*. Estas estruturas são induzidas por ondas ou correntes de tempestades registrando eventos episódicos de alta energia durante a inundação marinha. Durante os eventos de tempestades, águas de fundo anóxico e sedimentos ricos em matéria orgânica podem ser revolvidos e isto pode ser a principal causa da mortandade em massa dos peixes. Consequentemente, estes eventos episódicos também devem ser investigados como processos chave na formação de concreções carbonáticas fossilíferas. A presença de detritos orgânicos terrestres, recuperados das concreções calcárias compostas de fusênio, é interpretada como resultante de incêndios em uma região árida (Martill *et al.*, 2012), indica ressedimentação de material proveniente das bordas da bacia.

## 6.7 Trato de Sistemas de Mar Alto

O trato de sistemas de mar alto (TSMA) está posicionado acima da SIM. Sobre o nível de concreções fossilíferas, a base do trato de sistema de mar alto é dominada por folhelhos de ambientes marinho raso (*shoreface* / transição *offshore*) e coquinas / calcários coquinoídes marinhos (Figura 30). Para o topo do TSMA são reconhecidas fácies de arenitos de ambiente marinho raso (*shoreface* / transição *offshore*).

O intervalo de folhelhos espessa no sentido do mergulho deposicional e é frequentemente coberto por camadas tabulares de calcários coquinoídes e coquinas com espessura centimétrica a decimétrica (Figura 30 A e B) que compreendem grande diversidade de fácies, comumente compostas de concentrações de moluscos densa a fracamente empacotados (principalmente conchas de gastrópodes e bivalves - Figura 30 C).

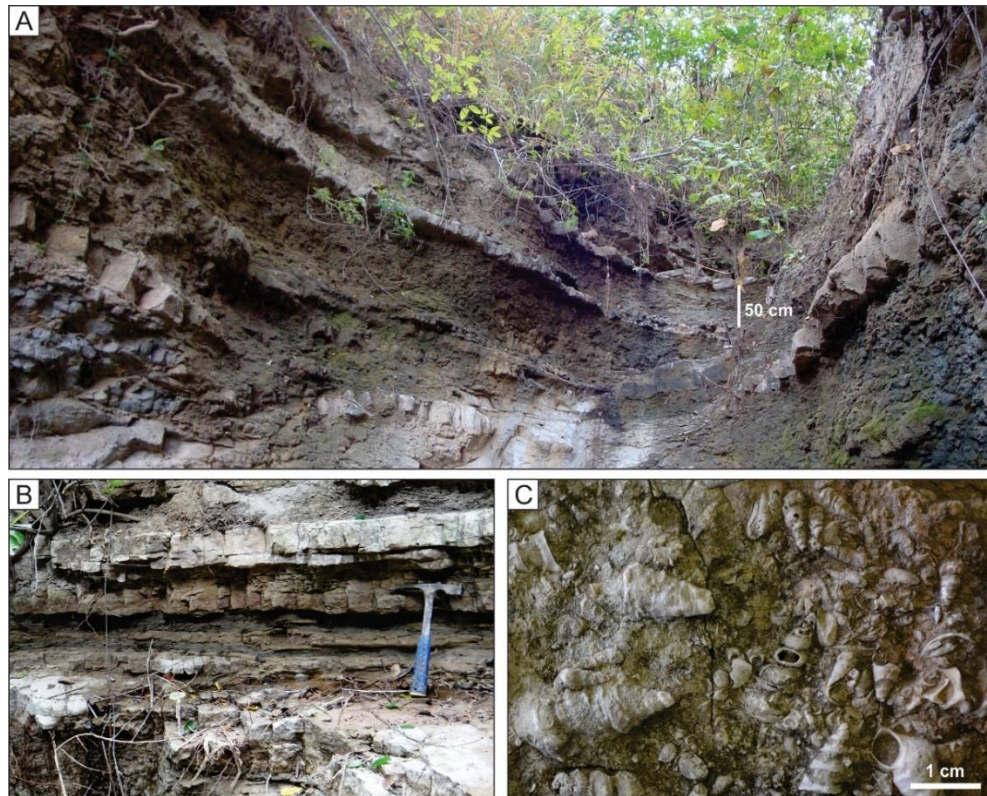


Figura 30 – Fácies de folhelhos marinhos plataformais e coquinas/calcários coquinoides marinhos, típicos do TSMA. A) Camadas tabulares de coquinas e calcários coquinoides com espessura cm-dm intercaladas com folhelhos marinhos plataformais pretos (Seção Sobradinho); B) Intervalo contendo camadas cm-dm de coquinas/calcários coquinoides ricos em gastrópodes e bivalves; C) Detalhe dos fósseis invertebrados: conchas de gastrópodes e bivalves.

Acima do nível de coquinas e calcários coquinoides, a sequência exibe padrão progradacional, mas as fácies superiores não são comumente preservadas como uma consequência da erosão antes da deposição de depósitos aluviais sobrepostos da Formação Exu, que gerou a discordância no topo da sequência. Além disso, as fácies progradacionais não estão bem expostas porque comumente são encobertas por depósitos de fluxo de detritos e tálus associados ao recuo das escarpas da Chapada do Araripe (Morales & Assine, 2015).

As espécies de ostracodes recuperados de um intervalo correlacionável no poço 1-PS-12, amostras MP-1075 e MP-1076 (Figura 31) são coerentes com um corpo de água com salinidade flutuante (Antonietto *et al.*, 2012).

Figura 31 – Correlação da seção Sobradinho com o poço 1-PS-12. (Coordenadas do poço: X = 459.760; Y = 9.171.730; coordenadas da seção: X = 481.953; Y = 9.162.842; Zona 24M) (localização da seção e do poço na figura 2).

A Seção Sobradinho é a mais completa já descrita para a Formação Romualdo e elemento chave para o entendimento do TSM. Descrição detalhada das fácies, com amostragem sistemática e análise de fácies orgânicas (Teixeira *et al.*, no prelo), permitem

reconhecer quatro diferentes fases e interpretar mudanças ambientais durante o trato de mar alto (Figura 32).

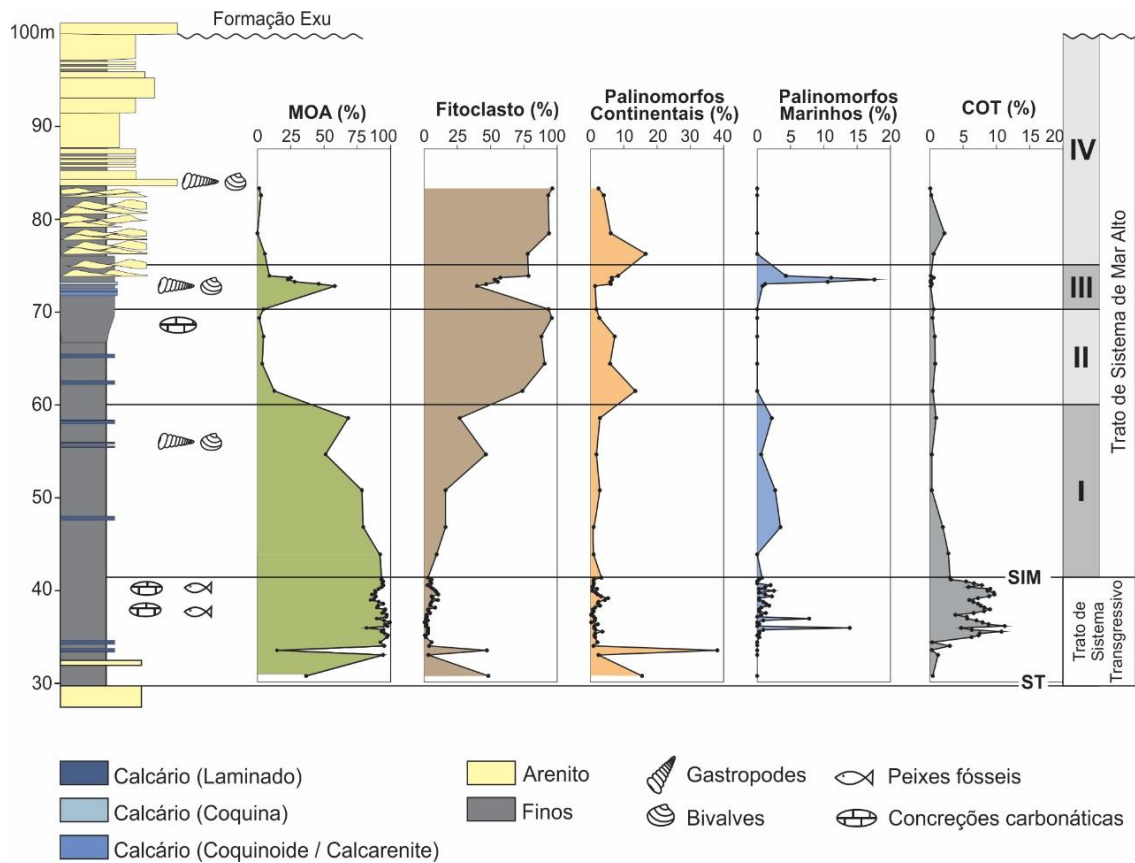


Figura 32 - Parâmetros organoquímicos e palinológicos de amostras da Seção Sobradinho (modificado de Teixeira *et al.*, no prelo).

O espaço de acomodação criado durante a transgressão foi progressivamente preenchido durante um período de agradação e aumento lento do nível do mar (fase I). O conteúdo fóssil (dinocistos, bivalves e gastrópodes) é evidência da sedimentação em ambientes marinhos, embora a presença mais comum de fitoclastos em direção ao topo indica aumento do suprimento de sedimentos continentais e afluxo de água doce das áreas circundantes emersas.

Sucedendo a fase de agradação, ocorre progradação durante nível do mar estacionário (fase II). Na região distal da bacia (Seção Sobradinho – Figura 32), o desaparecimento abrupto de palinomorfos marinhos e o aumento considerável de palinomorfos continentais, as baixas porcentagens de MOA (Matéria Orgânica Amorfa) e COT (Carbono Orgânico Total), e o elevado conteúdo de fitoclastos, também observados macroscopicamente no campo, associados com o aumento do conteúdo de silte, indicam importantes mudanças ambientais

decorrente do aumento no aporte sedimentar e afluxo de água doce, provavelmente com uma importante queda na salinidade.

Durante o período estacionário (fase II), o espaço de acomodação não é criado nos ambientes costeiros. Eventos recorrentes de processos de alta energia induzidos por ondas de marés e tempestades retrabalham sedimentos do fundo de mar raso. A ressedimentação produziu distintas camadas de concentrações bioclásticas dependendo da profundidade, características do fundo e geografia da costa, sobretudo moluscos (gastrópodes e bivalves) dominam. Folhelhos intercalados com coquinas e calcários coquinoídeos são ricos em palinórfos marinhos e MOA (Figura 32), validando este intervalo como um importante marco estratigráfico durante período estacionário do nível do mar. Depósitos da Fase II podem ser erodidos por processos marinhos (fase III).

As camadas de coquinas são concentrações fossilíferas complexas suportadas por bioclastos, algumas com base erosiva e gradação normal indicativa de tempestitos (Sales, 2005; Soares, 2012; Prado *et al.*, 2014; 2015; 2016). Muitos tipos diferentes de concentrações de conchas repousam sobre superfícies de ravinamento (Assine, 2007). Camadas tabulares ricas em conchas, com espessuras centimétricas a decimétricas estão presentes na Seção Sobradinho, tanto de calcários coquinoídeos ou coquinas, como de arenitos híbridos constituídos por conchas dispersas em uma matriz de areia de quartzo e bioclastos.

Coquinas em sentido ao topo, a sucessão estratigráfica é progradacional (fase IV). Este final do TSMA é parcialmente preservado, pois os depósitos foram removidos pela erosão antes da sedimentação dos depósitos aluviais da Formação Exu (Assine *et al.*, 2014). A única seção onde o final do TSMA foi medido é a Seção Sobradinho, em que o padrão estratigráfico mostra típica progradação granocrescente ascendente (Figura 31), com ausência de palinórfos marinhos e um grande volume de palinórfos continentais e fitoclastos (Figura 32).

Os depósitos da parte superior do TSMA são arenitos de ambiente marinho raso (*shoreface / foreshore*) (Figura 33) e fácies heterolíticas formados sob a influência de correntes de maré. A evidência de raseamento e continentalização em sentido ao topo do TSMA é comprovada pela ocorrência de moldes de fósseis vegetais em arenitos (Figura 33 B).

O acamamento em fácies heterolíticas varia de ondulado a *flaser* dependendo do conteúdo de argila, em que a cor pode ser preta (COT >2%) ou verde. Arenitos com acamamento lenticulares dominam localmente e revelam paleocorrentes para sul. Arenitos

finos sigmoides ocorrem intercalados com fácies heterolíticas e comumente apresentam *drapes* de argila nos *foresets* de cruzadas acanaladas e clastos de argila dispersos ou concentrados na superfície entre os *sets*. Cruzadas sigmoides tendem a se horizontalizar na base, passando lateralmente para fácies heterolíticas. Arenitos predominam no topo e registram padrão bimodal de paleocorrentes orientado NNW-SSE. Notável é a presença de concentração de gastrópodes (turrítelídeos) nos *foresets* de algumas das camadas de arenitos regressivos.

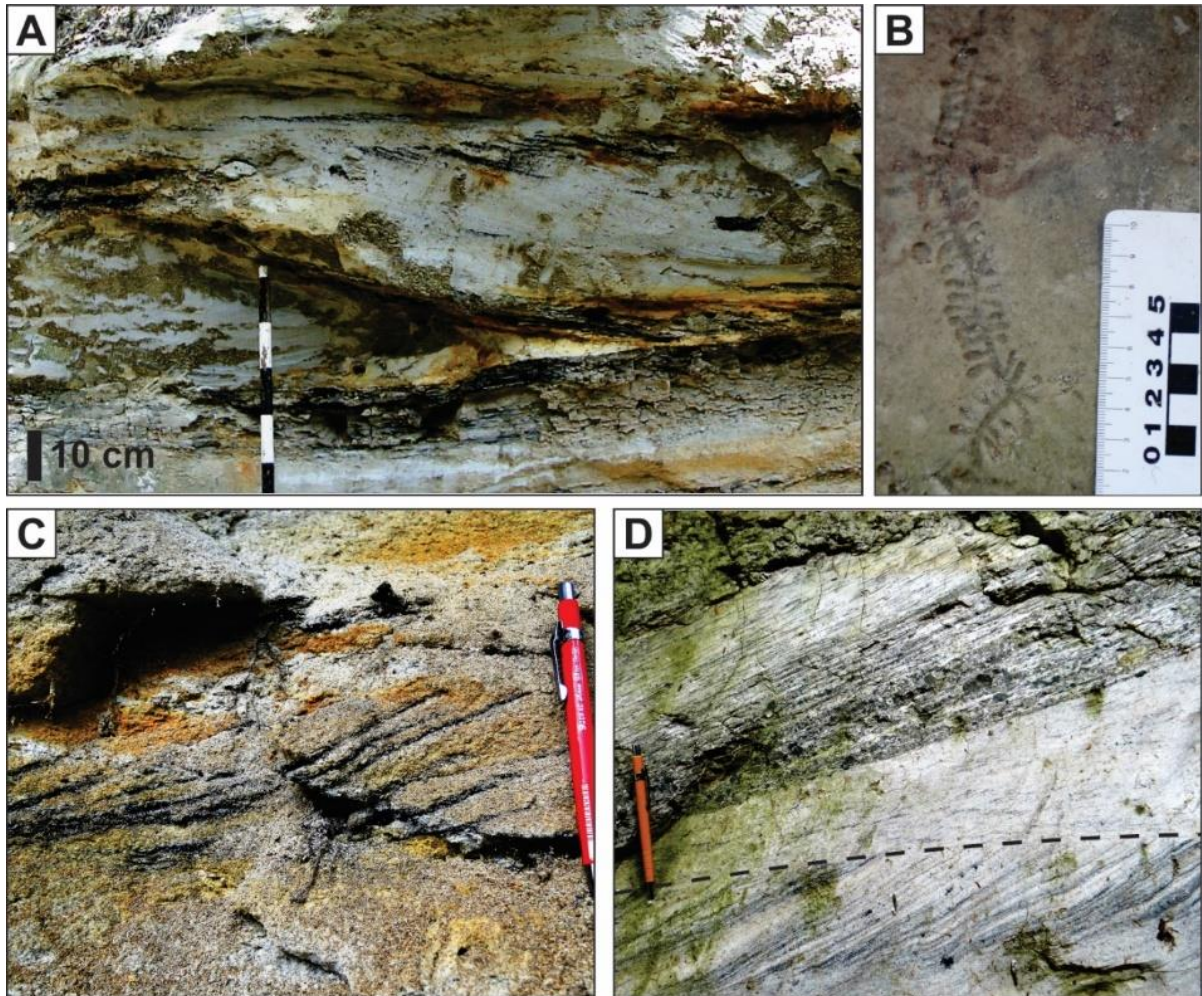


Figura 33 – Associação de fácies do TSMA. A) Arenitos sigmoides com drapes de argila e detritos de plantas; B) Moldes de vegetais em arenitos; C) Concentração de micas sobre os foresets; D) Drapes de argila sobre foresets das estratificações cruzadas, evidenciando superfície de reativação.

## 6.8 Representação tridimensional idealizada dos tratos de sistemas

A identificação das superfícies-chave permitiu identificar três tratos de sistemas deposicionais para a Formação Romualdo: i) trato de sistemas de mar baixo; ii) trato de sistemas transgressivo e iii) trato de sistemas de mar alto, interpretados em blocos diagramas (Figura 34).

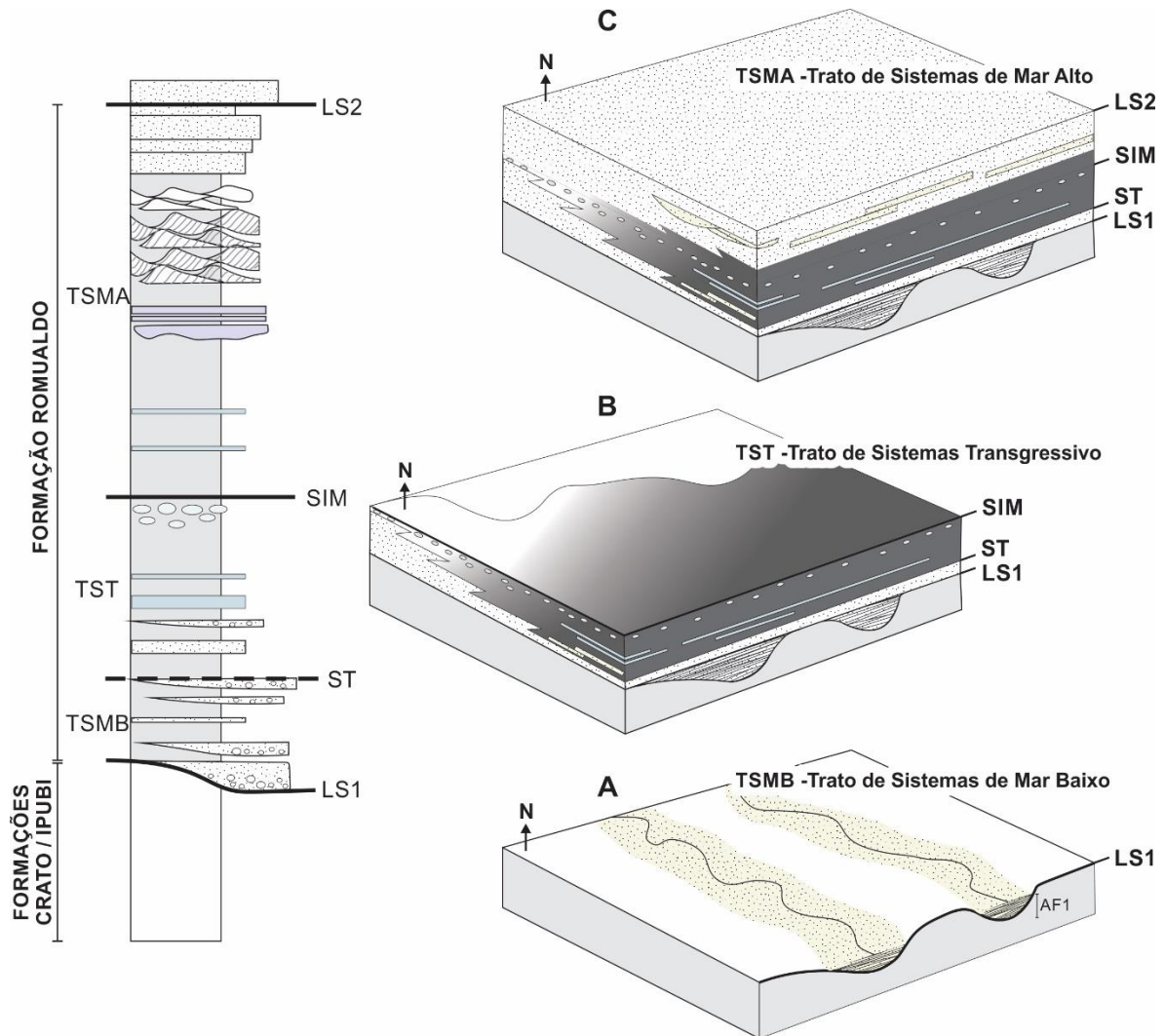


Figura 34 - Blocos diagramas dos tratos de sistemas pertencentes a seqüência estratigráfica da Formação Romualdo. A) Esquema do Trato de Sistema de Mar Baixo (TSMB) com indicação do limite inferior LS1; B) Esquema do Trato de Sistema Transgressivo (TST) com indicação das superfícies-chave LS1, ST e SIM; C) Esquema do Trato de Sistema de Mar Alto (TSMA).



## 7 - PALEOGEOGRAFIA

O Cretáceo foi período de excepcional elevação do nível do mar (Haq *et al.*, 1987; Skelton, 2003; Hart *et al.* 2016), com evidências no registro sedimentar das principais margens continentais (Cooper, 1977; Matsumoto, 1980), inclusive na margem continental brasileira.

O mar pode ter invadido a Bacia do Araripe pelo norte, via Bacias do São Luís e Parnaíba (Beurlen, 1963, 1966; Braun, 1966; Arai *et al.* 1994 e Arai, 2014); pelo nordeste via Bacia Potiguar (Beurlen, 1962; Lima, 1978 e Viana, 1998), ou pelo sudeste, via Bacia Sergipe-Alagoas (Mabesoone & Tinoco 1973; Assine 1994) (Figura 35). Conseqüentemente, a paleogeografia deposicional das bacias interiores do Nordeste do Brasil, em especial a Bacia do Araripe, deve ser reinvestigada, sob aspecto do entendimento da transgressão marinha e da sucessão estratigráfica e variações espaciais dos sistemas deposicionais da Formação Romualdo.

As primeiras evidências de ingressão marinha durante o Eoaptiano ocorreram na margem leste brasileira, caracterizada principalmente pela presença do “evaporito Paripueira”, na Bacia de Sergipe-Alagoas (Ojeda, 1982) e de dinoflagelados (*Subtilisphaera*) associados à palinozona P-230 na Bacia de Almada (Lana & Pedrão, 2000). Na Formação Lagoa Feia da Bacia de Campos, Silva-Telles *et al.* (1994) descreveram as primeiras descobertas de foraminíferos em níveis delgados de folhelhos do Membro Coqueiros.

Nas bacias da margem equatorial brasileira, os primeiros registros de ingressão marinha ocorreram somente no Neoaptiano, em sedimentos da Formação Codó (Bacia do Parnaíba e São Luís), do Membro Trairi da Formação Paracuru (Bacia do Ceará), das Camadas Ponta do Tubarão da Formação Alagamar (Bacia Potiguar) (Bagni, 2010). Essas formações são caracterizadas por sedimentos carbonáticos, evaporíticos e siliciclásticos finos, associados a dinoflagelados (gênero *Subtilisphaera*), foraminíferos, equinoides e moluscos marinhos (Arai & Coimbra, 1990; Beurlen, 1963 e 1966; Lima, 1978; Regali, 1989 e Regali & Santos, 1999), com alto teor de matéria orgânica.

PROVENIÊNCIA DO MAR	DEFENSORES	ARGUMENTOS FAVORÁVEIS	ARGUMENTOS CONTRÁRIOS
<b>BACIA DO PARNAÍBA</b>	Beurlen (1963) Beurlen (1966) Beurlen (1971) Medeiros (1990) Arai <i>et al</i> (1994) Bagni (2010) Arai (2014)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Semelhanças litológicas e paleontológicas entre o Gr. Santana e a Fm. Codó;</li> <li>• Evidência de equinoide no flanco sudoeste da Bacia do Araripe;</li> <li>• Diversidade de moluscos, incluindo exemplares marinhos, presentes no flanco oeste;</li> <li>• Formação Exu, sobreposta ao Gr. Santana, litologicamente semelhante a Fm. Itapecuru, sobreposta a Fm. Codó.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fm. Codó dista centenas de quilômetros do Gr. Santana, inexistindo ocorrência de registro sedimentar correlato as mesmas;</li> <li>• Mapa de isópacas da Fm. Codó não indica continuidade para sul na época da deposição;</li> <li>• Embasamento, no flanco oeste da Bacia do Araripe, era mais elevado na época da deposição, servindo como barreira ao fluxo de água entre as duas bacias.</li> </ul>
<b>BACIA POTIGUAR</b>	Beurlen (1962) Lima (1978) Viana (1998)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fácies marinhas não litorâneas em Santana do Cariri, em posição estratigráfica inferior a todas as outras ocorrências marinhas conhecidas na bacia.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sedimentos marinhos na Bacia Potiguar (<i>onshore</i>) ocorrem a partir do Turoniano;</li> <li>• Não há evidências de sedimentos marinhos de mesma idade nas bacias interiores do nordeste do Brasil, acima do Lineamento de Patos.</li> </ul>
<b>BACIA SERGIPE - ALAGOAS</b>	Mabesoone e Tinoco (1973) Assine (1990; 1994)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ocorrência de morros-testemunhos isolados entre as duas bacias com empilhamento estratigráfico semelhante (Serra do Tonã e Serra Negra);</li> <li>• Ocorrência de sedimentos marinhos de idade alboatiana na Bacia de Sergipe-Alagoas, representados pelas Fms. Muribeca e Riachuelo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Os exemplares de equinoides e quelônios da Bacia do Araripe são completamente distintas das que ocorrem ao sul, inclusive as da Bacia Sergipe-Alagoas.</li> </ul>

Figura 35 - Quadro comparativo dos sentidos de transgressão propostos para explicar os sedimentos marinhos do Grupo Santana (modificado de Bagni, 2010).

Estudos de foraminíferos nas camadas marinhas do Cretáceo da Bacia Sergipe-Alagoas indicam que houve uma ligação permanente do mar com o Atlântico Norte no final do Aptiano.

Visando o entendimento da paleodrenagem na época de deposição da Formação Romualdo, os dados coletados no presente trabalho revelaram similaridades com as medidas de paleocorrentes obtidas no trabalho de Assine (1994) e Varejão *et al.* (2016). As paleocorrentes dos estratos basais da Formação Romualdo revelam paleofluxo principal para quadrante sul (Figura 36).

Assine (1994) interpretou que a ingressão marinha na Bacia do Araripe, durante o Aptiano-Albiano, tenha sido proveniente do sul-sudeste via Bacia de Sergipe-Alagoas com base nas medidas de paleocorrentes e na correlação de sedimentos marinhos entre tais bacias. Os argumentos apresentados remetem à ocorrência de sedimentos marinhos (Formação Riachuelo) com uma ictiofauna bastante semelhante. Corroborando esta interpretação, as paleocorrentes das Formações Barbalha (Bacia do Araripe, Assine, 1994) e Marizal (Bacia do Recôncavo-Tucano, Varejão *et al.*, 2016) revelaram paleodrenagem continental para sul e sudeste. Os dados de paleocorrentes da Formação Romualdo, obtidos neste trabalho, ajustam-se satisfatoriamente a este cenário paleogeográfico, pois mostram área-fonte a norte e tendência de fluxo para sul (Figura 37).

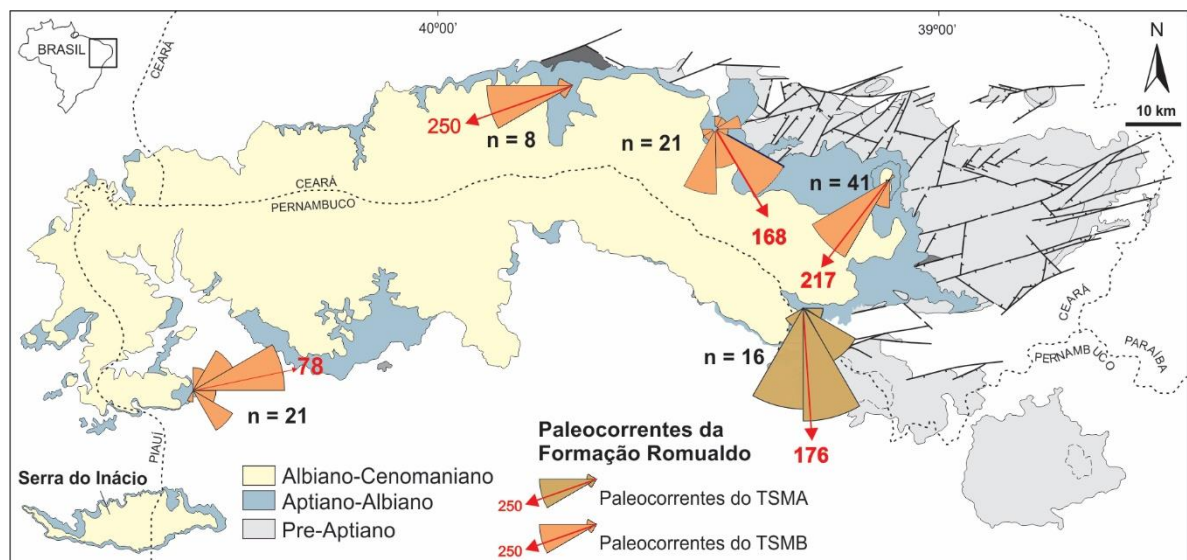


Figura 36 - Dados de paleocorrentes dos arenitos do TSMB e TSMA pertencentes à Formação Romualdo.

As informações disponíveis da Formação Romualdo mostram que a interpretação de Arai (2014) é inconsistente com transgressão proveniente de noroeste, a partir da Bacia do Parnaíba. Como pontuado no trabalho de Assine *et al.* (2016), o mapa paleogeográfico representado proposto por Arai (2014) é baseado nos contornos modernos das bacias do Araripe, Jatobá, Tucano, Recôncavo, Almada, Potiguar, São Francisco e São Luís e, os limites modernos destas bacias não representam a configuração paleogeográfica original delas, nem a área de ocorrência do mar no interior do continente durante o Aptiano / Albiano (Braun, 1966).

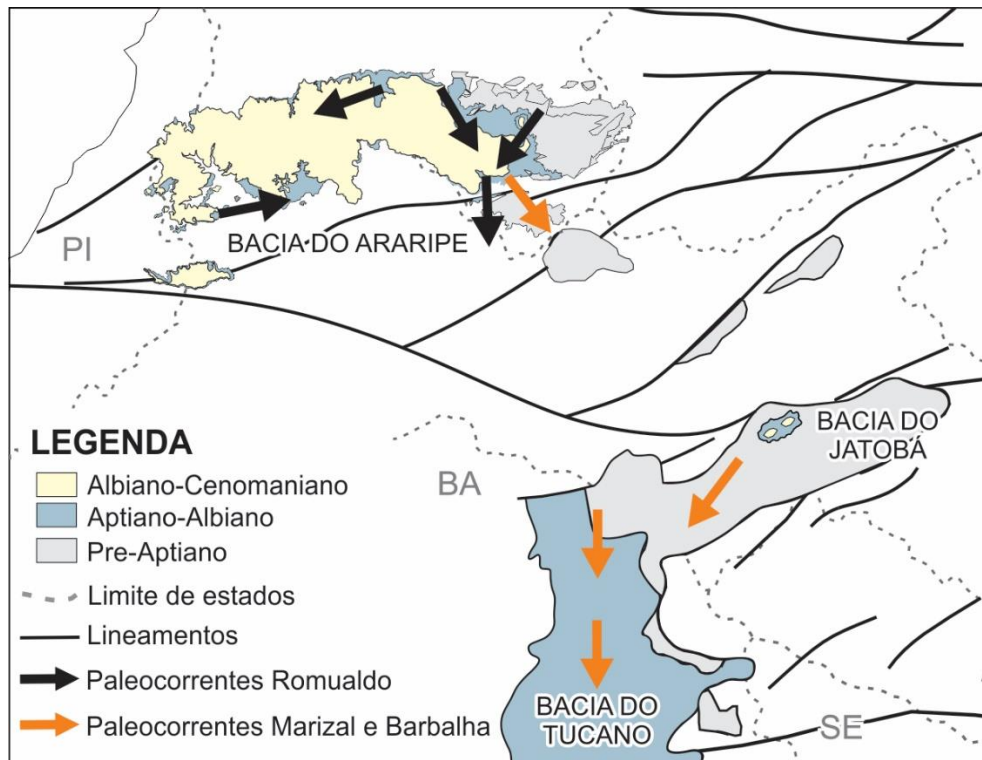


Figura 37 - Dados de paleocorrentes das Bacias Tucano, Jatobá e Araripe durante o Aptiano/Albiano. (modificado de [Varejão et al., 2016](#)).

Os dados da Formação Romualdo se coadunam com a interpretação paleogeográfica apresentada no trabalho de [Assine et al. \(2016\)](#), que é também suportada pela arquitetura estratigráfica das bacias do Parnaíba/Grajaú e Potiguar. Tal arquitetura sugere a existência de uma divisão de águas localizada entre as bacias do Araripe e Parnaíba. A arquitetura estratigráfica e as paleocorrentes da associação de fácies da Formação Alagamar (Aptiano) da Bacia Potiguar mostra paleomergulho deposicional para nordeste, o que indica paleodrenagem continental distinta da Bacia do Araripe.

[Assine et al. \(2016\)](#) sugerem um cenário paleogeográfico em que as bacias do Parnaíba e Potiguar foram separadas uma da outra e do sistema formado pelas bacias do Araripe, Tucano e Jatobá, configurando três distintas bacias no Nordeste do Brasil durante o Aptiano/Albiano. Em tal arranjo hidrográfico paleocontinental, entende-se que os sentidos das incursões marinhas devem ter ocorrido pelos vales dos rios contemporâneos, o que significa a existência de pelo menos três principais sentidos de ingressão marinha para o interior das bacias do Nordeste do Brasil durante o Aptiano/Albiano (Figura 38).

O presente conhecimento da paleoictiofauna da Formação Romualdo como de outras formações do Cretáceo Inferior no Brasil (principalmente na região Nordeste do Brasil) permite a reconstrução da paleogeografia da Bacia do Araripe relativa a outras bacias

sedimentares desta região. A ampla distribuição dos fósseis contendo peixes da Formação Romualdo é argumento contrário à hipótese que a região do Araripe foi uma bacia intracontinental isolada.

A relação paleogeográfica entre o leste da Bacia do Araripe e a Bacia de Sergipe-Alagoas foi fortalecida com a descoberta de diversos gêneros de peixes e espécies nas rochas sedimentares da Formação Riachuelo (Membro Mearim), tais como *Vinctifer comptoni*, *Rhacolepis buccalis*, *Notelops brama*, *Cladocyclus*, *Tharrhias araripis*, onde foram identificados nas rochas desta formação em sedimentos e concreções calcárias associados com pequenos amonoides (Maisey, 1991). A presença de *Vinctifer*, *Cladocyclus*, *Dastilbe* da Bacia Sergipe-Alagoas em sedimentos betuminosos confirma a possibilidade que esta bacia tenha sido conectada não somente a Bacia do Araripe, mas também com a Bacia do Recôncavo-Tucano.

Dados geológicos, estratigráficos e paleontológicos fazem com que se admita, no presente trabalho, que o *link* entre as bacias discutidas acima tenha sido resultado da transgressão marinha ocorrida do neo-Aptiano ao eo-Albiano. Considerando este cenário, a ingressão marinha alcançou a Bacia do Araripe de áreas mais ao sul através da Bacia do Tucano (Assine, 1994; Assine *et al.*, 2016) (Figura 38). Isto resultou de incremento acentuado do espaço de acomodação, não só pela subsidência flexural da bacia (Assine, 2007), mas também pela elevação eustática do nível do mar.

A arquitetura estratigráfica da Formação Romualdo mostra acunhamento das fácies com *onlap* costeiro para norte / noroeste. Toda sequência espessa em sentido ao quadrante SE, onde aumenta a espessura do TSMB e TSMA. A espessura do TST não varia significativamente, mas as fácies mudam consideravelmente. O padrão de empilhamento do TST é retrogradacional, sendo a seção mais expressiva de folhelhos pretos marinhos, tipificados por ambientes anóxicos importantes, situada na região sudeste da bacia.

Paleocorrentes para sul e sudeste medidas em depósitos de arenitos (St(g)) de planícies costeiras (transicionais) e arenitos de ambientes marinhos rasos (St e Ssg) (*shoreface* / transição *offshore*) do TSMB são consistentes com a interpretação de área fonte a norte e noroeste da bacia, e mergulho deposicional para sul. Fácies de arenitos de ambientes marinho raso são influenciados por maré mostrando paleocorrentes bimodais na Seção Sobradinho com direção NS.

Concreções encontradas no “Parque dos Dinossauros” estão alongadas e o eixo maior apresenta padrão bimodal orientado na direção NNW/SSE (Fara *et al.*, 2005). Esta orientação aparentemente reflete a ação de correntes perpendiculares a linha de costa.

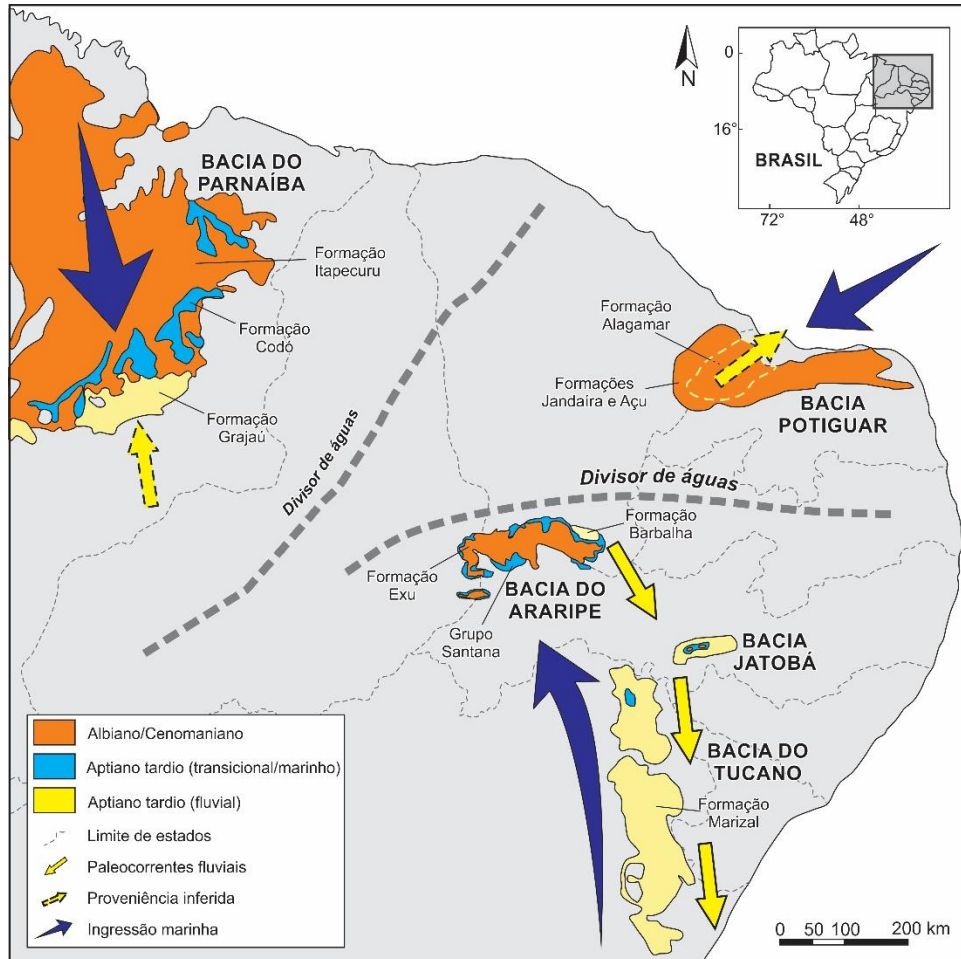


Figura 38 - Cenário paleogeográfico do Nordeste do Brasil durante o Aptiano baseado nas paleocorrentes dos depósitos fluviais, assim como na arquitetura da associação de fácies de unidades estratigráficas contemporâneas. Note a divisão de drenagens, e o provável percurso da ingressão marinha para montante ao longo dos vales fluviais (baseado de Assine 1994). Proveniência sedimentar inferida é baseada nas mudanças de fácies laterais e distribuição do tamanho dos grãos (modificado de Assine *et al.* 2016).

## 8 – CONCLUSÕES

O registro estratigráfico da Formação Romualdo é elemento chave para esclarecer os cenários paleogeográficos e paleoambientais, em resposta à fragmentação do Gondwana e abertura do Atlântico Sul. Ao fornecer a arquitetura estratigráfica da sequência Romualdo, em conjunto com dados sobre a análise de fácies, paleocorrentes e dados paleontológicos, o estudo desta unidade revelou que a Formação Romualdo marca uma importante ingressão marinha em uma ampla área do Nordeste do Brasil do neo-Aptiano ao eo-Albiano. A transgressão ocorrida causou profundas mudanças ambientais com relevantes impactos sobre as biotas locais e regionais. Este cenário é suportado por interpretações novas e dados resultantes deste trabalho:

1. A arquitetura estratigráfica da Formação Romualdo compõe uma sequência deposicional limitada por discordâncias. A Formação Romualdo repousa em desconformidade sobre as formações Crato e Ipubi, ou discordância litológica sobre rochas cristalinas do Precambriano. O limite superior da sequência é uma discordância regional, com as sequências aluviais sobrepostas pertencentes ao Grupo Araripe (Formações Araripina e Exu).

2. A sequência deposicional Romualdo compreende três tratos de sistemas deposicionais: 1) trato de sistemas de mar baixo; 2) trato de sistemas transgressivo e 3) trato de sistemas de mar alto. A associação de fácies transgressiva inclui folhelhos marinhos e é limitada por duas superfícies-chave, a superfície transgressiva (ST) na base e a superfície inundação máxima (SIM) no topo da seção de folhelhos pretos marinhos plataformais com concreções carbonáticas fossilíferas.

3. Folhelhos pretos transgressivos são fácies anóxicas com elevado conteúdo de matéria orgânica (até 13%). Além de peixes e tartarugas marinhos encontrados nas concreções, influência marinha na sedimentação é confirmada pela presença de palinomorfos (dinocistos e palinoforaminíferos).

4. O trato de sistemas de mar alto apresenta empilhamento progracional que registra tendência de raseamento no final da sequência Romualdo. Predominam arenitos e fácies heterolíticas com influência de marés, mas é notável erosão por ondas/tempestades e depósitos de coquinas/calcários coquinoídes produtos de ressedimentação, marcando uma diversidade de concentrações complexas de conchas, registrando um evento transgressivo durante o trato de mar alto.

5. Quando o mar alcançou a Bacia do Araripe no fim do Aptiano, a invasão marinha se estendeu até o interior mudando a paisagem continental e criando extenso mar epicontinental de curta duração no interior do Nordeste do Brasil. Mares epicontinentais são ambientes complexos e comumente são marcados por mudanças do nível do mar, refletindo flutuações na salinidade da água e nos valores de temperatura, e como aporte sedimentar de diferentes regiões e áreas fontes, resultando em frequentes misturas de formas marinhas, salobras e não marinhas.

6. As associações de fácies e conseqüentemente os tratos de sistemas deposicionais correspondem a um ciclo transgressivo-regressivo, com *onlap* costeiro em direção a norte e noroeste, onde fácies marinhas ultrapassam os limites da bacia, repousando diretamente sobre as rochas do embasamento cristalino. Paleomergulho deposicional para sul é também suportado por paleocorrentes de arenitos com influências de marés e fácies heterolíticas dos tratos de sistemas de mar baixo e alto.

7. Os dados sobre a arquitetura estratigráfica da unidade e paleocorrentes, em conjunto com dados geológicos e paleontológicos disponíveis, sustentam a interpretação que o mar atingiu a Bacia do Araripe vindo de sul, subindo pelos vales fluviais que drenavam para sul.



## REFERÊNCIAS

- Aires, A. S.; Kellner, A. W.; Müller, R. T.; Da Silva, L. R.; Pacheco, C. P.; Dias-Da-Silva, S. 2014. New postcranial elements of the Thalassodrominae (Pterodactyloidea, Tapejaridae) from the Romualdo Formation (Aptian–Albian), Santana Group, Araripe Basin, Brazil. *Palaeontology*, **57**: 343-355.
- Almeida, F. F. M. 1967. Origem e Evolução da Plataforma Brasileira. *Departamento Nacional de Produção Mineral, Divisão de Geologia e Mineralogia*, **241**: 36.
- Antonietto, L.S., Gobbo, S.R., Do Carmo, D.A., Assine, M.L., Silva, J.E.L.E. 2012. Taxonomy, ontogeny and paleoecology of two species of Harbinia TSAO, 1959 (Crustacea, Ostracoda) from the Santana formation, lower cretaceous, Northeastern Brazil. *Journal of Paleontology*, **86**, **4**: 659-668.
- Arai, M. 2014. Aptian/Albian (Early Cretaceous) paleogeography of the South Atlantic: a paleontological perspective. *Brazilian Journal of Geology*, **44**: 339-350.
- Arai, M.; Botelho Neto, J.; Lana, C. L. C.; Pedrão, E. 2000. Cretaceous dinoflagellate provincialism in Brazilian marginal basins. *Cretaceous Research*, **21**: 351-366.
- Arai, M. & Coimbra, J. C. 1990. Análise paleoecológica do registro das primeiras ingressões marinhas na Formação Santana (Cretáceo Inferior da Chapada do Araripe). In: 1º Simpósio da Bacia do Araripe e Bacias Interiores do Nordeste, Crato-CE, *Atas*, v.1, p.225-239.
- Arai, M.; Lana, C. C.; Pedrão, E. 1994. Ecozona Subtilisphaera spp.: Registro eocretáceo de um importante episódio ecológico do Oceano Atlântico primitivo. *Acta Geologica Leopoldensia*, **XVII**, **39**: 521-538.
- Assine, M. L. 1990. *Sedimentação e tectônica da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil*. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP - Rio Claro, Rio Claro, Dissertação de Mestrado, 124p.
- Assine, M. L. 1992. Análise estratigráfica da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, **22**: 289-300.
- Assine, M. L. 1994. Paleocorrentes e Paleogeografia na Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, **24**: 223-232.
- Assine, M. L. 2007. Bacia do Araripe. *Boletim de Geociências da Petrobras*, **15**: 371 - 389.
- Assine, M. L.; Perinotto, J. A. J.; Andriolli, M. C.; Neumann, V. H.; Mescolotti, P. C.; Varejão, F. G. 2014. Sequências Depositionais do Andar Alagoas da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. *Boletim de Geociências da Petrobras*, **22**: 3-28.
- Assine, M. L.; Quaglio, F.; Warren, L. V.; Simões, M. G. 2016. Comments on paper by M. Arai "Aptian/Albian (Early Cretaceous) paleogeography of the South Atlantic: a paleontological perspective". *Brazilian Journal of Geology*, **46**: 3-7.
- Bagni, F. L. 2010. *Correlação Estratigráfica e Considerações Paleogeográficas da Transgressão Marinha Aptiana nas Bacias da Margem Equatorial Brasileira*. Departamento de Paleontologia e Estratigrafia Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 89p.
- Batista, M. E. 2011. *Evidências de depósitos de tempestitos fossilíferos cretáceos na região de Moreilândia, borda sul da Bacia do Araripe*. Departamento de Ciências Biológicas, Universidade Regional do Cariri - URCA, 51p.
- Berthou, P. Y.; Depeche, F.; Colin, J. P.; Figueira, J. B. M.; Teles, M. S. L. 1994. New data on the ostracodes from the Crato lithologic units (lower member of the Santana Formation, Latest Aptian-Lower Albian) of the Araripe Basin (Northeastern Brazil). *Acta Geologica Leopoldensia*, **17**: 539-554.
- Beurlen, K. 1961. O Turoniano marinho do Nordeste do Brasil. *Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia*, **10**: 39-52.
- Beurlen, K. 1962. A geologia da Chapada do Araripe. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **34**: 365-370.
- Beurlen, K. 1963. Geologia e Estratigrafia da Chapada do Araripe. In: XVII Congresso Brasileiro de Geologia, Recife, *Suplemento*, p.10-47.

- Beurlen, K. 1964. As espécies dos Cassiopinae, nova subfamília dos Turritellidae, no Cretáceo do Brasil. *Arquivos de Geologia*, **5**: 1-44.
- Beurlen, K. 1966. Novos equinóides no Cretáceo do Nordeste do Brasil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **389**: 455-464.
- Beurlen, K. 1971a. As condições ecológicas e faciológicas da Formação Santana na Chapada do Araripe (Nordeste do Brasil). *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **43**: 411-415.
- Beurlen, K. 1971b. A paleontologia na geologia do Cretáceo no Nordeste do Brasil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **43**(suplemento): 89-101.
- Braun, O. P. G. 1966. Estratigrafia dos sedimentos da parte interior da Região Nordeste do Brasil (Bacias de Tucano-Jatobá, Mirandiba e Araripe). *Boletim DNPM/DGM* 236, 1-75.
- Brito, M.I. 1984. The upper Lower Cretaceous in Brazil, its divisions and boundaries. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **56**: 287-293.
- Brito Neves, B. B.; Santos, E. J.; Van Schmus, W. R. 2000. Tectonic history of the Borborema Province, Northeastern Brazil. In: Cordani, U. G.; Milani, E. J.; Thomaz Filho, A.; Campos, D. A. (ed.) *Tectonic Evolution of South America*. Rio de Janeiro, 31<sup>o</sup> International Geological Congress, 31, 151-182.
- Broin, F. 1994. Turtles from Chapada do Araripe, Early Cretaceous, Ceará State, Brazil. In: 3<sup>o</sup> Simposio sobre o Cretáceo do Brasil. Rio Claro, Sao Paulo, p.137-138.
- Burne, R. V. & Moore, L. S. 1987. Microbialites: organosedimentary deposits of benthic microbial communities. *PALAIOS*, **2**: 14.
- Carvalho, M. S. S. & Santos, M. E. C. M. 2005. Histórico das Pesquisas Paleontológicas na Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, **28**: 15-34.
- Catuneanu, O. 2006. *Principles of Sequence Stratigraphy*. Alberta, Canada, Elsevier, 375p.
- Catuneanu, O.; Abreu, V.; Bhattacharya, J. P.; Blum, M. D.; Dalrymple, R. W.; Eriksson, P. G.; Fielding, C. R.; Fisher, W. L.; Galloway, W. E.; Gibling, M. R.; Giles, K. A.; Holbrook, J. M.; Jordan, R.; Kendall, C. G. S. C.; Macurda, B.; Martinsen, O. J.; Miall, A. D.; Neal, J. E.; Nummedal, D.; Pomar, L.; Posamentier, H. W.; Pratt, B. R.; Sarg, J. F.; Shanley, K. W.; Steel, R. J.; Strasser, A.; Tucker, M. E.; Winker, C. 2009. Towards the standardization of sequence stratigraphy. *Earth-Science Reviews*, **92**: 1-33.
- Catuneanu, O.; Galloway, W. E.; Kendall, C. G. S. C.; Miall, A. D.; Posamentier, H. W.; Strasser, A.; Tucker, M. E. 2011. Sequence stratigraphy: methodology and nomenclature. *Newsletters on stratigraphy*, **44**: 173-245.
- Chagas, D. B. 2006. *Litoestratigrafia da Bacia do Araripe: reavaliação e propostas para revisão*. Departamento de Geologia Aplicada, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, Dissertação de Mestrado, 112p.
- Chagas, D.B., Assine, M.L., Freitas, F.I., 2007. Facies sedimentares e ambientes deposicionais da Formação Barbalha no Vale do Cariri, Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil *Geociências*, **26**, **4**: 313-322.
- Coimbra, J. C.; Arai, M.; Carreño, A. L. 2002. Biostratigraphy of Lower Cretaceous microfossils from the Araripe basin, northeastern Brazil. *Geobios*, **35**: 687-698.
- Cooper, M. R. 1977. Eustacy during the Cretaceous: its implications and importance. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **22**: 1-60.
- Dias-Brito, D.; Tibana, P.; Assine, M. L.; Neumann, V. H. 2015a. Calcários Lagunares Romualdo: Bacia do Araripe, Aptiano superior - Albiano inferior. In: Dias-Brito, D. & Tibana, P. (ed.) *Calcários do Cretáceo do Brasil: um Atlas*. Rio Claro, UNESP/UNESPetro, 135-157.
- Dias-Brito, D., Tibana, P., Assine, M.L., Rossetti, D.F., 2015b. Laminitos lacustres organo-calcários neoaptianos ricos em ostracodes, NE do Brasil: bacias do Araripe, Potiguar e Parnaíba, Aptiano superior (Alagoas superior). In: D. Dias-Brito, P. Tibana (Eds.), *Calcários do Cretáceo do Brasil: um Atlas*. UNESP/UNESPetro, Rio Claro, pp. 49-119.
- Embry, A. F. & Klovan, J. E. 1971. A Late Devonian reef tract on Northeastern Banks Island, NWT. *Canadian Petroleum Geology Bulletin*, **19**: 730-781.
- Fara, E.; Saraiva, A. Á. F.; Campos, D. A.; Moreira, J. K. R.; Siebra, D. C.; Kellner, A. W. A. 2005. Controlled excavations in the Romualdo Member of the Santana Formation (Early Cretaceous,

- Araripe Basin, northeastern Brazil): stratigraphic, palaeoenvironmental and palaeoecological implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **218**: 145-160.
- Folk, R. L. (ed.). 1962. *Spectral subdivision of limestones types*. American Association of Petroleum Geologists, (Classification of Carbonate Rocks, 62-85p.
- Fürsich, F. T. & Oschmann, W. 1993. Shell beds as tool in basin analysis – the Jurassic of Kachchh, western India. *Journal of the Geological Society*, **150**: 169-185.
- Haq, B. U.; Hardenbol, J.; Vail, P. R. 1987. Chronology of fluctuating sea level since the Triassic. *Science*, **235**: 1156 -1167.
- Hart, M. B., FitzPatrick, M. E., Smart, C. W. 2016. The Cretaceous/Paleogene boundary: foraminifera, sea grasses, sea level change and sequence stratigraphy. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **441**: 420-429.
- Heimhofer, U. et al. 2008. Evidence for photic zone euxinia in the Early Albian Santana Formation (Araripe Basin, NE Brazil). *Terra Nova*, **20**, **5**: 347-354.
- Heimhofer, U. & Hochuli, P.-A. 2010. Early Cretaceous angiosperm pollen from a low-latitude succession (Araripe Basin, NE Brazil). *Review of Palaeobotany and Palynology*, **161**: 105-126.
- Heimhofer, U.; Meister, P.; Bernasconi, S. M.; Ariztegui, D.; Martill, D. M.; Rios-Netto, A. M.; Schwark, L. 2017. Isotope and elemental geochemistry of black shale-hosted fossiliferous concretions from the Cretaceous Santana Formation fossil Lagerstätte (Brazil). *Sedimentology*, **64**: 150-167.
- Hirayama, R. 1998. Oldest known sea turtle. *Nature*, **392**: 705-708.
- Kellner, A. W. A. 2002. Membro Romualdo da Formação Santana, Chapada do Araripe, CE. Um dos mais importantes depósitos fossilíferos do Cretáceo brasileiro. In: Schobbenhaus, C.; Campos, D. A.; Queiroz, E. T.; Winge, M.; Berbert-Born, M. (ed.) *Sítios geológicos e paleontológicos do Brasil*. Brasília, DNPM/CPRM/SIGEP volume 1, 121-130.
- Kellner, A. W. & Campos, D. d. A. 1999. Vertebrate paleontology in Brazil--A review. *Episodes- Newsmagazine of the International Union of Geological Sciences*, **22**: 238-251.
- Kellner, A. W. A. & Campos, D. A. 2000. Brief Review of Dinosaur Studies and Perspectives in Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **72**: 509-538.
- Kidwell, S. M.; Fuersich, F. T.; Aigner, T. 1986. Conceptual framework for the analysis and classification of fossil concentrations. *PALAIOS*, **1**: 228-238.
- Lana, C. & Pedrão, E. 2000. Um episódio de incursão marinha no Eoalptiano (Eoalagoas) da Bacia de Almada, BA, Brasil. *Revista Universidade de Guarulhos, Geociências*, **5**: 89-92.
- Lima, M. R. 1978. *Palinologia da Formação Santana (Cretáceo do Nordeste do Brasil)*. Instituto de Geociências, USP, São Paulo, Tese de Doutorado, 335p.
- Mabesoone, J. M. & Tinoco, I. M. 1973. Paleoecology of Aptian Santana Formation (Northeastern Brazil). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **14**: 87-118.
- Maisey, J. G. 1991. *Santana Fossils - An Illustrated Atlas*. TFH Publishers, 459p.
- Maisey, J. G. 2000. Continental break up and the distribution of fishes of Western Gondwana during the Early Cretaceous. *Cretaceous Research*, **21**: 281-314.
- Maldanis, Lara, et al. 2016. Heart fossilization is possible and informs the evolution of cardiac outflow tract in vertebrates." *Elife* **5**:e14698.
- Manso, C. L. d. C. & Hessel, M. H. 2012. Novos equinóides (Echinodermata: Echinoidea) do Albiano da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, **42**: 187-197.
- Martill, D. M. 1988. Preservation of fish in the Cretaceous Santana Formation of Brazil. *Palaeontology*, **31**: 1-18.
- Martill, D. M. 1993. *Fossils of the Santana and Crato Formations, Brazil*. London, The Palaeontological Association, (Field Guides to Fossils: Number 5), 159p.
- Martill, D. M. 1997. Fish oblique to bedding in early diagenetic concretions from the Cretaceous Santana Formation of Brazil e implications for substrate consistency. *Palaeontology*, **41**: 1011-1026.
- Martill, D. M. (ed.). 2001. *The Santana Formation*. Oxford, Blackwell Science, (Palaeobiology II, 351-356p.

- Martill, D. M. 2007. The age of the Cretaceous Santana Formation fossil Konservat Lagerstätte of north-east Brazil: a historical review and an appraisal of the biostratigraphic utility of its palaeobiota. *Cretaceous Research*, **28**: 895-920.
- Martill, D. M. 2011. A new pterodactyloid pterosaur from the Santana Formation (Cretaceous) of Brazil. *Cretaceous Research*, **32**: 236-243.
- Martill, D. M.; Brito, P. M.; Washington-Evans, J. 2008. Mass mortality of fishes in the Santana Formation (Lower Cretaceous, ?Albian) of northeast Brazil. *Cretaceous Research*, **29**: 649-658.
- Martill, D. M.; Loveridge, R. F.; Mohr, B. A.; Simmonds, E. 2012. A wildfire origin for terrestrial organic debris in the Cretaceous Santana Formation Fossil Lagerstätte (Araripe Basin) of north-east Brazil. *Cretaceous Research*, **34**: 135-141.
- Matos, R. M. D. 1992. The Northeast Brazilian Rift System. *Tectonics*, **11**: 766-791.
- Matsumoto, T. 1980. Inter-regional correlation of transgressions and regressions in the Cretaceous period. *Cretaceous Research*, **1**: 359-373.
- Meylan, P. A. 1996. Skeletal morphology and relationships of the Early Cretaceous side-necked turtle, *Araripemys barretoii* (Testudines: Pelomedusoides: Araripemydidae), from the Santana Formation of Brazil. *Journal of Vertebrate Paleontology*, **16**: 20-33.
- Miall, A. D. 1978. Lithofacies types and vertical profile models of braided river deposits, a summary. In: Miall, A. D. (ed.) *Fluvial Sedimentology*. Calgary, Canadian Society of Petroleum Geologists, 5, 597-604.
- Miall, A. D. 1999. *Principles of Sedimentary Basin Analysis*. 3<sup>a</sup>. New York, Springer-Verlag, 672p.
- Mitchum, J. R.; Vail, R. M.; Thompson, S. 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part two: the depositional sequence as a basic unit for stratigraphic analysis. In: Payton, C. E. (ed.) *Seismic stratigraphy - applications to hydrocarbon exploration*. Tulsa, AAPG, (Memoir 26), 53-62.
- Monaco, P. 1994. Hummocky cross-stratifications and trace fossils in the Middle Toarcian of some sequences of Umbria-Marche Apennines. *Geobios*, **27**: 679-688.
- Morales, N., Assine, M. 2015. Chapada Do Araripe: A Highland Oasis Incrusted into the Semi-arid Region of Northeastern Brazil. In: B.C. Vieira, A.A.R. Salgado, L.J.C. Santos (Eds.), *Landscapes and Landforms of Brazil*. World Geomorphological Landscapes. Springer Netherlands, p. 231-242.
- Moura, M. V. 2007. *Análise Estratigráfica do Andar Alagoas na borda leste da Bacia do Araripe*. Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 74p.
- Nascimento Jr, D. R.; da Silva Filho, W. F.; Freire Jr, J. G.; dos Santos, F. H. 2016. Syngenetic and diagenetic features of evaporite-lutite successions of the Ipubi Formation, Araripe Basin, Santana do Cariri, NE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **72**: 315-327.
- Neumann, V. H. & Assine, M. L. 2015. Stratigraphic proposal to the post-rift I tectonic-sedimentary sequence of Araripe Basin, Northeastern Brazil. In: Strati 2015 - 2nd International Congress on Stratigraphy, Graz (Austria), p.274.
- Neumann, V. H. d. M. L. 1999. *Estratigrafía, sedimentología, geoquímica y diagénesis de los sistemas lacustres aptiense-albienses de la Cuenca de Araripe (Noreste de Brasil)*. Departament d'Estratigrafia i Paleontologia, Universitat de Barcelona, Barcelona, 233p.
- Nichols, G. 2009. *Sedimentology and Stratigraphy*. 2nd. Wiley-Blackwell, 419p.
- Ojeda, H. A. O. 1982. Structural framework, stratigraphy and evolution of Brazilian marginal basins. *AAPG Bulletin*, **66**: 732-749.
- Oliveira, G. R. 2007. Aspectos tafonômicos de Testudines da Formação Santana (Cretáceo Inferior), Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, **30**: 83-93.
- Oliveira, G. R. & Kellner, A. W. A. 2007. A new side-necked turtle (Pleurodira, Pelomedusoides) from the Santana Formation (Early Cretaceous), Araripe Basin, Northeastern Brazil. *Zootaxa*, **1425**: 53-61.
- Pereira, P. A.; Cassab, R. d. C. T.; Barreto, A. M. F. 2016. Cassiopidae gastropods, influence of Tethys Sea of the Romualdo Formation (Aptian–Albian), Araripe Basin, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **70**: 211-223.

- Pinheiro, A. P.; Saraiva, A. A.; Santana, W. 2014. Shrimps from the Santana Group (Cretaceous: Albian): new species (Crustacea: Decapoda: Dendrobranchiata) and new record (Crustacea: Decapoda: Caridea). *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **86**: 663-670.
- Pons, D.; Berthou, P.; Filgueira, J.; Sampaio, J. A. 1994. Palynologie des unités lithostratigraphiques “Fundão”, “Crato” et “Ipupi” (Aptien Supérieur à Albién Inférieur-moyen, Bassin d’Araripe, NE du Brésil): enseignements paléocologiques, stratigraphiques et climatologiques. *Géologie de l’Afrique et de l’Antique Sud. Compte-Rendu des Colloques de Géologie d’Angers*, **16**: 383-401.
- Ponte, F. 1992. Origem e evolução das pequenas bacias cretácicas do interior do Nordeste do Brasil. *Simpósio sobre as bacias cretácicas Brasileiras*, **2**: 55-58.
- Ponte, F. C. 1994. Extensão Paleogeográfica da Bacia do Araripe no Mesocretáceo. In: 3º Simpósio sobre o Cretáceo do Brasil, Rio Claro, *Resumos expandidos*, p.131-135.
- Ponte, F. C. & Appi, C. J. 1990. Proposta de revisão da coluna litoestratigráfica da Bacia do Araripe. In: 36º Congresso Brasileiro de Geologia, Natal-RN, *Anais*, v.1, p.211-226.
- Ponte, F. C. & Ponte Filho, F. C. 1996. Evolução Tectônica e Classificação da Bacia do Araripe. In: 4º Simpósio sobre o Cretáceo, Águas de São Pedro-SP, *Boletim*, p.123-133.
- Posamentier, H. W. & Walker, R. G. (ed.). 2006. *Facies Models Revisited*. Society for Sedimentary Geology, 532p.
- Prado, L. A. C.; Pereira, P. A.; Sales, A. M. F.; Barreto, A. M. F. 2014. Análise tafonômica e taxonômica da concentração de invertebrados fósseis do topo da Formação Romualdo, Cretáceo Inferior da Bacia do Araripe em Araripe, Ceará (CE). *Estudos Geológicos*, **24**: 53-64.
- Prado, L. A. C.; Pereira, P. A.; Sales, A. M. F.; Barreto, A. M. F. 2015. Taphonomic and paleoenvironmental considerations for the concentrations of macroinvertebrate fossils in the Romualdo Member, Santana Formation, Late Aptian–Early Albian, Araripe Basin, Araripina, NE, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **62**: 218-228.
- Prado, L. A. C.; Pereira, P. A.; Sales, A. M. F.; Barreto, A. M. F. 2016. Tafonomia dos Invertebrados do Sítio Canastra, Formação Romualdo, Cretáceo Inferior, Bacia do Araripe, Araripina, Pernambuco, Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências*, **39**: 77-87.
- Price, L. I. 1971. A presença de pterosauria no Cretácio Inferior da Chapada do Araripe, Brasil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **43**: 451 - 461.
- Price, L. Y. 1973. Quelônio Amphichelidia no Cretáceo Inferior do Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, **3**: 84 - 95.
- Prothero, D. R. & Schawab, F. 2014. *Sedimentary Geology. An Introduction to Sedimentary Rocks and Stratigraphy*. Third Edition. 49p.
- Regali, M.S.P. 1974. Palinologia dos sedimentos Meso-Cenozóicos do Brasil. *Boletim Técnico da Petrobrás*, **17**, **3**: 177-191.
- Regali, M. S. P. 1989. Primeiros registros da transgressão neoaptiana na margem equatorial brasileira. In: 11º Congresso Brasileiro de Paleontologia, Curitiba, *Anais*, v.1, p.275-293.
- Regali, M. S. P. 1990. Biocronostratigrafia e Paleoambiente do Eocretáceo das bacias do Araripe (CE) e Rio do Peixe (PB), NE - Brasil. In: 1º Simpósio sobre a Bacia do Araripe e as Bacias Interiores do Nordeste, Crato - CE, *Atas*, v.1, p.163-171.
- Regali, M. S. P. 2001. Palinoestratigrafia dos sedimentos Cretácicos da Bacia do Araripe e das Bacias interiores do nordeste e Brasil. In: Barros, L. M.; Nuvens, P. C.; Filgueira, J. B. M., I e II Simpósios Sobre a Bacia do Araripe e Bacias Interiores do Nordeste, Crato-CE, p.101-108.
- Regali, M. & Santos, P. 1999. Palinoestratigrafia e geocronologia dos sedimentos albo-aptianos das Bacias de Sergipe e Alagoas–Brasil. *Simpósio sobre o Cretáceo do Brasil*, **5**: 411-419.
- Riding, R. 2000. Microbial carbonates: the geological record of calcified bacterial–algal mats and biofilms. *Sedimentology*, **47**: 179-214.
- Rios-Netto, A. M. R., M. S. P.; Carvalho, I. S.; Freitas, F. I. 2012. Palinoestratigrafia do intervalo Alagoas da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, **42**: 331-342.
- Romano, P. S. R.; Oliveira, G. R.; Azevedo, S. A. K.; Kellner, A. W. A.; Campos, D. A. 2013. New information about Pelomedusoides (Testudines: Pleurodira) from the Cretaceous of Brazil. In:

- Brinkman, D. B.; Holroyd, P. A.; Gardner, J. D. (ed.) *Morphology and evolution of turtles*. Springer Netherlands, 261-275.
- Sales, A. M. F. 2005. *Análise tafonômica das ocorrências fossilíferas de macroinvertebrados do Membro Romualdo (Albiano) da Formação Santana, Bacia do Araripe, NE do Brasil: significado estratigráfico e paleoambiental*. IGc, USP, São Paulo-SP, Tese de doutorado, 131p.
- Santana, W.; Pinheiro, A. P.; Silva, C. M. R.; Saraiva, A. A. 2013. A new fossil caridean shrimp (Crustacea: Decapoda) from the Cretaceous (Albian) of the Romualdo Formation, Araripe Basin, Northeastern Brazil. *Zootaxa*, **3620**: 293-300.
- Santos, M. E. C. M. 1982. Ambiente deposicional da Formação Santana - Chapada do Araripe (PE/PI/CE). In: Anais do XXXII Congresso Brasileiro de Geologia, Salvador (BA), *Anais*, v.4, p.1413-1426.
- Silva-Telles, A.; Henz, G. I.; Arai, M. 1994. Evidências das primeiras ingressões marinhas na fase rift da margem leste brasileira. *Boletim de Geociências da Petrobras*, **8**: 401-427.
- Silva, M. A. M. 1986. Lower Cretaceous sedimentary sequences in the Araripe Basin, Northeastern Brazil: a revision. *Revista Brasileira de Geociências*, **16**: 306-310.
- Silva Santos, R. d. & Valença, J. G. 1968. A Formação Santana e sua paleoictiofauna. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **40**: 339-360.
- Scherer, C.M.S., Goldberg, K., Bardola, T., 2015. Facies architecture and sequence stratigraphy of an early post-rift fluvial succession, Aptian Barbalha Formation, Araripe Basin, northeastern Brazil. *Sedimentary Geology*, 322, **0**: 43-62.
- Skelton, P. W. 2003. *The cretaceous world*. Cambridge University Press,
- Sloss, L. L. 1963. Sequences in the cratonic interior of North America. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **74**: 93-113.
- Soares, R. C. 2012. *Gênese dos níveis coquinóides do Membro Romualdo, Formação Santana, na porção central e leste da Bacia do Araripe*. Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Ceará, 76p.
- Teixeira, M. C.; Filho, J. G. M.; Oliveira, A. D. d.; Assine, M. L. Faciologia orgânica da Formação Romualdo (Grupo Santana, Cretáceo Inferior da Bacia do Araripe): caracterização da matéria orgânica sedimentar e interpretação paleoambiental. No prelo.
- Tomé, M. E. T. R.; Lima Filho, M. F.; Neumann, V. H. M. L. 2014. Taxonomic studies of non-marine ostracods in the Lower Cretaceous (Aptian–lower Albian) of post-rift sequence from Jatobá and Araripe basins (Northeast Brazil): Stratigraphic implications. *Cretaceous Research*, **48**: 153-176.
- Valença, L. M. M.; Neumann, V. H.; Mabesoone, J. M. 2003. An overview on Callovian-Cenomanian intracratonic basins of Northeast Brazil: Onshore stratigraphic record of the opening of the southern Atlantic. *Geologica Acta*, **1**: 261 - 275.
- Varejão, F. G.; Warren, L. V.; de Jesus Perinotto, J. A.; Neumann, V. H.; Freitas, B. T.; de Almeida, R. P.; Assine, M. L. 2016. Upper Aptian mixed carbonate-siliciclastic sequences from Tucano Basin, Northeastern Brazil: Implications for paleogeographic reconstructions following Gondwana break-up. *Cretaceous Research*, **67**: 44-58.
- Viana, M. 1998. The Proto-Atlantic Albian way and its influence on the South American-African life. *Boletim de la Asociación Paleontológica del Golfo San Jorge*, **2**: 32-34.
- Viana, M. S. S. & Agostinho, S. M. 1995. Camarões do Membro Romualdo da Formação Santana (Cretáceo Inferior da Bacia do Araripe). *Boletim Núcleo Nordeste Sociedade Brasileira Geologia*, **14**: 239-243.
- Vila-Nova, B. C.; Saraiva, A. A. F.; Moreira, J. K. R.; Sayão, J. M. 2011. Controlled excavations in the Romualdo Formation lagerstätte (Araripe Basin, Brazil) and pterosaur diversity: remarks based on new findings. *PALAIOS*, **26**: 000-000.
- Walker, R. G. & James, N. P. (ed.). 1992. *Facies models: response to sea level change*. Ontario, Canada, Geological Association of Canada, 454p.
- Warren, L. V. 2006. *Evolução sedimentar da Formação Rio do Rasto na região centro-sul do Estado de Santa Catarina*. Programa de Pós-Graduação em Geologia Sedimentar, Universidade de São Paulo, São Paulo, 174p.

Wignall, P.B., 1991. Model for transgressive black shales? *Geology*, 19(2): 167-170.

Wignall, P.B., Maynard, J.R., 1993. The sequence stratigraphy of transgressive black shales. *Source Rocks in a Sequence stratigraphic framework*, 37: 35-47.