



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

LUDMILA ALVES CADEIRA DO PRADO

**TAFONOMIA E TAXONOMIA DAS CONCENTRAÇÕES DE
MACROINVERTEBRADOS DA FORMAÇÃO ROMUALDO NOS ESTADOS DE
PERNAMBUCO E PIAUÍ: CONSIDERAÇÕES PALEOAMBIENTAIS DA
TRANSGRESSÃO MARINHA CRETÁCEA NA BACIA DO ARARIPE**

Recife

2019

LUDMILA ALVES CADEIRA DO PRADO

**TAFONOMIA E TAXONOMIA DAS CONCENTRAÇÕES DE
MACROINVERTEBRADOS DA FORMAÇÃO ROMUALDO NOS ESTADOS DE
PERNAMBUCO E PIAUÍ: CONSIDERAÇÕES PALEOAMBIENTAIS DA
TRANSGRESSÃO MARINHA CRETÁCEA NA BACIA DO ARARIPE**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Geociências da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção
do título de Doutora em Geociências.

Área de concentração: Geologia Sedimentar.

Orientadora: Prof^a. Dra. Alcina Magnólia da Silva Franca

Recife

2019

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

- P896t Prado, Ludmila Alves Cadeira do.
 Tafonomia e taxonomia das concentrações de macroinvertebrados da Formação Romualdo nos estados de Pernambuco e Piauí: considerações paleoambientais da transgressão marinha cretácea na Bacia do Araripe / Ludmila Alves Cadeira do Prado. - 2019.
 94 folhas, il.
- Orientadora: Prof^a. Dr^a. Alcina Magnólia da Silva Franca.
- Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Geociências, 2019.
 Inclui Referências.
1. Geociências. 2. Equinoides. 3. Moluscos. 4. Crustáceos. 5. Grupo Santana.
 I. Franca, Alcina Magnólia da Silva (Orientadora). II. Título.

UFPE

551 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-217

LUDMILA ALVES CADEIRA DO PRADO

**TAFONOMIA E TAXONOMIA DAS CONCENTRAÇÕES DE
MACROINVERTEBRADOS DA FORMAÇÃO ROMUALDO NOS ESTADOS DE
PERNAMBUCO E PIAUÍ: CONSIDERAÇÕES PALEOAMBIENTAIS DA
TRANSGRESSÃO MARINHA CRETÁCEA NA BACIA DO ARARIPE**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de doutora em Geociências.

Aprovada em: 22/02/2019

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Alcina Magnólia da Silva Franca (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof.^a Dr.^a Priscilla Albuquerque Pereira (Examinadora Externa)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof.^a Dr.^a Tereza Cristina dos Santos Calado (Examinadora Externa)
Universidade Federal de Alagoas

Prof. Dr. Ismar de Souza Carvalho (Examinador Externo)
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof.^a Dr.^a Juliana de Moraes Leme (Examinadora Externa)
Universidade de São Paulo

Prof.^a Dr.^a Cynthia Lara de Castro Manso (Examinadora Externa)
Universidade de São Paulo

AGRADECIMENTOS

À Pós-Graduação em Geociências e Universidade Federal de Pernambuco pelo espaço cedido e aos seus funcionários sempre tão acolhedores.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- CAPES pela concessão da bolsa de estudo de doutorado.

À profa. Dra. Alcina Magnólia Franca Barreto pela orientação, incentivo e amizade.

Ao professor A. Richard Palmer e Javier Luque pela orientação durante o período do Doutorado Sanduíche na University of Alberta, e a todos os amigos feitos durante a estadia no Canadá.

Aos integrantes do Laboratório de Paleontologia da UFPE (PALEOLAB) pelos maravilhosos trabalhos de campo e amizade.

Ao professor Dr. Alexandre Sales (*in memoriam*) pelo incentivo desde o início da minha trajetória acadêmica e amizade.

Aos meus pais Luzia Alves e Martins Cadeira do Prado pelo suporte, carinho e afeto.

Ao meu padrasto Juarez Pereira e irmã Sabrina Alves por toda assistência e incentivo.

A Jefferson Lima pelo companheirismo, amor e assistência.

Aos meus sogros Maria de Jesus e Carlos Lima, e cunhada Aline Lima pelo apoio e carinho.

Aos meus amigos do Cariri cearense, em especial Cristina, Karla, Lana, Rosimara, Rosilaine, Nilsa, Kezia, Livânio e Carol, pelo incentivo e companheirismo desde os tempos de graduação.

Aos presidentes Luiz Inácio Lula da Silva e Dilma Rousseff, e ex-ministro de Educação Fernando Haddad, que através de políticas públicas, possibilitaram o acesso ao ensino superior de uma forma mais justa e igualitária.

Ao Sci-hub por tornar o conhecimento acessível a todos.

A Deus por guiar todos os meus caminhos.

Por fim, a todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para realização deste projeto, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Na Formação Romualdo são comuns invertebrados, tal como os crustáceos presentes nos folhelhos e, moluscos e equinoides nas rochas calcárias. Buscando compreender a diversidade de macroinvertebrados, paleoambiente e as relações paleobiogeográficas no Cretáceo Inferior, principalmente na porção oeste da Bacia Sedimentar do Araripe, foram realizadas coletas, elaboração de perfis, identificação taxonômica, análise estratigráfica e tafonômica em vários afloramentos. Como resultado, foi encontrado o mais completo registro de equinoides para a bacia, dois novos gêneros e espécies de caranguejos da família Orithopsidae e Eogeryonidae?, *Exucarcinus gonzagai* e *Romualdocarcinus salesi*, respectivamente, e um novo gênero e espécie de camarão da superfamília Penaeoidea, *Cretainermis pernambucensis*. Interpretações tafonômicas sugerem que as coquinas foram depositadas a partir de tempestades em uma plataforma marinha rasa, variando de ambiente distal a transicional proximal-distal. A fauna sugere sedimentação marinha no Araripe com influência tetiana, corroborando com a hipótese de ingressão marinha na Formação Romualdo a partir da Bacia Potiguar ou Bacia do Parnaíba.

Palavras-chave: Equinoides. Moluscos. Crustáceos. Grupo Santana.

ABSTRACT

In the Romualdo Formation invertebrates are common, as are the crustaceans present in shales, and mollusks and echinoids in limestone rocks. In order to understand the diversity of macroinvertebrates, paleoenvironment and paleobiogeographic relationships in the Lower Cretaceous, mainly in the western portion of the Araripe Sedimentary Basin, sampling, profile elaboration, taxonomic identification, stratigraphic and taphonomic analysis were performed in several outcrops. As a result, the most complete echinoid record of the basin was found, two new genera and species of crab belonging to the families Orithopsidae and Eogeryonidae?, *Exucarcinus gonzagai* and *Romualdocarcinus salesi*, respectively, and a new genus and species of shrimp of the superfamily Penaeoidea, *Cretainermis pernambucensis*. Taphonomic interpretations suggest that coquinas were deposited from storms on a shallow marine platform, ranging from distal to proximal-distal environment. The fauna suggests marine sedimentation in the Araripe with thetitan influence, corroborating with the hypothesis of marine entry in the Romualdo Formation from the Potiguar Basin or the Parnaíba Basin.

Keywords: Echinoid. Molluscs. Crustaceans. Santana Group.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Localização geográfica da área de estudo. A- América do Sul com ênfase no Nordeste do Brasil. B - Bacias sedimentares do nordeste do Brasil; as setas representam as três possíveis rotas de ingressão marinha cretácea no Araripe. C- Bacia do Araripe; as estrelas representam a área de estudo.....	12
Quadro 1 -	Estratigrafia da Formação Romualdo, Bacia do Araripe.....	16
Quadro 2 -	Diversidade de moluscos da Formação Romualdo, Bacia do Araripe.....	20
Quadro 3 -	Feições macroscópicas usadas na análise tafonômica, incluídas nas categorias: sedimentológicas, bioestratinômicas e diagenéticas dos bioclastos, estratigráficas e paleoecológicas da associação fossilífera.....	26
Figura 2 -	Classificação das concentrações esqueléticas em nove tipos, de acordo com o processo de formação e gradiente de águas rasas e profundas.....	27

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	OBJETIVOS	11
1.1.1	Objetivo Geral	11
1.1.2	Objetivos específicos.....	11
2	GEOLOGIA DA BACIA DO ARARIPE	12
2.1	ESTRATIGRAFIA.....	13
2.1.1	Supersequência Paleozoica (Ordoviciano Superior-Devoniano Inferior)	13
2.1.2	Supersequência Pré-Rifte (Jurássico Superior)	13
2.1.3	Supersequência Rifte (Neocomiano)	14
2.1.4	Supersequência Pós-Rifte I (Aptiano Superior - Albiano Inferior)	14
2.1.4.1	Andar Alagoas	17
2.1.5	Supersequência Pos-Rifte II (Albiano - Cenomaniano)	17
3	PALEONTOLOGIA DA FORMAÇÃO ROMUALDO.....	19
3.1	FILO MOLLUSCA: CLASSES BIVALVIA E GASTROPODA.....	19
3.2	FILO ECHINODERMATA: CLASSE ECHINOIDEA.....	19
3.3	FILO ARTHROPODA: SUBFILO CRUSTACEA: CLASSE MALACOSTRACA: ORDEM DECAPODA	21
3.4	PALEOAMBIENTE.....	22
3.5	PALEOGEOGRAFIA	23
4	MATERIAL E MÉTODOS	25
4.1	ÁREA DE ESTUDO	25
4.2	MATERIAL	25
4.3	MÉTODOS	25
4.3.1	Análise Tafonômica	26
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
5.1	ARTIGO 1 - TAPHONOMY OF MACROINVERTEBRATES AND ALBIAN MARINE INGRESSION AS RECORDED BY THE ROMUALDO FORMATION (CRETACEOUS, ARARIPE BASIN, BRAZIL).....	29
5.2	ARTIGO 2 - NEW BRACHYURAN CRABS FROM THE APTIAN–ALBIAN ROMUALDO FORMATION, SANTANA GROUP OF BRAZIL: EVIDENCE FOR A TETHYAN CONNECTION TO THE ARARIPE BASIN.....	42
5.3	ARTIGO 3 - NEW RECORDS OF SHRIMP FROM THE LOWER CRETACEOUS ROMUALDO FORMATION, ARARIPE BASIN, NORTHEASTERN BRAZIL,	

	WITH NEW TAXA OF PENAEOIDEA (CRUSTACEA: DECAPODA: DENDROBRANCHIATA).....	56
5.4	ARTIGO 4 - TAFONOMIA DAS COQUINAS DA FORMAÇÃO ROMUALDO, BACIA DO ARARIPE, E INGRESSÃO MARINHA: NOVOS SÍTIOS E ESTÁGIO ATUAL DO CONHECIMENTO.....	64
6	CONCLUSÕES.....	85
	REFERÊNCIAS.....	86

1 INTRODUÇÃO

Embora a concepção de sedimentação da Formação Romualdo sob influência marinha seja um consenso entre os pesquisadores, a interpretação paleoambiental das suas diferentes fácies e a reconstrução paleogeográfica da transgressão marinha aptiana-albiana na Bacia do Araripe ainda são matérias controversas. Para tal, é indispensável o estudo das coquinas por estarem presentes ao longo de toda a bacia e incluírem os principais elementos marinhos da formação.

A tafonomia, ciência destinada a estudar os processos de preservação (Behrensmeier e Kidwell, 1985), foi inicialmente aplicada aos moluscos e gastrópodes bivalvíos da Formação Romualdo por Mabesoone e Tinoco (1973). Esses autores propuseram que a sedimentação das conchas de moluscos teria ocorrido em um ambiente instável e energético devido à fragmentação dos clastos e formação de concentrações coquinóides. Posteriormente, Santos (1982) associou a presença de clastos de moluscos marinhos subarredondados à sedimentação marinha rasa, tal como próxima a linha da praia. Sales (2005) analisou as coquinas provenientes das porções norte, sudoeste e principalmente leste da bacia e sugeriu que essas associações fossilíferas teriam sido formadas em ambiente marinho raso sob a ação de ondas de tempestades, classificando-as como tempestitos proximais, tempestitos distais, concentrações primariamente biogênicas e resíduos transgressivos. Estudos tafonômicos com moluscos coletados na porção cearense da Bacia do Araripe foram realizados posteriormente por Soares (2013), Prado et al. (2014) e Batista et al. (2015), que identificaram o mesmo padrão de preservação tempestítica. Na porção oeste da bacia, onde há a maior evidência de sedimentação marinha (i.e. equinóides), os estudos tafonômicos restringem-se aos municípios de Araripina e Marcolândia, estados de Pernambuco e Piauí, respectivamente.

Os decápodes, como invertebrados aquáticos, são considerados bons indicadores paleoambientais (Esteves, 1998; Matsumura-Tundisi, 1999; Carvalho e Uieda, 2004). Aqueles da Formação Romualdo, são provenientes em sua grande maioria do estado do Ceará, e ocorrem até o presente associados aos folhelhos com ictiólitos (Martins Neto, 1987; Maisey e Carvalho, 1995; Santana et al., 2013; Pinheiro et al., 2014). Quanto a tafonomia, apenas breves comentários foram publicados, a exemplo do trabalho de Saraiva et al. (2009) que sugerem mortandade em massa de *Paleomattea deliciosa* Maisey e Carvalho, 1995 devido a sua ocorrência aglomerada, e Bondioli et al. (2017) que propuseram mortandade em massa para os estratos ricos em camarões, com morte associada a eventos de anoxia em ambientes distais de baixa energia e soterramento muito rápido por sedimentos siliciclásticos.

A realização de trabalhos taxonômicos e tafonômicos de associações de macroinvertebrados no estado de Pernambuco e Piauí, mostra-se promissora na interpretação do paleoambiente e paleogeografia do mar Araripe, por abrigar novos elementos marinhos com aspectos de preservação ainda desconhecidos, além de afloramentos com informações estratigráficas ainda pouco exploradas.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho visa colaborar com a interpretação paleoambiental da Formação Romualdo baseado na análise tafonômica e identificação dos invertebrados fósseis.

1.1.1 Objetivo Geral

Descrição taxonômica e tafonômica dos macroinvertebrados da Formação Romualdo provenientes dos estados de Pernambuco e Piauí para uma interpretação paleoambiental e paleogeográfica da transgressão marinha aptiana-albiana na Bacia do Araripe.

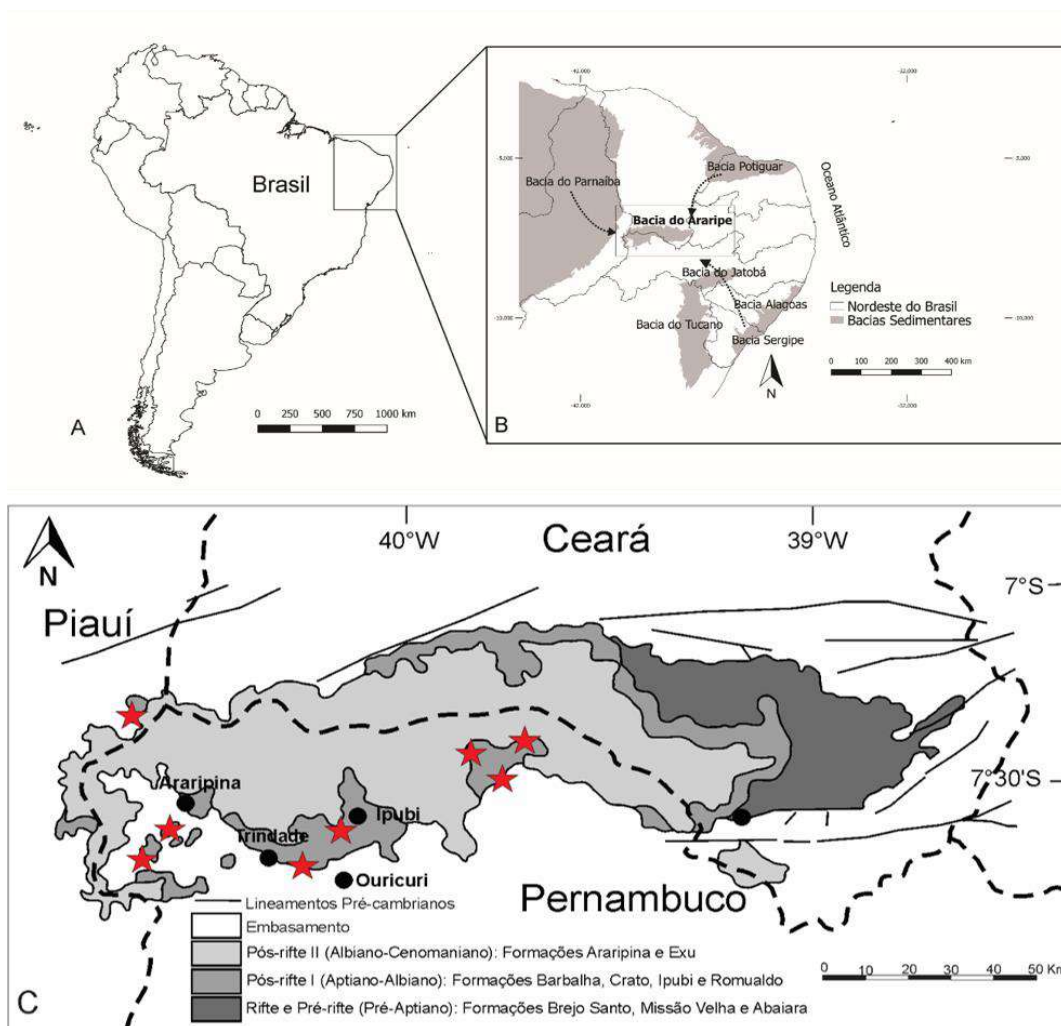
1.1.2 Objetivos específicos

- Identificar os decápodes;
- Interpretar as assembleias fossilíferas quanto à gênese e ambiente de sedimentação;
- Comparar os novos dados com aqueles disponíveis na literatura;
- Levantar informações acerca da distribuição paleogeográfica da fauna identificada.

2 GEOLOGIA DA BACIA DO ARARIPE

As bacias interiores do nordeste do Brasil representam um conjunto de pequenas bacias fanerozóicas situadas entre as bacias do Tucano - Jatobá, Parnaíba e Potiguar, tendo como origem o processo de separação da América do Sul e África (Matos, 1992; Assine, 1994). Dentre elas, a Bacia do Araripe é a mais extensa, com a maior área de exposição de rochas cretáceas (12.200 km²). A Bacia do Araripe localiza-se entre os estados do Piauí, Pernambuco e Ceará, Nordeste do Brasil, e repousa sobre terrenos pré-cambrianos da Zona Transversal da Província Borborema (Brito Neves et al., 2000) (Fig. 1), ao sul da Zona de Cisalhamento de Patos (Assine, 2007).

Figura 1- Localização geográfica da área de estudo. A- América do Sul com ênfase no Nordeste do Brasil. B - Bacias sedimentares do nordeste do Brasil; as setas representam as três possíveis rotas de ingressão marinha cretácea no Araripe. C- Bacia do Araripe; as estrelas representam a área de estudo.



Fonte: Modificado de Assine, 2007.

2.1 ESTRATIGRAFIA

A partir do primeiro trabalho de cunho geológico desenvolvido na área por Small (1913), várias propostas estratigráficas foram lançadas nas décadas seguintes. A nomenclatura proposta por Beurlen (1971) que subdividia a Formação Santana nos membros Crato, Ipubi e Romualdo foi por muitos anos utilizada. Entretanto, essa seria uma classificação baseada em critérios ambientais (Assine, 1992), sendo a proposta de Newmann e Cabrera (1999) (Quadro 1) mais coerente, dado que ambos os membros da Formação Santana possuem características sedimentológicas e ambientais próprias e extensão em área que permitem individualizá-los como formações dentro do Grupo Santana. Neste trabalho, adotou-se a nomenclatura proposta por Assine et al. (2014) que inclui dentro do Grupo Santana todo registro estratigráfico da supersequência pós-rifte de Assine (2007), incluindo as formações Barbalha, Crato, Ipubi e Romualdo (Quadro 1).

A Bacia do Araripe é formada pelas supersequências paleozoica, pré-rifte, rifte e pós-rifte I e II (Assine, 1990; 1992; 2007; Ponte e Appi, 1990; Ponte e Ponte filho, 1996, Brito Neves, 1990), descritas a seguir.

2.1.1 Supersequência Paleozoica (Ordoviciano Superior-Devoniano Inferior)

A supersequência paleozoica é representada pela Formação Cariri, aflorando na porção leste da bacia (Assine, 2007). É formada quase que exclusivamente por arenitos com descontínuos níveis decimétricos de siltitos brancos e níveis de conglomerados, interpretados como fácies de sistemas fluviais entrelaçados (Assine, 1992, 2007). O conteúdo paleontológico restringe-se até o presente a icnofósseis de invertebrados (Albuquerque et al., 1999).

2.1.2 Supersequência Pré-Rifte (Jurássico Superior)

A supersequência pré-rifte representa a fase precursora do rifteamento que deu origem à margem continental brasileira (Ponte et al., 1997), sendo composta pelas formações Brejo Santo e Missão Velha. A Formação Brejo Santo é composta principalmente por folhelhos e lamitos vermelhos (Assine, 2007), entre os quais ocorrem entremeadas camadas decimétricas a métricas de arenitos finos a médios e delgadas lâminas de calcário argiloso, rico em microfósseis de ostracodes (Assine, 1992). A presença de formas exclusivamente não

marinhas indica sedimentação lacustre em ambientes propícios à formação de *red beds* (Assine, 2007).

A Formação Missão Velha se sobrepõe concordantemente à formação Brejo Santo, sendo constituída por arenitos localmente conglomeráticos que podem alojar níveis decimétricos de siltitos com muitos fragmentos de madeira (troncos) silicificada. Essa associação faciológica indica sedimentação a partir de planícies fluviais de sistemas entrelaçados caracterizados por canais rasos e de alta energia (Assine, 2007).

2.1.3 Supersequência Rifte (Neocomiano)

A supersequência rifte é representada exclusivamente pela Formação Abaiara que aflora apenas no município de mesmo nome (Assine, 2007). Na base, são encontrados folhelhos silticos e siltitos vermelhos com intercalações descontínuas de camadas decimétricas de arenitos finos. No topo, ocorrem lentes decamétricas de arenitos finos a grossos com níveis conglomeráticos portadores de madeira silicificada (Assine, 1992, 2007). A associação faciológica sugere sedimentação lacustre e fluvial de canais entrelaçados (Ponte et al., 1997; Assine, 2007).

2.1.4 Supersequência Pós-Rifte I (Aptiano Superior - Albiano Inferior)

Como resultado da elevação global do nível do mar durante o Aptiano superior (Vail et al., 1977), uma transgressão marinha atingiu as bacias marginais brasileiras e o interior do Nordeste do Brasil. Contudo, os registros cretáceos marinhos nas bacias interiores encontram-se atualmente restritos a supersequência pós-rifte I da Bacia do Araripe, representada pelo Grupo Santana (formações Barbalha, Crato, Ipubi e Romualdo) (Ponte 1992; Assine, 1994; Ponte e Ponte Filho, 1996; Newmann e Cabrera, 1999; Assine et al., 2014).

Na Formação Barbalha predomina fácies arenosas com intercalações de lamitos avermelhados e amarelados e níveis delgados de conglomerados (Assine, 1992). O perfil estratigráfico compreende dois ciclos fluviais com granodecrescência ascendente, cujos topos são marcados pela presença de intervalos pelítico-carbonáticos lacustres (Assine, 2007). O primeiro se encerra com intervalo de folhelhos ricos em lâminas carbonáticas onde se encontra inserida uma camada de calcário com aspecto brechoide chamada de Camadas Batateiras (Hashimoto et al., 1987 apud Assine et al., 2014), que devido à sua grande extensão lateral é considerada um marco estratigráfico de importância regional da Bacia do Araripe

(Assine, 2007). Nos folhelhos é comum a presença de ostracodes, conchostráceos, restos de peixes e fragmentos vegetais carbonificados (Assine et al., 2014). A associação de fácies é típica de sistemas transgressivos, materializado por fácies de canais fluviais, que gradativamente perdem energia e são recobertos por fácies pelíticas lacustres (Assine et al., 2014).

A Formação Crato é formada por folhelhos calcíferos interestratificados com calcários laminados. A associação faciológica indica condições de baixa energia no ambiente deposicional com influxo de terrígeno, sendo comum a presença de filamentos algálicos (Assine, 1992). Por apresentar um diverso e abundante registro fóssilífero com espécimes excepcionalmente bem preservados (Maisey, 1991) é considerado um depósito excepcional (*Konservat-Lagerstätten*=Seilacher, 1970). São encontrados ostracodes, conchostráceos, insetos, aracnídeos, bivalvíos, gastrópodes, peixes, pterossauros, quelônios, crocodilianos, aves, anuros, algas, gimnospermas, angiospermas e palinórmorfos (Maisey, 1991; Kellner, 2002; Martins Neto, 2005; Kunzmann et al., 2006; Lima et al., 2012; Tomé et al., 2014; Teixeira et al., 2017, Carvalho et al., 2019). A ausência de formas marinhas indica sedimentação em ambiente lacustre (Newmann, 1999).

Na Formação Ipubi são encontradas camadas de gipsita associadas a folhelhos, carbonatos e arenitos. Embora ocorra no município de Santana do Cariri, concentra-se sobretudo na porção oeste da bacia, entre os municípios de Ipubi e Araripina (Assine, 1992). O conteúdo fóssil é representado por ostracodes, vegetais, peixes e coprólitos (Barros et al., 2016). A associação de fácies sedimentares e geometria dos evaporitos indicam sedimentação em ambientes costeiros (supramaré) sujeitos a variações relativas do nível do mar, em condições de clima árido e semiárido, similares as atuais salinas do sul da Austrália (Assine, 1992; Assine et al., 2014).

Na base da Formação Romualdo são encontrados arenitos intercalados a folhelhos seguidos por folhelhos verdes ricos em ostracodes. Logo acima, ocorrem os folhelhos escuros com nódulos calcários, na maioria dos casos fóssilíferos (Assine, 1992; Assine et al., 2014). Enfatiza-se que os fósseis são encontrados tanto nos nódulos quanto nos folhelhos que envolvem os nódulos. Para o topo, encontram-se camadas de calcário com invertebrados sotopostas às camadas de arenito fino com intercalações de siltitos e folhelhos contendo fósseis de água doce, como conchostráceo e molusco (Beurlen, 1971; Assine, 2007).

Quadro 1-Estratigrafia da Formação Romualdo, Bacia do Araripe.

Small (1913)	Beurlen (1962)	Beurlen (1963)	Gaspary e Anjos (1964)	Beurlen (1971)	Lima (1978)	Silva (1983)	Assine (1990)	Ponte e Appi (1990)	Martill e Willby (1993)	Neumann e Cabrera (1999)	Assine (2007)	Assine (2014)
Arenito Superior	Fm. Exu	Fm. Exu	Fm. Feira Nova	Fm. Exu	Fm. Exu	Fm. Exu	Fm. Exu	Mb. Superior	Fm. Exu	Fm. Exu	Fm. Exu	Fm. Exu
								Mb. Inferior	Fm. Arajara		Fm. Araripina	Fm. Araripina
Calcários de Santana	Fm. Santana	Fm. Santana	Fm. Santana	Mb. Romualdo	Fm. Santana	Fm. Santana			Mb. Romualdo	Fm. Santana	Fm. Santana	Fm.
				Mb. Ipubi					Mb. Ipubi	Fm. Ipubi		Fm. Romualdo
		Fm. Crato		Mb. Crato		Mb. Crato			Mb. Crato	Fm. Crato		Fm. Romualdo
Arenito Inferior	Fm. Missão Velha	Fm. Missão Velha	Fm. Missão Velha	Fm. Missão Velha	Fm. Sergi	Fm. Sergi	Fm. Barbalha		Fm. Rio da Batateira	Fm. Rio da Batateira	Fm. Santana	Fm.
									Fm. Abaiara	Fm. Abaiara		Fm.
									Fm. Missão Velha	Fm. Missão Velha		Fm. Romualdo
												Fm. Ipubi
												Fm. Crato
												Fm. Crato
Conglomerado Basal	Fm. Cariri	Fm. Cariri	Fm. Mauriti	Fm. Cariri	Fm. Tacaratu	Paleozoico	Fm. Cariri	Fm. Mauriti	Fm. Cariri	Fm. Mauriti	Fm. Cariri	Fm. Cariri

Fonte: Modificado de Assine, (1992); Neumann & Cabrera (1999). Fm.: Formação; Mb.: Membro.

Assim como a Formação Crato, a Formação Romualdo é considerada um *Konservat Lagerstätten*, conhecida internacionalmente por abrigar fósseis excepcionalmente bem preservados, na maioria dos casos (Maisey, 1991). A fauna representada por peixes ósseos e cartilaginosos, dinossauros, pterossauros, moluscos, equinoides, crustáceos, foraminíferos, dinoflagelados e vegetais (Mabesoone e Tinoco, 1973; Arai e Coimbra, 1990; Berthou et al., 1990; Kellner, 2002; Bruno e Hessel, 2006; Lima et al., 2012) é típica de ambiente transicional a marinho raso, sendo os equinoides um dos os principais indicadores de sedimentação marinha franca (Beurlen, 1963, 1964).

2.1.4.1 Andar Alagoas

O Andar Alagoas (Aptiano superior/Albiano inferior) da Bacia do Araripe é formado por três sequências deposicionais, uma vez que desconformidades internas foram identificadas no topo das Camadas Batateiras e no topo da Formação Ipubi (Assine et al., 2014). A primeira sequência representa um trato de sistemas transgressivos desde a base da Formação Barbalha até o topo das Camadas Batateiras. A segunda sequência compreende sistemas transgressivos desde os conglomerados do topo da Formação Barbalha até a seção carbonático-siliclástico da Formação Crato e sistemas de nível alto incluindo a seção evaporítica. Por fim, a terceira sequência é representada integralmente pela Formação Romualdo, formada pelos tratos de sistemas transgressivos (fácies aluviais e dominadas por onda), zona de inundação máxima (folhelhos marinhos escuros) e trato de sistemas de mar alto (coquinas) (Custódio et al., 2017).

2.1.5 Supersequência Pos-Rifte II (Albiano - Cenomaniano)

Restrita à porção oeste da bacia, a Formação Araripina é constituída por uma associação de ritmitos de arenitos finos e lamitos associados a arenitos médios a grossos dispostos em corpos de geometria lenticular (Assine 1992, 2007). Trata-se, possivelmente, de um sistema de inunditos situados em uma laguna que iria secar e ser cortada profundamente por sistemas fluviais desenvolvidos em vales de grandes dimensões (Ponte et al., 1997).

A Formação Exu apresenta arenitos grossos e conglomerados originados em sistemas fluviais entrelaçados e meandantes ocasionalmente intercaladas por fácies pelíticas de planície de inundação (Ponte et al., 1997; Assine, 1992). Até o presente momento, somente

traços fósseis sem valor cronoestratigráfico foram encontrados na Formação Exu (Assine, 2007).

3 PALEONTOLOGIA DA FORMAÇÃO ROMUALDO

Para uma melhor compreensão das interpretações tafonômicas e paleoambientais serão apresentados a seguir os principais aspectos preservacionais, diversidade taxonômica e distribuição geográfica dos macroinvertebrados da Formação Romualdo.

3.1 FILO MOLLUSCA: CLASSES BIVALVIA E GASTROPODA

Por possuírem geralmente uma concha sólida e bem calcificada, nas formas de aragonita ou calcita (Camacho, 2007), os moluscos são bem representados no registro fóssil (Machado et al., 2011) e dominantes na fração preservável da maioria das comunidades bentônicas (Staff e Powell, 1988).

Dentre os macroinvertebrados da Formação Romualdo, os moluscos representam o filo com maior número de espécimes na Formação Romualdo, sendo encontrados ao longo de toda Bacia do Araripe. A fauna de moluscos passou a ser conhecida na década de 60, a partir de citações e relatos de ocorrências (Beurlen 1962, 1963, 1966, 1971; Mabesoone e Tinoco, 1973; Maisey, 1991). Contudo, deve-se à Pereira et al. (2015, 2016ab, 2017) a realização de um trabalho taxonômico mais completo com a revisão e identificação de novas espécies (Quadro 2). Pereira et al. (2017) ainda propõem que as diferentes associações de moluscos no Araripe estariam ligadas a sedimentação em ambiente estuarino, lagunar ou marinho raso.

3.2 FILO ECHINODERMATA: CLASSE ECHINOIDEA

O registro fóssil de equinoides é geralmente escasso, principalmente entre os regulares, devido a rápida desintegração da carapaça ao longo das suturas que compõem o esqueleto (Fischer, 1952; Schäfer, 1972). Segundo Kier (1977) o menor número de fósseis de equinoides regulares em relação aos irregulares resulta das diferenças relacionadas ao hábito de vida e durabilidade esquelética, uma vez que há mais espécies de equinoides regulares que irregulares em ambientes marinhos atuais. O hábito de vida é comumente relacionado ao substrato, já que equinoides regulares predominam em áreas de ativa erosão tal como costas intertidais rochosas, enquanto os equinoides irregulares são comuns em áreas de ativa deposição, como substratos arenosos e argilosos, facilitando assim a sua preservação (Kier, 1977). A durabilidade esquelética associa-se a articulação em maior ou menor grau das várias placas de calcita magnésiana que formam o esqueleto dos equinoides (Kroh e Smith, 2010). No geral, os equinoides irregulares tendem a possuir carapaças com um maior grau de

interligação entre as placas que os regulares (Moffat et al., 1999; Greenstein, 1993), o que aumenta o seu potencial de resistência a desarticulação após a morte. Possivelmente, esse conjunto de fatores justifique a ausência de equinoides regulares na Formação Romualdo, até o presente momento.

Quadro 2 - Diversidade de moluscos da Formação Romualdo, Bacia do Araripe.

Classe	Família	Espécie
Bivalvia	Bakeveliidae	<i>Aguileria dissita</i> White, 1887
	Mitylidae	<i>Brachidontes araripensis</i> Pereira et al., 2015
	Corbulidae	<i>Corbula</i> sp.
Gastropoda	Cassiopidae	<i>Paraglauconia</i> (<i>Diglauconia</i>) <i>araripensis</i> (Beurlen, 1964)
		<i>Paraglauconia</i> (<i>Diglauconia</i>) <i>lyrica</i> Maury, 1936
		<i>Gymnentome</i> (<i>Gymnentome</i>) <i>romualdoi</i> (Beurlen, 1964)
		<i>Gymnentome</i> (<i>Gymnentome</i>) <i>carregoiza</i> Maury, 1936
		<i>Gymnentome</i> (<i>Craginia</i>) <i>beurleni</i> Pereira et al., 2016 ^a
		<i>'Pseudomesalia'</i> (<i>'Pseudomesalia'</i>) <i>mennessieri</i> Pereira et al., 2016 ^a
		<i>'Pseudomesalia'</i> (<i>'Pseudomesalia'</i>) <i>santanensis</i> Pereira et al., 2016 ^a
	Cerithiidae	<i>Cerithium sergipensis</i> Maury, 1936
	Naticidae	<i>Tylostoma ranchariensis</i> Pereira et al., 2015

Fonte: Pereira, 2017

Beurlen (1963) relatou a primeira ocorrência de equinoides indeterminados na Bacia do Araripe. Em 1966, ele identificou as espécies *Pygurus tinocoi* e *Faujasia araripensis*, sendo essa última mais frequente. A espécie *F. araripensis* foi transferida para o gênero *Pygidiolampas* por Brito (1981), e mais recentemente para o gênero *Bothryopneustes* Foutau 1924 por Manso e Hessel (2007). Segundo Manso e Hessel (2007), *P. tinocoi* e *B. araripensis* seriam epifaunais ou semi-endofaunais de ambiente marinho de baixa energia.

Mais recentemente, as espécies *Douvillaster benguellensis* e *Hemiaster proclivus* foram identificadas por Manso e Hessel (2012). Segundo as autoras, ambas seriam endofaunais, sendo *H. proclivus* habitante de áreas mais rasas e *D. benguellensis* dominantes em áreas mais profundas, com menor circulação hídrica. Embora essas espécies não ocorram associadas, possuem distribuição aproximada, o que fez Manso e Hessel (2012) sugerirem que elas dividiriam o mesmo ambiente marinho, mas ocupando diferentes nichos, caracterizados por variações granulométricas e de disponibilidade de oxigênio.

3.3 FILO ARTHROPODA: SUBFILO CRUSTACEA: CLASSE MALACOSTRACA: ORDEM DECAPODA

Fatores biológicos como calcificação do esqueleto, modo de vida e habitat influenciam diretamente na fossilização dos decápodes (Glaessner, 1969). O registro fóssil dos camarões, por exemplo, é muito mais escasso que dos caranguejos e lagostas, devido ao seu modo de vida pelágico e cutícula muito fina (Bishop, 1986). Caranguejos assim como lagostas possuem uma cutícula moderadamente mineralizada e habitam diversos ambientes, incluindo aqueles que possuem um alto potencial de preservação, tais como recifes calcários e substratos arenosos, silticos e argilosos (Glaessner, 1969; Bishop, 1986). Curiosamente, o registro fóssil de decápodes na Bacia do Araripe é em sua totalidade representada por camarões, com exceção de uma única espécie de caranguejo, sendo, portanto, já esperada a descoberta de novos espécimes de caranguejos na região.

Todos os decápodes da Formação Romualdo ocorrem nos folhelhos ou em nódulos calcários. Alguns são encontrados no estado do Ceará, tal como o caranguejo *Araripecarcinus ferreraei* Martins Neto, 1987 e os camarões *Paleomattea deliciosa* (Dendobranchiata) Maisey e Carvalho, 1995, *Kellnerius jamacaruensis* Santana, Pinheiro, Silva e Saraiva, 2013, *Araripenaeus timidus* Pinheiro, Saraiva e Santana 2014 (Saraiva et al., 2009; Pinheiro et al., 2014; Santana et al., 2013; Martins Neto, 1987). No estado de Pernambuco é relatada a presença de *P. deliciosa* (Viana e Agostinho, 1995; Saraiva et al., 2016), *Sume marcosi* Saraiva, Pinheiro e Santana, 2018 e *Priorhyncha feitosai* Alencar, Pinheiro, Saraiva, Oliveira e Santana, 2018.

Os palaemonídeos, como *K. jamacaruensis*, podem habitar ambientes lacustres, estuarinos e marinhos (Rogers, 2016). Os dendobranquiatas, como o *A. timidus* e *P. deliciosa*, podem ocorrer em ambientes marinhos e/ou estuarinos, com exceção de poucos sergestídeos (Pinheiro et al., 2014; Pérez Farfante e Kensley 1997; Tavares e Martin, 2010). Contudo,

sendo o luciferídeo *S. marcosi* de ambiente marinho nerítico, e o solenocerídeo *P. feitosai* de ambiente marinho profundo, haveria ao menos uma incursão marinha para o nível estratigráfico e região em que são encontrados (Saraiva et al., 2018).

3.4 PALEOAMBIENTE

A presença de uma ictiofauna marinha, e plantas e vertebrados terrestres de água doce na Formação Romualdo, levaram Santos e Valença (1968) a concluir que haveria na região do Araripe um grande golfo alimentado por águas oceânicas e fluviais ou pluviais. Segundo Mabesoone e Tinoco (1973), as águas deste golfo apresentariam grande variação de salinidade, o que explicaria a diversidade de fósseis encontrados nestes estratos. Segundo Arai e Coimbra (1990), os microfósseis nos folhelhos (pólen, esporos, dinoflagelados, ostracodes, foraminíferos e micromoluscos) seriam típicos de ambientes costeiros mixohalinos. Entretanto, a presença do dinoflagelado do gênero *Subtilisphaera* Jain e Millepied, 1973 indicaria inquestionável influência marinha. Essas drásticas mudanças de salinidade seriam possivelmente as principais causas da mortandade em massa conhecida na Formação Romualdo (Martill, 1988; Martill et al., 2008). Adicionalmente, ondas de tempestade poderiam ter revolvido o fundo lamoso e provocado envenenamento ambiental, devido à presença de *hummocky* na camada de arenito sotoposta aos folhelhos (Della Fávera, 1987).

Beurlen (1963) já citava a presença de uma “efêmera ingressão marinha” na Bacia do Araripe, devido à presença de equinoides em algumas rochas calcárias da Formação Romualdo. Segundo Santos (1982) a ocorrência de moluscos nessas mesmas rochas também seria coerente para ambiente marinho raso. Trabalhos paleoecológicos mais recentes, sugerem que as coquinas seriam depositadas em ambientes lagunares, estuarinos e marinhos, estando esses últimos restritos a porção oeste da bacia (Pereira et al., 2017). Já de acordo com as análises palinofaciológicas e organogeoquímicas realizadas por Teixeira et al. (2017) também haveria eventos de ingressão marinha nos afloramentos localizados no extremo sul do Ceará. Segundo os autores, uma ingressão teria ocorrido no nível dos folhelhos com concreções calcárias, sugerindo um caráter mais distal a intermediário, e outra entre as coquinas e folhelhos intercalados, com condições mais proximais e influência de componentes de origem marinha, evidenciando um ambiente marinho costeiro transicional proximal-distal.

3.5 PALEOGEOGRAFIA

Beurlen (1963, 1966) foi o primeiro a tratar sobre a rota de ingressão marinha na Bacia do Araripe. Segundo ele, a presença de equinoides na porção oeste da Bacia indicava que a ingressão marinha teria ocorrido através da Bacia do Parnaíba. De acordo com Arai (2014), a distribuição do *Subtilisphaera* nas bacias do nordeste do Brasil representaria uma ecozona de afinidade tetiana, e sendo ela menos notável na Bacia Potiguar, indicaria também uma ingressão marinha através da Bacia do Parnaíba, onde a ecozona é mais proeminente. Moluscos da família Cassiopidae e alguns peixes da Formação Romualdo também apresentam afinidade tetiana (Silva Santos, 1985; Pereira et al., 2016a). Contudo, segundo Custódio et al. (2017), a hipótese de conexão entre a Bacia do Araripe e Parnaíba não se sustenta, devido ao paleoambiente e arquitetura estratigráfica da Formação Codó não condizer com a antiga Formação Santana (Rossetti et al., 2000; Paz e Rossetti, 2006).

Uma segunda hipótese de ingressão marinha a partir da Bacia do Tucano também é levantada, devido as paleocorrentes fluviais medidas nas formações Barbalha (Grupo Santana) e Marizal (Bacia do Tucano) que indicam paleofluxo para o sul e sudeste, uma vez que as ingressões normalmente ocorrem na direção oposta a paleodrenagem continental (Assine 1994; Assine et al., 2014, 2016). Segundo Custódio et al. (2017), as concreções carbonáticas da Formação Romualdo com orientação NNW-SSE (Fara et al., 2005) corroboram com essa hipótese, por estarem disposta em posição perpendicular ao litoral. Outra evidencia, seria a presença de morros testemunhos entre as bacias do Araripe, Tucano e Jatobá, como Serra do Tonã e Serra Negra, com a mesma sucessão estratigráfica da Bacia do Araripe (Varejão et al., 2016). Entretanto, Arai (2016) discorda dessa hipótese pelo fato das formações Marizal e Barbalha não terem sido depositadas em um sistema fluvial típico, mas no início da transgressão marinha. Logo, as paleocorrentes se originariam através de marés de inundação, e representariam o próprio sentido da transgressão marinha.

A terceira hipótese aventada é a ingressão via Bacia Potiguar, devido à presença de fácies marinhas mais distais em Santana do Cariri (Beurlen, 1971; Mabesoone e Tinoco, 1973; Santos, 1982; Silva Santos, 1991), além de falhas com direção SW (Lima, 1978) que poderia conectar ambas as bacias. Para outros autores (e.g., Mabesoone et al., 1999; Valença et al., 2003), haveria uma conexão entre Bacia do Araripe e as bacias Sergipe, Parnaíba e Potiguar. Entretanto, a sedimentação marinha na Bacia Potiguar por ter idade turoniana não poderia ser correlata a Bacia do Araripe (Aptiano) (Lima, 1978; Arai, 2006), e ausência de sedimentos marinhos coevos à antiga Formação Santana nas bacias interiores, situadas entre a

Bacia do Araripe e a Potiguar (e.g., bacias de Icó, Iguatu, Lima Campos, Malhada Vermelha, Lavras da Mangabeira e Rio do Peixe), descartaria essa possibilidade (Arai, 2006).

4 MATERIAL E MÉTODOS

Associações de invertebrados fósseis foram coletados da Formação Romualdo nos estados de Pernambuco e Piauí para identificação taxonômica e interpretação das feições tafonômicas. Os detalhes são apresentados a seguir.

4.1 A ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo envolve afloramentos da porção oeste-sudoeste da Bacia Sedimentar do Araripe, são eles:

- Ladeira do Berlenga (7°16'56"S 40°35'29"O), município de Caldeirão Grande, Estado do Piauí;
- Sítios Cedro (39°35'32"N 7°29'35" E), Santo Antônio (39°32'51"N 7°30'31"E) e Zé Gomes (7°31'16"S 39°34'18"W), município de Exu, Estado de Pernambuco;
- Sítio Arrojado (7°41'12"S 40°33'48"W) e Mineradora Trevo (7°40'41"S 40°33'43"W), município de Araripina, Estado de Pernambuco;
- Mineradora Serrolândia (7°43'28"S 40°11'36"W), município de Ouricuri, Estado de Pernambuco;
- Mineradoras Qualiminas (7°41'58"S 40°10'21"W), localizada entre os limites dos municípios de Ipubi e Trindade, Estado de Pernambuco.

4.2 MATERIAL

O material estudado corresponde a associações de moluscos, equinóides e decápodes preservados nas rochas calcareníticas/calcáreas e folhelhos da Formação Romualdo.

4.3 MÉTODOS

Em todas as áreas de coleta foram elaborados perfis estratigráficos levando em consideração a associação fóssil de cada litofácies. Os blocos de rochas que continham os macroinvertebrados tiveram seu topo e base marcados para análise tafonômica.

Em laboratório o material foi lavado e preparado mecanicamente com auxílio de instrumentos odontológicos e microretífica. Para identificação dos espécimes, utilizou-se estereomicroscópio óptico ZEISS Discovery 8, e em alguns casos, Microscópio Eletrônico de

Varredura (MEV). Para enfatizar o relevo de alguns decápodes foi ainda aplicado cloreto de amônio vaporizado e/ou realizadas fotografias sob luz UV.

4.3.1 Análise Tafonômica

A análise tafonômica incluiu a descrição qualitativa e semi-quantitativa das feições macroscópicas como sugerido por Simões et al. (2010) (Quadro 3), utilizando ao menos 120 bioclastos (>2 mm) em cada camada fossilífera, seguindo Kidwell et al. (2001).

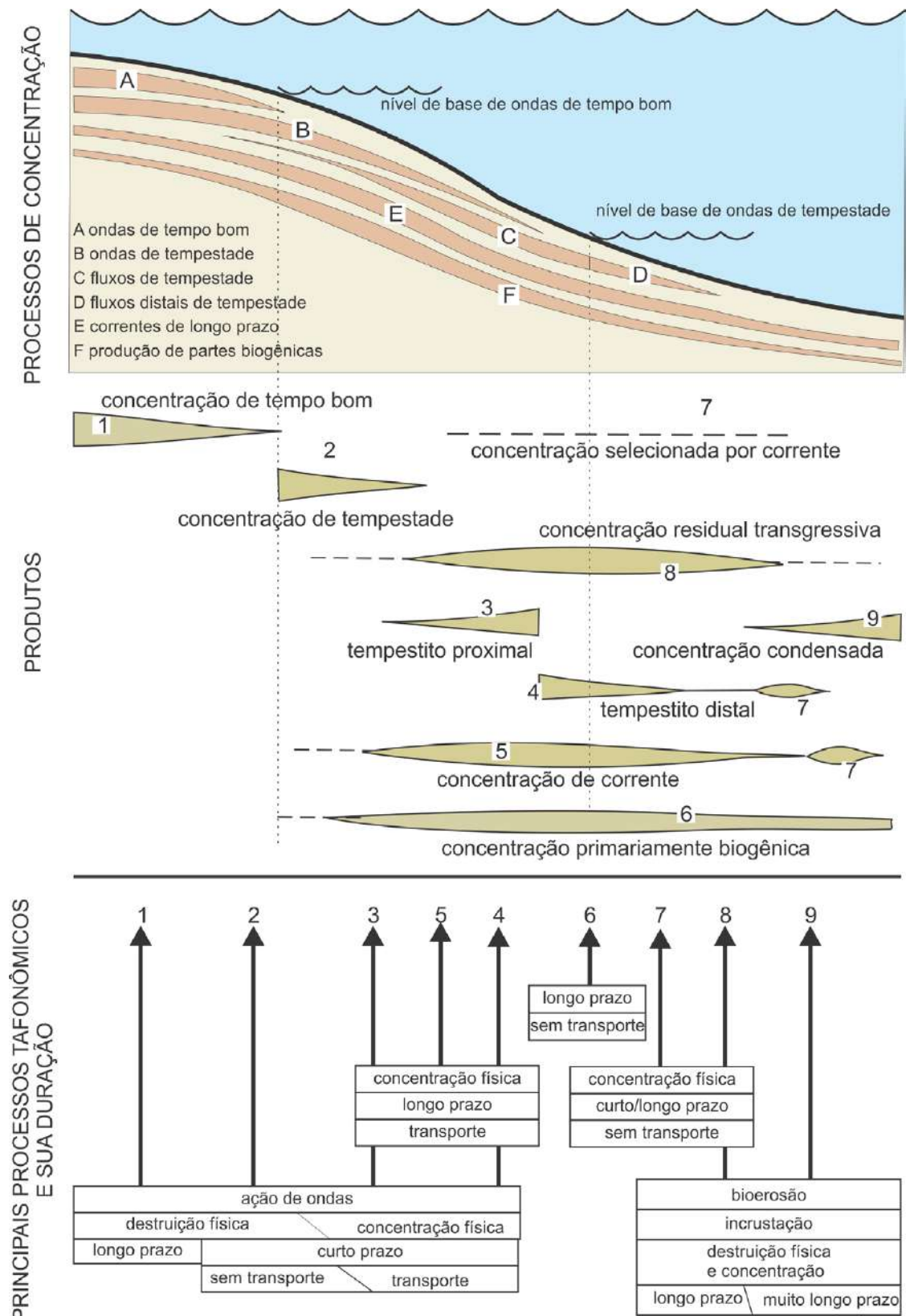
Quadro 3- Feições macroscópicas usadas na análise tafonômica, incluídas nas categorias: sedimentológicas, bioestratinômicas e diagenéticas dos bioclastos, estratigráficas e paleoecológicas da associação fossilífera.

1. Feições Sedimentológicas:	2. Feições Bioestratinômicas dos Bioclastos:
Grau de empacotamento dos bioclastos;	Orientação dos bioclastos em planta e seção;
Volume de bioclastos (%) no depósito;	Grau de articulação das carapaças ou esqueletos;
Grau de seleção dos bioclastos;	Fragmentação;
Tamanho dos bioclastos;	Corrosão;
Relação (%) de bioclastos e matriz;	Incrustação;
Estruturas sedimentares inorgânicas e biogênicas associadas;	
3. Feições Estratigráficas da Assembleia Fossilífera:	4. Feições Paleoecológicas da Assembleia Fossilífera:
Espessura;	Número de espécies;
Extensão lateral;	Abundância relativa de espécies;
Geometria do depósito;	Composição taxonômica
Contatos estratigráficos;	Modo de vida;
Estrutura interna ou microestratigrafia;	Classes de tamanho (idade);
Posição na sequência deposicional.	Mineralogia e microarquitetura originais.

Fonte: Adaptado de Simões et al., 2010.

As associações fósseis foram classificadas geneticamente ao longo do gradiente de águas rasas e profundas seguindo Fürsich e Oschmann (1993). Esses autores sugerem que invertebrados em ambientes marinhos, tal como as coquinas da Formação Romualdo podem ser agrupadas de acordo com suas feições tafonômicas em 9 tipos, refletindo os processos biológicos e hidráulicos, e por vezes o gradiente batimétrico em que foram formadas (Fig. 2).

Figura 2- Classificação das concentrações esqueléticas em nove tipos, de acordo com o processo de formação e gradiente de águas rasas e profundas.



Fonte: Erthal et al. 2017 (adaptada de Fürsich e Oschmann, 1993).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e discussões obtidos são apresentados em quatro artigos científicos, são eles:

5.1 ARTIGO 1 - TAPHONOMY OF MACROINVERTEBRATES AND ALBIAN MARINE INGRESSION AS RECORDED BY THE ROMUALDO FORMATION (CRETACEOUS, ARARIPE BASIN, BRAZIL). PUBLICADO NA **BRAZILIAN JOURNAL OF GEOLOGY**.

5.2 ARTIGO 2 - NEW BRACHYURAN CRABS FROM THE APTIAN–ALBIAN ROMUALDO FORMATION, SANTANA GROUP OF BRAZIL: EVIDENCE FOR A TETHYAN CONNECTION TO THE ARARIPE BASIN. PUBLICADO NA **ACTA PALAEONTOLOGICA POLONICA**.

5.3 ARTIGO 3 - NEW RECORDS OF SHRIMP FROM THE LOWER CRETACEOUS ROMUALDO FORMATION, ARARIPE BASIN, NORTHEASTERN BRAZIL, WITH NEW TAXA OF PENAEOIDEA (CRUSTACEA: DECAPODA: DENDROBRANCHIATA). PUBLICADO NA **CRETACEOUS RESEARCH**.

5.4 ARTIGO 4 - TAFONOMIA DAS COQUINAS DA FORMAÇÃO ROMUALDO, BACIA DO ARARIPE, E INGRESSÃO MARINHA: NOVOS SÍTIOS E ESTÁGIO ATUAL DO CONHECIMENTO.

ARTICLE

Tafonomy of macroinvertebrates and Albian marine ingression as recorded by the Romualdo Formation (Cretaceous, Araripe Basin, Brazil)

Ludmila Alves Cadeira do Prado^{1*} ,
Gelson Luís Fambrini¹, Alcina Magnólia Franca Barreto¹

ABSTRACT: The Romualdo Formation, Araripe Basin, crops out in the municipality of Exu, Pernambuco State, exposing coquinas. Fauna survey, taphonomic analysis of the macrobenthos, and identification of sedimentary facies of the outcrop were carried out to contribute to paleoenvironmental understanding of the Romualdo Formation. The association of molluscs (*Cerithium* sp., *Tylostoma ranchariensis*, *Aguileria dissita*, *Brachidontes araripensis* and unidentified cassiopids) and echinoids of the species *Bothryopneustes araripensis* suggests sedimentation in the marine environment. The taphonomic similarities made possible the grouping of coquinas into two types. Coquinas type 1 exhibit characteristics of transport and reworking of bioclast generated by storms in proximal setting. Coquinas type 2 demonstrates echinoids in situ and articulated with spines connected to shells, suggesting a fast sedimentation by distal tempestite. Regarding sedimentary facies, the concentrations of invertebrates would have been formed in the transitional offshore zone of siliclastic platform. The results presented here evidence a broader distribution of echinoids and expand the geographic limits of the shallow marine environment in the Romualdo Formation.

KEYWORDS: echinoids; mollusks; tempestites; obrution deposits; South America.

INTRODUCTION

Taphonomic analysis based on concentrations formed by molluscs and echinoids has frequently been used to aid in the interpretation of paleoenvironment and fossilization processes (García and Aguirre 2004, Olóriz *et al.* 2008). This fact is due to the predominance of molluscs in most fossil associations (Staff and Powell 1988), and echinoids, given the structure of their multi-articulated skeleton, are considered good indicators of biostratigraphic processes (Nebelsick 1999b).

Toward the top of the Romualdo Formation, there are different limestone and calciferous sandstones strata, mostly forming coquinas, which occur widespread in the Araripe Basin and can reach one meter in thickness (Sales 2005, Assine *et al.*, 2014). These shell-rich rocks are formed by marine molluscs and echinoderms, clearly suggesting a marine

ingression in the basin (Beurlen 1966, 1971, Assine 1992, 2007, Sales 2005, Assine *et al.* 2014).

Coquinas in the Romualdo Formation were taphonomically identified as being a result of storm wave's action in shallow marine environment (Sales 2005). However, most of the studied coquinas were from the state of Ceará, and are exclusively formed by molluscs (Sales 2005, Prado *et al.* 2014, Batista *et al.* 2015). Echinoid-bearing coquinas had only been found in the west border of the basin, Araripina county, Pernambuco State, Brazil (Beurlen 1966, Prado *et al.* 2015, 2016) (Fig. 1). Taphonomic studies classified them as proximal tempestite and obrution deposits (*sensu* Brett 1995) formed in the marine environment (Sales 2005, Prado *et al.* 2015, 2016). On the other hand, sedimentological studies interpreted coquinas as residual lags originated above ravine surface and analyzed as a stratigraphic framework (Assine 2007).

¹Department of Geology, Center of Technology and Geosciences, Universidade Federal de Pernambuco – Recife (PE), Brazil. E-mails: prado.lac@gmail.com, g_fambrini@yahoo.com, alcinabarreto@gmail.com

*Corresponding author.

Manuscript ID: 20180048. Received on: 04/24/2018. Approved on: 06/29/2018.

The new outcrop on the Cedro site, Exu county, Pernambuco State, has the most complete record of echinoids in the Araripe Basin so far, considering its abundance of fossil at various intervals in the sedimentary succession and distinct stages of disarticulation preserved. Taphonomic analyses, faunal survey and sedimentary facies analysis were performed to contribute to the interpretation of the Albian transgression in the Araripe sedimentary Basin.

The Araripe Sedimentary Basin and the Romualdo Formation

The Araripe Basin is in northeastern Brazil, covering the boundary zones between the states of Pernambuco, Piauí, and Ceará (38°30' to 40°55'W — 7°07' to 7°49'S). It is an inverted intracontinental graben originated during the Mesozoic over a Paleozoic intracratonic synclises, and records pre-rift, rift and post-rift (I and II) strata formed mainly by fluvial and lacustrine strata (Assine 2007, Marques *et al.* 2014) (Figs. 1 and 2).

According to Maisey (1991), the Romualdo Formation (post-rift I strata) is known worldwide for being considered a deposit with a high concentration of well-preserved fossils (*Lagerstätten* sensu Seilacher 1970). The faunal composition in the Romualdo Formation (Albian) is typical of a transitional marine environment, by presenting organisms that tolerate different levels of salinity, such as fish, invertebrates (crustaceans, molluscs and echinoids), dinoflagellates and foraminifera (Mabessone & Tinoco 1973, Lima 1978, Arai & Coimbra 1990, Berthou *et al.* 1990, Bruno & Hessel 2006, Arai 2014).

According to Custódio *et al.* (2017), the Romualdo Formation comprises transgressive and highstand system

tracts. The coastal alluvial and tide-dominated facies represents the transgressive systems tract, the marine black shales corresponding to the maximum flooding zone, and the shell beds record brief transgressive events during stillstand phases.

It should be noted that the maximum flood surface has already been reported by Assine (2007) for the coquina level.

The Romualdo Formation crops out in the municipality of Exu (Pernambuco State, Brazil) showing strata of shales with limestone concretions followed by bioclastic-rich limestones which contain the macroinvertebrates.

MATERIALS AND METHODS

Sedimentary and taphonomic data of the Romualdo Formation were acquired from a 5,5 m thick section outcropping at the Cedro site, Exu county (UTM N 0434996, E 9172325), located about 100 km from Araripina, Pernambuco State (Fig. 1). The levels of rocks that contained the macroinvertebrates had their base and top marked.

About 34 samples were collected and deposited in the Palaeontology Collection of the Geology Department (DGEO), Center of Technology and Geosciences (CTG), at Federal University of Pernambuco (UFPE), Pernambuco, Brazil. In the laboratory, a mean of 120 bioclasts (≥ 2 mm) was analyzed in each skeletal accumulation, as proposed by Kidwell *et al.* (2001), to obtain reliable taphonomic results.

The analysis of the biostratigraphic and sedimentological features was performed according to Kidwell *et al.* (1986), Kidwell and Bosence (1991), Kidwell and Holland (1991), including the degree of bioclastic packaging, sorting in 4 size classes (mm): I (2.0–3.9), II (4.0–7.9), III

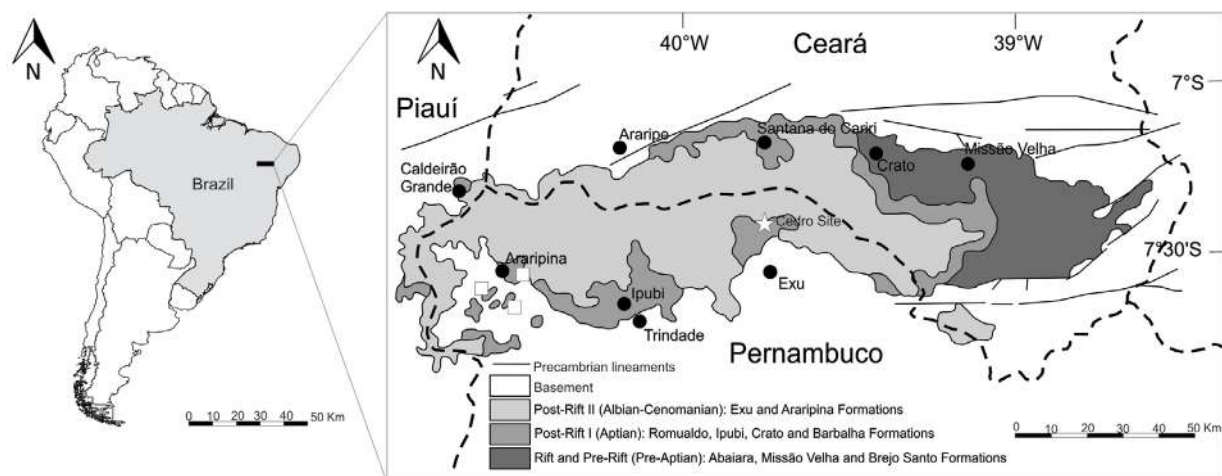


Figure 1. Location of echinoids-bearing coquinas in the Araripe Basin, northeast Brazil. The squares represent echinoid occurrences reported in previous studies, and the star shows the new occurrence on the Cedro site in Exu, Pernambuco State.

(8.0–15.9) and IV (16.0–31.9), orientation, fragmentation, corrosion, incrustation, articulation degree of shells, and sedimentary structures.

Regarding paleoecological features, life habits, composition (whenever possible, specimens were identified taxonomically to species or genus level) and relative abundance of the taxa were observed, considering as few abundant, abundant and very abundant those that represented < 20%, ≥ 20 and ≤ 80%, and > 80% of the fossil associations, respectively. Regarding the stratigraphic features, the thickness and stratigraphic contacts of the strata were analyzed. The genetic classification of the concentrations was performed according to Fürsich and Oschmann (1993).

RESULTS

Sedimentary facies

Six sedimentary facies were identified:

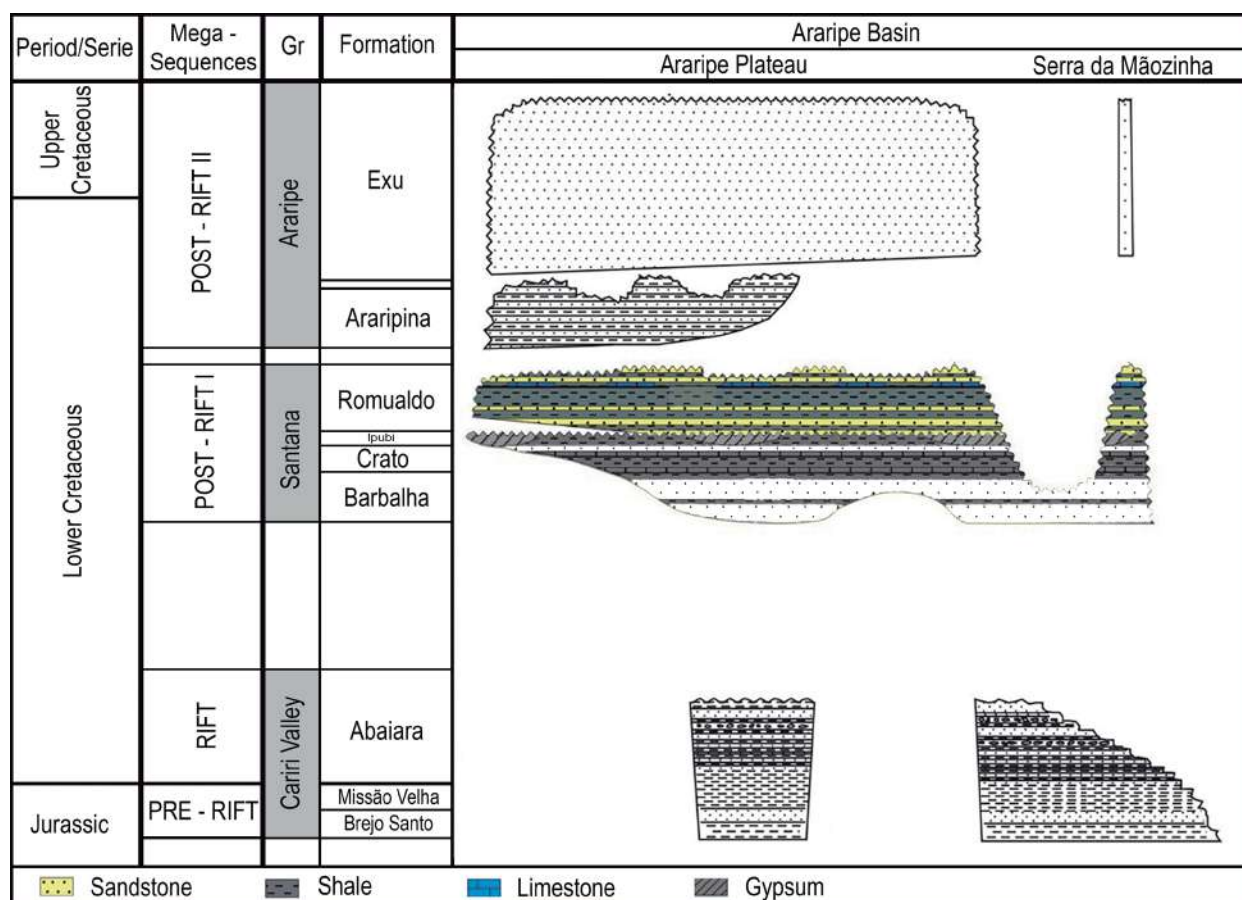
- (Cq) Coquinas;
- (Fl) Laminated shale;
- (Fml) Laminated mudstones;

- (Sm) Massive sandstones;
- (Sh) Laminated sandstones;
- (Sp) Tabular cross-stratification sandstones (Tab. 1).

At the Cedro site, the Romualdo Formation shows a succession of fossil-bearing shales (mainly fish remains and plant fossils in calcareous nodules — facies F1) interfingered by sandstone strata with planar and climbing ripple laminations (facies Sh and Sp), and thin layers of coquinas (Cq), labeled Layers of Cedro-LCE. Fifteen layers of calciferous sandstone (LCE1-LCE15) were observed. These layers are limited at the base by abrupt contacts, sometimes with incipient wavy truncated laminations (LCE1, LCE4, LCE5), intercalated with layers of laminated mudstones (Fml) or shales (Fl), apparently non-fossiliferous in LCE1-LCE5 and LCE6-LCE14 (Fig. 3).

Survey of Macrobenthos

Macroinvertebrates form fossiliferous concentrations in all layers, except in LCE11, which has a single unidentified closed articulated bivalve. Since samples with less than 20 specimens are not reliable to determine taphonomic



Source: modified from Assine, 2007.

Figure 2. Stratigraphic chart of the Araripe Basin with emphasis on the Romualdo Formation, Post-rift I Megasequence.

signatures in single taxa assemblages (Kidwell *et al.* 2001), LCE11 has not been considered for analysis.

The shell-beds are polytypic and polyspecific, with variations in the relative abundance of taxa and in the size classes of the individuals between the layers. The fauna includes the gastropods *Tylostoma ranchariensis* (Pereira *et al.* 2015), *Cerithium* sp., unidentified cassiopids, bivalves *Aguileria dissita* (White 1887) and *Brachidontes araripensis* (Pereira *et al.* 2015) (Fig. 4), and irregular echinoids (i.e., *Bothryopneustes araripensis* Manso & Hessel 2007) (Fig. 5).

Brachidontes araripensis is abundant in all layers and only becomes less abundant in LCE4 and LCE5, in which echinoids are very abundant. Echinoids occur in all layers, except in LCE1 and LCE6, in which the species *Tylostoma ranchariensis* and *Brachidontes araripensis* are abundant. *Cerithium* sp. occurs where echinoids are predominant and are less abundant in LCE4 and LCE5, but abundant in LCE15. Cassiopids are less abundant, and *Aguileria dissita* ranges from less abundant to abundant along the layers (Fig. 3).

Taphonomic data

The shell-beds show high levels of fragmentation and or disarticulation, except the gastropods present in LCE1, LCE2,

LCE7 and LCE8 (Fig. 3). The coquinas have low abrasion and no sign of bioerosion or corrosion. Bioclast orientation is concordant and polymodal regarding bedding plans, with concavities facing both upwards and downwards. Chaotic distribution, as displayed by vertical sections, is less frequent.

The coquinas quantitatively differ each to another concerning the taphonomic attributes (Fig. 3). However, similarities make possible to group them into two types (Tab. 2):

- Type 1, which has loose to dense packing, well-sorted, and nesting of bivalves (LCE2, LCE3, LCE6, LCE7, LCE8, LCE9, LCE10, LCE11, LCE12, LCE13, LCE14 and LCE15);
- Type 2, which present loose to disperse packing, poorly-sorted, and presence of articulated echinoids (LCE1, LCE4 and LCE5) (Figs. 3, 5 and 6).

Disarticulation stages of echinoids

The echinoid shells have four disarticulation stages:

1. Fully articulated;
2. Collapsed and cracked radially;
3. Fragmented with many articulated plates; and
4. Fragmented into small parts (Fig. 5).

There is a predominance of fragmented individuals in the layers where echinoids occur (stages 3 and or 4). Stages 1 and 2 occur mainly in type 2 coquina (Fig. 3), sometimes

Table 1. Sedimentary facies of the Romualdo Formation in the study area.

Facies Code	Facies	Description	Interpretation
Cq	Coquinas	Yellow, fine calcareous sandstones with remains of shells, mostly fragmented, sometimes with incipient truncated wavy laminations.	Accumulation in high-energy events. Storm beds (tempestites) in a shallow environment.
Fl	Laminated Shale	Light gray to whitish gray shales, laminated, layered with lateral continuity and centimetric thickness, with horizontal lamination and expressive scattered fossil content. There is often the occurrence of centimetric to decimetric discoidal calcareous concretions in the fossils, rich in remains of plants and fish.	Decanting of clays in calm waters. The light coloring suggests oxidizing conditions at the depositional site. Fall-out deposits.
Fml	Laminated mudstones	Laminated mudstones laterally persistent in succession with up to 1 m thick. Features light gray to whitish color and light tints (cream, yellow) when altered. It is common the presence of carbonate nodules and discoidal calcareous concretions associated or not to the presence of fossil. Remains of fish (scales, teeth, and bones), coprolites, mollusks and rare plant fragments are common.	Deposition by decantation in calm waters, disoxic or anoxic conditions. Fall-out deposits.
Sm	Massive sandstones	Tabular centimetric layers, or lenticular, of very fine to fine calcareous sandstones, well sorted.	Bottom currents associated with storm waves.
Sh	Laminated Sandstones	Very fine sandstones, well sorted, light gray to whitish gray color, with horizontal lamination, arranged in centimetric to decimetric tabular layers.	Deposition by bottom currents in plane beds under conditions of upper flow regime.
Sp	Planar cross-stratification sandstones	Fine sandstones with small and low angle planar cross-stratification, arranged in decimetric tabular layers. Color is light gray to whitish.	Migrating forms of sub-aqueous beds of sinuous crest due to continued action of unidirectional currents.

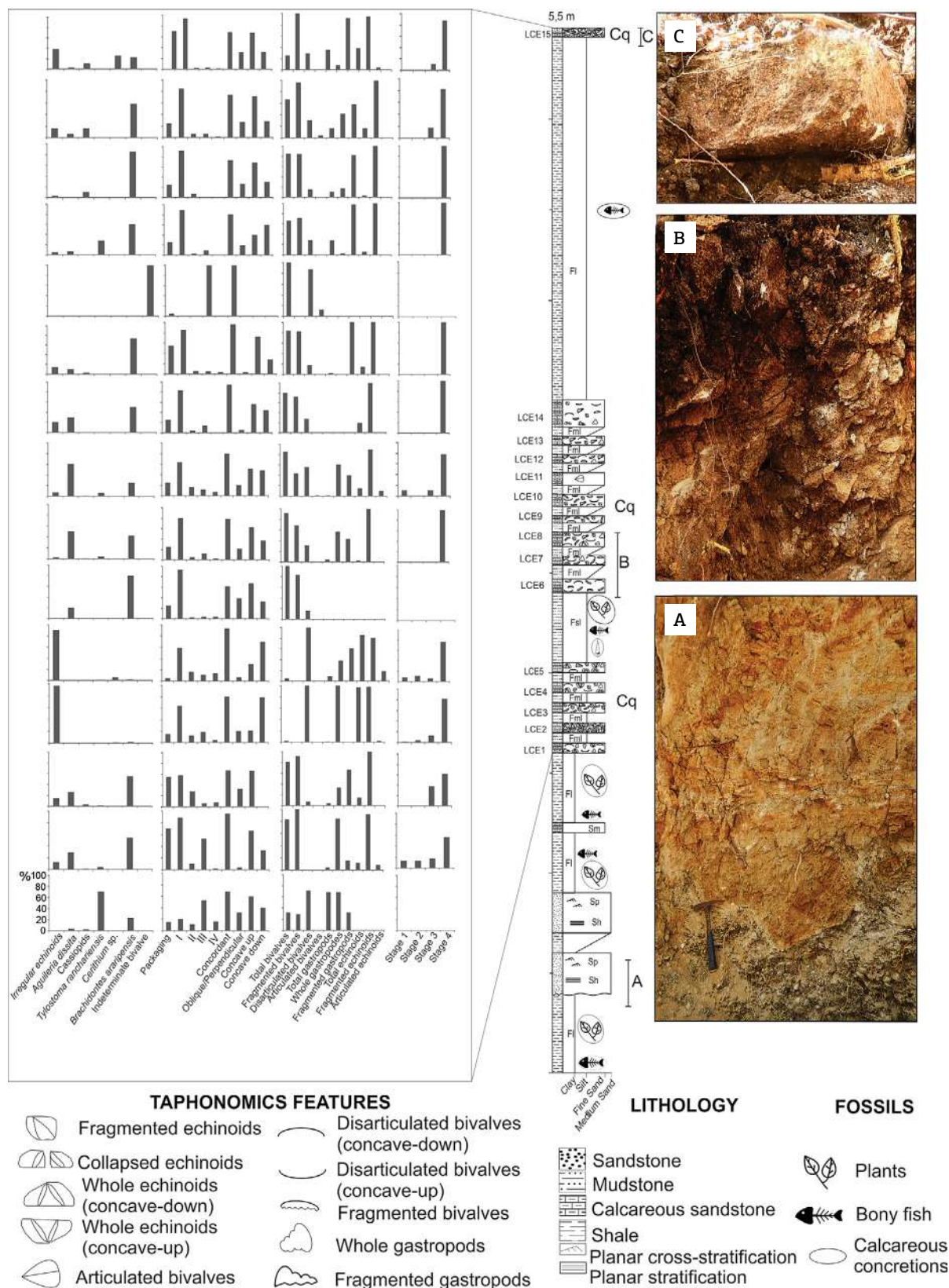


Figure 3. Stratigraphic column of the Romualdo Formation in the study area. Abundance of taxa, biostratigraphic and sedimentological features analyzed in the layers LCE1–LCE15 ($n = 120$). Size classes of bioclasts (mm): I (2.0–3.9), II (4.0–7.9), III (8.0–15.9) and IV (16.0–1.9). Disarticulation stages of echinoid shells: 1) fully articulated, 2) radially cracked, 3) large fragments, 4) small fragments. (A) Facies Fl, Sh and Sp. (B) Facies Fml and layers LCE6–LCE8. (C) Layer LCE15.

with spines attached to the shells, predominating those with the concavity facing upwards.

DISCUSSION

Unlike the outcrops located in the eastern border of Araripe Basin analyzed by Custódio *et al.* (2017) to identify transgressive and highstand tracts of the Romualdo Formation, on Cedro site the concretions-bearing shale occurs not only below the coquinas, but between them. Facies of shales and mudstones in most of the studied outcrop indicate an environment with a predominance of sedimentation under low-energy condition. The presence of marine fish (e.g. *Lepidotes*, *Vinctifer*, *Cladocyclus* and *Rhinobatus*) in the limestone concretions in these facies suggests the existence of a seaway between Araripe Basin and the open marine environment, which allowed these organisms to migrate to the area (Silva Santos & Valença 1968, Martill 1988, 2007, Assine 2007, Assine *et al.* 2014).

The sandstone facies with planar cross-stratification (Sp facies), horizontal lamination (Sh facies) and structureless (Sm facies) are related to the action of unidirectional currents, deposition by bottom currents under upper flow regime and bottom currents associated with storm waves, respectively. This facies association is typically for wave-influenced coastal environments (Walker & Plint 1992, James & Dalrymple 2010). The association of mudstones and bioclastic sandstones with incipient wavy truncated laminations indicates sedimentation in the offshore transition zone of

siliclastic platforms (i.e., below the base level of fair weather waves and above the base level of storm waves; Reading & Collinson 1996, James & Dalrymple 2010, Mancosu *et al.* 2015, Horodyski *et al.* 2014) (Fig. 7).

Brachidontes araripensis occurs in all coquinas, indicating these organisms were highly adapted to local environmental conditions, perhaps because this species could tolerate variations in salinity as well as the living species of this genus (Terranova *et al.* 2007). However, the other identified taxa occur in marine waters (Wenz 1938, Stephenson 1952, Morter 1984, Hessel & Junior 1989, Cleevely & Morris 1988, Sälgeback & Savazzi 2006), indicating that, although there were variations in salinity, it would still be sufficient for the establishment of benthic marine communities with echinoids (*Bothryopneustes araripensis*), which are found in most of the coquinas.

Although coquinas are similar regarding their taxonomic composition, they differ in the abundance of groups. Thus, overtime, the environment would have maintained the abiotic conditions necessary for the establishment of a fauna with possible salinity variations that would favor the predominance of certain groups, as it has been already observed in previous studies (Pereira *et al.* 2015, Prado *et al.* 2016).

The species identified in the Cedro outcrop have an epifaunal and or semi-infaunal mode of life, i.e., they have a lower preservation potential in comparison with infaunal individuals. That is because they remain longer on the sediment-water interface and are more easily exposed to the turbulence of the environment in low

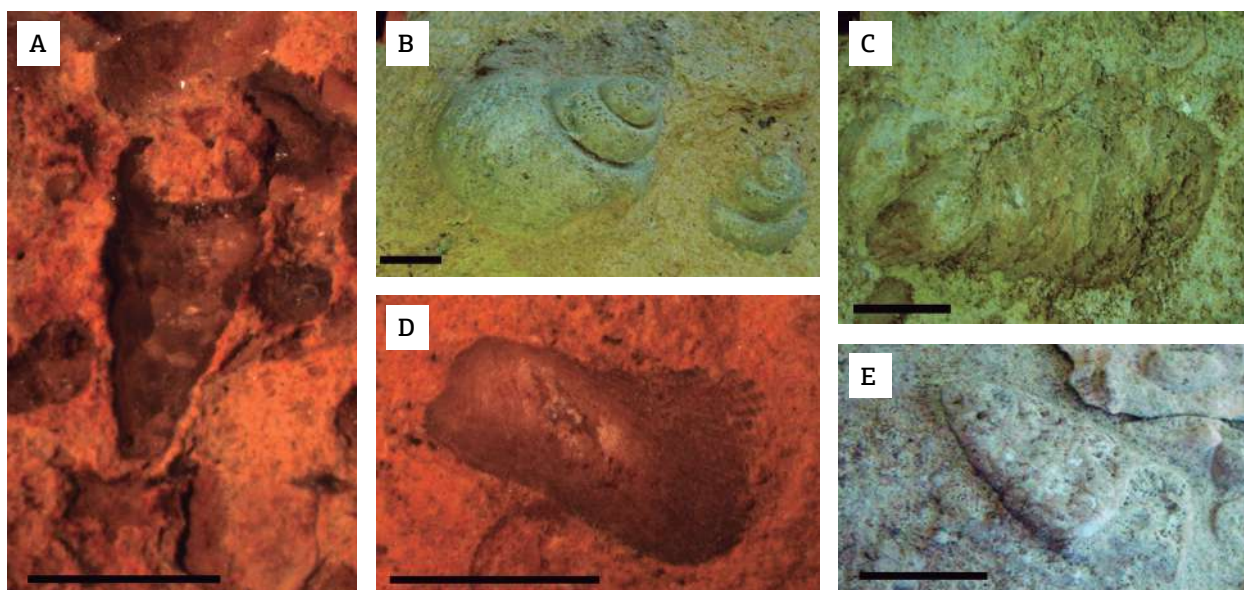


Figure 4. Macroinvertebrates identified in the prospected outcrop: (A) *Cerithium* sp. (DCEO-CTG-UFPE-8712), (B) *Tylostoma ranchariensis* (DCEO-CTG-UFPE-8681), (C) *Aguilera dissita* (DCEO-CTG-UFPE-8684), (D) *Brachidontes araripensis* (DCEO-CTG-UFPE-8681), (E) Cassiopids gastropod (DCEO-CTG-UFPE-8712). Scale: 1 cm.

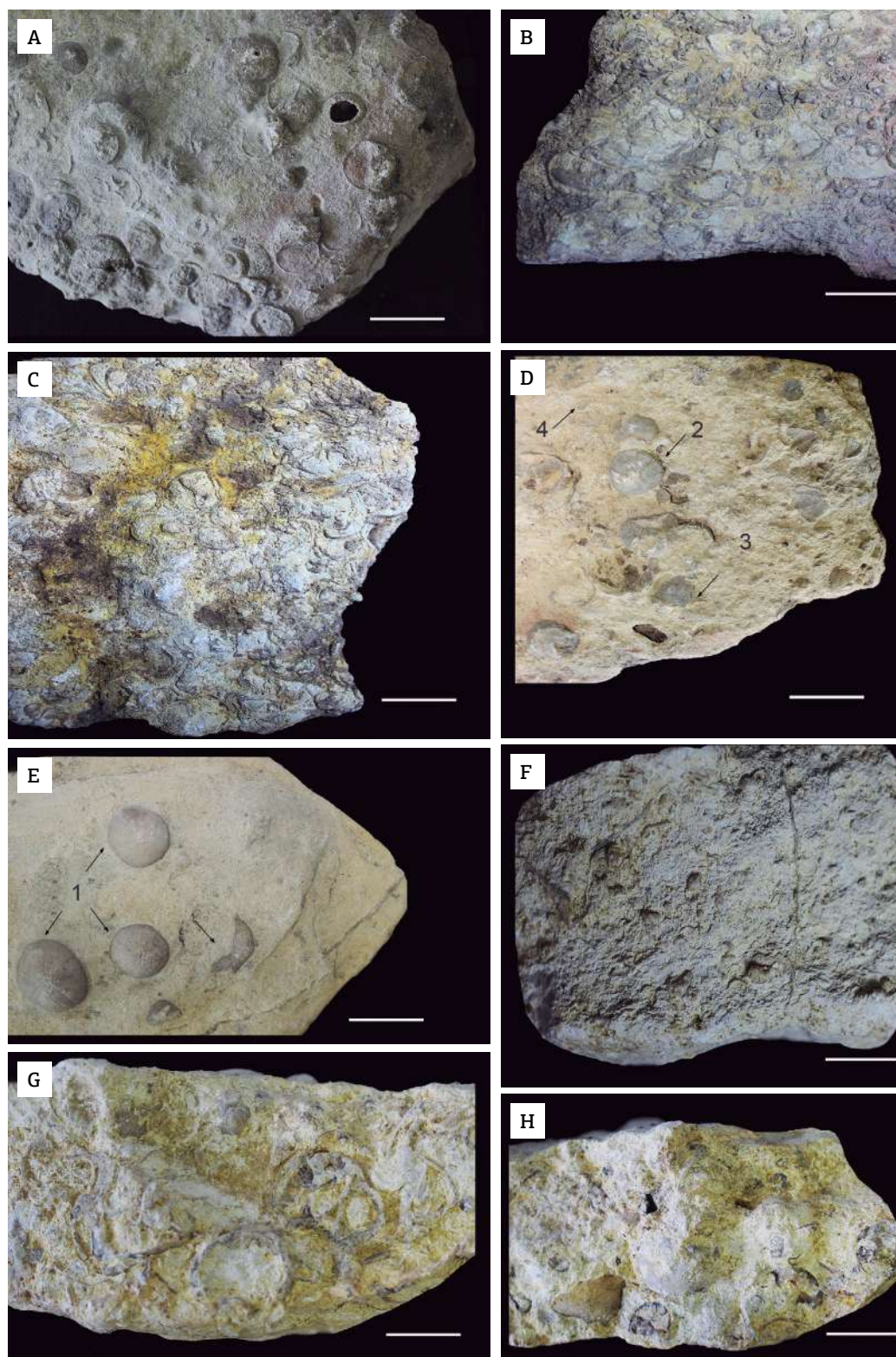


Figure 5. Coquinas types 1 and 2: (A) LCE1 (DGEO-CTG-UFPE-8680), (B) LCE2 (DGEO-CTG-UFPE-8682), (C) LCE3 (DGEO-CTG-UFPE-8683), (D) LCE4 (DGEO-CTG-UFPE-8692), (E) LCE5 (DGEO-CTG-UFPE-8694), (F) LCE6 (DGEO-CTG-UFPE-8701), (G) LCE7 (DGEO-CTG-UFPE-8702), (H) LCE8 (DGEO-CTG-UFPE-8703). Notice in the coquinas type 2 the loose (D) to disperse (A and E) packed fossil association, shells of echinoids of the *Bothryopneustes araripensis* species facing upward and downward (E), and desarticulation stages of irregular echinoid: 1) Fully articulated shell (E), 2) radially cracked shell, 3) fragmented shell with many articulated plates, 4) shell fragmented into small parts (D). Observe in the coquinas type 1 the loose (F, G and H) to dense (B and C) packed fossil association, good sorted and chaotic distribution. Scale: 1 cm.

sedimentation rate conditions, usually predominant in the day-to-day (Kidwell 1986, Best & Kidwell 2000), justifying the high index of fragmentation in the coquinas on the Cedro site.

Preservation of the organism is also directly influenced by its skeletal type (Speyer & Brett 1988). Fragmentation and disarticulation is high in all taxonomic groups, especially in the echinoids (stages 3 and 4), because the structure of their multi-element skeleton (*sensu* Speyer & Brett 1988) is more susceptible to disarticulation, occurring from within a few hours up to a few days (Schäfer 1972). The exceptions are the gastropods, which due to their univalve skeleton and absence of ligament tissue are physically more resistant hence more frequently preserved (Speyer & Brett 1988).

The disarticulation and fragmentation seems to be more related to the high energy of the environment than to biological or chemical processes since it is observed in all taxonomic groups and because there are no signs of corrosion and bioerosion. The absence of corrosion and bioerosion also suggests that the individuals remained for a short time exposed to the water-sediment interface, being rapidly buried after dying (Davies *et al.* 1989).

The degree of packing ranges from dispersed to dense, suggesting there would be variations in the hydraulic selection of the matrix or in the availability of bioclasts (Kidwell *et al.* 1986, Holz & Simões 2002, Schmidt-Neto *et al.* 2014).

Genetic classification of the concentrations

According to Aigner and Reineck (1982) and Aigner (1985), sedimentary records in siliciclastic platforms are controlled mainly by tempestite events. However, even though they are formed by the same type of event, the fossiliferous concentrations have peculiar taphonomic features along the shallow to deep-water gradient (Fürsich & Oschmann 1993).

Coquinas type 1 has characteristics of bioclastic transport and reworking through storm waves, such as the presence of well-selected bioclasts and nested valves (Allen 1990, Kidwell

& Bosence 1991). Because they present a typical transport biofabric with few signs of abrasion, these coquinas would have been formed by para-autochthonous and allochthonous individuals through short-term currents such as those generated by storm in proximal settings (Fig. 7) (Simões *et al.* 2000, Fürsich & Oschmann 1993). The absence of any sedimentary structure that could indicate the action of storm events is justified possibly due to the high availability of bioclasts that would have obliterated the sedimentary record. For bioclastic concentrations in storm-influenced shelf environments, Kidwell & Bosence (1991) estimate a time-averaging ranging from a few decades to a few thousands of years.

In coquinas Type 2, the transport seems to have been less significant as suggested, for example, by the poor selection of bioclasts and preservation of several whole specimens. The presence of articulated concave-upwards echinoid shells (stages 1 and 2) with the concavity facing upward, sometimes with spines, indicates that a rapid sedimentation process buried the echinoid still alive in situ (obration deposits), representing the best evidence of autochthony. The few signs of abrasion indicate that coquinas were formed in areas of low hydrodynamic energy, and the stability of the bottom of this area was only altered by episodic events, i.e. storms (Schmidt-Neto *et al.* 2014).

Obrution deposits are generated from sudden sedimentological events, of which identification is facilitated by the presence of well-preserved epifaunal benthic organisms (Brett 1995). This type of fossil association is most often identified at the final transgressive stage or at the beginning of the highstand deposits (Brett & Seilacher 1991), and corresponds to what Kidwell and Bosence (1991) denominate *census assemblages*, which is the type of fossil accumulation most similar to the original communities, with no time-averaging or time-averaging ranging from days to hundreds of years (Kidwell & Bosence 1991, Kidwell 1997). Obrution deposits are most commonly found in calm sedimentary environments such as in areas more distant from

Table 2. Main taphonomic features of coquinas type 1 and 2 and their interpretations.

Coquinas	Taphonomic signatures	Interpretation
Type 1	High levels of fragmentation and or disarticulation, low abrasion and bioerosion and corrosion absent. Good sorted and loose to dense packed fossil assemblage. Bioclast orientation on bedding plans is concordant and polymodal, with the concavities facing both upwards and downwards. In cross section, chaotic distribution is less frequent. Presence of nesting of bivalves.	Transport and reworking of bioclastic through storm waves in proximal setting of transitional offshore zone.
Type 2	High levels of fragmentation and or disarticulation, low abrasion and abrasion and bioerosion and corrosion absent. Poor sorted and loose to disperse packed fossil assemblage. Bioclast orientation on bedding plans is concordant and polymodal, with the concavities facing both upwards and downwards. In cross section, chaotic distribution is less frequent. Presence of articulated echinoids with spines attached to the shells.	Rapid sedimentation of echinoids in situ by storms in more distal setting of transitional offshore zone.

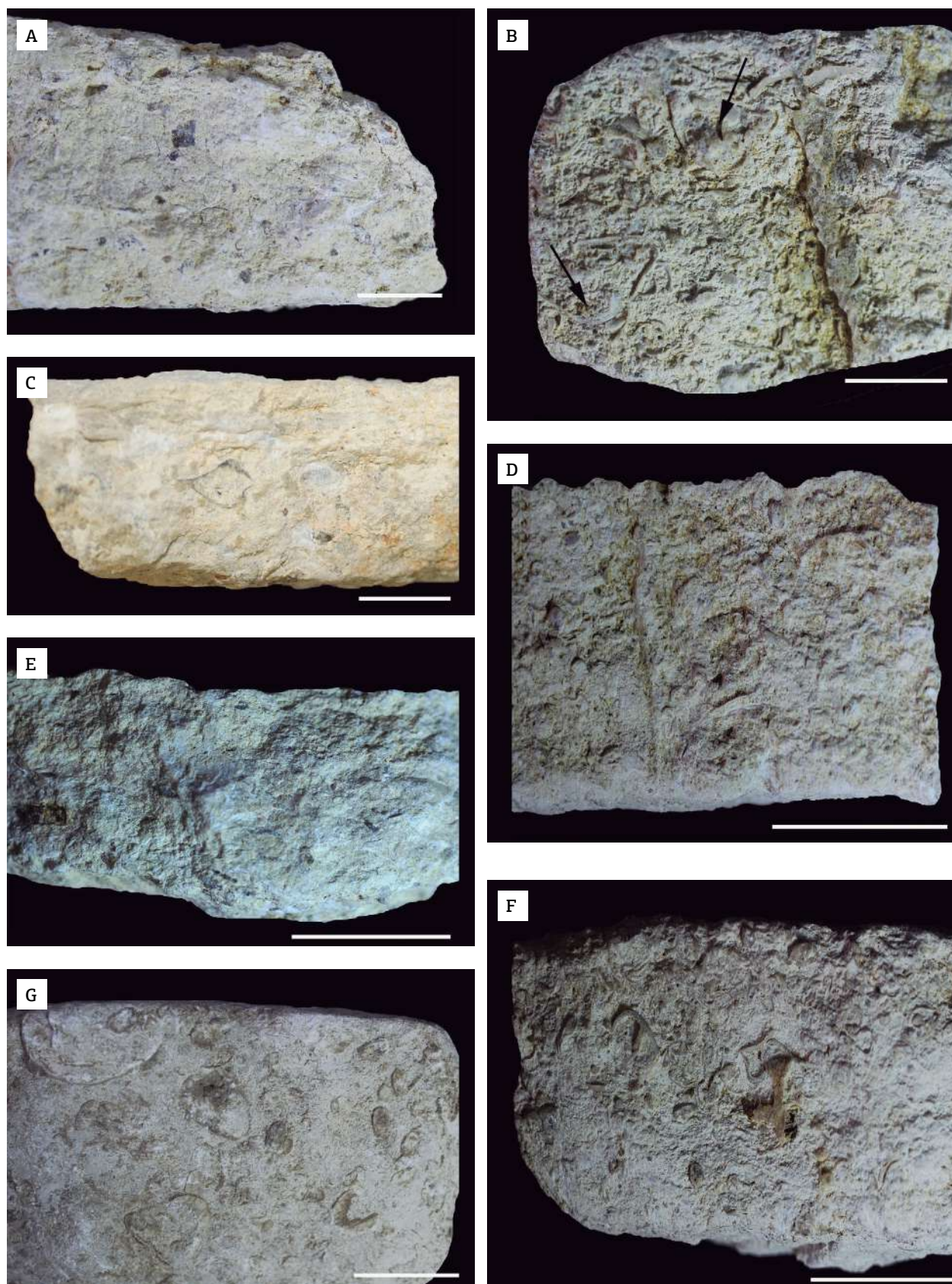
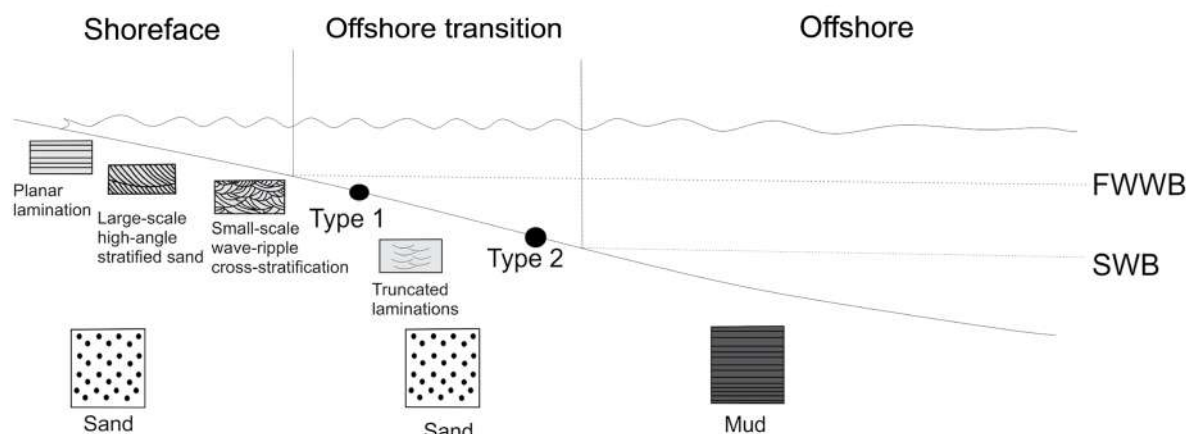


Figure 6. Coquinas type 1: (A) LCE9 (DGEO-CTG-UFPE-8704), (B) LCE10 (DGEO-CTG-UFPE-8705), (C) LCE11 (DGEO-CTG-UFPE-8706), (D) LCE12 (DGEO-CTG-UFPE-8707), (E) LCE13 (DGEO-CTG-UFPE-8708), (F) LCE14 (DGEO-CTG-UFPE-8709), (G) LCE15 (DGEO-CTG-UFPE-8710). Notice the chaotic distribution, nesting of bivalves (B), and loose (A, C, D and E) to dense (B, F and G) packed fossil association. Scale: 1 cm.



Source: modified from Dumas and Arnott, 2006.

Figure 7. Shoreface-offshore marine profile. Note the distribution of coquinas type 1 and 2 in the transitional offshore zone.

the platform (Fig. 7), due to the decrease of turbidity currents that settle the suspended sediment (Brett *et al.* 1986, 1997, Donovan 1991, Walker & Plint 1992). In fact, the echinoid *Bothryopneustes araripensis* identified in the Type 2 coquinas has also been interpreted as typical of low energy marine environments (Manso & Hessel 2012).

Sedimentation in the bioclastic sandstone seems to have occurred in an offshore-transition zone due to the sandy granulometry and the presence of sedimentary structures related to storm events, such as truncated laminations, usually preserved in these areas (Reading & Collinson 1996). Moreover, a better preservation of regular echinoids is also expected in the transition zone, where there would be less physical and biological reworking (Kidwell & Baumiller 1990).

In coquinas Type 2, articulated echinoid shells are also found, not in a life position (concavity facing downwards). According to Brett *et al.* (1997), echinoids can be transported still articulated in few hours after their death. Fragments in these coquinas indicate the influence of mixed taphonomic processes, related to energy events that would have carried remains of fossil from other areas and incorporated them into the bottom sediment for longer periods (Speyer & Brett 1991, Reid *et al.* 2015). Therefore, part of the fauna preserved in these coquinas would have represented para-autochthonous and/or allochthonous individuals.

Nebelsick (1999a) observed that the radial fissure in sand dollars (an irregular echinoid of the order Clypeasteroida) resulted from the sediment load on the fossil shells. Post-depositional changes of this type may also be related to the preservation of radially collapsed and cracked echinoids in the coquinas Type 2, as already suggested by Sales (2005).

CONCLUSION

The facies and fossils in the Romualdo Formation on the Cedro site indicate an environment with marine influence and predominantly calm sedimentation, represented by shales/mudstones with fossils of fish and vegetables, sometimes interrupted by tempestite sedimentation forming coquinas. The sedimentation of macrobenthos seems to have occurred in a transitional offshore marine environment, sometimes influenced by proximal storms, with coquinas exhibiting a transport biofabric and sometimes by more distal storms, representing the best evidence of in situ preservation of echinoids in the area.

The new occurrence of autochthonous echinoids in the municipality of Exu, Pernambuco, confirms the marine entry into Araripe and expands its paleogeographic boundaries to the west.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank Capes and CNPq for the fellowships; the geologist Alexandre Magno Feitosa Sales (*in memoriam*) for his friendship and valuable scientific contributions. We also thank Dra. Paula Sucerquia for her suggestions and the Exu city council, Pernambuco State, and Genilma Cordeiro and Cícero Marcelino for the pleasant company in the field work. We are grateful as well to Michael Holz and the anonymous reviewer for their accurate comments that improved the present paper.

REFERENCES

- Aigner T. 1985. *Storm depositional systems-dynamic stratigraphy in modern and ancient shallow-marine sequences*. New York, Lecture notes in Earth Sciences, 174 p.
- Aigner T., Reineck H.E. 1982. Proximity trends in modern storm sands from the Helgoland Bight (North Sea) and their implication for basin analysis. *Senckenbergiana Maritima*, **14**:183-215.
- Allen J.R.L. 1990. Transport - hydrodynamics: shells. In: Briggs D.E.G., Peter C. (Eds.). *Palaeobiology: a synthesis*. Oxford, Blackwell Science, p. 227-229.
- Arai M. 2014. Aptian/Albian (Early Cretaceous) paleogeography of the South Atlantic: a paleontological perspective. *Brazilian Journal of Geology*, **44**:339-350. <http://dx.doi.org/10.5327/Z2317-4889201400020012>
- Arai M., Coimbra J.C. 1990. Análise paleoecológica do registro das primeiras ingressões marinhas na Formação Santana (Cretáceo Inferior da Chapada do Araripe). In: Simpósio sobre a Bacia do Araripe e Bacias Interiores do Nordeste, 1., Crato. Atas... v. 1, p. 225-239.
- Assine M.L. 1992. Análise estratigráfica da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, **22**:289-300.
- Assine M.L. 2007. Bacia do Araripe. *Boletim de Geociências da Petrobras*, **15**:371-389.
- Assine M.L., Perinotto J.A.J., Custódio M.A., Neumann V.H., Varejão F.G., Mescolotti P.C. 2014. Sequências deposicionais do Andar Alagoas da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. *Boletim de Geociências da Petrobras*, **22**:3-28.
- Batista M.E.P., Sales A.M.F., Pinheiro A.P., Barros O.A. 2015. Tafonomia de moluscos do sítio Barreiros, município de Moreilândia, PE, Bacia do Araripe. *Estudos Geológicos*, **25**:53-60.
- Berthou P.Y., Viana M.S.S., Campos D.A. 1990. Coupe de la Formation Santana dans le secteur de Pedra Branca (Santana do Cariri; Bassin d'Araripe, NE du Brésil): contribution a l'étude de la sedimentologie et des paleoenvironnements. In: Simpósio sobre a Bacia do Araripe e Bacias Interiores do Nordeste, 1., Crato. Atas... v. 1, p. 173-191.
- Best M.R., Kidwell S.M. 2000. Bivalve taphonomy in tropical mixed siliciclastic-carbonate settings. II. Effect of bivalve life habits and Shell types. *Paleobiology*, **26**:103-115. [https://doi.org/10.1666/0094-8373\(2000\)026%3C0103:BTITMS%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1666/0094-8373(2000)026%3C0103:BTITMS%3E2.0.CO;2)
- Beurlen K. 1966. Novos equinóides no Cretáceo do Nordeste do Brasil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **38**:455-464.
- Beurlen K. 1971. As condições ecológicas e faciológicas da Formação Santana na Chapada do Araripe (Nordeste do Brasil). *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **43**:411-415.
- Brett C.E. 1995. Sequence stratigraphy, biostratigraphy and taphonomy in shallow marine environments. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **10**:597-616. <https://doi.org/10.2307/3515097>
- Brett C.E., Moffat H.A., Taylor W.L. 1997. Echinoderm taphonomy, taphofacies, and lagerstätten. *Paleontological Society Papers*, **3**:147-190. <https://doi.org/10.1017/S1089332600000243>
- Brett C.E., Seilacher A. 1991. Fossil lagerstätten: a taphonomic consequence of event sedimentation. In: Einsele G., Ricken W., Seilacher A. (Eds.). *Cycles and events in stratigraphy*. Berlin, Springer-Verlag, p. 283-297.
- Brett C.E., Speyer S.E., Baird G.C. 1986. Storm-generated sedimentary units: Tempestite proximity and event stratification in the Middle Devonian Hamilton Group of New York. In: Brett C.E. (Ed.). *Dynamic stratigraphy and depositional environments of the Hamilton Group (Middle Devonian) in New York State*. *Museum Bulletin*, New York, p. 129-156.
- Bruno A.P., Hessel M.P. 2006. Registros paleontológicos do Cretáceo marinho na Bacia do Araripe. *Estudos Geológicos*, **16**:30-49.
- Cleevely R.J., Morris N.J. 1988. Taxonomy and ecology of Cretaceous Cassiopidae (Mesogastropoda). *Bulletin of the British Museum (Natural History)*, **44**:233-291.
- Custódio M.A., Quaglio F., Warren L.V., Simões M.G., Fürsich F.T., J. Perinotto, J.A., Assine, M.A. 2017. The transgressive-regressive cycle of the Romualdo Formation (Araripe Basin): Sedimentary archive of the Early Cretaceous marine ingressão in the interior of Northeast Brazil. *Sedimentary Geology*, **359**:1-15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sedgeo.2017.07.010>
- Davies D.J., Powell E.N., Stanton R.J. 1989. Relative rates of shell dissolution and net sediment accumulation-a commentary: can shell beds form by the gradual accumulation of biogenic debris on the sea floor? *Lethaia*, **22**:207-212. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3931.1989.tb01683.x>
- Donovan S.K. 1991. The taphonomy of echinoderms: calcareous multi-element skeletons in the marine environment. In: Donovan S.K. (Ed.). *The process of fossilization*. London, Belhaven Press, p. 241-269.
- Dumas S., Arnott R.W.C. 2006. Origin of hummocky and swaley cross-stratification - The controlling influence of unidirectional current strength and aggradation rate. *Geology*, **34**:1073-1076. <https://doi.org/10.1130/G22930A.1>
- Fürsich F.T., Oschmann W. 1993. Shell beds as tools in basin analysis: the Jurassic Kachchh, western India. *Journal of Geological Society*, **150**:169-185. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.150.1.0169>
- García J.Y., Aguirre J. 2004. Quantitative taphonomic analysis and taphofacies in lower pliocene temperate carbonate-siliciclastic mixed platform deposits (Almería- Níjar basin, SE Spain). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **207**:83-103. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2004.02.002>
- Hessel M.H.R., Junior N.P.F. 1989. Algumas espécies de Aguilera (Bivalvia) do Albiano Inferior de Sergipe. In: Congresso Brasileiro de Paleontologia, 11., Curitiba. *Anais...* p. 301-315.
- Holz M., Simões M.G. 2002. *Elementos Fundamentais de Tafonomia*. Porto Alegre, Universidade/UFRGS, 231 p.
- Horodyski R.S., Holz M., Grahm Y., Bosetti E.P. 2014. Remarks on sequence stratigraphy and taphonomy of the Malvinokaffric shelly fauna during the Kacák Event in the Apucarana Sub-basin (Paraná Basin), Brazil. *International Journal of Earth Sciences (Geologische Rundschau)*, **103**:367-380. <https://doi.org/10.1007/s00531-013-0954-9>
- James N.P., Dalrymple R.W. 2010. *Facies Models* 4. Canada, Geological Association of Canada, 574 p.
- Kidwell S.M. 1986. Taphonomic Feedback in Miocene Assemblages: Testing the Role of Dead Hardparts in Benthic Communities. *Palaios*, **1**:239-255. <https://doi.org/10.2307/3514688>
- Kidwell S.M. 1997. Time-averaging in the marine fossil record: overview of strategies and uncertainties. *Geobios*, **30**:977-995. [https://doi.org/10.1016/S0016-6995\(97\)80219-7](https://doi.org/10.1016/S0016-6995(97)80219-7)
- Kidwell S.M., Baumiller T. 1990. Experimental disintegration of regular echinoids: roles of temperature, oxygen and decay thresholds. *Paleobiology*, **16**:247-271. <https://doi.org/10.1017/S0094837300009982>
- Kidwell S.M., Bosence D.W. 1991. Taphonomy and time- averaging of marine shelly faunas In: Allison P.A., Briggs D.E.G. (Eds.). *Taphonomy: releasing the data locked in the fossil record*. New York, Plenum Press, p. 115-209.

- Kidwell S.M., Fürsich, F.T., Aigner, T. 1986. Conceptual framework for the analysis and classification of fossil concentrations. *Palaios*, **1**:228-238. <https://doi.org/10.2307/3514687>
- Kidwell S.M., Holland S.M. 1991. Field description of coarse bioclastic fabrics. *Palaios*, **6**:426-434. <https://doi.org/10.2307/3514967>
- Kidwell S.M., Rothfus T.A., Best M.M.R. 2001. Sensitivity of taphonomic signatures to sample size, sieve size, damage scoring system, and target taxa. *Palaios*, **16**:26-52. <https://doi.org/10.2307/3515551>
- Lima M.R. 1978. *Palinologia da Formação Santana (Cretáceo do Nordeste)*. PhD Thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo, 337 p.
- Mabesoone J.M., Tinoco I.M. 1973. Paleogeology of the Aptian Santana Formation (Northeastern Brazil). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **14**:97-118. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(73\)90006-0](https://doi.org/10.1016/0031-0182(73)90006-0)
- Maisey J.G. 1991. *Santana fossil an illustrated atlas*. Neptune City, New Jersey, T.F.H. Publications, 459 p.
- Mancosu A., Nebelsick J.H., Kroh A., Pillola G.L. 2015. The origin of echinoid shell beds in siliciclastic shelf environments: three examples from the Miocene of Sardinia, Italy. *Lethaia*, **48**:83-99. <https://doi.org/10.1111/let.12090>
- Manso C.L.C., Hessel M.H. 2007. Revisão sistemática de *Pygidiolampas araripensis* (Beurlen, 1966), (Echinodermata: Cassiduloidea) da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. *Geociências*, **26**:271-277.
- Manso C.L.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.
- Marques F.O., Nogueira F.C.C., Bezerra F.H.R., Castro D.L. 2014. The Araripe Basin in NE Brazil: An intracontinental graben inverted to a high-standing horst. *Tectonophysics*, **630**:251-264. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2014.05.029>
- Martill D.M. 1988. Preservation of fish in the Cretaceous Santana Formation of Brazil. *Palaeontology*, **31**:1-18.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2007.01.002>
- Morter A.A. 1984. Purbeck-Wealden beds mollusca and their relationship to ostracod biostratigraphy, stratigraphical correlation and palaeogeology in the Weald and adjacent areas. *Proceedings of the Geologists' Association*, **95**:217-234. [https://doi.org/10.1016/S0016-7878\(84\)80009-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7878(84)80009-7)
- Nebelsick J.H. 1999a. Taphonomic comparison between recent and fossil sand dollars. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **149**:349-358. [http://dx.doi.org/10.1016/S0031-0182\(98\)00211-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0031-0182(98)00211-9)
- Nebelsick J.H. 1999b. Taphonomy of clypeaster fragments: preservation and taphofacies. *Lethaia*, **32**:241-252. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3931.1999.tb00542.x>
- Olóriz F., Reolid M., Rodríguez-Tovar F.J. 2008. Taphonomy of fossil macro-invertebrate assemblages as a tool for ecostratigraphic interpretation in Upper Jurassic shelf deposits (Prebetic Zone, Southern Spain). *Geobios*, **41**:31-42. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geobios.2006.03.003>
- Pereira P.A., Cassab R.C.T., Barreto A.M.F., Almeida J.A.C. 2015. Moluscos da Formação Romualdo, Aptiano-Albiano, Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Ciências Naturais*, **10**:231-246.
- 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. <http://dx.doi.org/10.18190/1980-8208/estudosgeologicos.v24n1p53-64>
- 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2015.06.005>
- 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. http://dx.doi.org/10.11137/2016_2_77_87
- Reading H.G., Collinson J.D. 1996. Clastic Coasts In: Reading H.G. (Ed.). *Sedimentary Environments: Process, Facies and Stratigraphy*. Cornwall, Blackwells, p. 154-231.
- Reid M., Bordy E.M., Taylor W. 2015. Taphonomy and sedimentology of an echinoderm obrution bed in the Lower Devonian Voorstehoeek Formation (Bokkeveld Group, Cape Supergroup) of the South Africa. *Journal of Africa Earth Sciences*, **110**:135-149. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.04.009>
- 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*. PhD Thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo, 160 p.
- Sälgeback J., Savazzi E. 2006. Constructional morphology of cerithiform gastropods. *Paleontological Research*, **10**:233-259. <https://doi.org/10.2517/prpsj.10.233>
- Schäfer W. 1972. *Ecology and paleoecology of marine environments*. Chicago, University of Chicago Press, 568 p.
- Schmidt-Neto H., Guimarães Netto R., Tognoli F.M.W. 2014. Análise tafonômica das concentrações fossilíferas da Formação Rio Bonito na região de Taió, Sul do Brasil. *Revista Brasileira de Paleontologia*, **17**:208-225. <http://dx.doi.org/10.4072/rbp.2014.2.08>
- Seilacher A. 1970. Begriff und bedeutung der Fossil-Lagerstätten: Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie. *Monatshefte*, **1**:34-39.
- Silva Santos R., Valença J.G. 1968. A Formação Santana e sua paleoictiofauna. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **40**:339-360.
- Simões M.G., Kowalewski M., Torello F.F., Ghilardi R.P., Mello H.C. 2000. Early onset of modern-style shell beds in the Permian Sequences of the Paraná Basin: implications for the Phanerozoic trend in bioclastic accumulations. *Revista Brasileira de Geociências*, **30**:499-503.
- Speyer S.E., Brett C.E. 1988. Taphofacies models for epeiric sea environments: middle Paleozoic examples. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **63**:225-262. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(88\)90098-3](https://doi.org/10.1016/0031-0182(88)90098-3)
- Speyer S.E., Brett C.E. 1991. Taphofacies controls: background and episodic processes in fossil assemblage preservation. In: Allison P.A., Briggs D.E.G. (Eds.). *Taphonomy: releasing the data locked in the fossil record*. New York, Plenum Press, p. 501-545.
- Staff G.M., Powell E.N. 1988. The paleoecological significance of diversity: the effect of time averaging and differential preservation on macroinvertebrate species richness in death assemblages. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **63**:73-89. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(88\)90091-0](https://doi.org/10.1016/0031-0182(88)90091-0)

- Stephenson L.W. 1952. *Larger invertebrate fossils of the Woodbine Formation (Cenomanian) of Texas*. Washington, D.C., United States Government Printing Office (USGS Numbered Series, 242), 226 p.
- Terranova M., Lo Brutto S., Arculeo M., Mitton J., 2007. A mitochondrial phylogeography of *Brachidontes variabilis* (Bivalvia: Mytilidae) reveals three cryptic species. *Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research*, **45**:289-298. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0469.2007.00421.x>
- Walker R.G., Plint A.G. 1992. Response to sea level change, wave and storm dominated shallow marine systems. In: Walker R.G., James N.P. (Eds.). *Facies Models*. St. John's, Geological Association of Canada, p. 219-238.
- Wenz W. 1938. Gastropoda teil I: allgemeiner teil und prosobranchia. In: Schindewolf O.H. (Ed.). *Handbuch der Paläozoologie*. Berlin, Band, 948 p.
- White C.A. 1987. On new generic forms of Cretaceous Mollusca and their relation to other forms. *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia*, **39**:32-37.



New brachyuran crabs from the Aptian–Albian Romualdo Formation, Santana Group of Brazil: Evidence for a Tethyan connection to the Araripe Basin

LUDMILA A.C. PRADO, JAVIER LUQUE, ALCINA M.F. BARRETO, and A. RICHARD PALMER



Prado, L.A.C., Luque, J., Barreto, A.M.F., and Palmer, A.R. 2018. New brachyuran crabs from the Aptian–Albian Romualdo Formation, Santana Group of Brazil: Evidence for a Tethyan connection to the Araripe Basin. *Acta Palaeontologica Polonica* 63 (4): 737–750.

Despite the exceptional palaeontological richness of the renowned Santana Group from the Early Cretaceous Araripe Basin of Brazil, only one specimen of true crabs (Brachyura) has been discovered to date. Here we present two new genera and species of brachyuran crabs from the upper Aptian–lower Albian Romualdo Formation of the Santana Group, represented by 30 specimens from several localities across the Araripe Basin in the state of Pernambuco, Brazil. One taxon, *Exucarcinus gonzagai* Prado and Luque gen. et sp. nov., is similar to several endemic stem raninoidans (Orithopsidae) from the late Aptian and early Albian of Colombia and the USA, respectively, while *Romualdocarcinus salesi* Prado and Luque gen. et sp. nov., seems to be closer to “higher” true crabs (Eubrachyura) from the Cenomanian of Spain. The presence of taxa similar to those from the mid-Cretaceous of northern South America, southern North America, and western Europe, reinforces the view of a Tethyan marine influence in Araripe during the breakup of South America and Africa, and adds to the growing data that suggest a generic and specific degree of endemism of true crabs in tropical South America during the mid-Cretaceous.

Key words: Decapoda, Eubrachyura, Raninoida, *Exucarcinus*, *Romualdocarcinus*, Cretaceous, South America.

Ludmila A.C. Prado [prado.lac@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-9842-7074>] and Alcina Barreto [alcinabarreto@gmail.com], Departamento de Geologia, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, 1235, 50740-533, Recife, Pernambuco, Brazil.

Javier Luque [luque@ualberta.ca; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-4391-5951>], Department of Biological Sciences, University of Alberta, Edmonton, Alberta T6G 2E9, Canada and Smithsonian Tropical Research Institute, Balboa-Ancón 0843-03092, Panamá, Panamá.

A. Richard Palmer [rich.palmer@ualberta.ca], Department of Biological Sciences, University of Alberta, Edmonton, Alberta T6G 2E9, Canada.

Received 23 March 2018, accepted 4 October 2018, available online 19 November 2018.

Copyright © 2018 L.A.C. Prado et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (for details please see <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Introduction

Our understanding of the diversity and geographic distributions of fossil crabs in the tropical Americas has grown considerably in the last decades, especially regarding Late Cretaceous and Cenozoic occurrences (Luque et al. 2017). Yet, little is known about the fossil record of true crabs (Brachyura) from the Early Cretaceous in South America, with only a handful of taxa reported so far. In Brazil, several fossil decapod crustaceans have been discovered in Aptian–Albian rocks of the Santana Group, Araripe Basin (mostly shrimps, see Table 1), but so far only one crab specimen has yet been reported and described as *Araripecarcinus ferreirai* Martins-Neto, 1987. Although only ventral and

appendicular features are preserved in the holotype of *A. ferreirai*, its phylogenetic position and overall anatomical characteristics suggest affinities to stem raninoidans of the superfamily Necrocarinoidea, yet with uncertain familial affinities (Luque 2015a; Schweitzer et al. 2016b; Luque et al. 2017).

Several other Early Cretaceous necrocarinoids are known from South America, such as the orithopsid crabs *Bellcarcinus* Luque, 2014; *Colombicarcinus* Karasawa, Schweitzer, Feldmann, and Luque, 2014; and *Planocarcinus* Luque, Feldmann, Schweitzer, Jaramillo, and Cameron, 2012; all of them from the upper Aptian and lower Albian of Colombia (Luque et al. 2012, 2017; Bermúdez et al. 2013; Karasawa et al. 2014; Schweitzer et al. 2016b; Fig. 1).

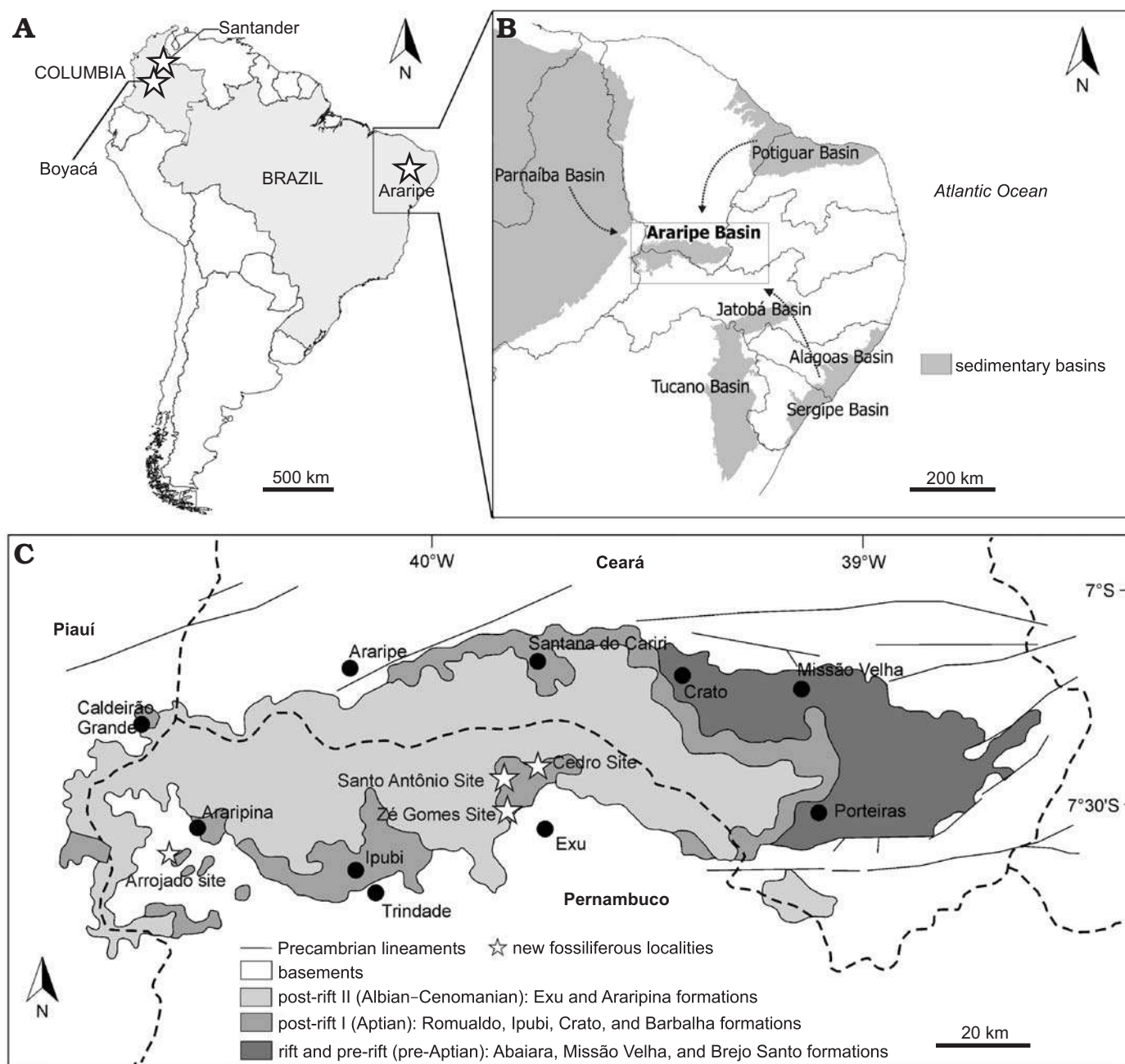


Fig. 1. **A.** Map showing the known occurrences (stars) of orithopsid and eubrachiuran genera in the Early Cretaceous of South America: upper Aptian–lower Albian San Gil Inferior Formation, Boyacá and upper Aptian Paja Formation, Santander, Colombia and upper Aptian–lower Albian Romualdo Formation, Araripe Basin, Brazil. **B.** Sedimentary basins of northeast Brazil; arrows show the three possible routes of Cretaceous marine ingressation into the Araripe Basin. **C.** New fossiliferous localities (stars) with brachiuran crabs from upper Aptian–lower Albian Romualdo Formation, Araripe Basin, Pernambuco, Brazil (base map modified from Assine 2007).

Similarly, only a handful of Early Cretaceous eubrachiurans, or “higher” true crabs, have been discovered worldwide (Klompaker 2013; Luque 2015b), with *Telamonocarcinus antiquus* Luque, 2015b, from the late Aptian–early Albian of Colombia representing the oldest crown eubrachiuran (Luque et al. 2017). Here we describe two new genera and species of brachiuran crabs, *Exucarcinus gonzagai* gen. et sp. nov. (Raninoida: Necrocarcinoidea: Orithopsidae) and *Romualdocarcinus salesi* gen. et sp. nov. (Eubrachiura: ?Portunoidea: ?Eogeryonidae), from upper Aptian–lower

Albian rocks of the fossiliferous Romualdo Formation, Santana Group, near the municipality of Exu in the state of Pernambuco, and discuss aspects of their systematic affinities, taphonomy, palaeoenvironment, and their palaeogeographical implications.

Institutional abbreviations.—DGEO-CTG-UFPE, Palaeontology Collection of the Geology Department, Centre of Technology and Geosciences, Federal University of Pernambuco, Brazil.

Table 1. List of decapods described from the Santana Group in the Araripe Basin.

Taxon	Stratigraphy	Locality	References
<i>Araripecarcinus ferreirai</i> Martins-Neto, 1987 (brachyuran crab)	Romualdo Formation (upper Aptian–lower Albian): calcareous concretions with fish	near the municipality of Porteiras, state of Ceará	Martins-Neto 1987; Luque 2015a
<i>Beurlenia araripensis</i> Martins-Neto and Mezzarila, 1991 (palaemonid shrimp)	Crato Formation (upper Aptian): laminated limestone	uncertain	Martins-Neto and Mezzarila 1991; Saraiva et al. 2009
<i>Paleomattea deliciosa</i> Maisey and Carvalho, 1995 (sergestid shrimp)	Romualdo Formation (upper Aptian–lower Albian): shales and calcareous concretions with fish	municipalities of Santana do Cariri and Missão Velha, state of Ceará, and Trindade, state of Pernambuco	Viana and Agostinho 1995; Saraiva et al. 2009; Pinheiro et al. 2016
Brachyuran crab zoeae indet. (brachyuran crab)	Romualdo Formation (upper Aptian–lower Albian): calcareous concretions with fish	uncertain	Maisey and Carvalho 1995; Luque 2015a
<i>Kellnerius jamacaruensis</i> Santana, Pinheiro, Silva, and Saraiva, 2013 (palaemonid shrimp)	Romualdo Formation (upper Aptian–lower Albian): calcareous concretions	municipalities of Missão Velha and Jardim, state of Ceará	Santana et al. 2013; Pinheiro et al. 2014
<i>Araripenaeus timidus</i> Pinheiro, Saraiva, and Santana, 2014 (penaeid shrimp)	Romualdo Formation (upper Aptian–lower Albian): calcareous concretions	municipality of Jardim, state of Ceará	Pinheiro et al. 2014
<i>Sume marcosi</i> Saraiva, Pinheiro, and Santana, 2018 (luciferid shrimp)	Romualdo Formation (upper Aptian–lower Albian): shale	municipality of Trindade, state of Pernambuco	Saraiva et al. 2018
<i>Exucarcinus gonzagai</i> gen. et sp. nov. Prado and Luque, 2018 (orithpsid crab)	Romualdo Formation (upper Aptian–lower Albian): coquina	municipality of Exu, state of Pernambuco	this paper
<i>Romualdocarcinus salesi</i> gen. et sp. nov. Prado and Luque, 2018 (eubrachyuran? / eogeryonid? crab)	Romualdo Formation (upper Aptian–lower Albian): coquina	municipality of Exu, state of Pernambuco	this paper

Nomenclatural acts.—This published work and the nomenclatural acts it contains have been registered in ZooBank, the online registration system for the ICZN. The electronic edition of this work was published in a journal with an ISSN 0567-7920, eISSN 1732-2421, and has been archived and is available from the following digital repository: <http://www.app.pan.pl/article/item/app004802018.html>.

Geographic and geological setting

During the late Early Cretaceous, rapid changes in plate tectonic reconfigurations occurred leading to the separation of South America and Africa. As a result, several small basins were formed in the interior of northeastern Brazil due to the opening of the central Atlantic Ocean (Matos 1992; Assine 1994). Among them, the Araripe Basin stands out, known internationally for the fossiliferous Lagerstätten of the Crato and Romualdo formations (Maisey 1991). The Araripe Basin, located between the states of Pernambuco, Piauí, and Ceará, is formed by five sequences: Paleozoic, Cariri Formation (upper Ordovician–lower Devonian), pre-rift Brejo Santo and Missão Velha formations (Upper Jurassic), rift Abaiara Formation (Neocomian), post-rift I Barbalha, Crato, Ipubi, and Romualdo formations (upper Aptian–lower Albian) and post-rift II Araripina and Exu formations (Albian–Cenomanian) (Assine 1992, 2007; Assine et al. 2014; Fig. 1). The Romualdo Formation is con-

stituted by a sequence of shale intercalated with sandstone at the base, followed by black shale with usually fossiliferous calcareous nodules, and layers of calcareous sandstone with macroinvertebrates, respectively (Assine et al. 2014). At the top, fine sandstone can be found with intercalations of siltstone and shale bearing freshwater fossils such as conchostracans and molluscs (Beurlen 1971; Assine 2007).

The Romualdo Formation contains bony and cartilaginous fish, dinosaurs, pterosaurs, molluscs, echinoids, crustaceans, foraminifera, dinoflagellates, gymnosperms, and angiosperms, that suggest sedimentation in a shallow marine to transitional palaeoenvironment (Silva-Santos and Valença 1968; Mabessone and Tinoco 1973; Arai and Coimbra 1990; Berthou et al. 1990; Kellner 2002; Bruno and Hessel 2006; Lima et al. 2012; Pinheiro et al. 2014; Pereira et al. 2017). However, the palaeogeographic reconstruction of the marine transgression in the Araripe Basin is still controversial, and three directions of ingression are suggested: (i) from the Parnaíba Basin (W-NW) (Beurlen 1963, 1966, 1971; Arai et al. 1994; Arai 2014; Prado et al. 2015; Pereira et al. 2017); (ii) from the Potiguar Basin (N-NE) (Lima 1978; Petri 1987); or (iii) from de Recôncavo–Tucano–Jatobá basins (S-SE), crossing the limits of Sergipe-Alagoas Basin (Assine et al. 2014; Custódio et al. 2017; see Fig. 1 and Table 2).

Two new brachyuran crabs, *Exucarcinus gonzagai* Prado and Luque gen. et sp. nov. and *Romualdocarcinus salesi* Prado and Luque gen. et sp. nov., were collected from marine rocks of the Romualdo Formation cropping out at Cedro (39°35'32"N 7°29'35"E), Santo Antônio (39°32'51"N 7°30'31"E), and Zé

Table 2. Key evidence advanced for three proposed marine ingression into the Araripe Basin.

Proposed directions of marine transgression into the Araripe Basin	Evidence
Parnaíba Basin	The presence of autochthonous echinoids restricted to the western portion of the Araripe Basin (Beurlen 1963, 1966, 1971; Prado et al. 2015). The marine molluscs (e.g., <i>Tylostoma ranchariensis</i> Pereira, Cassab, Barreto, and Almeida, 2016b, and <i>Gymnentome (Craginia) beurleni</i>) Pereira, Cassab, and Barreto, 2016a and fishes (e.g., <i>Araripichthys castilhoi</i> Silva Santos, 1985) of Tethyan affinity in the Araripe Basin (Maisey 1991, 2000; Maisey and Moody 2001; Alvarado-Ortega and Brito 2011; Pereira et al. 2016a, 2017). Dinoflagellates of the genus <i>Subtilisphaera</i> , which represents a ecozone of Tethyan affinity more prominent in the basins of northeastern Brazil located to the west (Arai et al. 1994; Arai 2014)
Recôncavo–Tucano–Jatobá basins	Fluvial palaeocurrents measured in the Barbalha (Aptian, Santana Group) and Marizal formations (Aptian, Tucano Basin), indicating south and southeast paleoflows. As the marine transgressions normally occur in the opposite direction to the continental palaeodrainage, the transgression during the Aptian–Albian in Araripe would have occurred from south-southeast to north-northwest (Assine 1994; Assine et al. 2014, 2016; Custódio et al. 2017). Tucano (Serra do Tonã) and Jatobá (Serra Negra) basins with the same stratigraphic succession of the Araripe Basin (Varejão et al. 2016).
Potiguar Basin	Faults with SW directions that could connect the Araripe and Potiguar basins (Lima 1978). The subsiding area extended farther toward the southwest of Potiguar Basin that probably connected it to the Araripe Basin (Petri 1987).

Gomes (7°31'16"S 39°34'18"W) in the municipality of Exu in the State of Pernambuco (Fig. 1). All of these outcrops include calcareous sandstone layers between shale layers with calcareous nodules of the Romualdo Formation, differing from each other by the thickness of the layers and their faunistic composition (Fig. 2). From the calcareous sandstone in the municipality of Exu were collected bivalves (e.g., *Corbula* sp., *Brachidontes araripensis* Pereira, Cassab, Barreto, and Almeida, 2016b, and *Aguileria dissita* White, 1887), gastropods (e.g., undetermined cassiopids, *Tylostoma ranchariensis* Pereira, Cassab, Barreto, and Almeida, 2016b, and *Cerithium sergipensis* Maury, 1936), echinoids (e.g., *Bothryopneustes araripensis* Manso and Hessel, 2007) (Pereira et al. 2017), and the two new genera and species of true crabs described herein. In the calcareous sandstone at the Arrojado site (7°41'12"S 40°33'48"W) in the municipality of Araripina, also in the state of Pernambuco, no molluscs or echinoids have been found, but fish predominate. In one of these layers we found a crab claw associated with fossil fish (Fig. 2).

Material and methods

A total of 30 crab specimens, represented only by dorsal carapaces plus a single isolated cheliped, were collected in situ and ex situ from calcareous sandstone of the upper Aptian–lower Albian Romualdo Formation. The specimens were prepared mechanically and examined under a stereoscopic microscope. For a complete analysis of the material, more complete specimens (DGEO-CTG-UFPE-7747, 8109, 8116, 8122, 8127, 8137, and 8144) were imaged with a Zeiss Sigma 300 VP-FESEM scanning electron microscope at the University of Alberta, Edmonton, Canada. The type series of *Exucarcinus gonzagai* gen. et sp. nov. and *Romualdocarcinus salesi* gen. et sp. nov. are deposited in DGEO-CTG-UFPE.

Systematic palaeontology

Order Decapoda Latreille, 1802

Infraorder Brachyura Latreille, 1802

Section Raninoida Ah Yong, Lai, Sharkey, Colgan, and Ng, 2007

Family Orithopsidae Schweitzer, Feldmann, Fam, Hessin, Hetrick, Nyborg, and Ross, 2003

Included genera: *Aetocarcinus* Schweitzer, Feldmann, Rader, and Frantescu, 2016; *Bellcarcinus* Luque, 2014; *Cherpiocarcinus* Marangon and De Angeli, 1997; *Colombicarcinus* Karasawa, Schweitzer, Feldmann, and Luque, 2014; *Cristella* Collins and Rasmussen, 1992; *Exucarcinus* Prado and Luque, gen. nov.; *Marycarcinus* Schweitzer, Feldmann, Fam, Hessin, Hetrick, Nyborg, and Ross, 2003; *Orithopsis* Carter, 1872; *Paradoxilissopsa* Schweitzer, Dworschak, and Martin, 2011 (= *Lissopsis* Frič and Kafka, 1887); *Paradoxocarcinus* Schweitzer, Feldmann, Fam, Hessin, Hetrick, Nyborg, and Ross, 2003; *Planocarcinus* Luque, Feldmann, Schweitzer, Jaramillo, and Cameron, 2012; *Shazella* Collins and Williams, 2004; *Silvacarcinus* Collins and Smith, 1993; *Texcancer* Frantescu, Feldmann, and Schweitzer, 2016.

Genus *Exucarcinus* Prado and Luque nov.

ZooBank LSID: urn:lsid:zoobank.org:act:1E8FAB5B-5466-4D4C-B382-99EDFE2B4E3D

Type species: *Exucarcinus gonzagai* Prado and Luque sp. nov.; by monotypy, see below.

Etymology: From the municipality of Exu where the material was collected, and the Greek *carcinus* (= *karkinos*), crab; gender masculine.

Diagnosis.—As for the type species by monotypy.

Exucarcinus gonzagai Prado and Luque sp. nov.

Fig. 3.

ZooBank LSID: urn:lsid:zoobank.org:act:B206279B-DB4B-4221-AB34-E8AE0D90E1E1

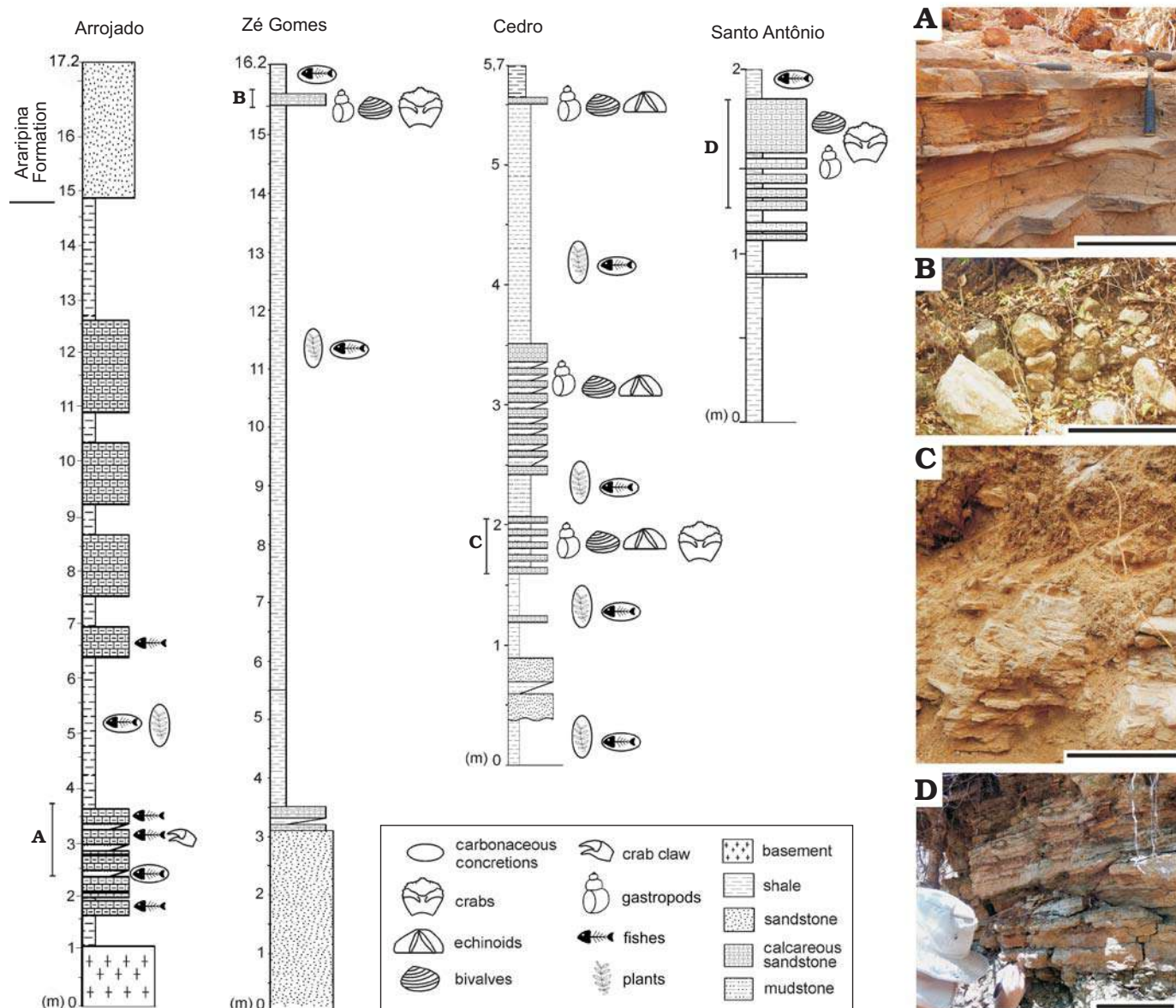


Fig. 2. Stratigraphic sections (A₁–D₁) and field photographs (A₂–D₂) of the upper Lower Cretaceous Romualdo Formation, Pernambuco, Brazil, where the new brachyuran crabs were discovered: Arrojado site (A), municipality of Araripina, Zé Gomes (B), Cedro (C), and Santo Antônio (D) sites, municipality of Exu. Scale bars 25 cm.

Etymology: In honour of Luiz Gonzaga do Nascimento (1912–1989) “the king of baião”, a singer, composer, and one of the most influential musicians of Brazilian popular music of the twentieth century, born in the Exu municipality, Pernambuco, Brazil.

Type material: Holotype (carapace): DGEO-CTG-UFPE-8114. Paratypes (carapaces): DGEO-CTG-UFPE-7745, 7748, 7749, 7751, 8103, 8105, 8107, 8109, 8115, 8116, 8133, 8106; all from the type locality.

Type locality: Zé Gomes, Santo Antônio, and Cedro sites, Araripe Basin, municipality of Exu, Pernambuco, Brazil.

Type horizon: Romualdo Formation (upper Aptian–lower Albian).

Diagnosis.—Carapace sub-hexagonal, nearly equidimensional, weakly vaulted to flattened, widest at carapace mid-length at level of epibranchial spine, finely granulated, lacking tubercles, bosses, ridges, or reniform swellings. Fronto-orbital margin slightly wider than half the carapace

maximum width; rostrum long, extending beyond outer-orbital spine, sulcate axially, bifid distally, with a short lateral spine on each side of the rostrum; post-rostral slits absent. Orbits wide, horizontal, upturned, with two relatively narrow orbital fissures; innermost fissure the shortest; intra-orbital lobe short, truncated, squarish; outer orbital spine well-developed, simple, triangular, shorter than rostrum, directed anteriorly. Anterolateral margin nearly as long as posterolateral margin, with 5–7 spines excluding outer orbital spine, acute, unequal, directed anterolaterally; epibranchial spine short. Posterolateral margin slightly convex to straight, lacking spines, denticles, or tubercles. Posterior margin concave, slightly narrower than fronto-orbital margin. Cervical and branchiocardiac grooves distinct, shallow, sub-parallel to each other; cervical groove reaching antero-

lateral margin; secondary groove not defined; post-cervical groove absent. Dorsal regions without tubercles, bosses, reniform swellings, or ridges; intestinal region wide, depressed laterally, delimited by swollen metabranchial regions; epibranchial region swollen proximally near contact with branchial groove; meso- and metabranchial regions not differentiated, lacking conspicuous spines or tubercles, but bearing an incipient oblique ridge.

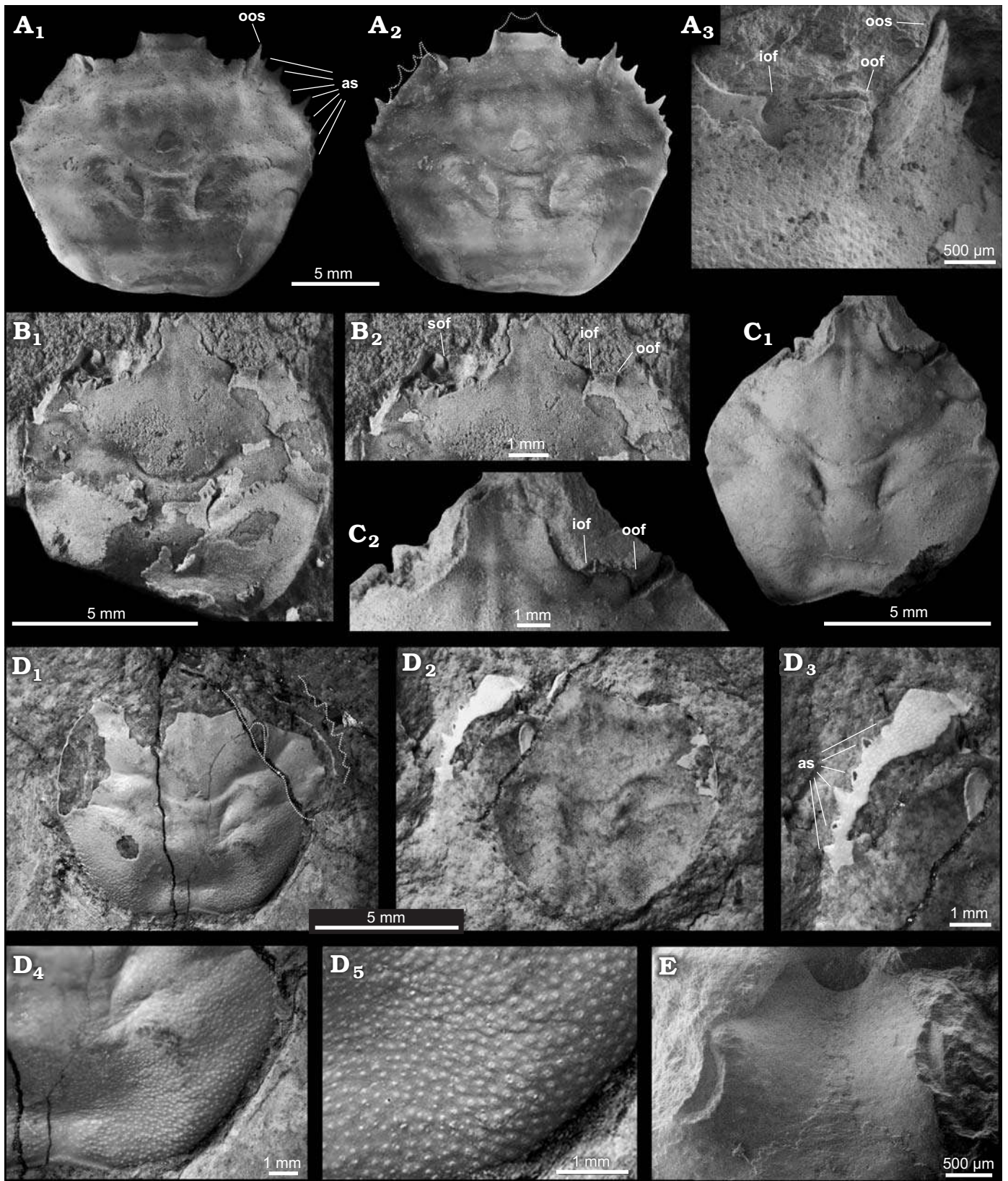
Description.—Carapace sub-hexagonal, about as long as wide in smaller specimens and slightly wider in larger specimens; dorsal carapace weakly vaulted to flattened, widest at carapace mid-length at the level of epibranchial spine. Dorsal carapace smooth, lacking conspicuous tubercles, bosses, ridges, or reniform swellings, covered with fine granulations. Fronto-orbital margin broad, slightly wider than half the carapace maximum width, and wider than posterior margin. Rostrum well-developed, long, extending well beyond outer-orbital spine, nearly one-third of fronto-orbital margin width, wider at base, with straight lateral margins converging antero-medially, bearing a pair of short but well-developed lateral spines positioned at mid-length, and a pair of distal spines forming a weakly downturned bifid rostrum; rostrum sulcate axially, with posterolateral margins at higher level than orbits; post-rostral slits absent. Orbits wide, upturned, directed forward, each orbit about one-third of fronto-orbital margin; supra-orbital margin straight, horizontal, with two relatively narrow orbital fissures parallel to each other, innermost orbital fissure shorter than outermost fissure; inner orbital lobe short, moderately developed, grading from lower margin of rostrum; intra-orbital lobe short, truncated, squarish in outline, separated from inner and outer lobes by the orbital fissures; outer orbital spine well-developed, simple, triangular, shorter than rostrum, with outer margin slightly converging anteriorly; sub-orbital margin visible in dorsal view, with one short, narrow suborbital fissure. Anterolateral margin slightly convex in smaller specimens, less so in larger specimens, nearly as long as posterolateral margin, bearing five to seven acute spines excluding outer orbital spine, of different sizes, and directed anterolaterally; epibranchial spine short, weakly to moderately developed, directed laterally. Posterolateral margin slightly convex in smaller specimens, nearly straight in larger specimen, without spines, denticles, or tubercles. Posterior margin wide, concave, slightly rimmed, much shorter than half of carapace maximum width, and slightly shorter than fronto-orbital margin. Cervical groove distinct, shallow, sinuous, arcuate, with smooth deflections, axially interrupted, distally reaching anterolateral margin; secondary groove not defined; post-cervical groove absent; branchial grooves distinct, well-developed, crescent-shaped; branchiocardic groove present, well-developed, sub-parallel to cervical groove. Epigastric region narrow, barely defined laterally by faint sub-parallel grooves; protogastric and mesogastric regions faintly tumid; hepatic region wide, depressed, without transverse ridge; epigastric, protogastric, mesogastric, and hepatic regions poorly delimited, with-

out tubercles or bosses; metagastric and urogastric lacking tubercles or longitudinal ridge, faintly separated by a shallow depression, both regions defined laterally by crescent-shaped branchial grooves; urogastric region narrow; cardiac region well-developed, tumid, broader than meta- and urogastric regions, wider anteriorly lacking tubercles, without transverse or longitudinal ridges; intestinal region wide, depressed anteriorly by contact with posterior cardiac region, depressed laterally and delimited by swollen metabranchial regions; epibranchial region moderately defined,

Table 3. Measurements (in mm) of the fossil crabs *Exucarcinus gonzagai* gen. et sp. nov. and *Romualdocarcinus salesi* gen. et sp. nov. Abbreviations: AL, anterolateral length; CL, carapace length; CW, carapace width; FW, fronto-orbital width; PL, posterolateral length; PW, posterior width; RW, rostrum width.

Species	DGEO-CTG-UFPE-	Occurrence	CL	CW	RW	FW	AL	PL	PW
<i>Exucarcinus gonzagai</i>	7745	Zé Gomes	7	8	—	5	3	4	4
	7749		7.5	9	—	—	3.5	4	3
	8114		13	15	3	9	6	7	8
	8116		10	11	2.5	7.5	4	5	6
	7748	Santo Antônio	6	7	1.5	4.5	2.5	3.5	4
	7751		8.5	10	—	6	4	4.5	5
	8103	Cedro	6	6	—	4.5	2.5	3.5	4
	8104		6.5	8	—	6	3	3.5	4
	8105		6.5	7	2	6	3	3.5	5
	8106		6	7	—	5	2.5	3.5	4
	8107		4.5	5.5	—	3.5	2.5	3	2.5
	8109		9	8	2	6	3.5	5	5
	8115		9	10	—	6	4	5	5
	8133		7	8	2	6	3	4	5
<i>Romualdocarcinus salesi</i>	8108	Cedro	4.5	6.5	2	5	2	2.5	4
	8110		4.5	6	1	3	2	2.5	2
	8111		—	—	2	—	—	—	—
	8119		3.5	4	1	3	2	1.5	2
	8122		5.5	6.5	2	6	1.5	2.5	3
	8123		4.5	6	1.5	5	2	2.5	3.5
	8124		6.5	7	2	6	3	3.5	4
	8125		—	8	2	6	4	5	—
	8126		5	7	6	2	2	3	3
	8127		10	9	3	9	4	3	4.5
	8128		5	7	6	2	2	3	—
	8129		—	—	2	—	—	—	—
	8131		5	6	1.5	4.5	2	3	3
	8132		6	7	2	6	2.5	3.5	4
	8135		—	9	2.5	7.5	—	—	—
	8137		7	8	2	6	4	3	4

Fig. 3. Orithopsid brachyuran *Exucarcinus gonzagai* Prado and Luque gen. et sp. nov. from the upper Aptian–lower Albian Romualdo Formation of the Santana Group, Araripe Basin, Pernambuco, Brazil. **A.** Holotype DGEO-CTG-UFPE-8114; A₁, SEM image of dorsal carapace; A₂, negative colour image of A₁; A₃, close-up of right orbit, orbital fissures, and outer orbital spine. **B.** Paratype DGEO-CTG-UFPE-8133; B₁, dorsal carapace; B₂, sub-orbital margin visible in dorsal view with one short and narrow suborbital fissure. **C.** Paratype DGEO-CTG-UFPE-8109; C₁, dorsal carapace; C₂, orbit and bifid rostrum extending well beyond the outer-orbital →



spine. **D.** Paratype DGEO-CTG-UFPE-8115; D₁, dorsal carapace; D₂, counterpart; D₃, close-up of ventral view of right anterolateral margin bearing multiple anterolateral spines; D₄, close-up of posterolateral and posterior margins lacking spines; D₅, close-up of dorsal carapace cuticle with fine granulations. **E.** Paratype DGEO-CTG-UFPE-8116, SEM image of bifid rostrum. Abbreviations: as, anterolateral spines; ios, inner orbital spine; iof, innermost orbital fissure; its, intra-orbital spine; oof, outermost orbital fissure; oos, outer orbital spine; sof, sub-orbital fissure. All specimens photographed dry and uncoated, except B, C, which are coated with ammonium chloride.

limited by cervical and branchiocardic grooves, swollen proximally near contact with branchial groove; meso- and metabranchial regions not differentiated, lacking conspicuous spines or tubercles, but bearing an incipient oblique ridge extending towards the posterolateral corner.

Dimensions.—For a list of measurements see Table 3.

Remarks.—*Exucarcinus* Prado and Luque gen. nov. strongly differs from Camarocarcinidae Feldmann, Li, and Schweitzer, 2007, Necrocarcinidae Förster, 1968, and several Cenomanocarcinidae Guinot, Vega, and Van Bakel, 2008, in its slightly vaulted to flattened dorsal carapace, the lack of posterolateral spines (Fig. 3A₁, A₂, B₁, C₁, D₁, D₄), and the absence of transverse or branchial ridges, contrasting with the strongly vaulted and ornamented carapaces seen in these families. Also, it lacks the deep cervical and branchiocardic grooves and short rostrum seen in Necrocarcinidae (Fig. 3A₁, A₂, B, C, E). Among stem raninoidans, the presence of a well-defined longitudinal mesial ridge, absent in *Exucarcinus*, is mostly seen among Palaeocorystidae Lörenthey in Lörenthey and Beurlen, 1929, Cenomanocarcinidae, Necrocarcinidae in part (i.e., *Elektrocarcinus* Schweitzer, Karasawa, Luque, and Feldmann, 2016, and *Hadrocarcinus* Schweitzer, Feldmann, and Lamanna, 2012), and most of the non-American Orithopsidae genera (see below). *Exucarcinus* Prado and Luque gen. nov. differs from Paranecrocarcinidae Fraaije, Van Bakel, Jagt, and Artal, 2008, in its flattened mesogastric region, the spinose anterolateral margin (5–7 spines) (Fig. 3A₁, A₂, D₁–D₃), and the lack of post-rostral slits, so distinctive of paranecrocarcinids. The new genus also differs from Paranecrocarcinidae and several Orithopsidae in the lack of protogastric swellings, but shares with them the wide, somewhat spatulate bifid rostrum extending well beyond the outer-orbital spine, the overall sub-hexagonal carapace with wide fronto-orbital margins, and the lack of posterolateral spines.

Exucarcinus Prado and Luque gen. nov. differs from other orithopsids (e.g., *Bellcarcinus*, *Cherpiocarcinus*, *Marycarcinus*, *Orithopsis*, *Paradoxilissopsa*, *Silvacarcinus*, *Texicancer*) in the lack of dorsal tubercles, reniform swellings, keels, or ridges (Fig. 3A₁, A₂, B₁, C₁, D₁, D₂). Other genera like *Cristella* and *Shazella* have pronounced epibranchial spines or pustulose dorsal carapaces with conspicuous dorsal grooves, none of which are apparent in the new genus. In fact, among orithopsids, *Exucarcinus* Prado and Luque gen. nov. seems to be more similar to some genera endemic to the Americas, like *Aetocarcinus*, *Colombicarcinus*, and *Planocarcinus* based on the lack of posterolateral spines, the smooth dorsal carapace lacking conspicuous dorsal ridges, keels, or tubercles, and the broad spatulate and bifid rostrum extending beyond the outer-orbital spine. However, these genera lack the numerous well-developed and acute anterolateral spines diagnostic of *Exucarcinus* Prado and Luque gen. nov. (Fig. 3A₁, A₂, D₁–D₃).

Stratigraphic and geographic range.—Type locality and horizon only.

Section Eubrachyura Saint Laurent, 1980

Clade Heterotremata Guinot, 1977

Family ?Eogeryonidae Ossó, 2016

Type genus: *Eogeryon* Ossó, 2016.

Included genera: Type genus and tentatively *Romualdocarcinus* Prado and Luque gen. nov.

Genus *Romualdocarcinus* Prado and Luque nov.

ZooBank LSID: urn:lsid:zoobank.org:act:DA947443-E1A9-485B-B1C0-F1C058DC1A6D

Type species: *Romualdocarcinus salesi* Prado and Luque sp. nov.; by monotypy, see below.

Etymology. From the Romualdo Formation, Santana Group; a Konservat-Lagerstätte in northeast Brazil where the material was collected, and the Greek *carcinus* (= *karkinos*), crab; gender masculine.

Diagnosis.—As for the type species by monotypy.

Romualdocarcinus salesi Prado and Luque sp. nov.

Fig. 4.

ZooBank LSID: urn:lsid:zoobank.org:act:86A8591D-A6D8-436B-AD02-8A29B36E3CF6

Etymology. In honour of the late Professor Alexandre Magno Feitosa Sales (1969–2016), an important figure in the paleontological scenario of Brazilian Northeast, mainly the Araripe Basin.

Type material: Holotype (carapace): DGEO-CTG-UFPE-8122. Paratypes (carapaces): DGEO-CTG-UFPE-8110, 8111, 8119, 8123, 8124, 8125, 8126, 8127, 8128, 8129, 8131; all from the type locality.

Type locality: Cedro site, Araripe Basin, municipality of Exu, Pernambuco, Brazil.

Type horizon: Romualdo Formation (upper Aptian–lower Albian).

Diagnosis.—Carapace sub-hexagonal to sub-square, nearly equidimensional, weakly vaulted transversely and longitudinally, widest anterior to carapace mid-length and to epibranchial spine, finely granulated, lacking ridges, bosses, tubercles, or reniform swellings. Fronto-orbital margin nearly as wide as carapace maximum width; rostrum well-developed, elongated, bifid, somewhat spatulate, axially sulcate, extending well beyond outer orbital spine, bearing a pair of short lateral spines at anterior third; post-rostral slits absent. Orbits wide, directed forward, faintly upturned; supra-orbital margin straight, sub-horizontal to slightly diverging postero-laterally, with two very short but wide orbital fissures somewhat oblique to each other; inner orbital lobe short; intra-orbital lobe short, roundish in outline; outer orbital spine well-developed, relatively long, simple, triangular, shorter than rostrum, with outer margin directed anteriorly or slightly diverging antero-laterally. Anterolateral margin shorter than postero-lateral margin, with three short, broad, well-developed triangular spines excluding the outer orbital spine, first two spines the largest; epibranchial spine weakly developed, directed laterally. Posterolateral margin entire, slightly convex to nearly straight. Posterior margin slightly concave to straight, rimmed, narrower than front-orbital margin. Cervical groove moderately defined, shallow, sinuous, distally reaching anterolateral margins; secondary groove

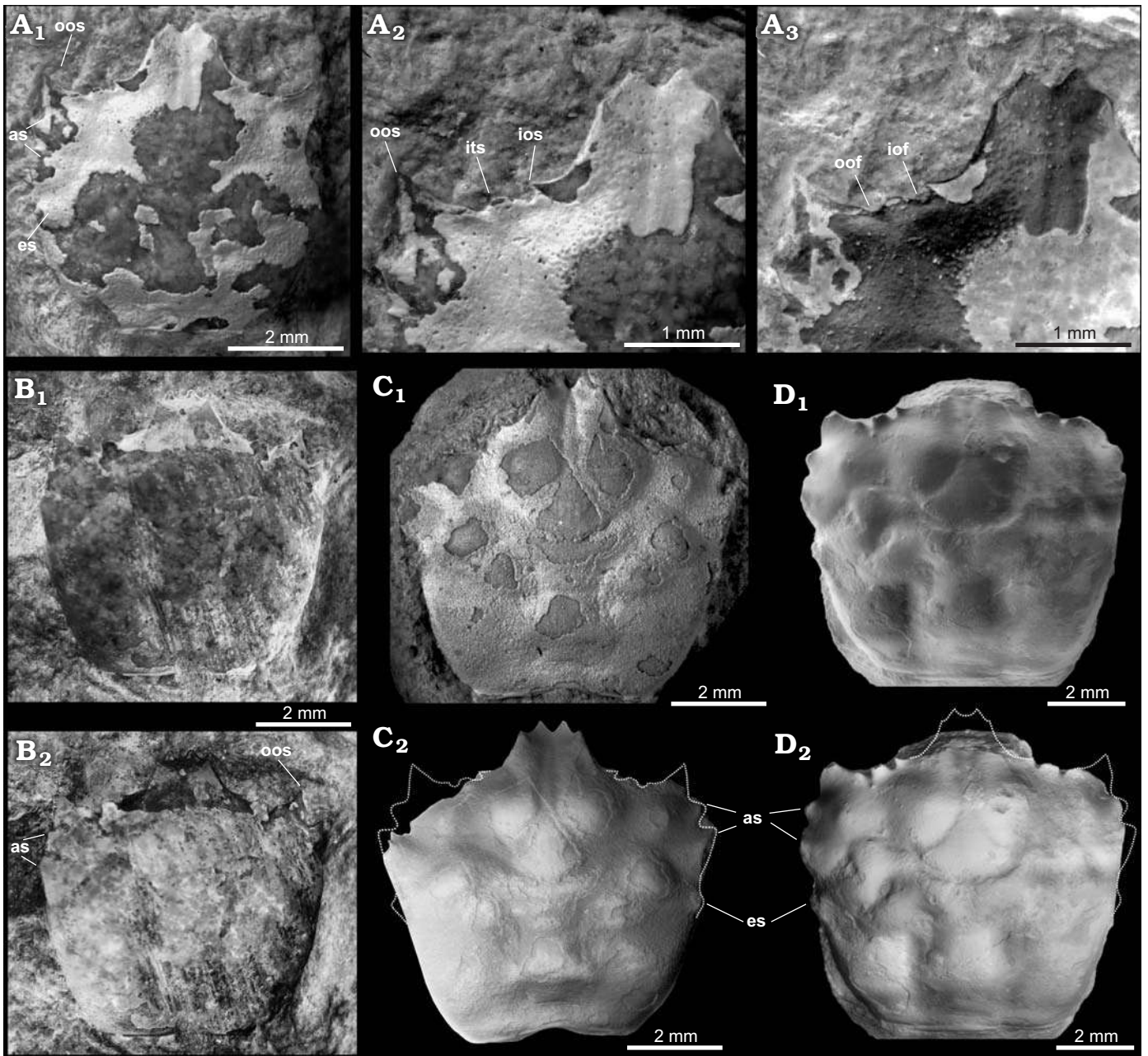


Fig. 4. ?Eogeryonid brachyuran *Romualdocarcinus salesi* Prado and Luque gen. et sp. nov. from the upper Aptian–lower Albian Romualdo Formation of the Santana Group, Araripe Basin, Pernambuco, Brazil. **A.** Holotype DGEO-CTG-UFPE-8122; A₁, dorsal view showing the two anterolateral spines, the epibranchial spine, and the outer orbital spine; A₂, close-up of rostrum and left orbit showing the inner-, intra-, and outer- orbital spines; A₃, inverted colour image of A₂, showing the short and wide inner and outer orbital fissures. **B.** Paratype DGEO-CTG-UFPE-8119; B₁, dorsal carapace; B₂, inverted colour image of B₁ showing the outer orbital spine and the two anterolateral spines. **C.** Paratype DGEO-CTG-UFPE-8137; C₁, dorsal carapace; C₂, inverted colour image of C₁, showing the anterolateral spines and the short epibranchial spine. **D.** Paratype DGEO-CTG-UFPE- 8127; D₁, SEM image of dorsal carapace; D₂, inverted colour image of D₁, showing the anterolateral spines and the short epibranchial spine. Abbreviations: as, anterolateral spines; ios, inner orbital spine; ioof, innermost orbital fissure; its, intra-orbital spine; oof, outermost orbital fissure; oos, outer orbital spine. All specimens photographed dry and uncoated, except for C₁, which was coated with ammonium chloride.

faint; postcervical groove absent. Branchiocardic groove shallower than cervical groove. Epigastric region narrow, protogastric and mesogastric regions slightly tumid; hepatic region wide, slightly tumid; intestinal region wide; epibranchial region with two swellings near contact with branchial groove; meso- and metabranchial regions not differentiated.

Description.—Carapace sub-hexagonal to sub-square, as long as wide; dorsal carapace weakly vaulted to flattened, widest anterior to carapace mid-length at level of second anterolateral spine; dorsal carapace smooth, finely granulated, with well-defined regions lacking ridges, tubercles, or reniform swellings. Fronto-orbital margin broad, nearly as wide as carapace maximum width and wider than posterior

margin. Rostrum well-developed, broad, long, somewhat spatulate, extending well beyond outer orbital spine, nearly one-third of fronto-orbital margin width, wider at the base, with straight lateral margins converging antero-medially, bearing a pair of short lateral spines at anterior third, and a pair of distal spines forming a weakly downturned bifid rostrum; rostrum sulcate axially, with posterolateral margins at level of supraorbital margin; post-rostral slits absent. Orbits wide, faintly upturned, directed forward, each orbit slightly over one-third of fronto-orbital margin; supra-orbital margin straight, sub-horizontal to slightly diverging postero-laterally, with two very short but wide orbital fissures somewhat oblique to each other; innermost orbital fissure slightly wider than outermost fissure; inner orbital lobe short, moderately developed, grading from lower margin of rostrum; intra-orbital lobe short, roundish in outline, separated from inner and outer lobes by orbital fissures; outer orbital spine well-developed, simple, triangular, shorter than rostrum, with outer margin directed anteriorly or slightly diverging antero-laterally. Anterolateral margin slightly convex to straight, slightly shorter than posterolateral margin, bearing three triangular, short, well-developed spines excluding outer orbital spine; first two spines the largest, directed antero-laterally, second antero-lateral spine wider than adjacent spines; third antero-lateral spine representing the epibranchial spine, weakly developed, directed laterally. Posterolateral margin slightly convex to nearly straight, without spines, denticles, or tubercles. Posterior margin wide, slightly concave, rimmed, shorter than fronto-orbital margin and slightly wider than half of carapace maximum width. Cervical groove distinct but moderately defined, shallow, sinuous, arcuate, with smooth deflections, axially interrupted, distally reaching anterolateral margins; secondary groove present but faint; post-cervical groove absent; branchial grooves distinct, moderately developed, crescent-shaped; branchiocardic groove present, weakly developed, sub-parallel to cervical groove. Epigastric region narrow, well-defined laterally by sub-parallel grooves; protogastric and mesogastric regions slightly inflated; hepatic region wide, without transverse ridge but slightly tumid; epigastric, protogastric, mesogastric, and hepatic regions without tubercles or bosses; metagastric and urogastric regions lacking tubercles or longitudinal ridges, faintly separated by a shallow depression, both regions defined laterally by crescent-shaped branchial grooves; urogastric region narrow; cardiac region well-developed, inflated, broader than meta- and urogastric regions, wider anteriorly, lacking tubercles, without transverse or longitudinal ridges; intestinal region wide, depressed anteriorly by contact with posterior cardiac region; epibranchial region well-defined, limited by cervical and branchiocardic grooves, with two swellings near contact with branchial groove; meso- and metabranchial regions not differentiated, lacking spines, tubercles, or conspicuous ridges, but with posterior metagastric region inflated.

Dimensions.—For a list of measurements see Table 3.

Remarks.—The systematic affinities of *Romualdocarcinus* Prado and Luque gen. nov. are puzzling, in part due to its incompleteness (only known from dorsal carapaces), and its superficial resemblance to brachyuran crabs from different groups. For instance, *Romualdocarcinus* shares a sub-hexagonal carapace outline with Paranecrocarcinidae, Cenomanocarcinidae, and Orithopsidae, although *Romualdocarcinus* is more sub-squarish than most orithopsids, and lacks the posterolateral spines and weakly projected rostrum of Cenomanocarcinidae, or the postrostral slits seen in most Paranecrocarcinidae. *Romualdocarcinus* also shares with Orithopsidae, Necrocarcinidae, and Paranecrocarcinidae a fronto-orbital margin that is wider than half the carapace maximum width, but differs from Necrocarcinidae, Paranecrocarcinidae, or any other necrocarcinoid-like raninoidan, in its fronto-orbital margin being almost as wide as the carapace (Fig. 4A₁, B, C, D). The subspatulate bifid rostrum that extends beyond the outer-orbital spine seen in several Paranecrocarcinidae and Orithopsidae, and the smooth dorsal carapace lacking ridges or rows of tubercles distinctive of orithopsids like *Planocarcinus*, *Colombicarcinus*, and *Aetocarcinus*, would advocate for affinities with the group.

Romualdocarcinus Prado and Luque gen. nov. and the orithopsid *Exucarcinus* Prado and Luque gen. nov., are known from the same strata and localities in the Araripe basin, yet both taxa differ in several features. In *Romualdocarcinus* the carapace outline is squarish, its dorsal regions are more tumid, and the posterior margin nearly straight, while in *Exucarcinus* the carapace is more hexagonal, has less marked dorsal regions, and the posterior margin is concave. Also, *Romualdocarcinus* has a shorter anterolateral margin, only three anterolateral spines (Fig. 4A₁, B₂, C₂, D₂), and a maximum width anterior to its mid-length, whereas *Exucarcinus* has anterolateral and posterolateral margins about the same length, has six to seven anterolateral spines, and is wider at its mid-length. Furthermore, in *Romualdocarcinus* the supra-orbital margins are weakly upturned and slightly divergent postero-laterally, and bear two short and wide orbital fissures faintly oblique to each other (Fig. 4A₂, A₃, C₂, D₂), which differ from the sub-horizontal margins with two narrower and sub-parallel orbital fissures seen in *Exucarcinus*.

Despite the superficial similarities between *Romualdocarcinus* and several necrocarcinoid-like raninoidans, the new genus seems to fit better within Eubrachyura, in particular Eogeryonidae, known from the Cenomanian of Spain (Ossó 2016). Both taxa share a sub-hexagonal to sub-square carapace outline, they have anterolateral margins with three spines (excluding the outer orbital spine), wide orbits with two open fissures, and a broad bifid rostrum with secondary lateral spines (Ossó 2016). However, in Eogeryonidae the rostrum is short and four tipped, while in *Romualdocarcinus* it is elongated and bifid (Fig. 4A, C). Other early eubrachyurans like Marocarcinidae Guinot, De Angeli, and Garasino, 2008, from the Cenomanian of Morocco, also share with *Romualdocarcinus* the bifid rostrum with secondary

lateral spines, and the presence of three spines in the anterolateral margin, but it has smaller orbits than those of *Romualdocarcinus*, it lacks orbital fissures, and has cervical and branchiocardial grooves marked only towards the lateral margin. Another family from the Upper Cretaceous of the Americas, Longusorbiidae Karasawa, Schweitzer, and Feldmann, 2008, shares with *Romualdocarcinus* a fronto-orbital margin nearly as wide as the carapace maximum width, the broad orbits, and a rostrum elongated and axially sulcate. However, Longusorbiidae has a considerably narrower downturned rostrum and well-defined dorsal carapace regions, both absent in *Romualdocarcinus*.

Although most eubrachyuran families have their earliest fossil representatives in Upper Cretaceous or Cenozoic rocks, only a handful of eubrachyuran-like families are currently known from Lower Cretaceous units, i.e., Telamonocarcinidae Larghi, 2014, from the lower Albian of Colombia; Tepexicarcinidae Luque, 2015b, from the lower Albian of Mexico; and Componocancridae Feldmann, Schweitzer, and Green, 2008, from the lower Albian of USA (see summary in Luque 2015b). A fourth family of eubrachyurans, Priscinachidae Breton, 2009, is known from the upper Albian and Cenomanian of Spain and France (Breton 2009; Klompmaker 2013). Although only two of these families, i.e., Telamonocarcinidae and Priscinachidae, can be placed within crown superfamilies such as Dorippoidea and Majoidea, respectively, all four taxa belong to basal eubrachyuran branches, whereas *Romualdocarcinus* is more reminiscent of modern-looking eubrachyurans like Eogeryonidae. If *Romualdocarcinus* is indeed an eogeryonid, it will extend the temporal distribution of the family into the Early Cretaceous, and represents one of the oldest “higher” true crab yet known.

Stratigraphic and geographic range.—Type locality and horizon only.

Concluding remarks

Early Cretaceous crabs of the family Orithopsidae are known from the Aptian–Albian of North America, South America, and Europe (Van Bakel et al. 2012; Schweitzer et al. 2016b; Luque et al. 2017, and references therein). *Exucarcinus* Prado and Luque gen. nov., from the Aptian–Albian of Brazil, is very similar to other endemic South American taxa of nearly the same age such as *Planocarcinus*, *Bellocarcinus*, and *Colombicarcinus*.

The only brachyuran crab previously known from the Romualdo Formation and the Santana Group as a whole is *Araripecarcinus ferreirai*, represented by a single ventral carapace with appendages associated (Maisey 1991; Luque 2015a). In contrast, *Exucarcinus gonzagai* Prado and Luque gen. et sp. nov. and *Romualdocarcinus salesi* Prado and Luque gen. et sp. nov. are so far known exclusively from dozens of dorsal carapaces. It is possible that *E. gonzagai* Prado and Luque gen. et sp. nov. might correspond to the

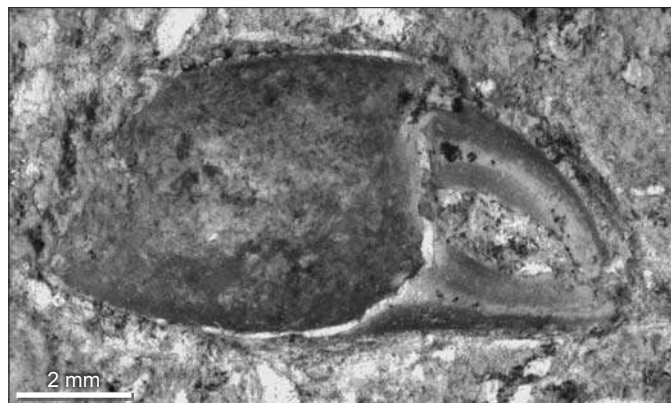


Fig. 5. Brachyura indet. (right cheliped) from the upper Aptian–lower Albian Romualdo Formation of the Santana Group, Araripe Basin, Pernambuco. DGEO-CTG-UFPE-7743, possibly akin to *Araripecarcinus ferreirai* Martins-Neto, 1987.

dorsal carapace of *A. ferreirai*, but without conclusive evidence and dorso-ventral material associated, this is just a possibility and both taxa so far cannot be compared directly or assumed as conspecific. In addition, *A. ferreirai* comes from a different stratigraphic interval, facies, and taphocoenosis than *E. gonzagai*, further suggesting a possible independent systematic placement. An isolated right brachyuran claw found in the site Arrojado (Fig. 5) was collected from the concretionary fish level from which *Araripecarcinus* comes (Fig. 2), and is similar to the chelipeds of *A. ferreirai*, suggesting that it could belong to this species. To date, all fossil and extant raninoidans, i.e., Necrocarinoidea, Palaeocorystoidea, and Raninoidea, are exclusively known from marine subtidal settings, and there are no fossil or extant raninoidans known from brackish or freshwater habitats (Luque 2015a). Therefore, the occurrences of *Exucarcinus* Prado and Luque gen. nov. associated with echinoids in the municipality of Exu, Pernambuco, suggest shallow marine sedimentation in the western portion of the Araripe Basin rather than brackish depositional settings.

As previously indicated, the eubrachyuran-like *Romualdocarcinus salesi* Prado and Luque gen. et sp. nov. might be an eubrachyuran related to *Eogeryon*, a genus whose sternal anatomy clearly indicates an eubrachyuran affinity (Ossó 2016: fig. 5). As such, *Romualdocarcinus* would be expected to have a sternal construction closer to eubrachyurans and unlike that of *Araripecarcinus* (Luque 2015a).

Molluscs and echinoids from the same stratigraphic levels of the Romualdo Formation where the new crab faunule occurs have been interpreted as transported clasts in deposits generated by storms at different water depths (Sales 2005; Prado et al. 2015, 2016). The occurrence of mostly dorsal carapaces of crabs lacking any preferential position within the matrix of coquinas, limited at the base by abrupt contacts which exhibit fragmented bioclasts without signs of abrasion or rounding, suggest deposition under storm events where the energy was not sufficient to transport the remains over long distances. Some specimens show local fragmentation due to compaction, as the carapaces are com-

plete but broken, and some of the fragments are only slightly displaced from the rest of the carapace. The crab carapaces here reported most likely would have been transported over short distances or remobilized within their own environment (parautochthonous sensu Kidwell et al. 1986).

To date, the genera *Planocarcinus*, *Bellcarcinus*, *Colombicarcinus*, *Exucarcinus* Prado and Luque gen. nov., and *Romualdocarcinus* Prado and Luque gen. nov. are restricted to northern South America, and are quite different from closer relatives in North America and Europe (Van Bakel et al. 2012; Schweitzer et al. 2016a, b; Luque et al. 2017). Our new findings indicate that the tropical Americas might have been inhabited by several early brachyuran lineages, with several endemic genera and species during the Cretaceous.

The Lower Cretaceous rocks of northeastern Brazil, including those in the Araripe Basin, record the transition from continental to marine facies (rift and post-rift sequences) linked to the separation of South America and Africa, and the birth of the Central Atlantic that connected the water masses of both hemispheres. According to Arai (2014), the Tethyan influence on these basins during the upper Aptian–lower Albian is suggested by the presence of several Tethyan faunas, such as the isopod *Codoisopus brejensis* in the Parnaíba Basin (Codó Formation) (Lindoso et al. 2013), the pithonellid calcispheres (calcareous dinoflagellates) in the Potiguar and Sergipe-Alagoas basins (Dias-Brito 1985a, b, 2002), bivalve *Neithea* (*Neithea*) *coquandi* (Péron, 1877) (Monteiro et al. 2010), planktonic foraminifera (e.g., *Globigerinelloides aptiensis*, *G. barri*, *G. blowi*, *G. ferreolensis*, *G. maridalensis*, *Hedbergella labocaensis*, *H. maslakovae*, *H. semielongata*, *H. similis*), and ammonoids (*Epicheloniceras* cf. *martinioides*, *Vectisites simplex*, and *V. cf. cruzi*) (Bengtson and Koutsoukos 1992; Bengtson et al. 2007) in the Sergipe-Alagoas Basin (Riachuelo Formation), and the molluscs and fishes in the Araripe Basin (see Table 2). Therefore, the marine ingression would have reached the Araripe either from the north through the Parnaíba Basin (Arai 2014) or from the northeast through the Potiguar Basin (Lima 1978) (Table 2), but not from the south (Recôncavo–Tucano–Jatobá basins).

Although the fragmentary and sparse record of fossil raninoidans and eubrachiurans from the Early Cretaceous does not help resolve this issue, the presence of taxa similar to those from the Aptian–Albian of Colombia, and the Albian–Cenomanian of USA, England, and Spain, confirm the broad distribution of these groups in the Tethys Ocean during the Early Cretaceous, and reinforces the view of a Tethyan influence in Araripe at the time.

Acknowledgements

We are grateful to the Exu city council, the friends Genilma Cordeiro, Cícero Marcelino, Juaran Rodrigues (all Pernambuco, Brazil) and the members of the palaeontology laboratory of the Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) for field assistance. We also thank Ismar Carvalho (Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brazil) for his suggestions in textual organization, Artur Andrade (head of DNPM's

regional office, Crato, Brazil) for his assistance in transporting fossil material abroad for study, and Jefferson Lima (Ph.D. student, UFPE, Brazil) for improvement on Figs. 1 and 2. Special thanks to Barry van Bakel (Oertijdmuseum De Groene Poort, Boxtel, Netherlands) and Álex Ossó (independent researcher, Tarragona, Spain) for discussions on the systematic affinities of the material studied, and to the reviewers Rodney Feldmann and Carrie Schweitzer (both Kent State University, Ohio, USA) for their thoughtful and stimulating comments. This work was possible thanks to the Brazilian Federal Agency for Support and Evaluation of Graduate Education-CAPES (Programa de Doutorado Sanduíche no Exterior PDSE: 88881.134830/2016-01) to LACP, the Izaak Walton Killam Memorial Scholarship (Canada) to JL, and the Natural Science and Engineering Research Council of Canada (NSERC) Discovery Grants RGPIN 04863 to ARP.

References

- Ahyong, S.T., Lai, J.C.Y., Sharkey, D., Colgan, D.J., and Ng, P.K.L. 2007. Phylogenetics of the brachyuran crabs (Crustacea: Decapoda): The status of Podotremata based on small subunit nuclear ribosomal RNA. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 45: 576–586.
- Alvarado-Ortega, J. and Brito, P.M. 2011. A new species of *Araripichthys* (Teleostei, Elopoccephala) from the Tlayúa Formation (Cretaceous, Albian), México. *Journal of Vertebrate Paleontology* 31: 1376–1381.
- Arai, M. 2014. Aptian/Albian (Early Cretaceous) paleogeography of the South Atlantic: a paleontological perspective. *Brazilian Journal of Geology* 44: 339–350.
- Arai, M. and Coimbra, J.C. 1990. Análise paleoecológica do registro das primeiras ingressões marinhas na Formação Santana (Cretáceo Inferior da Chapada do Araripe). *Atas do 1º Simpósio sobre a Bacia do Araripe e Bacias Interiores do Nordeste*, 225–233. SBP, Crato-CE.
- Arai, M., Lana, C.C., and Pedraza, E. 1994. Ecozona *Subtilisphaera* spp.: Registro eocretáceo de um importante episódio ecológico do Oceano Atlântico primitivo. *Acta Geologica Leopoldensia* 39: 521–538.
- Assine, L.M. 1992. Análise estratigráfica da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências* 22: 289–300.
- Assine, L.M. 1994. Paleocorrentes e Paleogeografia na Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências* 24: 223–232.
- Assine, L.M. 2007. Bacia do Araripe. *Boletim de Geociências da Petrobrás* 15: 371–389.
- Assine, L.M., Perinotto, J.A.J., Custódio, M.A., Neumann, V.H., Varejão, F.G., and Mescollotti, P.C. 2014. Sequências deposicionais do Andar Alagoas da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. *Boletim de Geociências da Petrobrás* 22: 3–28.
- Assine, L.M., Quaglio, F., Warren, L.V., and 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.
- Bengtson, P. and Koutsoukos, E.A.M. 1992. Ammonite and foraminiferal dating of the first marine connection between the Central and South Atlantic. In: R. Curnelle (ed.), *Géologie Africaine. Elf Aquitaine Mémoire* 13: 403.
- Bengtson, P., Koutsoukos, E.A.M., Kakabadze, M.V., and Zucon, M.H. 2007. Ammonite and foraminiferal biogeography and the opening of the Equatorial Atlantic gateway. In: *1st International Palaeobiogeography Symposium. Paris, France, Abstracts*, 12. Université Pierre et Marie Curie and Museum national d'Histoire naturelle, Paris.
- Bermúdez, H.D., Gómez-Cruz, A.D.J., Hyžný, M., Moreno-Bedmar, J.A., Barragán, R., Sánchez, M.M., and Veja, F.J. 2013. Decapod crustaceans from the Cretaceous (Aptian–Albian) San Gil Group in the Villa de Leyva section, central Colombia. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen* 267: 255–272.
- Berthou, P.Y., Viana, M.V., and Campos, D.A. 1990. Coupe de la Formation Santana dans le secteur de “Pedra Branca” (Santana do Cariri) (Bassin

- D'Araripe, NE do Brasil). Contribution à l'étude de La sedimentologie et des paleoenvironnements. In: L.M. Barros, P.C. Nuvens, and J.B.M. Filgueira (eds.), *Atas do 1º Simpósio sobre a Bacia do Araripe e Bacias Interiores do Nordeste*, 173–191. SBP, Crato-CE.
- Beurlen, K. 1963. Geologia e estratigrafia da Chapada do Araripe. *Anais do 17º Congresso Nacional de Geologia* 1: 1–47.
- Beurlen, K. 1966. Novos equinóides no Cretáceo do Nordeste do Brasil. *Anais Academia Brasileira de Ciências* 38: 455–464.
- Beurlen, K. 1971. As condições ecológicas e faciológicas da Formação Santana na Chapada do Araripe (Nordeste do Brasil). *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 43: 411–415.
- Breton, G. 2009. Description of *Priscinachus elongatus* n. gen., n. sp., and *Priscinachidae* n. fam. for the earliest spider crab (Crustacea, Decapoda, Majoidea), from the French Cretaceous (Cenomanian). *Geodiversitas* 31: 509–523.
- Bruno, A.P. and Hessel, M.P. 2006. Registros paleontológicos do Cretáceo marinho na Bacia do Araripe. *Estudos Geológicos* 16: 30–49.
- Carter, J. 1872. On *Orithopsis bonneyi*, a new fossil crustacean. *Geological Magazine* 9: 529–532.
- Collins, J.S.H. and Smith, R. 1993. Ypresian (Lower Eocene) crabs (Decapoda, Crustacea) from Belgium. *Bulletin de l'Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique (Sciences de la Terre)* 63: 261–270.
- Collins, J.S.H. and Williams, R.J. 2004. A new genus and species of necrocarcinid crab (Crustacea, Brachyura) from the Upper Cretaceous of England. *Bulletin of the Mizunami Fossil Museum* 31: 33–35.
- Collins, J.S.H. and Rasmussen, H.W. 1992. Upper Cretaceous–Lower Tertiary decapod crustaceans from west Greenland. *Bulletin Grønlands Geologiske Undersøgelse* 162: 1–46.
- Custódio, M.A., Quaglio, F., Warren, L.V., Simões, M.G., Fürsich, F.T.J., Perinotto, J.A., and Assine, M.A. 2017. The transgressive-regressive cycle of the Romualdo Formation (Araripe Basin): Sedimentary archive of the Early Cretaceous marine ingression in the interior of Northeast Brazil. *Sedimentary Geology* 35: 1–15.
- Dias-Brito, D. 2002. Os fósseis da bacia de Sergipe-Alagoas: calcisferas pelágicas. *Phoenix* 4 (39): 1–2. Available from http://www.phoenix.org.br/Phoenix39_Mar02.htm
- Dias-Brito, D. 1985a. Calcisphaerulidae do Albiano da Bacia de Campos, Rio de Janeiro, Brasil. Investigações taxonômicas: biocronoestratigráficas e paleoambientais. In: D.A. Campos, C.S. Ferreira, I.M. Brito, and C.F. Viana (eds.), *Coletânea de Trabalhos Paleontológicos, Geologia 27, Paleontologia e Estratigrafia* 2, 295–306. Ministério das Minas e Energia, Departamento Nacional da Produção Mineral, Brasília.
- Dias-Brito, D. 1985b. Calcisphaerulidae e microfósseis associados da Formação Ponta do Mel-Bacia Potiguar, Brasil: considerações paleoecológicas e biocronoestratigráficas. In: D.A. Campos, C.S. Ferreira, I.M. Brito, and C.F. Viana (eds.), *Coleção de trabalhos Paleontológicos, Geologia 27, Paleontologia e Estratigrafia* 2, 307–314. Ministério das Minas e Energia, Departamento Nacional da Produção Mineral, Brasília.
- Fraaije, R.H.B., Van Bakel, B.W.M., Jagt, J.W.M., and Artal, P. 2008. New decapod crustaceans (Anomura, Brachyura) from mid-Cretaceous reefal deposits at Monte Orobe (Navarra, northern Spain), and comments on related type-Maastrichtian material. *Bulletin de l'Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique (Sciences de la Terre)* 78: 193–208.
- Guinot, D., De Angeli, A., and Garassino, A. 2008. Marocarcinidae, a new eubrachiuran family, and *Marocarcinus pasinii* n. gen., n. sp. from the Upper Cretaceous (Cenomanian–Turonian) of Gara Sbaa, south-eastern Morocco (Crustacea, Decapoda, Brachyura). *Atti della Società Italiana di Scienze Naturali e del Museo Civico di Storia Naturale in Milano* 149: 25–36.
- Guinot, D., Vega, F.J., and Van Bakel, B. 2008. Cenomanocarcinidae n. fam., a new Cretaceous podotreme family (Crustacea, Decapoda, Brachyura, Raninoidia), with comments on related families. *Geodiversitas* 30: 681–719.
- Karasawa, H., Schweitzer, C.E., Feldmann, R.M. 2008. Revision of the Portunidea Rafinesque, 1815 (Decapoda: Brachyura) with emphasis on the fossil genera and families. *Journal of Crustacean Biology* 28: 82–127.
- Karasawa, H., Schweitzer, C.E., Feldmann, R.M., and Luque, J. 2014. Systematics and phylogeny of the Raninoida (Crustacea: Brachyura). *Journal of Crustacean Biology* 34: 216–272.
- Kellner, A.W.A. 2002. Membro Romualdo da Formação Santana, Chapada do Araripe, CE – Um dos mais importantes depósitos fossilíferos do Cretáceo brasileiro. In: C. Schobbenhaus, D.A. Campos, E.T. Queiroz, M. Winge, and M.L.C. Berbetborn (eds.), *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil, 4th edition*, 121–130. DNPM/CPRM – Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleontológicos (SIGEP), Brasília.
- Kidwell, S.M., Fürsich, F.T., and Aigner, T. 1986. Conceptual framework for the analysis and classification of fossil concentrations. *Palaos* 1: 228–238.
- Klompmaaker, A.A. 2013. Extreme diversity of decapod crustaceans from the mid-Cretaceous (late Albian) of Spain: Implications for Cretaceous decapod paleoecology. *Cretaceous Research* 41: 150–185.
- Larghi, C. 2004. Brachiuran decapod Crustacea from the Upper Cretaceous of Lebanon. *Journal of Paleontology* 78: 528–541.
- Latreille, P.A. 1802. *Histoire naturelle, générale et particulière des crustacés et des insectes. Ouvrage faisant suite aux œuvres de Leclerc de Buffon et partie du cours complet d'histoire naturelle rédigé par C. S. Sonnini, membre de plusieurs sociétés savantes. Vol. 1.* 394 pp. F. Dufart, Paris.
- Lima, F.J., Saraiva, A.A.F., and Sayão, J.M. 2012. Revisão da paleoflora das Formações Missão Velha, Crato e Romualdo, Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. *Estudos Geológicos* 22: 99–115.
- Lima, M.R. 1978. *Palinologia da Formação Santana (Cretáceo do Nordeste do Brasil)*. 337 pp. Unpublished Ph.D. Thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Lindoso, R.M., Carvalho, I.S., and Mendes, I.D. 2013. An isopod from the Codó Formation (Aptian of the Parnaíba Basin), Northeastern Brazil. *Brazilian Journal of Geology* 43: 16–21.
- Lörentz, E. and Beurlen, K. 1929. Die fossilen Decapoden der Länder der Ungarischen Krone. *Geologica Hungarica (Palaeontologica)* 3: 1–421.
- Luque, J. 2014. A new genus and species of raninoidan crab (Decapoda, Brachyura) from the Lower Cretaceous of Colombia, South America. *Scripta Geologica* 147: 27–34.
- Luque, J. 2015a. A puzzling frog crab (Crustacea: Decapoda: Brachyura) from the Early Cretaceous Santana Group of Brazil. Frog first or crab first? *Journal of Systematic Palaeontology* 13: 153–166.
- Luque, J. 2015b. The oldest higher true crabs (Crustacea: Decapoda: Eubrachiura): insights from the Early Cretaceous of the Americas. *Palaeontology* 58: 251–263.
- Luque, J., Feldmann, R.M., Schweitzer, C.E., Jaramillo, C., and Cameron, C.B. 2012. The oldest frog crabs (Decapoda: Brachyura: Raninoida) from the Aptian of northern South America. *Journal of Crustacean Biology* 32: 405–420.
- Luque, J., Schweitzer, C.E., Santana, W., Portell, R.W., Vega, F.J., and Klompmaaker, A.A. 2017. Checklist of fossil decapod crustaceans from tropical America. Part I: Anomura and Brachyura. *Nauplius* 25: e2017025.
- Mabesoone, J.M. and Tinoco, I.M. 1973. Paleoecology of the Aptian Santana Formation (Northeastern Brazil). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 14: 97–118.
- Maisey, J.G. 1991. *Santana Fossil an Illustrated Atlas*. 459 pp. Tropical Fish Hobbyist Publications, New Jersey.
- Maisey, J.G. 2000. Continental break up and the distribution of fishes of Western Gondwana during the Early Cretaceous. *Cretaceous Research* 21: 281–314.
- Maisey, J.G. and Carvalho, G.P. 1995. First records of fossil sergestid decapods and fossil brachiuran crab larvae (Arthropoda, Crustacea), with remarks on some supposed palaemonid fossils, from the Santana Formation (Aptian–Albian, NE Brazil). *American Museum Novitates* 3132: 1–17.
- Maisey, J.G. and Moody, J.M. 2001. A review of the problematic extinct teleost fish *Araripichthys*, with a description of a new species from the Lower Cretaceous of Venezuela. *American Museum Novitates* 3324: 1–27.
- Manso, C.L.M. and Hessel, M.H. 2007. Revisão sistemática Pygidiolam-

- pas araripensis* (Beurlen, 1966), (Echinodermata: Cassiduloida) da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. *Geociências* 26: 271–277.
- Marangon, S. and De Angeli, A. 1997. *Cherpiocarcinus*, nuovo genere di brachiuro (Decapoda) dell'Oligocene del Bacino Ligure-Piemontese (Italia settentrionale). *Lavori – Società Veneziana di Scienze Naturali* 22: 97–106.
- Martins-Neto, R.G. 1987. Primeiro registro de decápode na Formação Santana, Bacia do Araripe (Cretáceo Inferior), Brasil. *Ciência e Cultura* 39: 406–410.
- Martins-Neto, R.G. and Mezzalana, S. 1991. Descrição de novos crustáceos (Caridea) da Formação Santana Cretáceo Inferior do Nordeste do Brasil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 63: 155–160.
- Matos, R.M.D. 1992. The northeast Brazilian rift system. *Tectonics* 11: 766–791.
- Maury, C.J. 1936. O Cretáceo de Sergipe, Brasil. *Monographias do Serviço Geológico e Mineralógico* 11: 1–283.
- Monteiro, F.A.C., Meirelles, C.A.O., and Soares, M.O. 2010. Bivalves fósseis do gênero *Neithea* (Bivalvia: Pectinidae) e seu significado paleogeográfico para o domínio tetiano na Bacia Potiguar. *Geociências* 29: 335–341.
- Ossó, Á. 2016. *Eogeryon elegius* n. gen. and n. sp. (Decapoda: Eubranchyura: Portunoidea), one of the oldest modern crabs from late Cenomanian of the Iberian Peninsula. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 68: 231–246.
- Pereira, P.A., Cassab, R.C.T., and Barreto, A.M.F. 2016a. Cassiopidae gastropods, influence of Tethys Sea of the Romualdo Formation (Aptian–Albian), Araripe Basin, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 70: 211–223.
- Pereira, P.A., Cassab, R.C.T., and Barreto, A.M.F. 2017. Paleoeecologia e paleogeografia dos moluscos e equinóides da Formação Romualdo, Aptiano–Albiano da Bacia do Araripe, Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências-UFRJ* 40: 180–198.
- Pereira, P.A., Cassab, R.C.T., Barreto, A.M.F., and Almeida, J.A.C. 2016b. Moluscos da Formação Romualdo, Aptiano–Albiano, Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Ciências Naturais* 10: 231–246.
- Péron, A. 1877. Observations sur la faune des Calcaires à Echinides de Rennes-les-Bains et sur quelques fossiles du terrain crétacé supérieur. *Bulletin de la Société Géologique de France* 3: 499–535.
- Petri, S. 1987. Cretaceous paleogeographic maps of Brazil. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 59: 117–168.
- Pinheiro, A.P., Alencar, D.R., Sayão, J.M., and Santiago, A.C. 2016. Primeiro registro fossilífero de Solenoceridae Wood-Mason, 1981 (Decapoda: Penaeoidea) para bacias sedimentares do Brasil. In: D. Lima and J. Colavite (eds.), *14º Congresso Brasileiro sobre Crustáceos, Crato, Resumos*, 293. Sociedade Brasileira de Carcinologia, Crato-CE.
- Pinheiro, A.P., Saraiva, A.Á.F., and 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.
- Prado, L.A.C., Pereira, P.A., Sales, A.M.F., and 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.
- Prado, L.A.C., Pereira, P.A., Sales, A.M.F., and Barreto, A.M.F. 2015. Tafonomical 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.
- 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*. 160 pp. Unpublished Ph.D. Thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Santana, W., Pinheiro, A.P., Silva, C.M.R., and Saraiva, A.Á.F. 2013. A new fossil caridean shrimp (Crustacea: Decapoda) from the Cretaceous (Albian) of the Romualdo Formation, Araripe Basin, northeastern Brazil. *Zootaxa* 3620: 293–300.
- Saraiva, A.Á.F., Pinheiro, A.P., and Santana, W. 2018. A remarkable new genus and species of the planktonic shrimp family Luciferidae (Crustacea, Decapoda) from the Cretaceous (Aptian/Albian) of the Araripe Sedimentary Basin, Brazil. *Journal of Paleontology* 92: 459–465.
- Saraiva, A.Á.F., Pralon, B.G.N., and Gregati, R.A. 2009. Taxonomic remarks on Brazilian Cretaceous Decapoda from Araripe Basin, Brazil, and ecological inferences. *Gaea* 5: 70–74.
- Schweitzer, C.E., Dworschak, P.C., and Martin, J.W. 2011. Replacement names for several fossil Decapoda. *Journal of Crustacean Biology* 31: 361–363.
- Schweitzer, C.E., Feldmann, R.M., and Frantescu, O.D. 2016a. Early Cretaceous (Albian) decapods from the Glen Rose and Walnut formations of Texas, USA. *Bulletin of the Mizunami Fossil Museum* 42: 1–22.
- Schweitzer, C.E., Feldmann, R.M., and Lamanna, M.C. 2012. New genus of crab (Brachyura: Raninoidea: Necrocarcinidae) from the Upper Cretaceous of West Antarctica, with description of a new species. *Annals of Carnegie Museum* 80: 147–158.
- Schweitzer, C.E., Feldmann, R.M., Fam, J., Hessin, W.A., Hetrick, S.W., Nyborg, T.G., and Ross, R.L.M. 2003. *Cretaceous and Eocene Decapod Crustaceans from Southern Vancouver Island, British Columbia, Canada*. 66 pp. NRC Research Press, Ontario.
- Schweitzer, C.E., Karasawa, H., Luque, J., and Feldmann, R.M. 2016b. Phylogeny and classification of Necrocarinoidea Föster, 1968 (Brachyura: Raninoidea) with the description of two new genera. *Journal of Crustacean Biology* 36: 338–372.
- Silva-Santos, R. 1985. Paleoiictiofauna da Formação Codó, Bacia do Parnaíba, NE do Brasil. In: *9º Congresso Brasileiro de Paleontologia, Resumos*, 11. SBP, Fortaleza.
- Silva-Santos, R. and Valença, J.G. 1968. A Formação Santana e sua paleoiictiofauna. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 40: 339–360.
- Van Bakel, B.W.M., Guinot, D., Artal, P., Fraaije, R.H.B., and Jagt, J.W.M. 2012. A revision of the Palaeocorystoidea and the phylogeny of raninoidian crabs (Crustacea, Decapoda, Brachyura, Podotremata). *Zootaxa* 3215: 1–216.
- Varejão, F.G., Warren, L.V., Perinotto, J.A. J., Neumann, V.H., Freitas, B.T., Almeida, R.P., and 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.S.S. and Agostinho, S.M. 1995. Camarões do Membro Romualdo da Formação Santana (Cretáceo Inferior da Bacia do Araripe). *Boletim do 16º Simpósio de Geologia do Nordeste Sociedade Brasileira Geologia* 1: 239–243.
- White, C.A. 1887. On new generic forms of Cretaceous Mollusca and their relation to other forms. *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia* 39: 32–37.



Contents lists available at ScienceDirect

Cretaceous Research

journal homepage: www.elsevier.com/locate/CretRes

Short communication

New records of shrimps from the Lower Cretaceous Romualdo Formation, Araripe Basin, northeastern Brazil, with new taxa of Penaeoidea (Crustacea: Decapoda: Dendrobranchiata)

Ludmila Alves Cadeira do Prado ^{a,*}, Tereza Cristina dos Santos Calado ^b,
Alcina Magnólia Franca Barreto ^a

^a Departamento de Geologia, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, 1235, 50740-533, Recife, Pernambuco, Brazil

^b Setor de Biodiversidade /Labmar/ICBS, Universidade Federal de Alagoas, 452, 57051-090, Maceió, Alagoas, Brazil

ARTICLE INFO

Article history:

Received 23 October 2018

Received in revised form

24 January 2019

Accepted in revised form 20 February 2019

Available online 27 February 2019

Keywords:

Cretainermis pernambucensis

Crustacea

Taxonomy

Taphonomy

South America

ABSTRACT

From the shrimp fauna survey of the upper Aptian–lower Albian Romualdo Formation of the Araripe Basin, State of Pernambuco, Brazil, new records of the sergestid *Paleomattea deliciosa* Maisey & Carvalho, 1995, have been identified, in addition to description of the *Cretainermis pernambucensis* gen. et sp. nov. (Penaeoidea). The new fossil is characterized by the short, spiniform and toothless rostrum and well-marked cervical groove. These fossils form associations that differ taphonomically in two types: Type 1 association occurs in shale layers and it is represented by shrimp buried *in situ*. Type 2 association occurs in layers of calcareous sandstone with shrimps both buried *in situ* and transported.

© 2019 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Two geological formations from the Araripe Basin are known worldwide for the great diversity of fossils generally exceptionally well preserved: the Crato (upper Aptian) and Romualdo (upper Aptian–lower Albian) formations (Maisey, 1991; Martill, 2007). With the exception of *Beurlenia araripeensis* Martins-Neto and Mezzalana (1991), found in the Crato Formation, all the shrimp species of the Araripe Basin are found in the shales or calcareous nodules of the Romualdo Formation (see Prado et al., 2018). Some of these shrimp are seen in the state of Ceará, such as *Paleomattea deliciosa* Maisey and Carvalho (1995); *Kellnerius jamacaruensis* Santana et al. (2013); and *Araripenaeus timidus* Pinheiro et al. (2014) (Martins Neto, 1987; Saraiva et al., 2009; Santana et al., 2013; Pinheiro et al., 2014; Saraiva et al., 2018). In Pernambuco, specifically in the municipality of Trindade, *P. deliciosa*, *Sume marcosi*

Saraiva et al. (2018) and *Priorhyncha feitosa* Alencar et al. (2018) are reported (Viana and Agostinho, 1995; Pinheiro et al., 2016; Saraiva et al., 2018; Alencar et al., 2018).

For a better understanding of fossiliferous diversity of the Romualdo Formation, a survey of the occurrence of fossil shrimp has been conducted in Pernambuco, with a description of a new genus and species of the superfamily Penaeoidea. Additionally, taphonomic analysis of the shrimp associations have been performed, and stratigraphic sections have been constructed at all sampling sites in order to contribute to the paleoenvironmental and stratigraphic interpretation of the Romualdo Formation.

2. Geological setting

The Araripe Basin is located in the interior of northeastern Brazil in the states of Pernambuco, Piauí and Ceará. According to Assine (2007) and Assine et al. (2014), the Araripe Basin is subdivided stratigraphically into the pre-rift, rift and post-rift (I and II) sequences formed mainly by fluvial and lacustrine strata (Fig. 1). The Romualdo Formation (post-rift I), upper Aptian–lower Albian, is characterized by sandstones intercalated with shales at the base,

* Corresponding author.

E-mail addresses: prado.lac@gmail.com (L.A.C. Prado), terezacalado@gmail.com (T.C.S. Calado), alcinabarreto@gmail.com (A.M.F. Barreto).

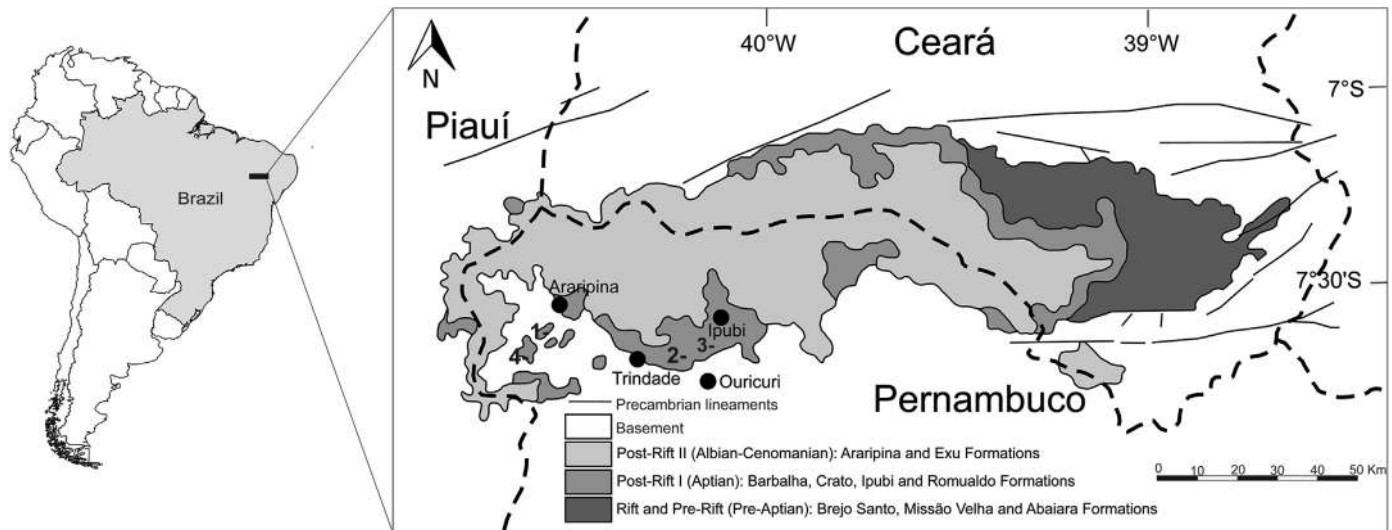


Fig. 1. Distribution of the shrimps in Romualdo Formation, Araripe Basin, state of Pernambuco. The study material was collected in 1- Arrojado site and 4- Trevo quarry, municipality of Araripina, 2- Serrolândia quarry, municipality of Ouricuri, and 3- Qualiminas quarry, limit of the municipalities of Ipupi and Trindade.

followed by shales with ostracods and calcareous nodules, respectively (Assine, 1992; Assine et al., 2014). Macrofossils such as fish, turtles, crocodiles, dinosaurs, pterosaurs, decapods and plants are found in both nodules and the shales that surround them (Mabessone and Tinoco, 1973; Bruno and Hessel, 2006; Lima et al., 2012; Pinheiro et al., 2014). At the top of the unit are found coquinas formed by mollusks, echinoids and brachyuran crabs in layers of limestone or calcareous sandstone (Sales, 2005; Prado et al., 2016, 2018). The fossil association is typical of a transitional to shallow marine environment (Beurlen, 1963, 1964).

3. Material and methods

The study material was collected from the Romualdo Formation, in Pernambuco at the Arrojado site (7° 41'12" S 40° 33'48" W) and the Trevo quarry (7° 40'41" S 40° 33'43" W); municipality of Araripina, in the Serrolândia quarry (7° 43'28" S 40° 11'36" W); the municipality of Ouricuri and Qualiminas (7° 41'58" S 40° 10'21" W), at the limit of the municipalities of Ipupi and Trindade (Fig. 1). All these outcrops are formed predominantly by shales intercalated with sandstones or calcareous sandstones (Fig. 2). In the Serrolândia quarry, shrimp has been found associated with fish and ostracods in the shales located just below a level of calcareous sandstone with gastropods of Cerithiidae Fleming, 1822, and Cassiopidae Beurlen, 1964. In the Qualiminas quarry, shrimp occurs associated with fish in limestone nodules and shale layers interspersed with sandstone beds. In the Trevo quarry, the holotype of *Cretainermis pernambucensis* (DGEO-CTG-UFPE-7746) has been found on a layer of calcareous sandstone interspersed with shales containing ichthyolites (*Tharrhias araripis* Jordan and Branner, 1908; *Cladocyclus gardneri* Agassiz, 1841; *Vinctifer comptoni* (Agassiz, 1841); *Brannerion* sp. Jordan, 1919; *Praelops cearensis* Santos, 1971). At the Arrojado site, shrimp are associated with fish (*Beurlenichthys ouricuriensis* Figueiredo and Gallo, 2004; *Brannerion* sp., *Vinctifer comptoni*, and *Calamopleurus cylindricus* Agassiz, 1841) and ostracods, in layers of calcareous sandstone, overlapping that where a crab cheliped possibly of the species *Araripecarcinus ferreirai* Martins Neto, 1987 was found (Prado et al., 2018).

The specimens analyzed (DGEO-CTG-UFPE 7746, 8138, 8141, 8143, 8144, 8145, 8146, 8147) are housed in the Palaeontology Collection of the Geology Department, Centre of Technology and Geosciences, Federal University of Pernambuco, Pernambuco, Brazil.

Biostratigraphic and sedimentological features of the fossiliferous assemblages followed Kidwell et al. (1986), Kidwell and Bosence (1991), and Kidwell and Holland (1991), including: degree of packaging, selection, orientation in plants, corrosion, and encrustation of bioclasts. The analysis of degree of articulation and fragmentation of a shrimp exoskeleton has been adapted from Bishop and Williams (2005), including articulated exoskeleton (carapace and abdomen with telson), partially articulated (carapace and abdomen without telson), disarticulation in associated units (carapace, abdomen and appendages), and disintegration of these units into isolated elements or fragments.

4. Systematic palaeontology

Order Decapoda Latreille, 1802

Suborder Dendrobranchiata Bate, 1888

Superfamily Penaeoidea Rafinesque, 1815

Family Incertae sedis

Genus *Cretainermis* gen. nov.

(Figs. 3–5)

Etymology. From Cretaceous, the geological age of the studied specimen and *inermis*, a Latin word for toothless, that refers to the unarmed rostrum.

Type species: *Cretainermis pernambucensis* sp. nov. by present designation.

Gender: masculine.

Diagnosis. Carapace elongated; rostrum short, spiniform and toothless and marked cervical groove. S1–S5 equal in size, S6 larger than the previous ones.

Remarks. According to Pérez Farfante and Kensley (1997) and Tavares and Martin (2010) the presence of the pleura of the second abdominal somite overlapping the third, but not the first would be one of diagnostic features of Dendrobranchiata, such as in *Cretainermis pernambucensis* sp. nov. *Cretainermis* n. gen. shares with Luciferidae De Haan, 1849, and Sergestidae Dana, 1852 a short and toothless rostrum, but does not present reduced P4–P5 diagnostic of the superfamily Sergestoidea Dana, 1852, justifying its placement in superfamily Penaeoidea Rafinesque, 1815 (Pérez Farfante and Kensley, 1997; Tavares and Martin, 2010). Among penaeoids, *Cretainermis* n. gen. differs from Carpopenaeidae Garassino, 1994; Penaeidae Rafinesque, 1815; and Sicyoniidae Ortmann, 1898; by its

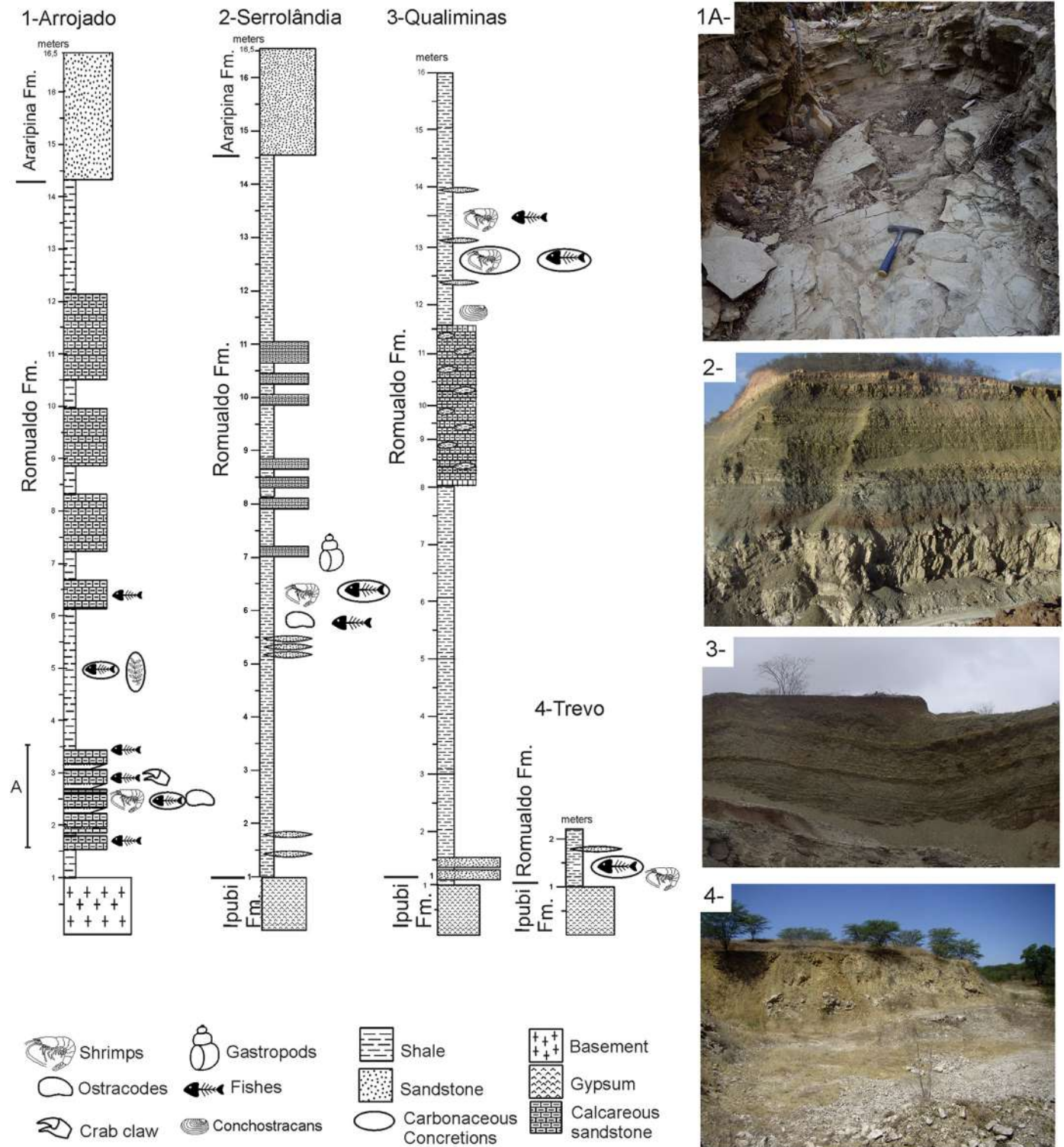


Fig. 2. Stratigraphic section of Romualdo Formation in the outcrops studied.

short rostrum, contrasting with the well-developed rostrum seen in these families. *Cretainermis* n. gen. shares with Benthescymidae Wood-Mason and Alcock, 1891, Solenoceridae Wood-Mason and Alcock, 1891, and Aristeidae Wood-Mason and Alcock, 1891 (only adult males) a short rostrum unarmed ventrally, but differs from them in its rostrum completely unarmed dorsally. In Aegeridae Burkenroad, 1963, the rostrum may be short or long, with sub- or

suprarostal spines or without rostral spines at all. However, the spines on the dorsal carapace useful to distinguish the new genus from the representatives of the superfamily Penaeoidea are not seen in *Cretainermis* n. gen., due to either absence in the organism or loss by taphonomic process. In addition, the new specimen is covered by manganese oxide, making taxonomic classification even more difficult.

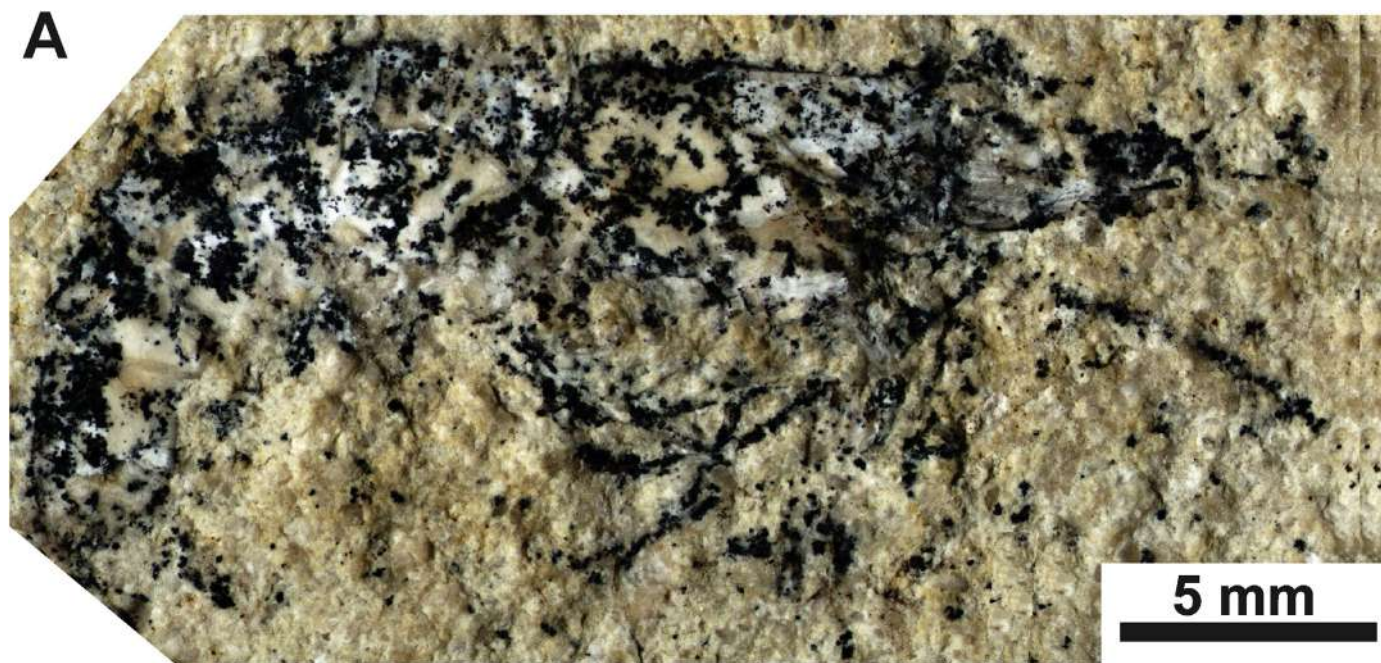


Fig. 3. Holotype of *Cretainermis pernambucensis* gen. et sp. nov. (DGEO-CTG-UFPE-7746).

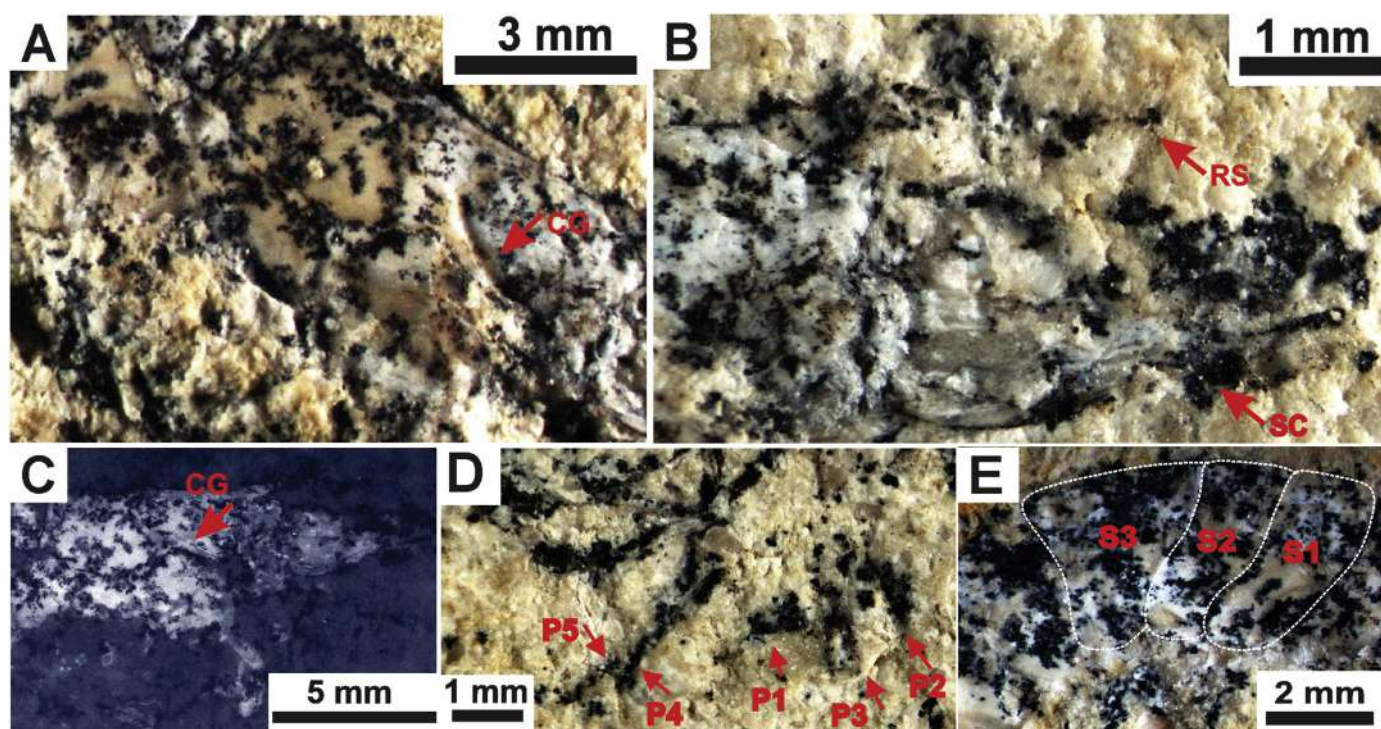


Fig. 4. Detail of *Cretainermis pernambucensis* gen. et sp. nov. A) carapace under oblique light; B) anterior region of the carapace; C) image under UV light; D) pereopods; E) schematic drawing over photo emphasizing S1–S3. Abbreviations: CG, cervical groove; RS, rostrum; SC, scaphocerite.

As for the penaeoideans found in Romualdo Formation, *Cretainermis* n. gen. differs from them by the absence of the sinuous cicatrix in the sixth somite and the 10 short dorsal spines in the rostrum, present in *Araripenaeus timidus* and *Priorhyncha feitosa*, respectively, justifying the new genus.

***Cretainermis pernambucensis* gen. et sp. nov.**
(Figs. 3–5)

Diagnosis. As for the genus.

Etymology. Derives from state of Pernambuco, Brazil, where the material was collected.

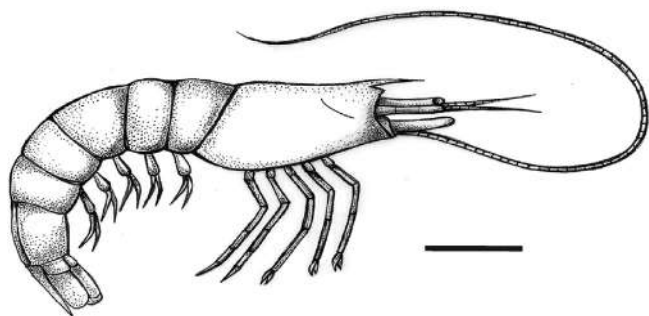


Fig. 5. Reconstitution of *Cretainermis pernambucensis* gen. et sp. nov. by Regina Carvalho. Scale bar: 5 mm.

Type material. Holotype DGEO-CTG-UFPE-7746.

Locality and horizon. Trevo quarry, district of Rancharia, municipality of Araripina, State of Pernambuco, Brazil; Romualdo Formation (upper Aptian–lower Albian), Santana Group, Araripe Basin.

Measurements. Total length 2.6 cm, without the telson; carapace length 6 mm (excluding rostrum); rostrum 4 mm length; abdomen 16 mm length.

Description. Carapace subrectangular, elongated, shorter than abdomen, apparently without spines; rostrum short, spiniform and toothless, extending weakly beyond scaphocerite mid-length; cervical groove well-marked; antennule and eyestalk not discernible. Well-developed P4 and P5. Abdomen subrectangular, apparently without ornamentation; S2 pleura superimposed on the third, but not the first; S1–S5 equal in size, S6 approximately twice the length of previous somites; telson not preserved. Pleopods poorly preserved.

5. Taphonomic aspects

The fossil associations described in this paper resemble each other because they are of the two-dimensional pavement type (Kidwell et al., 1986), with no preferred orientation of bioclasts. However, taphonomic differences are observed that allow the identification of two patterns of preservation: types 1 and 2 (Table 1, Fig. 6). Type 1 association occurs in the shale with dispersed packaging of bioclasts (Fig. 6A–B). Most shrimps are articulated or partially articulated. When the abdomen is disarticulated from the carapace, the abdominal segments are fully articulated. Type 2 association occurs in the layers of calcareous sandstone with loose packaging of bioclasts (Fig. 6C–G). Although there are scarcely articulated (e.g. *Cretainermis pernambucensis* gen. et sp. nov.) or partially articulated shrimps, and some articulated or disarticulated abdominal segments, most bioclasts are fragments.

Disarticulation of shrimps occurs rapidly in approximately 2 weeks due to physical disturbance of the environment, scavenger

action, bacterial decay, and infaunal bioturbation (Plotnick, 1986; Allison, 1988). Thus, Bondioli et al. (2017) suggested that the Romualdo Formation shrimp preserved in the shale (here classified as type 1) would have been rapidly buried after death under anoxic conditions due to the complete articulation of their exoskeletons. According to Plotnick (1986), these would be the essential conditions for this kind of preservation to occur. However, we suggest that in type 1 associations there would also be exposure of some shrimps at the water-sediment interface, due to presence of individuals with the abdomen disconnected from the cephalothorax. It should be emphasized that this is one of the first disarticulations to occur (Plotnick, 1986), and these abdomens are still articulated. Thus, the time of exposure would have been very brief.

As type 1 association occurs only in shales, it is understood that the organisms have been buried under low energy conditions due to the increase of fine sedimentation rates (see Paterson et al., 2007; Matos et al., 2013). Good preservation and absence of fragmentation and preferential orientation suggests that organisms have not been transported, being buried *in situ* (autochthony) or at most remobilized within their own environment (parautochthony) (Kidwell et al., 1986).

In type 2 association, sand lithology itself already suggests deposition in a more energetic environment, which could be responsible for the disarticulation and fragmentation of shrimp. On the other hand, disintegration in isolated units may have occurred due to a greater exposure of the remains at the water-sediment interface, since in most marine decapods it occurs after carapace disconnection from the abdomen, usually between the third and fourth week after death (Bishop and Williams, 2005).

According to Plotnick (1986), the disturbance caused by bioturbation of infaunal organisms is the main destruction factor for buried arthropod remains. However, in the studied associations both angular and rounded fragments occur. This suggests at least in part, transport of skeletal remains. Thus, the organisms articulated in the type 2 association, as well as in the type 1 association, would be autochthonous and/or parautochthonous, with low sediment-water interface. Disarticulated and fragmented specimens would have had a longer time of exposure at water-sediment interface, being destroyed by bioturbatory organisms or transport in and/or out of their original life habits (allochthonous) (sensu Kidwell et al., 1986).

6. Paleoenvironmental considerations

Although the species *Kellnerius jamacaruensis*, *Araripenaeus timidus*, *Sume marcosi*, *Priorhyncha feitosa* and *Paleomattea deliciosa* have been described from the Romualdo Formation, only the latter was found in the studied outcrops. *Paleomattea deliciosa* has been found both at the shale level, where *Sume marcosi* and *Priorhyncha feitosa* occurs in the state of Pernambuco (Saraiva et al., 2018; Alencar et al., 2018), and in sandstone layers in association with *Cretainermis pernambucensis* gen. et sp. nov.

As a sergestid shrimp, *P. deliciosa* could have either marine and fresh water habits (Tavarez and Martin, 2010). However, since the luciferid *S. marcosi* was possibly marine from neritic zone (Saraiva et al., 2018), and *P. feitosa*, as a solenocerid, would occur in the deep sea (Tavarez and Martin, 2010), the association of shrimps preserved in shale, in the western portion of the Romualdo Formation, represents one more line of evidence of marine sedimentation in the Araripe Basin. As for the fossil association in the sandstone, the impossibility of inserting *Cretainermis pernambucensis* gen. et sp. nov. into a family prevents some paleoenvironmental inference.

Table 1
Degree of articulation and fragmentation of the shrimps of Romualdo Formation in the state of Pernambuco.

Fossil association	Locality	N°	AE	PAE	AB	DB	FR
Type 1	Serrolândia quarry	100	36	54	10	—	—
	Qualiminas quarry	9	5	—	4	—	—
Type 2	Trevo quarry	87	3	2	20	5	69
	Arrojado site	133	5	12	10	22	50

N°—number of specimens analyzed. AE—articulated exoskeleton, PAE—partially articulated exoskeleton, AB—articulated abdomen, DB—disarticulated abdomen, FR—fragments.

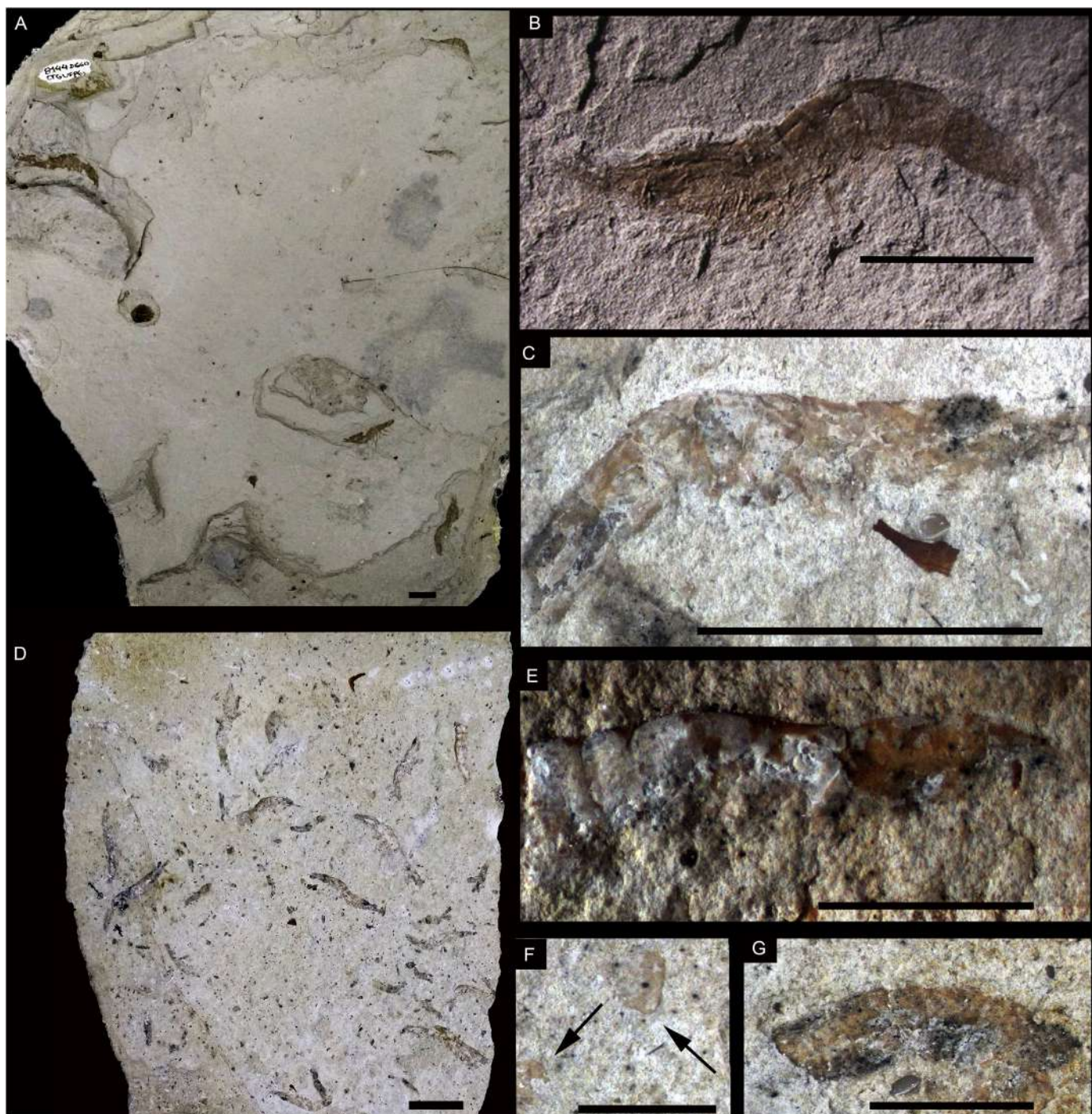


Fig. 6. Taphonomic aspects of shrimp preservation in the studied area. A-type 1 association (DGE0-CTG-UFPE-8139), B- *Paleomattea deliciosa* (DGE0-CTG-UFPE-8139) with articulated exoskeleton, C- partially articulated exoskeleton, D- type 2 association (DGE0-CTG-UFPE-8141), E-articulated abdominal segments, F- fragmented exoskeleton, G-dis-articulated abdomen. Scale bar: 5 mm.

7. Conclusions

A new genus and species of the superfamily Penaeoidea *Cretainermis pernambucensis* is described from the upper Aptian–lower Albian rocks of Brazil. In the state of Pernambuco, the new species has been found associated with the sergestid *Paleomattea deliciosa*. The shrimp are preserved in shale and sandstones, both *in situ* and transported. Due to modern

environment of the shrimp found in the shale of Romualdo Formation, in the western portion of the Araripe Basin, they would have been deposited in marine settings. In the sandstone, the environmental conditions cannot be inferred due to the wide distribution current of the identified shrimps. The identification of new species accompanied by stratigraphic information may help to clarify the paleoenvironmental aspects of the different sedimentary facies of Romualdo Formation.

Acknowledgements

To the Brazilian Federal Agency for Support and Evaluation of Graduate Education – CAPES and National Council for Scientific and Technological Development – CNPq (303040/2017-3), for the financial assistance, to the municipalities of Trindade and Ipubi, Pernambuco, for partnership, to Sr. Juanar Rodrigues who collected the specimen *Cretainermis pernambucensis*, to Dr. Javier Luque for the valuable comments, and to members of the Palaeontology Laboratory of the Federal University of Pernambuco (UFPE) for field assistance. We also thank to Carrie Schweitzer and an anonymous reviewer for their careful reading of our manuscript and their insightful comments and suggestions.

References

- Agassiz, L., 1841. On the fossil found by Mr. Gardner in the province of Ceará, in the north of Brazil. *Edinburgh New Philosophical Journal* 30, 82–84.
- Alencar, R.B., Pinheiro, A.P., Saraiva, A.A.F., Oliveira, G.R., Santana, W.A., 2018. New genus and species of Solenoceridae (Crustacea, Decapoda, Dendrobranchiata) from the Cretaceous (Aptian/Albian) of the Araripe Sedimentary Basin, Brazil. *Zootaxa* 4527 (4), 494–500.
- Allison, P.A., 1988. The role of anoxia in the decay and mineralization of proteinaceous macro-fossils. *Paleobiology* 14 (2), 139–154.
- Assine, M.L., 1992. Análise estratigráfica da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências* 22 (3), 289–300.
- Assine, L.M., 2007. Bacia do Araripe. *Boletim de Geociências da Petrobras* 15 (2), 371–389.
- Assine, L.M., Perinotto, J.A.J., Custódio, M.A., Neumann, V.H., Varejão, F.G., Mescolotti, P.C., 2014. Sequências deposicionais do Andar Alagoas da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. *Boletim de Geociências da Petrobras* 22, 3–28.
- Bate, C.S., 1888. Report on the Crustacea Macrura Collected by the H.M.S Challenger During the Years 1873–76. Report on the Scientific Results of the Voyage of H.M.S. Challenger during the years 1873–76, 24: i-xc + 1-942, plates 1-150 in separate volume.
- Beurlen, K., 1963. Geologia e estratigrafia da Chapada do Araripe. In: 17º Congresso Nacional de Geologia, Recife, Anais, 47 p.
- Beurlen, K., 1964. As espécies dos Cassiopinae, nova subfamília dos Turritellidae, no Cretáceo do Brasil. *Arquivos de Geologia-UFPE* 5, 1–44.
- Bishop, G.A., Williams, A.B., 2005. Taphonomy and preservation of burrowing thalassinidean shrimps. *Proceedings of the Biological Society of Washington* 118 (1), 218–236.
- Bondiolli, J.G., Matos, S.A., Fürsich, F.T., Custódio, M.A., Assine, M.L., Warren, L.V., Simões, M.G., 2017. Shrimp biostratigraphy (Crustacea, Decapoda) upper Aptian Romualdo Formation, Araripe Basin, Brazil, and their paleoecologic significance. In: 25º Congresso Brasileiro de Paleontologia, Ribeirão Preto, Resumos, 47, Paleontologia em Destaque, Sociedade Brasileira de Paleontologia, Ribeirão Preto-SP.
- Bruno, A.P., Hessel, M.P., 2006. Registros paleontológicos do Cretáceo marinho na Bacia do Araripe. *Estudos Geológicos* 16 (1), 30–49.
- Burkenroad, M.D., 1963. The evolution of the Eucarida (Crustacea, Eumalacostraca) in relation to the fossil record. *Tulane Studies in Geology* 2, 3–16.
- Dana, J.D., 1852. *Conspectus crustaceorum, &c. Conspectus of the Crustacea of the exploring expedition under Capt. C. Wilkes, U.S.N. Macroura*. *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia* 6, 10–28.
- De Haan, W., 1833–1850. Crustacea. In: von Siebold, P.F. (Ed.), *Fauna Japonica sive Descriptio Animalium, quae in Itinere per Japoniam, Jussu et Auspiciis Superiorum, qui Summum in India Batava Imperium Tenent, Suspecto, Annis 1823–1830 Collegit, Notis, Observationibus et Adumbrationibus Illustravit*. i–xxxix, ix–xvi, 1–243, Plates A–J, L–Q, pp. 1–55. *Lugduni-Batavorum*.
- Figueiredo, F.J., Gallo, V., 2004. A new teleost fish from the Early Cretaceous of Northeastern Brazil. *Boletim do Museu Nacional, Nova Série, Geologia* 73, 1–23.
- Fleming, J., 1822. The Philosophy of Zoology: or a General View of the Structure, Functions and Classification of Animals. *Edinburgh* 2, pp. 1–618.
- Garassino, A., 1994. The macruran decapod crustaceans of the Upper Cretaceous of Lebanon. *Paleontologia Lombarda (nuova serie)* 3, 3–27.
- Jordan, D.S., 1919. New genera of fossil fishes from Brazil. *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia* 71, 208–210.
- Jordan, D.S., Branner, J.C., 1908. The Cretaceous fishes of Ceará, Brazil. *Smithsonian Miscellaneous Collections* 52, 1–29.
- Kidwell, S.M., Bosence, D.W., 1991. Taphonomy and time-averaging of marine shelly faunas. In: Allison, P.A., Briggs, D.E.G. (Eds.), *Taphonomy: releasing the data locked in the fossil record*. Plenum Press, New York, pp. 115–209.
- Kidwell, S.M., Holland, S.M., 1991. Field description of coarse bioclastic fabrics. *Palaaios* 6, 426–434.
- Kidwell, S.M., Fürsich, F.T., Aigner, T., 1986. Conceptual framework for the analysis and classification of fossil associations. *Palaaios* 1, 228–238.
- Latreille, P.A., 1802. Histoire naturelle, générale et particulière des Crustacés et des Insectes. Ouvrage faisant suite à l'histoire naturelle générale et particulière, composée par Leclerc de Buffon, et rédigée par C.S. Sonnini, membre de plusieurs Sociétés savantes. Dufart, Paris 3, 476.
- Lima, F.J., Saraiva, A.A.F., Sayão, J.M., 2012. Revisão da paleoflora das Formações Missão Velha, Crato e Romualdo, Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. *Estudos Geológicos* 22 (1), 99–115.
- Mabessone, J.M., Tinoco, L.M., 1973. Paleogeology of the Aptian Santana Formation (Northeastern Brazil). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 14, 97–118.
- Maisey, J.G., 1991. Santana Fossil an Illustrated Atlas. *Tropical Fish Hobbyist Publications* 459.
- Maisey, J.G., Carvalho, G.P., 1995. First records of fossil sergestid decapods and fossil brachyuran crab larvae (Arthropoda, Crustacea), with remarks on some supposed palaemonid fossils, from the Santana Formation (Aptian-Albian, NE Brazil). *American Museum Novitates* 3132, 1–17.
- 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 biochronostratigraphic utility of its palaeobiota. *Cretaceous Research* 20, 1–26.
- Martins-Neto, R.G., 1987. Primeiro registro de decápode na Formação Santana, Bacia do Araripe (Cretáceo Inferior), Brasil. *Ciência e Cultura* 39 (4), 406–410.
- Martins-Neto, R.G., Mezzalana, S., 1991. Descrição de novos crustáceos (Caridea) da Formação Santana Cretáceo Inferior do Nordeste do Brasil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 63, 155–160.
- Matos, S.A., Pretto, F.A., Simões, M.G., 2013. Tafonomia dos Pygocephalomorpha (Crustacea, Peracarida, Malacostraca), Permiano, Bacia do Paraná, Brasil, e seu significado paleoambiental. *Revista Brasileira de Paleontologia* 16 (1), 97–114.
- Ortmann, A., 1898. Gliederfüssler: Arthropoda. In: *Bronn's Klassen und Ordnungen des Tierreichs*. Crustacea, Malacostraca – [Systematik], vol. 5, pp. 1057–1168, 2.
- Paterson, J.R., Jago, J.B., Brock, G.A., Gehling, J.G., 2007. Taphonomy and palaeoecology of the emuellid trilobite *Balcoracania Dailyi* (early Cambrian, South Australia). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 249, 302–321.
- Pérez Farfante, I., Kensley, B., 1997. Penaeoid and sergestoid shrimps and prawns of the world. Keys and diagnoses for the families and genera. *Memoires du Museum National d'Histoire Naturelle* 175, 1–233.
- Pinheiro, A.P., Saraiva, A.A.F., 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 (2), 663–670.
- Pinheiro, A.P., Alencar, D.R., Sayão, J.M., Santiago, A.C., 2016. Primeiro registro fossilífero de Solenoceridae Wood-Mason, 1981 (Decapoda: Penaeoidea) para bacias sedimentares do Brasil. In: 14º Congresso Brasileiro sobre Crustáceos, Crato, Resumos, 293. Sociedade Brasileira de Carcinologia, Crato-CE.
- Plotnick, R.E., 1986. Taphonomy of a modern shrimp: implications for the arthropod fossil record. *Palaaios* 1 (3), 286–293.
- 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, Araripe, Pernambuco, Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências* 39, 77–87.
- Prado, L.A.C., Luque, J., Barreto, A.M.F., Palmer, R., 2018. New orithopsid crabs from the Aptian–Albian Romualdo Formation, Santana Group of Brazil: evidence for a tethyan connection to the Araripe Basin. *Acta Palaeontologica Polonica* 63 (4), 737–750.
- Rafinesque, C.S., 1815. *Analyse de la Nature ou Tableau de l'univers et des corps organisés*. Palermo (self-published?) 224 pp.
- 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 (Unpubl. PhD thesis). Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 160.
- Santana, W., Pinheiro, A.P., Silva, C.M.R., Saraiva, A.A.F., 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, R.S., 1971. Nouveau Genre et Espèce d'Elopidae du Bassin Sedimentaire de la Chapada do Araripe, Brésil. *Anais da Academia brasileira de Ciências* 43 (2), 439–442.
- Saraiva, A.A.F., Pralon, B.G.N., Gregati, R.A., 2009. Taxonomic remarks on Brazilian Cretaceous Decapoda from Araripe Basin, Brazil, and ecological inferences. *Gaea* 5, 70–74.
- Saraiva, A.A.F., Pinheiro, A.P., Santana, W., 2018. A remarkable new genus and species of the planktonic shrimp family Luciferidae (Crustacea, Decapoda) from the Cretaceous (Aptian/Albian) of the Araripe Sedimentary Basin, Brazil. *Journal of Paleontology* 92 (3), 1–7.
- Tavares, C., Martin, J., 2010. Suborder Dendrobranchiata Bate, 1888. In: *Scram, Fr. et al. (Eds.), Treatise on Zoology–Anatomy, Taxonomy, Biology – The Crustacea, Decapoda, Volume 9, Part A, Eucarida: Euphausiacea, Amphionidacea, and Decapoda (partim)*. Koninklijke Brill NV, Leiden, The Netherlands, pp. 99–164.
- Viana, M.S.S., Agostinho, S.M., 1995. Camarões do Membro Romualdo da Formação Santana (Cretáceo Inferior da Bacia do Araripe). In: 26º Simpósio de Geologia do

Nordeste Sociedade Brasileira Geologia, Núcleo Nordeste, Recife, Boletim, pp. 239–243.

Wood-Mason, J., Alcock, A., 1891. Natural History Notes from H.M. Indian Marine Survey Steamer 'Investigator', Commander R.F. Hoskyn, R.N., commanding. Series II, No. 1. On the results of deep-sea dredging during the season 1890-1891. Ann. Mag. Nat. Hist. VIII. Sixth series(XLVI) 26–286.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2019.02.023>.

Tafonomia das coquinas da Formação Romualdo, Bacia do Araripe, e ingressão marinha: novos sítios e estágio atual do conhecimento

Ludmila Alves Cadeira do Prado ^{1*}, Rodrigo S. Horodyski ², Alcina Magnólia Franca Barreto¹

¹ Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Geologia, 1235, 50740-533, Recife, PE, Brasil.

² Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Av. Unisinos, 950, Cristo Rei, 93022-000 São Leopoldo, RS, Brasil.

Resumo

As principais informações estratigráficas, tafonômicas e taxonômicas das coquinas da Formação Romualdo, Aptiano-Albiano da Bacia do Araripe, disponíveis na literatura, além da descrição de novas coquinas, são aqui apresentadas a fim de contribuir com a interpretação paleoambiental da ingressão marinha no Araripe. As coquinas ocorrem nos três estados que compõem a Bacia do Araripe (Ceará, Pernambuco e Piauí) apresentando considerável diversidade bentônica (i.e. moluscos gastrópodes e bivalvíos, caranguejos braquiúros e equinóides irregulares). São encontradas em rochas calcárias/calcareníicas, intercaladas a camadas de siltito/argilito por vezes com presença de concreções calcárias com organismos nectônicos e continentais. Quanto a gênese das coquinas, elas seriam formadas por eventos de tempestades em um ambiente marinho plataformaraso, sendo classificadas como resíduos transgressivos, tempestitos distais e proximais, e concentrações primariamente biogênicas. É comum haver mais de uma gênese de concentrações e vários níveis de coquinas em um mesmo afloramento. Essas diferenças estariam relacionadas ao aumento de energia e variação de lâmina d'água na bacia ao longo do tempo, relacionadas por sua vez a breves pulsos transgressivos responsáveis pela colonização de organismos tipicamente marinhos no ambiente. Nos novos afloramentos dos estados Pernambuco e Piauí, as coquinas representam biocenoses que sofreram erosão e transporte para áreas proximais da plataforma, a partir de fluxos de tempestades (tempestitos proximais). Em alguns casos, o substrato coquinoide foi posteriormente colonizado por organismos epifaunais, sendo soterrados abruptamente, ou bioerodido e bioturbado, sugerindo uma associação com ampla mistura temporal.

Introdução

Como resultado da elevação global do nível do mar durante o Aptiano superior (Vail et al., 1977), uma transgressão marinha atingiu o Nordeste do Brasil, ficando registrada nas rochas da Formação Romualdo da Bacia do Araripe. A principal evidência de sedimentação sob condições marinhas é a presença de equinoides regulares, estando esses associados a moluscos gastrópodes e bivalvíos, e caranguejos braquiúros na forma de coquinas. Aparentemente, os elementos francamente marinhos estariam sobretudo na porção oeste da bacia, dado o registro mais completo de equinoides da bacia no estado de Pernambuco, e sua ocorrência restrita a essa área (Beurlen, 1963, Prado et al., 2018a).

As coquinas, embora presentes ao longo da Bacia do Araripe, apresentam diferentes biotramas e composição faunística, refletindo as diferentes características abióticas do paleoambiente. Baseado em análises tafonômicas, as coquinas do Araripe teriam se formado a partir de eventos tempestísticos em diferentes profundidades (Sales, 2005, Prado et al., 2016).

Com intuito de colaborar com a interpretação da ingressão marinha no Araripe, descrevemos aqui três novos afloramentos com invertebrados da porção oeste da Bacia do Araripe com detalhamento da fauna e das assinaturas tafonômicas, e apresentamos um modelo para geração das coquinas no Araripe.

Geologia da Bacia do Araripe

A Bacia do Araripe localiza-se entre os limites dos estados de Pernambuco, Piauí e Ceará, tendo origem relacionada ao processo de fragmentação do supercontinente Gondwana durante o Cretáceo Inferior (Matos, 1992). É formada principalmente por estratos lacustres e fluviais mesozoicos, agrupados nas sequências Pré-rifte, Rifte e Pós-rifte I e II (Assine 2007, Marques et al., 2014) (Fig. 1).

A Formação Romualdo (Pós-rifte I) é formada quase que exclusivamente por folhelhos, intercalados por camadas de calcário/arenito calcífero e arenito (Beurlen, 1971; Assine, 2007). Os fósseis ocorrem tanto nos famosos nódulos calcários quanto nos folhelhos que os envolvem, tais como peixes, répteis, plantas, crustáceos, dinoflagelados e foraminíferos (Mabessone e Tinoco 1973, Lima 1978, Arai e Coimbra 1990, Berthou et al., 1990, Bruno e Hessel 2006, Arai, 2014). Os macroinvertebrados (i.e. moluscos, equinoides e caranguejos), por sua vez, ocorrem em camadas de calcário/arenito calcífero (Beurlen, 1966; Sales, 2005; Pereira et al., 2016; Prado et al., 2018a, b). Segundo Custódio et al. (2017) a ingressão marinha na Bacia do

Araripe, na porção leste da bacia, seria representada pelo intervalo dos folhelhos negros com concreções carbonáticas (zona de inundação máxima) e os calcários dominados por macroinvertebrados (trato de sistemas de mar alto).

Material e Métodos

As coquinas foram coletas na Ladeira do Berlenga, município de Caldeirão Grande, estado do Piauí, na Mineradora Serrolândia, município de Ouricuri, e Sítio Santo Antônio, município de Exu, ambos no estado de Pernambuco. Os afloramentos são formados por argilitos/folhelhos com concreções calcárias, intercalados por camadas de calcarenito ou arenito calcífero, que abrigam os macroinvertebrados (Fig. 2).

Cerca de 20 blocos foram coletados, sendo analisados aproximadamente 120 bioclastos (maiores que 2 mm) em cada camada fossilífera, a fim de interpretar a gênese da deposição dos bioclastos. Apenas as feições macroscópicas foram observadas, dentre elas: grau de empacotamento dos bioclastos, seleção em 4 classes de tamanho (I, 2.0–3.9; II, 4.0–7.9; III, 8.0–15.9; IV, 16.0–31.9; V, 32.0–63.9 mm), orientação, articulação, fragmentação e volume dos bioclastos no depósito, presença de bierosão, corrosão, incrustação e abrasão (Kidwell et al., 1986; Kidwell e Bosence, 1991; Kidwell e Holland, 1991). Para contribuir com as inferências paleoambientais da Formação Romualdo buscou-se identificar a fauna de invertebrados no menor nível taxonômico possível.

Assim como nos trabalhos anteriores que versavam sobre a tafonomia das coquinas do Araripe, utilizou-se a classificação genética de Fursich e Oschmann (1993), que se baseia principalmente na biotrama e assinaturas bioestratinômicas dos invertebrados depositados ao longo do gradiente de águas rasas e profundas.

Todas as informações relativas a tafonomia das coquinas do Araripe disponíveis na literatura foram reunidas. As feições bioestratinômicas, classificação genética, distribuição estratigráfica e espacial também foram discutidos.

Novos afloramentos fossilíferos

Na Ladeira do Berlenga há fósseis de invertebrados na maioria das camadas de arenito calcífero. Contudo, apenas em duas delas há formação de coquinas, (LB01-LB02) (Figs. 2 e 3). O empacotamento varia de disperso a frouxo. Os bioclastos encontram-se mal selecionados e distribuídos caoticamente em planta e seção, contudo, aqueles concordante ao acamamento predominam. Os gastrópodes representam a maioria da assembleia fóssil, prevalecendo aqueles

fragmentados. Dentre eles, foram reconhecidas as famílias Cassiopidae, Cerithidae, Naticidae. Apenas na camada LB02 há bivalvíos, representados pelas famílias Mytilidae (*Brachidontes araripensis*) e Bakevelliidae (*Aguileria dissita*), estes desarticulados ou fragmentados (Tabela 1).

Na Mineradora Serrolândia, há apenas uma camada coquinoide (SE01) formada principalmente pelo molde interno dos gastrópodes (Figs. 2 e 4). Essa assembleia fóssil exibe bioclastos pobremente selecionados, caoticamente distribuídos, empacotamento frouxo, e fósseis em sua maioria fragmentados. Os gastrópodes identificados pertencem a família Cassiopidae. Os poucos bivalvíos encontrados, estão desarticulados e em condições de preservação que impedem a sua identificação (Tabela 1).

No sítio Santo Antônio as cinco camadas coquinoide (SA01-SA05) (Figs. 2 e 4) são suportadas por bioclastos com empacotamento que varia de denso/frouxo a denso, pobremente selecionadas, e caoticamente distribuídos. Nelas predominam os bivalvíos, em sua maioria fragmentados. Porém, a presença de valvas desarticuladas, formando por vezes aninhamento, e articuladas fechadas é comum. Uma exceção é o topo da SA01, onde há muitos *Brachidontes araripensis* em posição de vida e recobertos por finos. Gastrópodes estão fragmentados ou inteiros. Carapaças de caranguejos são encontradas em SA01 e SA02, estes desarticuladas ou fragmentadas. No topo da SA02 há icnofósseis (anelidae?), bioerosão e bioturbação. Foram identificados os gastrópodes da família Naticidae, Cassiopidae e Cerithidae, os bivalvíos das famílias Corbulidae e Bakevelliidae (*Aguileria dissita*), e os caranguejos braquiúros da família Orithopsidae (*Exucarcinus gonzagai*) (Tabela 1).

Discussão

As coquinas apresentam sinais de retrabalhamento por tempestades proximais, tais como distribuição caótica, aninhamento de bivalvíos, valvas com a convexidade voltada para cima ou para baixo, mistura de bioclastos bem preservados e fragmentados e base erosiva das camadas fossilíferas (Fig.4, Fürsich e Oschmann, 1993; Simões et al., 1996). A fragmentação aparece elevada em todas as assembleias, geralmente apresentando fósseis com bordas angulares, devido provavelmente a fratura mecânica causada pelo transporte e/ou organismos bioturbadores, já que são encontrados caranguejos raninoidas, que assim como os atuais, poderiam viver enterrados (Van Bakel et al., 2012). Esses eventos tempestíticos transportariam os fósseis mas não teriam energia suficiente para causar abrasão e nem selecioná-los por tamanho e densidade.

O substrato duro formado pelo acúmulo denso de conchas transportadas propiciou a colonização pelos numerosos bivalvíos da espécie *Brachidontes araripensis* na camada SA01 (Fig. 4) num processo reconhecido como *allogenic taphonomic feedback* (sensu Kidwell e Jablonski, 1983). O gênero *Brachidontes* é representado por organismos epifaunais fixados por bissus com tolerância a variações de temperatura e de salinidade, e tendem a viver em grupo (Terra Nova et al., 2007; Rovere et al., 2015). Estes organismos preservados *in situ*, teriam sido soterrados abruptamente por aumento de sedimentação de finos, sendo considerados aqui parte de uma concentração primariamente biogênica.

Pereira et al. (2017), com base na fauna de moluscos, sugeriu uma sedimentação lagunar para a assembleia fóssil de Serrolândia, Santo Antônio e Ladeira do Berlenga. Contudo, os caranguejos raninoida, por vezes presentes em Santo Antônio, são exclusivos de ambiente marinho raso. Logo, considera-se para essas camadas, além de uma mistura temporal, uma mistura espacial de faunas de ambientes marinhos e lagunares. Adicionalmente, as conchas na camada SA02 teriam sido expostas à bioturbação e bioerosão na interface água sedimento antes do soterramento final em condições de baixa taxa de sedimentação (Fig.4, Aller, 1982, Davies et al., 1989).

As coquinas da Formação Romualdo (PE, PI e CE)

Entende-se que as coquinas representam a fase rasa do paleoambiente da Formação Romualdo, por serem formadas exclusivamente por organismos bentônicos (Tabela 2), ocupando ambiente ora marinho ora transicional. Pereira et al. (2017), com base na fauna de invertebrados, identificaram paleoambientes lagunares, estuarinos e marinhos ao longo de toda extensão da Bacia do Araripe. É importante frisar que organismos tipicamente marinhos são restritos às coquinas, principalmente na porção oeste da bacia (Beurlen, 1966, Sales, 2005, Pereira et al., 2017, Prado et al., 2018a), e não nos folhelhos com ictiólitos, interpretados como a superfície de inundação máxima na bacia por Custódio et al. (2017).

As coquinas se encontram geralmente em cotas altimétricas de 615 a 777 m, sendo intercaladas a camadas de siltito/argilito, por vezes com a presença de concreções calcárias com organismos nectônicos e continentais (e.g. peixes e plantas) (Fig. 2). As coquinas apresentam diferentes biotramas e assinaturas tafonômicas, por sua vez, relacionadas aos processos responsáveis pela sua gênese (Fursich e Oschmann, 1993, Kidwell et al., 1986; Kidwell e Holland, 1991). Interpretações tafonômicas sugerem que as coquinas foram depositadas a partir de tempestades, sendo responsáveis pela erosão e redeposição dos organismos em diferentes

profundidades. Na tabela 2 são apresentadas as características tafonômicas gerais das coquinas do Araripe, de acordo com a sua classificação genética, bem como a sua fauna e localização geográfica.

Segundo Fursich e Oschmann (1993) os tempestitos são caracterizados principalmente por uma biotrama indicativa de transporte. Os tempestitos distais diferem dos proximais principalmente por serem menos espesso e apresentarem um discreto aumento na seleção dos bioclastos (Fig. 4). Esses últimos têm distribuição presumida abaixo do nível de base de ondas de tempestades, enquanto os primeiros ocorrem geralmente entre o nível de base de ondas de tempo bom e tempestades. As concentrações primariamente biogênicas dependem da alta produtividade orgânica, sendo geralmente preservadas a partir de súbitos eventos de soterramento induzidos por tempestades (Fig. 4). Na Formação Romualdo as coquinas classificadas como primariamente biogênicas tem distribuição presumida abaixo do nível de base de ondas de tempestades, devido ao denso aporte de finos só possível abaixo do nível de base de tempestades, ou logo acima dela, devido ao súbito soterramento de organismos por sedimentos arenosos e estruturas sedimentares relacionadas a tempestades geralmente preservadas nessas áreas (e.g. estratificação cruzada *hummocky*) (Sales, 2005; Prado et al., 2018a; Walker e Plint, 1992; James e Dalrymple, 2010). Os resíduos transgressivos têm ocorrência mais ampla, desde o nível de base de ondas de tempo bom abaixo do nível de base de ondas de tempestades. Devido a longa exposição dos bioclastos na interface água sedimento e múltiplos retrabalhamentos causados principalmente por tempestades e correntes, são caracterizados por fósseis em distintos estágios bioestratinômicos (Fig. 4). Ou seja, quanto a profundidade, os tempestitos proximais representariam áreas mais rasas, e as concentrações primariamente biogênicas e tempestitos distais representariam no Araripe ambientes mais profundos, mas ainda sim plataformais.

As coquinas ocorrem em todos os estados que englobam a Bacia do Araripe e repetidamente nos perfis geológicos. Na maioria das seções observa-se mais de uma gênese de concentrações e várias camadas (níveis) de coquinas (Figs. 1 e 2), associadas ao aumento de energia e variação de lamina d'água na bacia; breves pulsos transgressivos seriam os responsáveis pela colonização de organismos tipicamente marinhos no ambiente.

Conclusão

As coquinas da Formação Romualdo são formadas predominantemente por moluscos gastrópodes e bivalvíos, por vezes, com a presença de equinoides irregulares e caranguejos

braquiúros. Breves pulsos transgressivos seriam os responsáveis pela colonização desses organismos tipicamente marinhos no ambiente. A sedimentação teria ocorrido em ambientes marinhos plataformais rasos sob a influência de tempestades em diferentes profundidades, gerando resíduos transgressivos, tempestitos distais e proximais e concentrações primariamente biogênicas.

As novas tafocenoses da Formação Romualdo nos estados de Pernambuco e Piauí, como era de se esperar, são formadas por moluscos e caranguejos, depositados a partir de eventos tempestíticos. Nessas áreas, as biocenoses eram atingidas por fluxos de tempestades sendo transportada para áreas proximais. Em baixas taxas de sedimentação, o substrato coquinoide era utilizado por organismos epifaunais que colonizavam o novo ambiente, ou era bioerodido e bioturbado, sugerindo uma associação com ampla mistura temporal.

Referências

- Aller, R.C. 1982. Carbonate dissolution in nearshore terrigenous muds: the role of physical and biological reworking. *Journal of Geology* 90, 79-95.
- Arai, M. 2014. Aptian/Albian (Early Cretaceous) paleogeography of the South Atlantic: a paleontological perspective. *Brazilian Journal of Geology* 44(2), 339-350.
- 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 Sobre a Bacia do Araripe e Bacias Interiores do Nordeste, Crato, Atas, p. 226-233.
- Assine, M.L. 2007. Bacia do Araripe. *Boletim de Geociências da Petrobrás* 15(2), 371-389.
- Batista, M.E.P., Sales, A.M.F., Pinheiro, A.P., Barros, O.A. 2015. Tafonomia de moluscos do sítio Barreiros, município de Moreilandia, PE, Bacia do Araripe. *Estudos Geológicos* 25,53-60.
- Berthou, P.Y., Viana, M.V., Campos, D.A. 1990. Coupe de la Formation Santana dans Le secteur de "Pedra Branca" (Santana do Cariri) (Bassin D' Araripe, NE du Brésil). Contribution a l' étude de La sedimentologie et des paleoenvironnements. In: 1º Simpósio Sobre a Bacia do Araripe e Bacias Interiores do Nordeste, Crato, Atas, p. 173- 1991
- Beurlen, K. 1966. Novos Equinóides no Cretáceo do Nordeste do Brasil. *Anais Academia Brasileira de Ciências* 38,455-464.

- Beurlen, K. 1971. As condições ecológicas e faciológicas da Formação Santana na Chapada do Araripe (Nordeste do Brasil). *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 43, 411-415.
- Bruno, A.P., Hessel, M.P. 2006. Registros paleontológicos do Cretáceo marinho na Bacia do Araripe. *Estudos Geológicos* 16(1), 30-49.
- Custódio, M.A., Quaglio, F., Warren, L.V., Simões, M.G., Fürsich, F.T., J. Perinotto, J.A., Assine, M.A. 2017. The transgressive-regressive cycle of the Romualdo Formation (Araripe Basin): Sedimentary archive of the Early Cretaceous marine ingression in the interior of Northeast Brazil. *Sedimentary Geology*, 35:1-15.
- Davies, D.J., Powell, E.N., Stanton, R.J. 1989. Relative rates of shell dissolution and net sediment accumulation –a commentary: Can shell beds form by the gradual accumulation of biogenic debris on the sea floor?. *Lethaia* 22, 207–12.
- Fürsich, F. T.; Oschmann, W. 1986. Storm shell beds of *Nanogyra virgula* in the Upper Jurassic of France. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie*, 172: 141-161.
- Fürsich, F.T., Oschmann, W. 1993. Shell beds as tools in basin analysis: the Jurassic Kachchh, western India. *Journal of Geological Society* 150(1),169-185.
- James N.P., Dalrymple R.W. 2010. *Facies Models 4*. Canada, Geological Association of Canada, 574 p.
- Kidwell S.M., Bosence D.W. 1991. Taphonomy and time- averaging of marine shelly faunas In: Allison P.A., Briggs D.E.G. (Eds.). *Taphonomy: releasing the data locked in the fossil record*. New York, Plenum Press, p. 115-209.
- Kidwell S.M., Holland S.M. 1991. Field description of coarse bioclastic fabrics. *Palaios*, 6:426-434
- Kidwell, S.M., Fürsich, F.T., Aigner, T. 1986. Conceptual framework for the analysis and classification of fossil concentrations. *Palaios* 1, 228–238.
- Kidwell, S.M., Jablonski, D. 1983. Taphonomic feedback: ecological consequences of shell accumulation. In: Tevesz, M.J.S, McCall, P.L. (Eds.). *Biotic Interactions in Recent and Fossil Benthic Communities*. New York, Plenum Press, pp. 195-248.
- Kidwell, S.M., Jablonski, D. 1983. Taphonomic feedback: ecological consequences of shell accumulation. In: Tevesz, M.J.S, McCall, P.L. (Eds.). *Biotic Interactions in Recent and Fossil Benthic Communities*. New York, Plenum Press, pp. 195-248.

- Lima 1978, Lima, M.R. 1978. Palinologia da Formação Santana (Cretáceo do Nordeste do Brasil). Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 337 p., 27 plates.
- Mabesoone, J.M., Tinoco, I.M. 1973. Paleocology of the Aptian Santana Formation (Northeastern Brazil). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 14:97-118.
- Marques F.O., Nogueira F.C.C., Bezerra F.H.R, Castro D.L. 2014. The Araripe Basin in NE Brazil: An intracontinental graben inverted to a high-standing horst. *Tectonophysics* 630,251-264.
- Matos, R.M.D. 1992. The northeast Brazilian rift system. *Tectonics* 11: 766–791.
- Pereira, P.A. 2016. Moluscos fósseis da Formação Romualdo, Cretáceo Inferior (Aptiano-Albiano), da Bacia do Araripe, NE do Brasil. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 90 p.
- Pereira, P.A., Cassab, R.C.T., Barreto, A.M.F. 2017. Paleocologia e Paleogeografia dos Moluscos e Equinóides da Formação Romualdo, Aptiano–Albiano da Bacia do Araripe, Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências-UFRJ* 40(2), 180-198.
- Prado, L.A.C., Fambrini, G.L., Barreto, A.M.F. 2018a. Taphonomy of macroinvertebrates and Albian marine ingression as recorded by the Romualdo Formation (Cretaceous, Araripe Basin, Brazil). *Brazilian Journal of Geology* 48(3), 519-531.
- Prado, L.A.C., Luque, J., Barreto, A.M.F., Palmer, R. 2018b. New orithopsid crabs from the Aptian–Albian Romualdo Formation, Santana Group of Brazil: evidence for a tethyan connection to the Araripe Basin. *Acta Palaeontologica Polonica* 63(4), 2018: 737-750.
- 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.
- 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(1), 53-64.

Rovere, A., Antonioli, A., Bianchi, C.N. 2015. Fixed biological indicators. In: Ian Shennan, I., Long, A.J., Horton, B.P. (Eds.). *Handbook of Sea-Level Research*. Wiley, American Geophysical Union, 268—280.

Sales 2005, 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. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 160 p.

Simões, M.G., Torello, F.F, Rocha-Campos, A.C. 1996. Gênese e classificação da coquina de Camaquã, Formação Corumbataí (Neopermiano), na Região de Rio Claro, SP. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 68(4), 545-557.

Terranova M., Lo Brutto S., Arculeo M., Mitton J., 2007. A mitochondrial phylogeography of *Brachidontes variabilis* (Bivalvia: Mytilidae) reveals three cryptic species. *Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research* 45, 289-298.

Vail, P.R., Mitchum, R.M.JR., Thompson, S. 1977. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part 4: Global Cycles of Relative Changes of Sea Level. In: Payton, C.E. (ed.). *Seismic Stratigraphy – Applications to hydrocarbon exploration*, p. 83-97.

Van Bakel, B.W.M., Guinot, D., Artal, P., Fraaije, R.H.B., Jagt, J.W.M. 2012. A revision of the Palaeocorystoidea and the phylogeny of raninoidian crabs (Crustacea, Decapoda, Brachyura, Podotremata). *Zootaxa* 3215, 1–216.

Walker R.G., Plint A.G. 1992. Response to sea level change, wave and storm dominated shallow marine systems. In: Walker R.G., James N.P. (Eds.). *Facies Models*. St. John's. Geological Association of Canada, p. 219-238.

Figura 1: Mapa de Localização da Bacia do Araripe com a distribuição das coquinas de acordo com sua classificação genética (Modificado de Assine et al. 2007 e Sales, 2005).

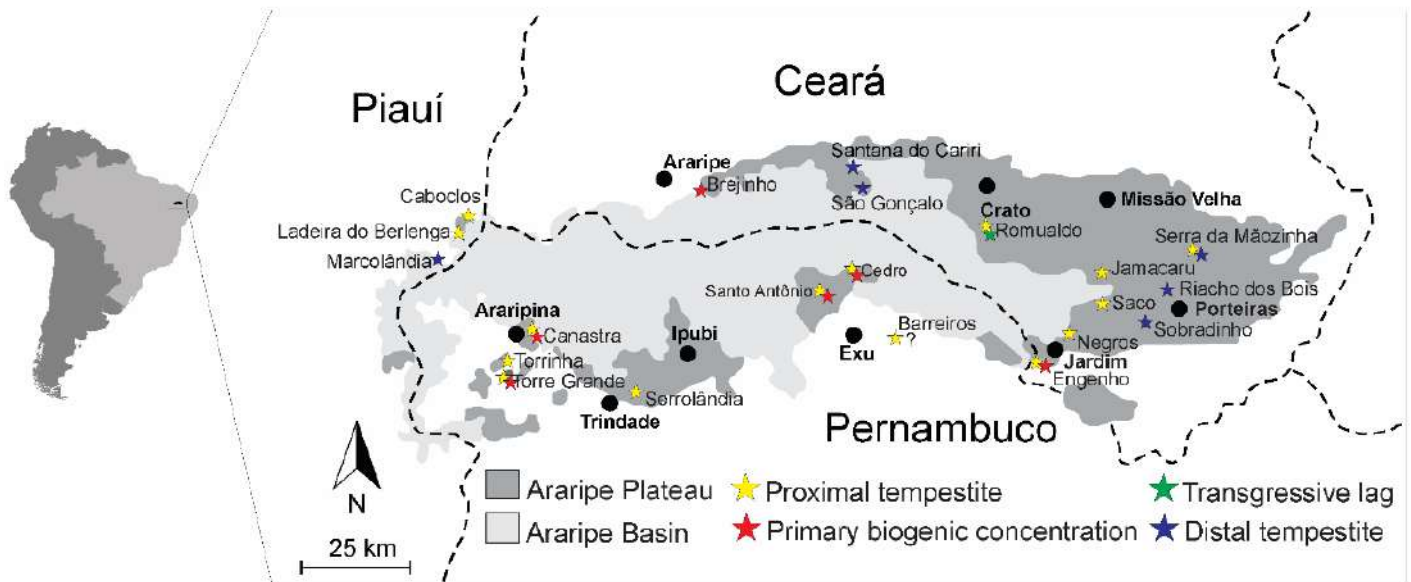


Figura 2. Perfis geológicos da Formação Romualdo com a presença de coquinas nos estados de Pernambuco, Piauí e Ceará. LB01-LB02: Coquinas da Ladeira do Berlenga. SE01: Coquina da Mineradora Serrolândia. SA01-SA05: Coquinas do sítio Santo Antônio. ? Possível classificação genética baseada nas informações disponíveis em Batista et al. 2015. (Adaptado de Sales, 2005; Prado et al., 2014, 2015, 2016, 2018a).

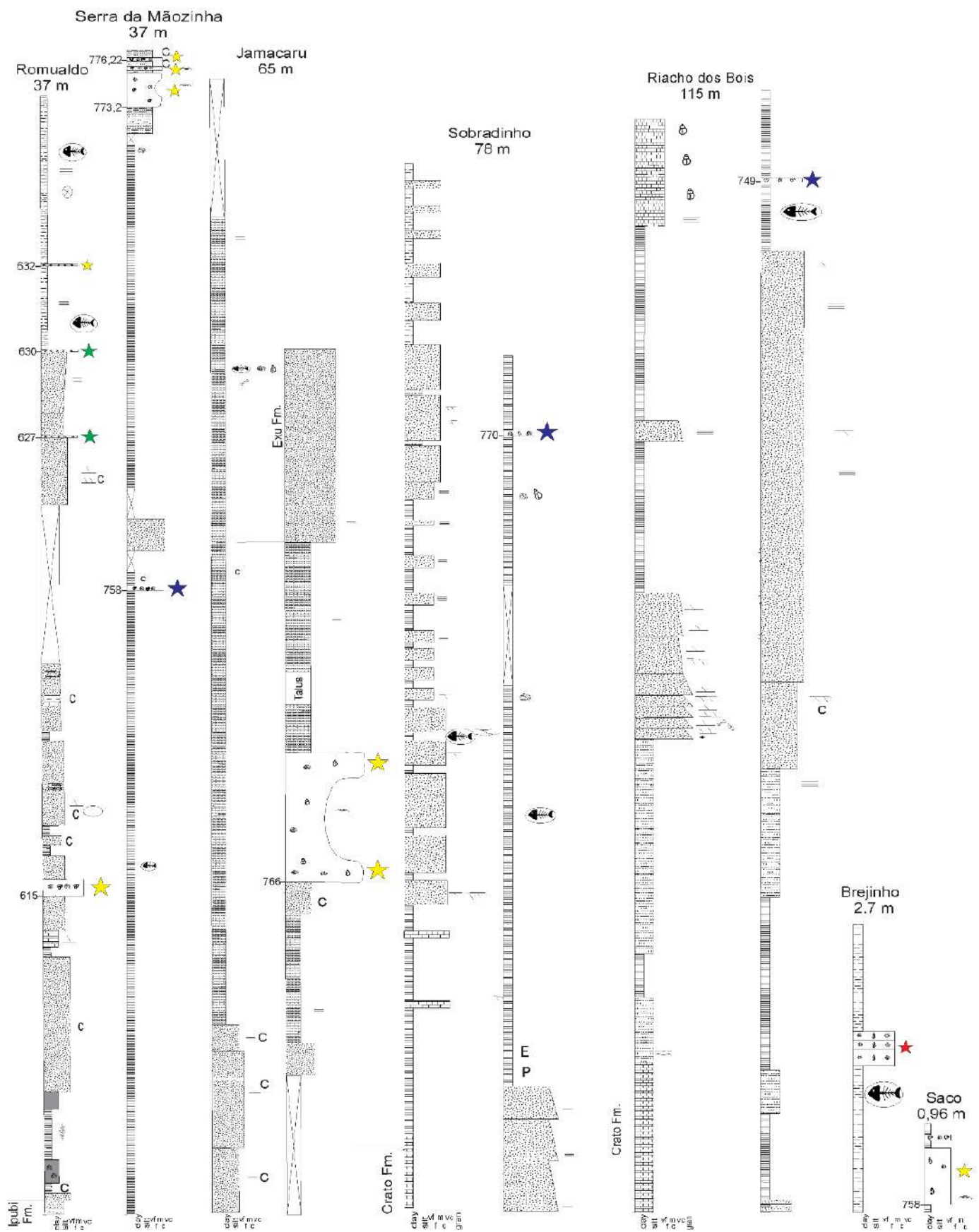


Figura 2. Continuação.

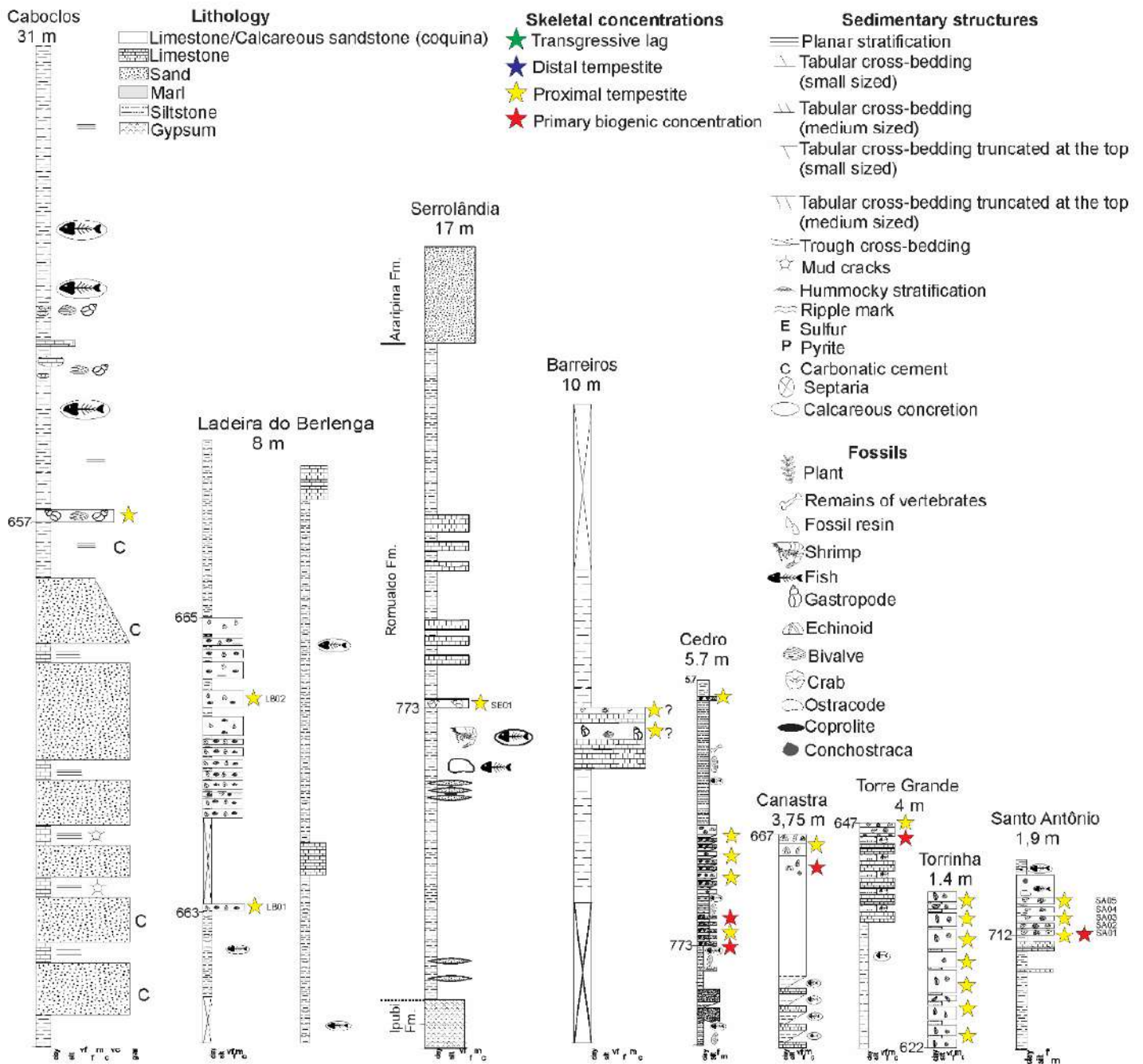


Figura 3: A-E, Coquinas do sítio Santo Antônio; A) SA01; B) SA02; C) SA03; D) SA04; e E) SA05. F) Coquina da mineradora Serrolândia SE01. G-H, Coquinas da Ladeira do Berlenga; G) LB01; H) LB02. Notar o empacotamento denso (A-F) e frouxo (G-H), pobre seleção, fragmentação e distribuição caótica dos bioclastos (A-H), com bivalvíos articulados *in situ* no topo da camada (A) e bioturbação e bioerosão (B).

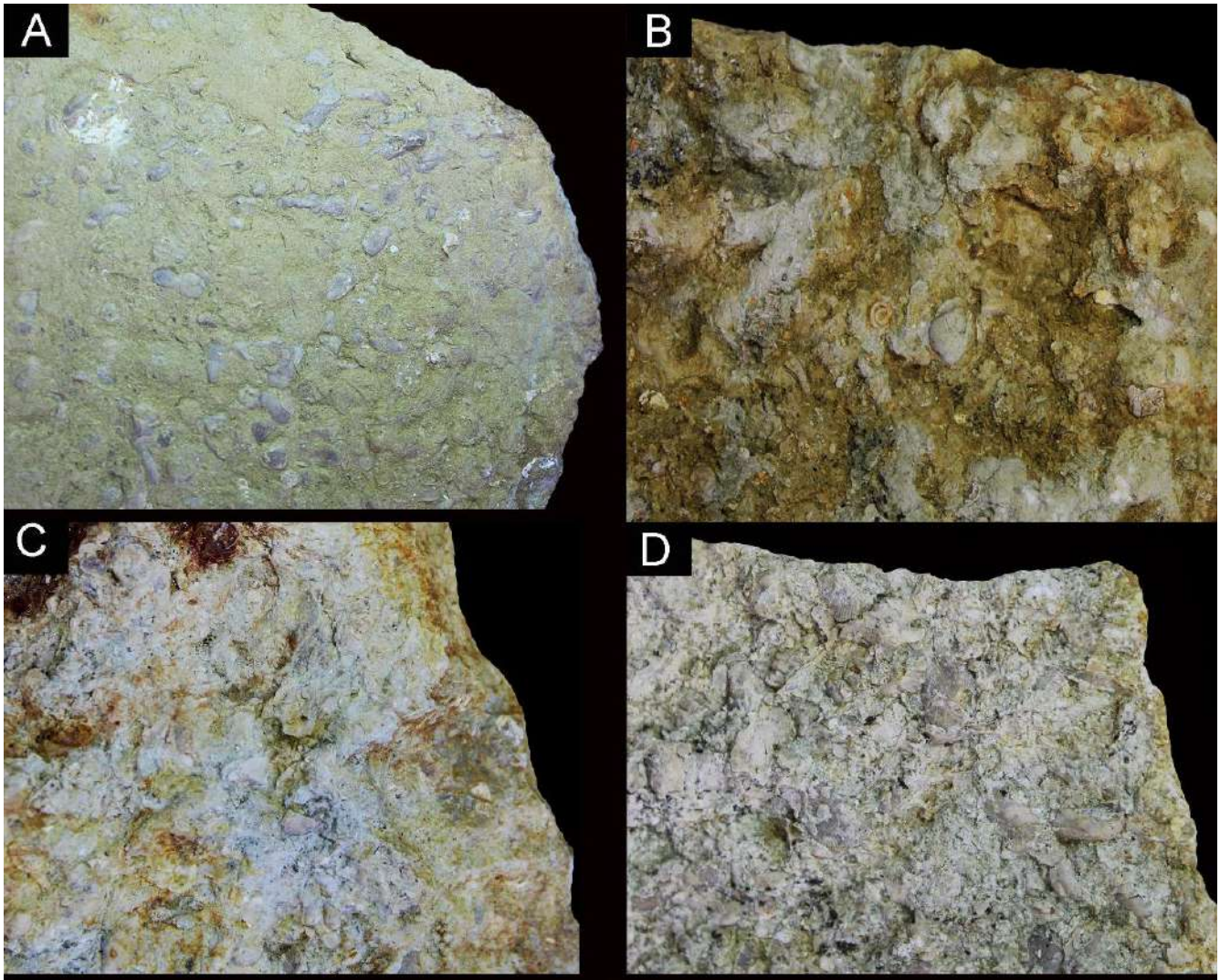


Figura 3. Continuação.

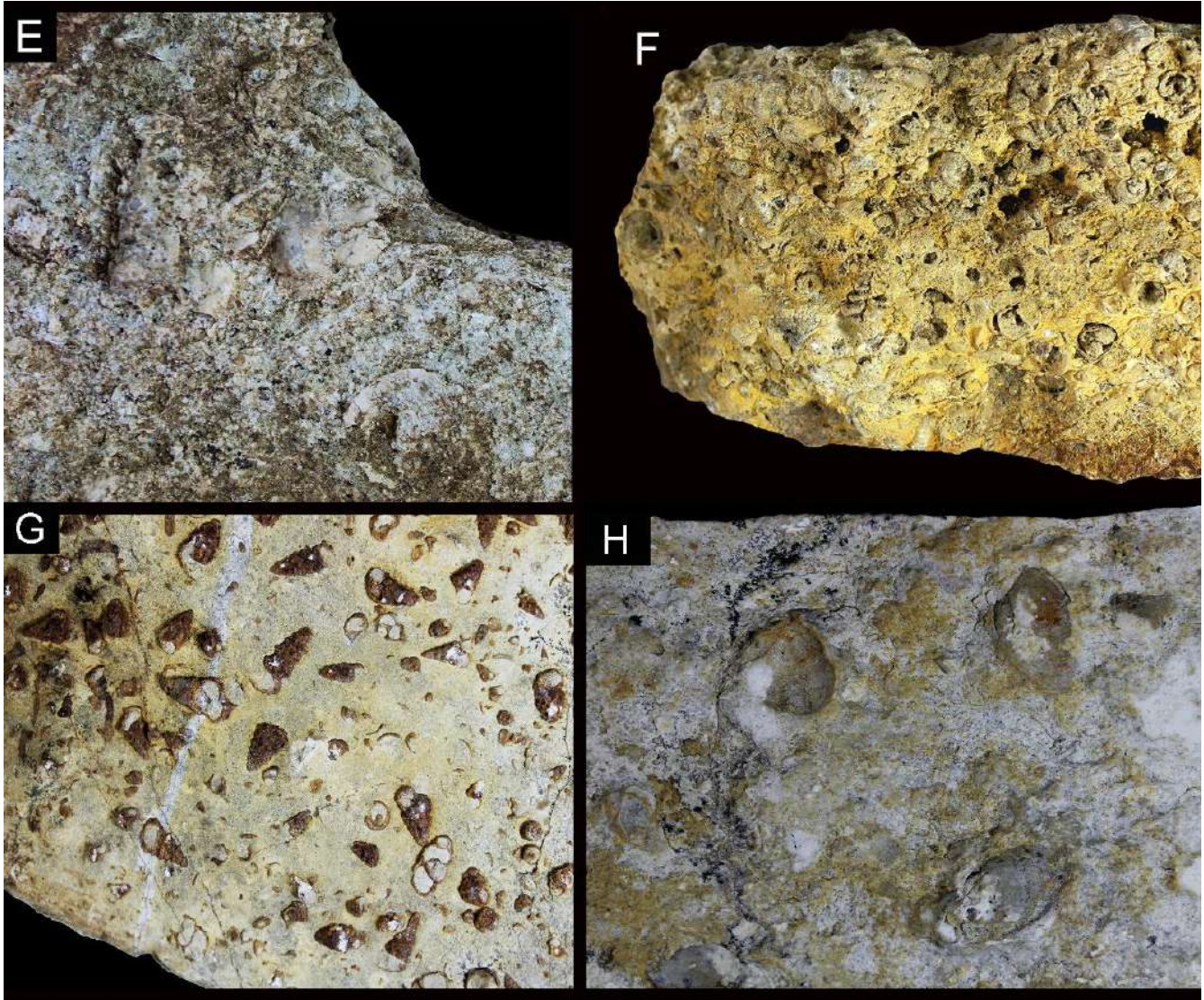


Figura 4: Possíveis caminhos para geração das coquinas da Formação Romualdo. Uma biocenose (1) pode ser soterrada *in situ* (2) ou ser atingida por fluxos de tempestades sendo transportada para áreas proximais (3) ou mais distais (4). Em baixas taxas de sedimentação, os depósitos coquínoides formados podem servir como substrato para fixação de organismos epifaunais (5) ou serem bioerodidos e bioturbados (6). Se houver um tempo de exposição ainda mais longo dos bioclastos no assoalho marinho, pode haver retrabalhamento, amalgamento, e maior taxa de incrustação e biorosão. Como resultado, essas tafocenoses exibem conchas com diferentes assinaturas tafonômicas e alta mistura temporal (6). (Adaptada de Fürsich e Oschmann, 1993).

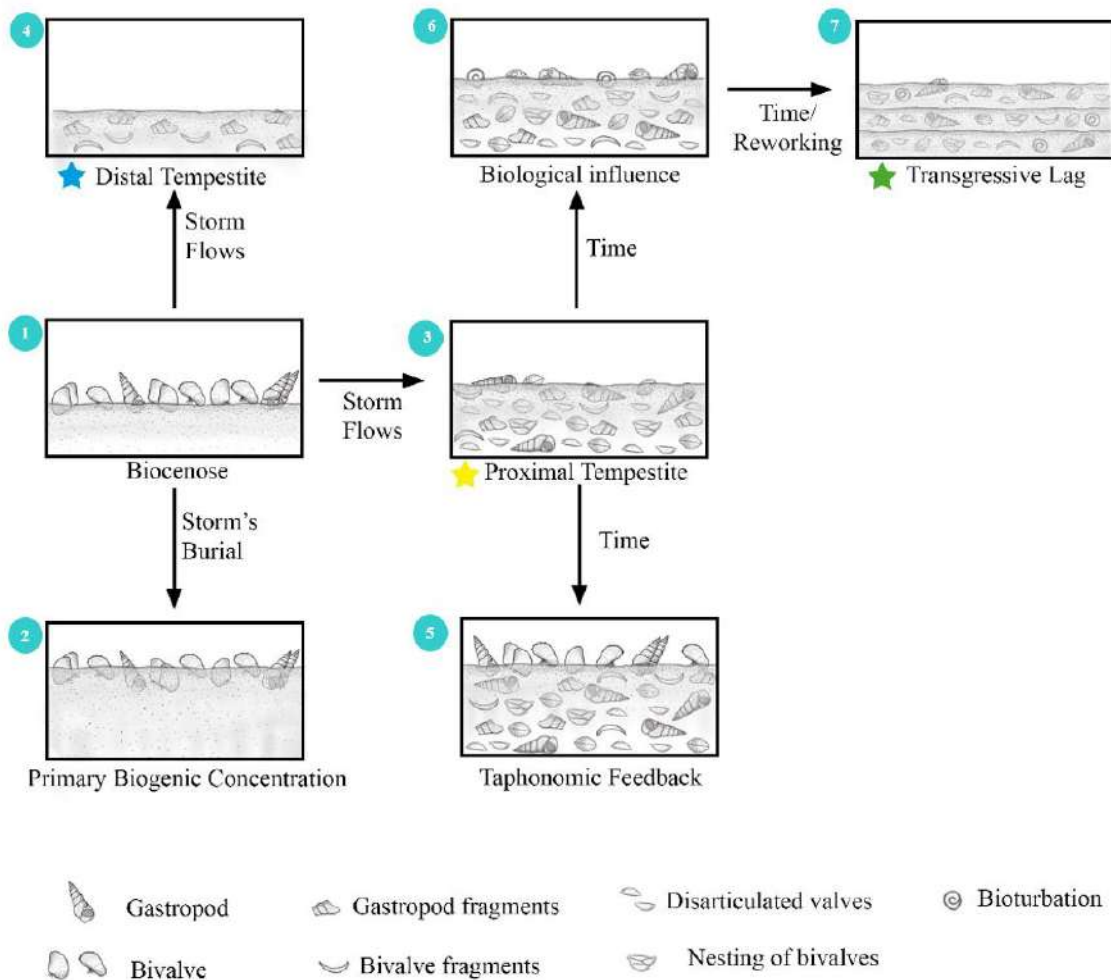


Tabela 1- Feições tafonômicas das coquinas dos sítios Santo Antônio, Serrolândia e Ladeira do Berlenga.

Localidade	Camada	Esp. cm	Biocl. %	Biválvio %			Gastrópode %		Caranguejo %		Classes de tamanho (biocl.) mm	Orientação das conchas em planta	Distribuição das conchas em seção	Diversidade da Fauna	Classificação das coquinas
Santo Antônio	SA01	7	55	Art. fechado	Des.	Frag.	Int.	Frag.	Car. Art.	Frag.	I, II, III	Polimodal	Caótica	<i>Brachidontes</i> sp. Cerithiidae Cassiopidae <i>Exu gonzagai</i>	Topo: Concentração primariamente biogênica; Base: Tempestito proximal.
				33	11	45		2	2	2					
	SA02	5	70	4	14	76		4		2	I, II, III	Polimodal	Caótica	<i>Brachidontes</i> sp. Cerithiidae Corbulidae Icnofóssil (anellidae?) Bioerosão Caranguejos ind. Bioturbação	Tempestito proximal
	SA03	5	70		5	94	1				I, II, III	Polimodal	Caótica	<i>Brachidontes</i> sp. Gastrópodes ind.	Tempestito proximal
	SA04		55	2	4	92		2			I, II, III	Polimodal	Caótica	<i>Brachidontes</i> sp. Cerithidae Corbulidae	Tempestito proximal
	SA05	9?	55		8	90		2			I, II, III, IV	Polimodal	Caótica	Aguileria <i>Brachidontes</i> sp. Cassiopidae	Tempestito proximal

Serrolândia	SE01	10	25		3		14	83			I, II, III, IV	Polimodal	Caótica	Cassiopidae Biválvios ind.	Tempestito proximal
Ladeira do Berlenga	LB01	4	5				15	85			I, II, III	Polimodal	Caótica	Cerithiidae Cassiopidae Naticidae	Tempestito proximal
	LB02	10	15		14	16	30	40			I, II, III, IV	Polimodal	Caótica	<i>Aguileria</i> sp. Cerithiidae <i>Brachidontes</i> sp.	Tempestito proximal

Tabela 2. Classificação genética das coquinas do Araripe, com suas respectivas características tafonômicas, fauna e locais de ocorrência.

Classificação genética das concentrações	Afloramento	Fauna	Características tafonômicas
Tempestitos proximais	Sítio Negros, Jardim, CE	<i>Biválvio: Mytilidae</i> e indeterminados. Gastrópode: Turritellidae.	-Empacotamento denso a disperso de bioclastos na matriz sedimentar. -Fragmentação variável (15 a 90 % dos bioclastos). -Pode haver espécimes completamente articulados. -Os bivalvíos articulados, em especial, podem representar a maior parte do grupo na concentração. -Aninhamento, empilhamento e embricamento de conchas de bivalvíos são comuns. -Bioclastos bem e mal selecionados (I-VI classes de tamanho). -Distribuição caótica em planta e em seção. -Espessura decimétrica a centimétrica (1 a 50 cm). -Contatos bruscos e erosivos.
	Sítio Romualdo, Crato, CE	<i>Biválvio: indeterminados</i> Gastrópode: Turritellidae.	
	Sítio Canastra, Araripina, PE	<i>Biválvio: Mytilidae e indeterminados.</i> <i>Gastópodes: indeterminados.</i> Equinoide: indeterminados.	
	Sítio Torrinha, Araripina, PE	<i>Biválvio: indeterminados.</i> Gastrópode: Cassiopidae, Cerithiidae e Naticidae.	
	Sítio Torre Grande, Araripina, PE	<i>Biválvio: indeterminados.</i> Gastrópode: Cassiopidae, Cerithiidae e Naticidae.	
	Serra da Mãozinha, Missão Velha, CE	<i>Biválvio: Mytilidae e indeterminados</i> Gastrópode: Turritellidae Epitoniidae, Cerithiidae e Naticidae.	
	Jamacaru, Missão Velha, CE	<i>Biválvio: indet.</i> Gastrópode: Turritellidae.	
	Sítio Caboclos, Fronteiras, PI	<i>Biválvio: Mytilidae e indeterminados.</i> Gastrópode: Turritellidae.	
	Mineradora Serrolândia, Ouricuri, PE	Gastrópode: Cassiopidae.	
	Sítio Santo Antônio, Exu, PE	Gastrópode: Cerithiidae e Cassiopidae. <i>Biválvio: Mytilidae</i> , Corbulidae, Bakevelliidae e Trochidae. Caranguejo: Orithopsidae.	
	Ladeira do Berlenga, Caldeirão Grande, PI	<i>Biválvio: Mytilidae e Bakevelliidae.</i> Gastrópode: Cerithiidae, Cassiopidae e Naticidae.	
	Sítio Cedro, Exu, PE	<i>Biválvio: Mytilidae e Bakevelliidae.</i> Gastrópode: Cassiopidae, Naticidae e Cerithiidae. Equinoide: Clypeidae (<i>Bothryopneustes araripensis</i>).	
	Sítio Engenho, Jardim, CE	<i>Biválvio: indeterminados</i> Gastrópode: Turritellidae e Naticidae.	
	Sítio Saco, Porteiras, CE	Bivalvio: Corbulidae e indeterminados. Gastrópode: Turritellidae.	

	Sítio Barreiros, Moreilândia, PE?	Gastrópode: Turritellidae. Biválvio: Arctidae.	
Concentrações Primariamente Biogênicas	Sítio Engenho, Jardim, CE	<i>Gastrópode</i> : Turritellidae, Naticidae e Neritidae. <i>Biválvio</i> : Mytilidae e indeterminados.	-Empacotamento denso a disperso de bioclastos na matriz sedimentar. -Fragmentação variável (15 a 75 % dos bioclastos). -Infauna rasa e epifauna <i>in situ</i> . Espessura 2 a 7 cm. -Bioclastos pobremente selecionados (I-V classes de tamanho). -Distribuição caótica em planta e seção. -Espessura centimétrica (2 a 7 cm).
	Sítio Canastra, Araripina, PE	Biválvio: Mytilidae e indeterminados. Gastrópode: Cerithiidae. Equinoide: Clypeidae (<i>Bothryopneustes araripensis</i>) e Pygurus (<i>Pygurus tinocoi</i>).	
	Sítio Torre Grande, Araripina, PE	<i>Biválvio</i> : indeterminados. Gastrópode: Cassiopidae e Naticidae. Equinoide: indeterminados.	
	Sítio Cedro, Exu, PE	Gastrópode: Cassiopidae, Naticidae e Cerithiidae. Biválvio: Bakevelliidae e Mytilidae. Equinoide: Clypeidae (<i>Bothryopneustes araripensis</i>). Caranguejo: Orithopsidae e ?Eogeryonidae.	
	Sítio Santo Antônio, Exu, PE	<i>Biválvio</i> : Mytilidae e Corbulidae.	
	Sítio Brejinho, Araripe, CE	<i>Biválvio</i> : indeterminados. Gastrópode: Epitoniidae e Cerithiidae.	
Tempestitos Distais	Santana do Cariri, CE	Gastrópode: Cassiopidae.	-Em relação aos tempestitos proximais, diferem por apresentar um discreto aumento na seleção dos bioclastos, um menor número de indivíduos fragmentados e menor grau de articulação. -Contatos bruscos e ondulados. -Intercala espessos pacotes de folhelhos/argilas/micas.
	Sítio São Gonçalo, Santana do Cariri, CE	<i>Biválvio</i> : Mytilidae. Gastrópode: Turritellidae.	
	Marcolândia, PI	Biválvio: Mytilidae e indeterminados. Gastrópode: Turritellidae e Epitoniidae.	
	Serra da Mãozinha, Missão Velha, CE	Gastrópode: Cassiopidae.	
	Sobradinho, Jardim, CE	Biválvio: Mytilidae e indeterminados. Gastrópode: Turritellidae.	
	Riacho dos Bois, Porteiras, CE	Biválvio: Mytilidae. Gastrópode: Turritellidae.	

Resíduos Transgressivos	Sítio Romualdo, Crato, CE	Gastrópode: Turritellidae. <i>Biválvio: indeterminados.</i>	-Concentrações amalgadas com conchas que exibem estágios bioestratinômicos distintos. -Distribuição caótica, mas em seção predominam os bioclastos concordantes ao acamamento. -Alta fragmentação. -Razoável concentração de conchas inteiras de gastrópodes. -Gradação irregular. -Modificação da biotrama por organismos bioturbadores.
-------------------------	---------------------------	--	--

6. CONCLUSÕES

As fácies e fósseis da Formação Romualdo nos novos afloramentos da porção oeste da Bacia Araripe indicam um ambiente com influência marinha e sedimentação predominantemente calma, representada por folhelhos e lamitos com fósseis de peixes e vegetais, interrompida em alguns momentos por sedimentação tempestítica formando coquinas. Breves pulsos transgressivos seriam responsáveis pela colonização de elementos tipicamente marinhos nas coquinas, tais como equinoides e caranguejos.

De uma forma geral, as coquinas teriam sido depositadas em ambiente marinho plataformaraso. Contudo, a profundidade da lâmina d'água e energia do evento deposicional não eram constantes ao longo do tempo geológico, havendo por isso tafocenoses com diferentes assinaturas tafonômicas. As coquinas por sua vez, são classificadas como resíduos transgressivos, tempestitos proximais e distais, e concentrações primariamente biogênicas.

Até o presente, apenas um único espécime de caranguejo braquiúro era conhecido para a Formação Romualdo. A partir de algumas dezenas de carapaças dorsais, foram descritos os novos gêneros e espécies *Exucarcinus gonzagai* (Raninoida: Orithopsidae) e *Romualdocarcinus salesi* (Heterotremata: Eogeryonidae?). A distribuição de *E. gonzagai* restrita ao Mar de Tétis durante o Cretáceo corrobora com a hipótese de ingresso marinha no Araripe a partir das bacias do Parnaíba ou Potiguar. Já *R. salesi* representa um dos eubraquiúros com ocorrência mais antiga.

Quanto a associação de camarões no estado de Pernambuco, as ocorrências no folhelho e arenito se diferenciam em relação aos aspectos tafonômicos. No folhelho os organismos teriam sido soterrados *in situ* ou no máximo remobilizados dentro do seu próprio ambiente, sob condições de baixa energia devido ao aumento da taxa de sedimentação de finos. No arenito, o aumento de energia e predação seriam os responsáveis pela desarticulação e fragmentação dos camarões. Nessas associações os espécimes podem ser desde autóctones com baixa residência na interface água-sedimento à parautóctones/alóctones. *Paleomattea deliciosa* é a espécie mais comum, ocorrendo em associação aos camarões previamente descritos (*Sume marcosi* e *Priorhyncha feitosai*) no folhelho, e ao novo Penaeoidea, *Cretainermis pernambucensis* no arenito. A sedimentação no folhelho seria marinha, devido ao hábito moderno dos camarões encontrados, no arenito, as condições ambientais não podem ainda ser inferidas devida a ampla ocorrência dos camarões identificados.

REFERÊNCIAS

- Albuquerque, P.R.F., Sales, A.M.F, Gomes, J.A.F. 1999. Traços fósseis da Formação Cariri (Paleozóico) da Bacia do Araripe, CE. **In:** 10º Congresso Brasileiro de Paleontologia, Crato, **Anais**, 1, p. 11-12.
- Alencar, R.B., Pinheiro, A.P, Saraiva, A.Á.F., Oliveira, G.R., Santana, W. A new genus and species of Solenoceridae (Crustacea, Decapoda, Dendrobranchiata) from the Cretaceous (Aptian/Albian) of the Araripe Sedimentary Basin, Brazil. **Zootaxa**, 4527(4): 494–500.
- 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 Sobre a Bacia do Araripe e Bacias Interiores do Nordeste, Crato, **Atas**, p. 226-233.
- Arai, M. 2006. Revisão estratigráfica do Cretáceo Inferior das bacias interiores do nordeste do Brasil. **Geociências**, 25(1): 7-15.
- Arai, M. 2014. Aptian/Albian (Early Cretaceous) paleogeography of the South Atlantic: a paleontological perspective. **Brazilian Journal of Geology**, 44(2): 339-350.
- 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**, 39(2): 521-538.
- Assine, L.M., Perinotto, J.A.J, Custódio, M.A., Neumann, V.H., Varejão, F.G., Mescolotti, P.C. 2014. Sequências deposicionais do Andar Alagoas da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, 22: 3-28.
- Assine, L.M., 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.
- Assine, M.L. 1990. **Sedimentação e Tectônica da bacia do Araripe** (Nordeste do Brasil). Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 124 p.
- Assine, M.L. 1992. Análise estratigráfica da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, 22(3): 289-300.
- Assine, M.L. 1994. Paleocorrentes e Paleogeografia na Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, 24(4): 223-232.
- Assine, M.L. 2007. Bacia do Araripe. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, 15(2): 371-389.
- Barros, O.A., Pontes, A.P., Silva, J.H., Saraiva, A.Á.F., 2016. Aspectos paleoecológicos da macrofauna dos folhelhos associados à camada de gipsita, bacia do araripe. **Estudos Geológicos**, 26(2): 147-156.

- Batista, M.E.P., Sales, A.M.F., Pinheiro, A.P., Barros, O.A. 2015. Tafonomia de moluscos do sítio Barreiros, município de Moreilandia, PE, Bacia do Araripe. **Estudos Geológicos**, 25: 53-60.
- Behrensmeyer, A.K. & Kidwell, S.M. 1985. Taphonomy's contributions to paleobiology. **Paleobiology**, 11: 105-119.
- Berthou, P.Y., Viana, M.V., Campos, D.A. 1990. Coupe de la Formation Santana dans le secteur de "Pedra Branca" (Santana do Cariri) (Bassin D' Araripe, NE du Brésil). Contribution à l' étude de la sédimentologie et des paléoenvironnements. **In**: 1º Simpósio Sobre a Bacia do Araripe e Bacias Interiores do Nordeste, Crato, **Atas**, p. 173- 1991.
- Beurlen, K. 1962. A geologia da Chapada do Araripe. **Anais Academia Brasileira de Ciências**, 3(3): 365-370.
- Beurlen, K. 1963. Geologia e estratigrafia da Chapada do Araripe. **In**: 17º Congresso Nacional de Geologia, Recife, **Anais**, 47 p.
- Beurlen, K. 1964. As espécies dos Cassiopinae, nova subfamília dos Turritellidae, no Cretáceo do Brasil. **Arquivos de Geologia-UFPE**, 5: 1-44.
- Beurlen, K. 1966. Novos Equinóides no Cretáceo do Nordeste do Brasil. **Anais Academia Brasileira de Ciências**, 38: 455-464.
- Beurlen, K. 1971. As condições ecológicas e faciológicas da Formação Santana na Chapada do Araripe (Nordeste do Brasil). **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 43: 411-415.
- Bishop, G.A. 1986. Taphonomy of the North American Decapods. **Journal of Crustacean Biology**, 6(3): 326-355.
- Bondioli, J.G., Matos, S.A., Fürsich, F.T., Custódio, M.A., Assine, M.L., Warren, L.V., Simões, M.G., 2017. Shrimp biostratigraphy (Crustacea, Decapoda) Upper Aptian Romualdo Formation, Araripe Basin, Brazil, and their paleoecologic significance. **In**: 25º Congresso Brasileiro de Paleontologia. Ribeirão Preto, **Resumos**, Paleontologia em Destaque: Boletim informativo da Sociedade Brasileira de Paleontologia, p. 47.
- Brito Neves, B., dos Santos, E.J., Van Schmus, W.R. 2000. Tectonic history of the Borborema Province, Northeastern Brazil. **In**: Cordani, U., Milani, E.J., Thomaz Filho, A., Campos, D.A. (eds.), **Tectonic evolution of the South America**, edited by 31st International Geological Congress, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 151–182.
- Brito, I.M. 1981. Os equinóides fósseis do Brasil:II. Holectipóides e cassiduloides. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 53(3): 513-527.
- Bruno, A.P. & Hessel, M.P. 2006. Registros paleontológicos do Cretáceo marinho na Bacia do Araripe. **Estudos Geológicos**, 16(1): 30-49.
- Brusca, R.C & Brusca, G.J. 2007. **Invertebrados**. Guanabara, 1098 p.
- Brusca, R.C., Brusca, G.J. 2003. **Invertebrates**. Massachusetts, Sinauer Associates, 2, 936 p.

- Camacho, H.H. 2007. Molusca. **In:** Camacho, H.H. (ed.), **Los Invertebrados fósiles**, Buenos Aires, Fundación de Historia Natural Félix de Azara: Universidad Maimónides, p. 293-322.
- Camacho, H.H. 2007. Molusca. **In:** Camacho, H.H. (ed.), **Los Invertebrados fósiles**, Buenos Aires, Fundación de Historia Natural Félix de Azara: Universidad Maimónides, p. 293-322.
- Camacho, H.H., del Río, C.J. 2007. Gastropoda. **In:** Camacho, H.H. (ed.), **Los Invertebrados fósiles**, Buenos Aires, Fundación de Historia Natural Félix de Azara: Universidad Maimónides, p. 323-376.
- Carvalho, E.M., Uieda, V.S. 2004. Colonização por Macroinvertebrados Bentônicos em Substrato Artificial e Natural em um Riacho da Serra de Itatinga, São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Zoologia**, 21(2): 287-294.
- Carvalho, I.S. & Melo, J. H. G. 2012. Bacias Interiores do Nordeste. Chapada do Araripe. **In:** Hasui, I., Carneiro, C.D.R., Almeida, F.F.M., Bartorelli, A. (eds.), **Geologia do Brasil**, São Paulo, BECA, p. 502-509.
- Carvalho, I.S., Vicalvi, M.A., Carvalho, M.G.P. 2011. Artrópodes. **In:** Carvalho, I. de S. (ed.), **Paleontologia: Microfósseis e paleoinvertebrados**, Rio de Janeiro, Interciência, 3ª ed., vol. 2, p. 371- 404.
- Carvalho, I.S., Agnolin, F., Rolando, M.A.A., Novas, F.E., Neto, J.X., Freitas, F.I., Andrade, J.A.F.G. 2019. A new genus of pipimorph frog (Anura) from the Early Cretaceous Crato Formation (Aptian) and the evolution of South American tongueless frogs. **Journal of South American Earth Sciences**, 92: 222-233.
- Cox, L.R. 1960. Gastropoda-General characteristics of Gastropoda. **In:** Moore, R.C. (ed.), **Treatise on Invertebrate Paleontology, Part I, Mollusca 1**. Geological Society of America and University of Kansas Press, Lawrence p. I84- I-169.
- Custódio, M.A., Quaglio, F., Warren, L.V., Simões, M.G., Fürsich, F.T., J. Perinotto, J.A., Assine, M.A. 2017. The transgressive-regressive cycle of the Romualdo Formation (Araripe Basin): Sedimentary archive of the Early Cretaceous marine ingressão in the interior of Northeast Brazil. **Sedimentary Geology**, 35: 1-15.
- Della Fávera, J. C., 1987. Tempestades como agentes de poluição ambiental e mortandade em massa no passado geológico: caso das formações Santana (Bacia do Araripe) e Irati (Bacia do Paraná). **Boletim de Geociências da Petrobras**, 1(2): 239-240.
- Esteves, F.A. **Fundamentos de Limnologia**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.
- Fara, E., Saraiva, A.A.F., Campos, D.A., Moreira, J.K.R., Siebra, D.C., Kellner, A.W.A. 2005. Controlled excavation in the Romualdo Member of the Santana Formation (early Cretaceous, Araripe Basin, northeast Brazil): stratigraphic, palaeoenvironmental and palaeoecological implications. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, 218: 145-160.

Fischer, A.G. 1952. Echinoids. **In:** Moore, R.C., Lalicker, C.G., Fischer, A.G. (eds.). **Invertebrate Fossils**, New York, McGraw-Hill Book Co, p. 675-714.

Fischer, A.G. 1952. Echinoids. **In:** Moore, R.C., Lalicker, C.G., Fischer, A.G. (eds.). **Invertebrate Fossils**, New York, McGraw-Hill Book Co, p. 675-714.

Fürsich, F.T. & Oschmann, W. 1993. Shell beds as tools in basin analysis: the Jurassic Kachchh, western India. **Journal of Geological Society**, 150(1):169-185.

Glaessner, M.F. 1969. Decapoda. **In:** Moore, R.C. (ed.), *Treatise on Invertebrate Paleontology*, Part R, Arthropoda 4. Geological Society of America and University of Kansas Press, Lawrence, p. R400-R533.

Greenstein, B.J. 1993. Is the fossil record of regular echinoids really so poor? A comparison of living and subfossil assemblages. **Palaios**, 8:587-601.

Hadel, V.F., Monteiro, A.M.G., Ditadi, A.S.F., Tiago, C.G. & Tommasi, L.R. 1999. Filo Echinodermata. **In:** Migotto, A.E. & Tiago, C.G. (eds.). **Biodiversidade do Estado de São Paulo, Brasil - Invertebrados Marinhos**, São Paulo, FAPESP, 3ª ed., p. 259-271.

Hashimoto, A.T., Appi, C.J., Soldan, A.L., Cerqueira, J.R. 1987. O neo-Alagoas nas bacias do Ceará, Araripe e Potiguar (Brasil): caracterização estratigráfica e paleoambiental. **Revista Brasileira de Geociências**, 17(2):118-122.

Holz, M. & Simões, M.G. 2002. **Elementos Fundamentais de Tafonomia**. Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 231 p.

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., Berbetborn, M.L.C. (eds.), **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**. 1º ed., Brasília: DNPM/CPRM – Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleontológicos (SIGEP), p. 121-130.

Kidwell, S.M., Rothfus, T.A., Best, M.M.R. 2001. Sensitivity of taphonomic signatures to sample size, sieve size, damage scoring system, and target taxa. **Palaios**, 16:26-52.

Kier, P.M. 1997. The poor fossil record of the regular echinoid. **Paleobiology**, 3:168-174.

Kroh, A. & Smith, A.B. 2010. The phylogeny and classification of post-palaeozoic echinoids. **Journal of Systematic Palaeontology**, 8(2):147-212.

Kunzmann, L., Mohr, B.A.R., Bernardes-de-Oliveira, M.E.C., Wilde, V. 2006. **Gymnosperms from the Early Cretaceous Crato Formation (Brazil)**. II. Cheirolepidiaceae, 9(2): 213-225.

Lima, F.J., Saraiva, A.A.F., Sayão, J.M. 2012. Revisão da paleoflora das Formações Missão Velha, Crato e Romualdo, Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. **Estudos Geológicos** 22(1):99-115.

Lima, M.R. 1978. **Palinologia da Formação Santana (Cretáceo do Nordeste do Brasil)**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 337 p., 27 plates.

Linse, K., Walker, L.J, Barnes, D.K.A. 2008. Biodiversity of echinoids and their epibionts around the Scotia Arc, Antarctica. **Antarctic Science**, 20:227-244.

Mabesoone, J.M. & Tinoco, I.M. 1973. Paleoecology of the Aptian Santana Formation (Northeastern Brazil). **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, 14:97-118.

Mabesoone, J.M., Viana, M.S.S., Lima Filho, M.F. Late Mesozoic History of Sedimentary Basins in NE Brazilian Borborema Province before the final separation of South America and Africa. 3: Paleogeogeography. **In: 5º Simpósio sobre o Cretáceo Brasileiro, Rio Claro, Boletim de Resumo**, p. 621-626

Mabessone, J.M. 2002. História geológica da província Borborema (NE Brasil). **Revista de geologia**, 15: 119-129.

Machado Junior, D.L., Dehira, L.K., Carneiro, C.D.R., Almeida, F.F.M. 1989. Reconstruções paleoambientais do Juro-Cretáceo do Nordeste oriental brasileiro. **Revista Brasileira de Geociências**, 19(4): 470-485.

Machado, D.M.C, Kotzian, C.B., Erthal, F. 2011. Moluscos. **In: Carvalho, I. de S. (ed.). Paleontologia: Microfósseis e paleoinvertebrados**, Rio de Janeiro, Interciência, 3ª ed., vol. 2, p. 409- 447.

Maisey, J.G & Carvalho, G.P. 1995. First records of fossil sergestid decapods and fossil brachyuran crab larvae (Arthropoda, Crustacea), with remarks on some supposed palaemonid fossils, from the Santana Formation (Aptian-Albian, NE Brazil). **American Museum Novitates**, 3132: 1-17.

Maisey, J.G. 1991. **Santana Fossil an Illustrated Atlas**. Tropical Fish Hobbyist Publications, 459 p.

Manso, C.L.C. & Hessel, M.H. 2012. Novos equinóides (Echinodermata: Echinoidea) do Albiano da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, 42(1): 187-197.

Manso, C.L.M. & Hessel, M.H. 2007. Revisão sistemática *Pygidiolampas araripensis* (Beurlen, 1966), (Echinodermata: Cassiduloida) da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. **Geociências**, São Paulo, 26(3): 271-277.

Martill, D.M. 1988. Preservation of fish in the Cretaceous Santana Formation of Brazil. **Palaeontology**, 31: 1-18.

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.

- Martins-Neto, R.G. & Mezzalana, S. 1991. Descrição de novos crustáceos (Caridea) da Formação Santana Cretáceo Inferior do Nordeste do Brasil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 63:155-160.
- Martins-Neto, R.G. 1987. Primeiro registro de decápode na Formação Santana, Bacia do Araripe (Cretáceo Inferior), Brasil. **Ciência e Cultura**, 39(4), 406–410.
- Matos, R.M.D. 1992. The Northeast Brazilian Rift System. **Tectonics**, 11(4):766-791.
- Matsumura-Tundisi, T. 1999. Diversidade de zooplâncton em represas do Brasil. In: Henry, R (ed.), **Ecologia de reservatórios**. São Paulo: FAPESP/FUNDIBIO, p.41-54.
- Maury, C.J. 1936. O Cretáceo de Sergipe, Brasil. **Monographias do Serviço Geológico e Mineralógico**, 11: 1–283.
- Moffat, H.A. and Bottjer, D.J. 1999. Echinoid concentration beds: two examples from the stratigraphic. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, 149: 329-348
- Neumann, V.H. & Cabrera, L. 1999. Una nueva propuesta estratigráfica para la tectono secuencia post-rifte de la cuenca de Araripe, Noreste de Brasil. In: 5º Simpósio Cretáceo Brasileiro, Serra Negra, **Boletins**, p. 279-285.
- Neumann, V.H., 1999. **Estratigrafia, sedimentologia, geoquímica y diagénesis de los sistemas lacustres aptiense-albienses de la Cuenca de Araripe (Noreste de Brasil)**. Tesis de Doctoral, Universitat de Barcelona, DEP, DGPPG, 244 p.
- Parma., S.G. 2007. Echinodermata. In: Camacho, H.H. (ed.), **Los Invertebrados fósiles**, Buenos Aires, Fundación de Historia Natural Félix de Azara: Universidad Maimónides, p. 681-726.
- Parma., S.G. 2007. Echinodermata. In: Camacho, H.H. (ed.), **Los Invertebrados fósiles**, Buenos Aires, Fundación de Historia Natural Félix de Azara: Universidad Maimónides, p. 681-726.
- Paz, J.D.S., Rossetti, D.F., 2006. Paleohydrology of an Upper Aptian lacustrine system from northeastern Brazil: integration of facies and isotopic geochemistry. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, 241: 247–266.
- Pereira, P.A. 2016. **Moluscos fósseis da Formação Romualdo, Cretáceo Inferior (Aptiano-Albiano), da Bacia do Araripe, NE do Brasil**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 90 p.
- Pereira, P.A., Cassab, R.C.T., Barreto, A.M.F. 2016a. Cassiopidae gastropods, influence of Tethys Sea of the Romualdo Formation (Aptian-Albian), Araripe Basin, Brazil, **Journal of South American Earth Sciences**, 70: 211-223.
- Pereira, P.A., Cassab, R.C.T., Barreto, A.M.F. 2017. Paleoecologia e Paleogeografia dos Moluscos e Equinoides da Formação Romualdo, Aptiano–Albiano da Bacia do Araripe, Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências-UFRJ**, 40(2):180-198.

Pereira, P.A., Cassab, R.C.T., Barreto, A.M.F., Almeida, J.A.C. 2016b. Moluscos da Formação Romualdo, Aptiano-Albiano, Bacia do Araripe, nordeste do Brasil. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Ciências Naturais**, 10(2): 231-246.

Pérez farfante, I. and Kensley, B. 1997. Penaeoid and sergestoid shrimps and prawns of the world. Keys and diagnoses for the families and genera. **Mémoires du Muséum National d'Histoire Naturelle**, 175: 1-233.

Petri, S. 1987. Cretaceous paleogeographic maps of Brazil. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, 59(1): 117-168.

Pinheiro, A.P., Saraiva, A.Á.F., 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(2): 663-670.

Pinheiro, A.P., Saraiva, A.Á.F., 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(2): 663–670.

Ponte, F. C. 1992. Origem e evolução das pequenas bacias cretácicas do interior do nordeste do Brasil. **In: 2º Simpósio Sobre as Bacias Cretácicas Brasileiras, Rio Claro, Resumos Expandidos**, p. 55-58.

Ponte, F.C. & Ponte Filho, F.C. 1996. Evolução tectônica e classificação da Bacia do Araripe. **In: 4º Simpósio sobre o Cretáceo do Brasil, Rio Claro, Boletim**, p. 123-133.

Ponte, F.C., Medeiros, R.A., Ponte-Filho, F.C. 1997. Análise estratigráfica da Bacia do Araripe: parte 1 - análise de sequências. **In: Simpósio sobre a Bacia do Araripe e Bacias Interiores do Nordeste. Crato, 1997. Trabalhos Científicos...Coleção Chapada do Araripe**, 1, Crato, CE, 2001.

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(1): 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.

Roccatagliata, D., Aguirre-Urreta, B., Gallego, O.F. 2007. Crustacea. **In: Camacho, H.H. (ed.), Los Invertebrados fósiles**, Buenos Aires, Fundación de Historia Natural Félix de Azara: Universidad Maimónides, p. 563-598.

Rogers, D. C. 2016. Phylum Arthropoda. **In:** Thorp J. H and Rogers, C. (eds.), **Freshwater Invertebrates: Keys to Nearctic Fauna**, Academic Press, 4^a ed., 762p.

Rossetti, D.F., Paz, J.D., Goes, A.M., Macambira, M.J.B. 2000. Sequential analysis of the Aptian deposits from the São Luís and Grajaú Basins, Maranhão State (Brazil) and its implication for unraveling the origin of evaporites. **Revista Brasileira de Geociências**, 30(3): 466–469.

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**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 160 p.

Santana, W., Pinheiro, A.P., Silva, C.M.R., Saraiva, A.Á.F. 2013. A new fossil caridean shrimp (Crustacea: Decapoda) from the Cretaceous (Albian) of the Romualdo Formation, Araripe Basin, northeastern Brazil. **Zootaxa**, 36(20): 293-300.

Santos, M.E.M. 1982. Ambiente deposicional da Formação Santana, Chapada do Araripe (PE/PI/CE). **In:** 32º Congresso Brasileiro de Geologia, Salvador. **Anais**, v.4, p.1412-1426.

Saraiva, A.Á.F. Alencar, D.R. Pinheiro, A.P. Oliveira, G.R, Santiago, A.C. 2016. Primeiro registro fóssil de Luciferidae de Haan, 1849 (Decapoda: Sergestoidea). **In:** 14º Congresso Brasileiro sobre Crustáceos, Crato, **Resumos**, p. 298.

Saraiva, A.Á.F., Pralon, B.G.N, Gregati, R.A. 2009. Taxonomic remarks on Brazilian Cretaceous Decapoda from Araripe Basin, Brazil, and ecological inferences. **Gaea**, 5:70-74.

Schweitzer, C.E., Karasawa, H., Luque, J., Feldmann, R.M. 2016. Phylogeny and classification of Necrocarcinoidea Föster, 1968 (Brachyura:Raninoidea) with the description of two new genera. **Journal of Crustacean Biology**, 36(3): 338-372.

Seilacher, A. 1970. Begriff und bedeutung der Fossil-Lagerstätten: Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie. **Monatshefte**, 1: 34-39.

Silva-Santos, R. 1985. Paleoictiofauna da Formação Codó, Bacia do Parnaíba, NE do Brasil. **In:** Congresso Brasileiro de Paleontologia, 9. **Resumos**, 11. SBP, Fortaleza, 1985.

Silva-Santos, R. 1991. **Fósseis do Nordeste do Brasil: paleoictiofauna da Chapada do Araripe**. Tese de Doutorado, Departamento de Biologia Animal e Vegetal, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 64 p.

Simões, M.G., Rodrigues, S.C., Bertoni-Machado, C. 2010. Procedimentos metodológicos em tafonomia. **In:** Carvalho I. de S. (ed.), **Paleontologia: conceitos e métodos**, Rio de Janeiro, Interciência, 3^a ed., p. 413-429.

Small, H. 1913. Geologia e suprimento de água subterrânea no Ceará e parte do Piauí. **Inspetoria de Obras Contra Secas**, 180 p.

Smith, A.B., Gale, A.S., Monks, N.E. 2001. Sea-level change and rock-record bias in the Cretaceous: a problem for extinction and biodiversity studies. **Paleobiology**, 27:241-253.

Soares, R.C. 2013. **Gênese dos níveis coquinóides do Membro Romualdo, Formação Santana na porção central e leste da Bacia do Araripe**. Dissertação de mestrado, Pós-graduação em Geologia-UFC, 76 p.

Souza-lima, W. & Manso, C.L.C. 2011. Equinodermas. **In:** Carvalho I. de S. (ed.), **Paleontologia: conceitos e métodos**, Rio de Janeiro, Interciência, 3(2): p. 449-470.

Staff, G.M. & Powell, E.N. 1988. The paleoecological significance of diversity: the effect of time averaging and differential preservation on macroinvertebrate species richness in death assemblages. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, 63: 73-89.

Tavares, C. & Martin, J. 2010. Suborder Dendobranchiata Bate, 1888. **In:** Scram, Fr. et al. (eds.), **Treatise on Zoology- Anatomy, Taxonomy, Byology** – The Crustacea, Decapoda, Volume 9, Part A, Eucarida: Euphausiacea, Amphionidacea, and Decapoda (partim). Koninklijke Brill NV, Leiden, The Netherland, p. 99-164.

Teixeira, M.C., Mendonça Filho, J.C., Oliveira, A.D., Assine, M.L. 2017. Faciologia orgânica da Formação Romualdo (Grupo Santana, Cretáceo Inferior da Bacia do Araripe): caracterização da matéria orgânica sedimentar e interpretação paleoambiental. **Revista do Instituto de Geociências**, 17(4): 1–44.

Tomé, M.E.T.R., Lima Filho, M.F., Neumann, V.H., Assine, 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.

Vail, P.R., Mitchum, R.M.JR., Thompson, S. 1977. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Seal Level, Part 4: Global Cycles of Relative Changes of Sea Level. **In:** Payton, C.E. (ed.). **Seismic Stratigraphy – Applications to hydrocarbon explonation**, p. 83-97.

Varejão, F.G., Warren, L.V., Perinotto, J.A. J., Neumann, V.H., Freitas, B.T., 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.S.S. & Agostinho, S.M. 1995. Camarões do Membro Romualdo da Formação Santana (Cretáceo Inferior da Bacia do Araripe). **In:** 26º Simpósio de Geologia do Nordeste Sociedade Brasileira Geologia, Núcleo Nordeste, Recife, **Boletim**, p. 239-243.