

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o texto completo desta tese será disponibilizado somente a partir de 02/08/2021.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

FILIPPE GIOVANINI VAREJÃO

**ABORDAGEM MULTI-INDICADORES DO SISTEMA MISTO
CARBONÁTICO-SILICICLÁSTICO DA FORMAÇÃO CRATO:
EVOLUÇÃO SEDIMENTAR, PALEOGEOGRAFIA E TECTÔNICA**

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

Orientador: Prof. Dr. Lucas Veríssimo Warren

Rio Claro – SP
2019

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“Júlio de Mesquita Filho”

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Campus de Rio Claro

FILIPE GIOVANINI VAREJÃO

**ABORDAGEM MULTI-INDICADORES DO SISTEMA MISTO
CARBONÁTICO-SILICICLÁSTICO DA FORMAÇÃO CRATO:
EVOLUÇÃO SEDIMENTAR, PALEOGEOGRAFIA E TECTÔNICA**

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

Orientador: Prof. Dr. Lucas Veríssimo
Warren

Rio Claro – SP
2019

V292a

Varejão, Filipe Giovanini

Abordagem multi-indicadores do sistema misto carbonático-siliciclástico da Formação Crato : Evolução sedimentar, paleogeografia e tectônica / Filipe Giovanini Varejão. -- Rio Claro, 2019

163 p. : il., tabs., fotos + 1 CD-ROM

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: Lucas Veríssimo Warren

1. Geologia estratigráfica Cretáceo. 2. Rochas sedimentares. 3. Paleontologia. 4. Sedimentos marinhos. 5. Bacias sedimentares. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

FILIPPE GIOVANINI VAREJÃO

**ABORDAGEM MULTI-INDICADORES DO SISTEMA MISTO
CARBONÁTICO-SILICICLÁSTICO DA FORMAÇÃO CRATO:
EVOLUÇÃO SEDIMENTAR, PALEOGEOGRAFIA E TECTÔNICA**

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

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Claudio Riccomini

Profª. Dra. Anelize Manuela Bahniuk Rumbelsperger

Prof. Dr. Marcello Guimarães Simões

Prof. Dr. Mauricio Guerreiro Martinho dos Santos

Conceito: Aprovado

Rio Claro - SP, 2 de agosto de 2019

“Conta a lenda de origem do povo Kariri que antes do mar chegar à Chapada do Araripe existiu um grande lago que deu origem aos seus antepassados. Um dia esse lago se encantou e nos tempos de hoje, de vez em quando, se apresenta para pessoas que se perdem na floresta em cima da chapada.”

AGRADECIMENTOS

A execução e sucesso de um trabalho de doutoramento muito se deve à colaboração de diversas pessoas e instituições. Em primeiro lugar não posso deixar de externar meu mais profundo reconhecimento ao meu grande amigo e orientador **Lucas Warren**, a quem muito devo por me influenciar, estimular e transformar em um cientista. Ao também grande amigo e ex-orientador **Mario Assine**, com quem toda minha jornada começou, cujo suporte e conhecimento são inestimáveis. Também não posso deixar de agradecer ao grande amigo **Marcello Simões**, que me mostrou a importância dos fósseis na análise sedimentar e pelo estímulo científico. Agradeço também à minha grande companheira **Mariza Rodrigues** que contribui sempre para meu crescimento e por me suportar em todos aspectos da minha vida.

Aos colegas do LESTE, DGA/Unesp - **Milena Rosa, Patricia Mescolotti, Amanda Santa Catharina, Paloma Lorenzo, André Santiago** – por fazerem parte do dia a dia de todos esses anos de convivência. Aos colegas do Laboratório de Paleozoologia Evolutiva, IBB/Unesp – **Suzana Matos, Victor Silva e Vitor Guerrini** – que também têm papel importante nesses anos de trabalho em conjunto.

A forma final desta tese contou com os comentários e sugestões dos professores **Claudio Ricommini, Anelize Bahniuk e Mauricio dos Santos** que em muito acrescentaram no fechamento do trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (**FAPESP; 2016/13214-7**) pelo financiamento de bolsa e reserva técnica durante a execução desta tese de doutorado. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Ao Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento “Relações entre Tectônica e Sedimentação em Bacias do Interior do Nordeste do Brasil” (**Petrobas; 2014/00519-9**) pelo apoio durante os trabalhos de campo. Ao Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (**LAMIR**) e ao Laboratório de Isótopos Estáveis (**LABISE**) pelas análises isotópicas de carbono e oxigênio. Ao Departamento de Petrologia e Metalogenia (**DPM, Unesp**) por fornecer acesso ao microscópio eletrônico de varredura (MEV) e espectroscopia de raios-X por dispersão de energia (EDS) e ao **UNESPetro** pelo uso do microscópio óptico.

RESUMO

A megassequência evaporítica transicional de idade aptiana constitui importante registro da abertura da margem equatorial brasileira, das primeiras conexões entre as águas dos oceanos Atlântico Sul e Central, e de depósitos das bacias interiores do Nordeste do Brasil. Nesse contexto, destaca-se a Formação Crato da Bacia do Araripe, composta por sucessão mista carbonática-siliciclástica com espessuras de até 90 m. A Formação Crato é mundialmente reconhecida pela excepcional preservação de fósseis continentais que conferem a unidade o status de *Konservat-Lagerstätte*. A unidade faz parte de sequência deposicional constituída pela porção superior da Formação Barbalha (predominantemente fluvial) e pela Formação Ipubi (depositada em condições evaporíticas), e é considerada como depositada em um sistema lacustre, associado à deposição deltaica nas porções proximais e carbonática nas porções bacinais. No entanto, tais interpretações vêm sendo questionadas devido a recentes descobertas de atividade microbiana nos calcários laminados da unidade. Face ao panorama exposto, este trabalho buscou aplicar abordagem calcada na análise multi-indicadores (sedimentologia, tafonomia, icnologia, estratigrafia de sequências, química orgânica, isótopos estáveis de oxigênio e carbono e análises de estrutura de deformação sin-sedimentar) dos depósitos da Formação Crato. A utilização de múltiplas técnicas de investigativas foi necessária afim de amparar a interpretação dos ambientes deposicionais, além de determinar o posicionamento estratigráfico e auxiliar na definição dos mecanismos de preservação de um dos mais importantes *Konservat-Lagerstätte* do Cretáceo mundial. Os dados apresentados nesta tese apontam para sedimentação em ambiente marinho transicional durante partes da Formação Crato. Ao menos dois ciclos transgressivos pontuados por breves incursões marinhas foram reconhecidos com base em sua associação de facies e ocorrências de dinocistos e icnofósseis tipicamente marinhos. As fases regressivas se diferenciam pela ocorrência de calcários laminados com assinaturas isotópicas tipicamente continentais. No topo da primeira fase regressiva ocorre sucessão de laminitos microbiais, estromatólitos, oncóides e trombólitos, atestando deposição dos laminitos do intervalo do Konservat-Lagerstätte em águas rasas. Esteiras microbianas são observadas recobrando e fornecendo condições ideais de fossilização. Tais evidencias e interpretações divergem das antigas hipóteses para a deposição da Formação Crato e representam inovações significativas na compreensão da evolução dos depósitos mistos da unidade.

Palavras-chave: Aptiano; microbialitos; *Konservat-Lagerstätte*; sedimentação mista; mar epicontinental.

ABSTRACT

The Aptian evaporitic transitional megasequence constitutes important register of the equatorial margin rifting, development of the seaway between the South and Central Atlantic oceans, and deposition in the interior basins of the NE Brazil. In this context, highlights the up to 90-m-thick mixed carbonate-siliciclastic succession from the Crato Formation, Araripe Basin. This unit is worldwide renowned for the exceptional preservation of terrestrial assemblages in laminated limestones and as one of the most important Cretaceous *Konservat-Lagerstätte* of the world. The occurrence of such well-preserved fossils boosted paleontological and sedimentological research focused in the origin of the laminated limestones. The Crato Formation is part of a transgressive-regressive depositional sequence of which the Barbalha (fluvial-lacustrine) and Ipubi (playa lake evaporites) formations are part. The unit is considered a lacustrine system with deltaic deposition in the shallow waters and carbonate precipitation in the basinal areas. However, these interpretations have been questioned in the last years, mainly by the discovery of microbial activity in the limestone intervals. Considering this context, the present research used a multi-proxy approach (sedimentology, taphonomy, ichnology, sequence stratigraphy, organic geochemistry, stable isotopes, and analysis of sin-sedimentary deformation structures) for the interpretation of the mixed deposits of the Crato Formation. The application of multiple techniques is considered essential to support a credible interpretation of the depositional environments, and to characterize the stratigraphic positioning, and definition of the preservational mechanisms of one of the most important Cretaceous *Konservat-Lagerstätte* in the world. The data presented herein points to marginal marine deposition during parts of the Crato Formation. At least two transgressive phases were recognized by typical facies associations and occurrence of dinocysts and marine ichnofossils. The regressive phases are highlighted by the occurrence of laminated limestones with distinctive continental isotope signature. At the top of the first regressive phase, microbial laminites, stromatolites, oncoids, and thrombolites, attests to shallow water deposition at the *Konservat-Lagerstätte* layers. Microbial mats of this interval were observed recovering fossils and potentializing mineralization of soft tissues, in a process known as “microbial entombment”. These evidences and interpretations are divergent from the old interpretations for the Crato Formation and represent significative innovations in the comprehension of mixed sedimentation in the unit.

Keywords: Aptian; microbialites; *Konservat-Lagerstätte*; mixed sedimentation; epicontinental sea

ORGANIZAÇÃO DA TESE

Esta tese foi concebida e organizada no intuito de apresentar os resultados da pesquisa em forma de artigos científicos. Estes artigos, redigidos em língua inglesa, constituem a maior parte dos capítulos e possuem listas de referências bibliográficas individuais cuja formatação atende aos padrões específicos de cada periódico para qual foram submetidos. Um breve resumo em língua portuguesa é feito antes de cada artigo a fim de contextualizar a produção no âmbito do presente documento.

O **Capítulo I** apresenta a tese, as principais problemáticas envolvidas e o objetivo do trabalho, contextualizando a área estudada em seu âmbito regional, bem como as principais metodologias aplicadas.

O **Capítulo II** apresenta a integração dos principais dados sedimentológicos, estratigráficos, estruturais e geoquímicos da Formação Crato. Os dados constam no manuscrito intitulado “*Mixed siliciclastic-carbonate sedimentation in an evolving epicontinental sea: new interpretations for the Aptian Crato Formation, Northeast Brazil*”. Este trabalho propõe um novo modelo deposicional integrado para a Formação Crato e enfatiza o primeiro registro de ingressão marinha na Bacia do Araripe.

O **Capítulo III** apresenta a primeira descrição de microbialitos da Formação Crato, incluindo estromatólitos dômicos e pseudo-colunares, estruturas sedimentares induzidas por esteiras microbianas (MISS) e oncoides. Esses dados são apresentados no artigo intitulado “*Stromatolites from the Aptian Crato Formation, a hypersaline system in the Araripe Basin, northeast Brazil*” publicado no periódico *Facies*.

A descoberta de microbialitos em diversos afloramentos da unidade nos quais estão preservados um dos mais famosos *Konservat-Lagerstätte* do Cretáceo mundial incentivou a análise conjugada das morfologias macroscópicas, microscópicas e ultraestruturais de estruturas microbianas e sua relação com a preservação excepcional de tecidos moles dos organismos fossilizados. O **Capítulo IV** aborda, dessa forma, os principais resultados obtidos na forma do manuscrito “*Exceptional preservation of soft tissues by microbial entombment: insights into the taphonomy of the Crato Konservat-Lagerstätte*” publicado no periódico *PALAIOS*. Este trabalho propõe um modelo inédito de preservação para organismos de tecido mole na Formação Crato e discute sua gênese e importância no contexto global.

No **Capítulo V** é discutida a gênese de uma importante estrutura de deformação na Formação Crato, o *loop bedding*. Tais estruturas são recorrentes no registro geológico e

usualmente interpretadas como produto de deformação sin-sedimentar gerada por abalos sísmicos. No entanto, a observação dessas estruturas em fácies predominantemente evaporíticas e em associação direta com gretas de sinerese permite interpretação alternativa. Dessa forma, o manuscrito intitulado “*Loop bedding structures: evidences of seismic activities, salt nucleation or both?*” discute a gênese evaporítica para estas estruturas.

Finalmente, o **Capítulo VI** apresenta as conclusões parciais e considerações adicionais desta tese. No **Apêndice**, consta o manuscrito intitulado “*Stromatolite fields developed in a protected rocky coastline: the shallow carbonate ramp of the Aptian Romualdo Formation (Araripe Basin, NE Brazil)*” publicado no periódico *Sedimentary Geology*, tratando da primeira descrição de estromatólitos para a Formação Romualdo e seu significado estratigráfico e paleambiental.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
ORGANIZAÇÃO DA TESE	v
SUMÁRIO	vii
I. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
I.1. Introdução	1
I.2. Objetivos.....	2
I.3. Contexto geológico	2
I.4. Métodos.....	5
I.4.1. Análise de fácies sedimentares	5
I.4.2. Análise de paleocorrentes	6
I.4.3. Microscopia eletrônica de varredura.....	6
I.4.4. Químioestratigrafia e análise de isótopos estáveis de C e O.....	7
I.4.5. Geoquímica orgânica	8
I.4.6. Análise de Sequências e correlações estratigráficas	9
I.4.7. Análise da deformação sin-sedimentar	9
I.5. Referências	10
II. SEDIMENTAÇÃO MISTA CARBONÁTICA-SILICICLÁSTICA EM MAR EPICONTINENTAL: NOVAS INTERPRETAÇÕES PARA A FORMAÇÃO CRATO	15
III. ESTROMATÓLITOS DO APTIANO DA FORMAÇÃO CRATO, UM SISTEMA LACUSTRE HIPERSALINO NA BACIA DO ARARIPE, NORDESTE DO BRASIL.....	81
IV. O KONSERVAT-LAGERSTÄTTE DA FORMAÇÃO CRATO E O PAPEL DAS ESTEIRAS MICROBIANAS NA PRESERVAÇÃO DE ASSEMBLEIAS FÓSSEIS EXCEPCIONAIS.....	102
V. REINTERPRETANDO AS ESTRUTURAS LOOP BEDDING.....	121
VI. CONCLUSÕES.....	143
APÊNDICE.....	146

I. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

I.1. Introdução

O limite Aptiano-Albiano registra a ruptura final entre os continentes Sul-Americano e Africano (Moulin et al., 2010; Chaboureaud et al., 2012; 2013). Durante esta fase, importante troca faunística entre o paleo-oceano Tethys e o proto-oceano Atlântico Sul é reconhecida nas bacias marginais equatorial e leste brasileira, indicando que a conexão marinha entre esses oceanos se deu a partir do Aptiano (Koutsoukos et al., 1991). A correlação existente entre as curvas de isótopos estáveis de carbono e enxofre em seções carbonáticas e evaporíticas de bacias pertencentes a esses dois oceanos corroboram com a existência de um *seaway* entre esses oceanos durante o Aptiano (Tedeschi et al., 2017).

A sequência aptiana pós-rifte transicional representa o último estágio preservado no registro sedimentar da evolução do sistema de riftes do interior do continente Sul-Americano e compreende importantes sucessões transgressivas-regressivas que culminaram na deposição de depósitos marinhos epicontinentais (Assine et al., 2014; Assine et al., 2016; Custódio et al., 2017). A Formação Crato da Bacia do Araripe, destaca-se pela preservação de intervalos carbonáticos originados por atividade microbiana (Catto et al., 2016; Warren et al., 2017) associados a importantes depósitos evaporíticos da Formação Ipubi. Enquanto depósitos aptianos das bacias marginais brasileiras encontram-se abaixo de grande coluna de água e de espessa pilha de sedimentos pós-aptianos da margem passiva, a Formação Crato se destaca por consistir de excelente análogo aflorante, o que permite a realização de estudos específicos e relevantes inferências paleoambientais e paleogeográficas.

A Formação Crato é mundialmente reconhecida pela preservação excepcional de organismos terrestres fossilizados em calcários laminados, que conferem à unidade o status de *Konservat-Lagerstätte* (Martill et al., 2007a). Desde a primeira descrição de fósseis nos carbonatos da Formação Crato por Silva Santos (1947), o interesse pela taxonomia dos diversos grupos fósseis encontrados foi crescente. No entanto, trabalhos de detalhe focados na tafonomia dos organismos, nos ambientes deposicionais da unidade e no posicionamento estratigráfico das ocorrências fossilíferas são mais escassos. Com exceção de poucos resumos publicados em congressos (Santos, 1982) e teses de doutoramento (Neumann, 1999), os estudos que versam sobre a geologia da unidade estão restritos ao intervalo do *Konservat-Lagerstätte* (Heimhofer

et al., 2010) e a níveis fossilíferos específicos que são predominantemente carbonáticos (Coimbra et al., 2002; Neumann et al., 2003; Carmo et al., 2004).

Face ao panorama exposto, este trabalho teve como objetivo aplicar uma abordagem calcada na análise multi-indicadores (sedimentologia, tafonomia, icnologia, estratigrafia de sequências, química orgânica, isótopos estáveis de oxigênio e carbonos e análises de estruturas de deformação sin-sedimentar) de detalhe em toda a sucessão da Formação Crato. Este procedimento é considerado necessário para amparar uma interpretação plausível e integrada dos ambientes deposicionais visto que estudos calcados em um único tipo de análise não têm avançado substancialmente na resolução de problemas envolvendo sua origem, posicionamento estratigráfico e definição dos mecanismos de preservação de um dos mais importantes *Konservat-Lagerstätte* do Cretáceo mundial. A integração da descrição macro, micro e ultraestrutural de carbonatos aliada a dados estratigráficos, geoquímicos, e estruturais, é fundamental para a correlação regional das diversas áreas de ocorrência da unidade, bem como na caracterização de sua arquitetura deposicional e contexto paleogeográfico, permitindo a definição da extensão e posicionamento da primeira ingressão marinha no interior do continente durante os últimos momentos da fragmentação da África e América do Sul.

I.5. Referências

- Asmus, H.E., Baisch, P.R., 1983. Geological evolution of the Brazilian continental margin. Episodes 4, 3–9.
- Assine, M.L., 2007. Bacia do Araripe. Bol. Geociencias da Petrobras 15, 371–389.
- Assine, M.L., Perinotto, J.A. de 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. Bol. Geociencias da Petrobras 22, 3–28.
- Assine, M.L., Quaglio, F., Warren, L.V., Simões, M.G., 2016. Comments on paper by M. Arai “Aptian/Albian (Early Cretaceous) paleogeography of the South Atlantic: a paleontological perspective.” Brazilian J. Geol. 46, 3–7.
- Assumpcao, M., 2018. The regional intraplate stress field in South America. J. Geophys. Res. Solid Earth 97, 11889–11903. <https://doi.org/10.1029/91JB01590>
- Brito Neves, B.B. de, Santos, E.J., Van Schmus, W.R., 2000. Tectonic history of the Borborema province, Northeastern Brazil, in: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filho, A., Campos, D.A. (Eds.), Tectonic Evolution of South America. International Geological Congress, Rio de Janeiro, pp. 151–182.
- Buatois, L.A., Mángano, M.G., 2011. Ichnology: Organism–substrate interactions in space and time. Cambridge University Press.
- Buick, R., Dunlop, J.S.R., Groves, D.I., 1981. Stromatolite recognition in ancient rocks: an appraisal of irregularly laminated structures in an Early Archaean chert-barite unit from

- North Pole, Western Australia. *Alcheringa An Australas. J. Palaeontol.* 5, 161–181. <https://doi.org/10.1080/03115518108566999>
- Cainelli, C., Mohriak, W.U., 1999. Some remarks on the evolution of sedimentary basins along the eastern Brazilian continental margin. *Episodes* 22, 206–216.
- Carmo, D.A. do, Rafael, R.M.L., Vilhena, R.M., Tomassi, H.Z., 2004. Redescricao de *Theriosynoecium silvae* e *Darwinula martinsi*, Membro Crato (Formação Santana), Cretáceo Inferior, Bacia do Araripe, NE, Brasil. *Rev. Bras. Paleontol.* 7, 151–158.
- Castro, D.L., Castelo Branco, R.M.G., 1999. Caracterização da arquitetura interna das bacias do Vale do Cariri (NE do Brasil) com base em modelagem gravimétrica 3-D. *Brazilian J. Geophys.* 17, 129–144.
- Catto, B., Jahnert, R.J., Warren, L.V., Varejao, F.G., Assine, M.L., 2016. The microbial nature of laminated limestones: Lessons from the Upper Aptian, Araripe Basin, Brazil. *Sediment. Geol.* 341, 304–315. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2016.05.007>
- Chaboureaud, A.-C., Donnadieu, Y., Sepulchre, P., Robin, C., Guillocheau, F., Rohais, S., 2012. The Aptian evaporites of the South Atlantic: a climatic paradox? *Clim. Past* 8, 1047–1058. <https://doi.org/10.5194/cp-8-1047-2012>
- Chaboureaud, A.-C., Guillocheau, F., Robin, C., Rohais, S., Moulin, M., Aslanian, D., 2013. Paleogeographic evolution of the central segment of the South Atlantic during Early Cretaceous times: Paleotopographic and geodynamic implications. *Tectonophysics* 604, 191–223. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.08.025>
- Chang, H.K., Kowsmann, R.O., Figueiredo, A.M.F., 1988. New Concepts on the Development of East Brazilian Marginal Basins. *Episodes*. <https://doi.org/http://0-dx.doi.org.athenea.upo.es/10.1108/CCIJ-04-2014-0025>
- Chang, H.K., Kowsmann, R.O., Figueiredo, A.M.F., Bender, A.A., 1992. Tectonics and stratigraphy of the East Brazil Rift system: an overview. *Tectonophysics* 213, 97–138. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90253-3](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90253-3)
- Coblentz, D.D., Richardson, R.M., 1996. Analysis of the South American intraplate stress field. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 101, 8643–8657. <https://doi.org/10.1029/96JB00090>
- Cogné, N., Gallagher, K., Cobbold, P.R., Riccomini, C., Gautheron, C., 2012. Post-breakup tectonics in southeast Brazil from thermochronological data and combined inverse-forward thermal history modeling. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 117. <https://doi.org/10.1029/2012JB009340>

- Coimbra, J.C., Arai, M., Carreño, A.L., 2002. Biostratigraphy of Lower Cretaceous microfossils from the Araripe basin, northeastern Brazil. *Geobios* 35, 687–698. [https://doi.org/10.1016/S0016-6995\(02\)00082-7](https://doi.org/10.1016/S0016-6995(02)00082-7)
- Demicco, R. V, Hardie, L.A., 1999. Sedimentary Structures and Early Diagenetic Features of Shallow Marine Carbonate Deposits. SEPM Atlas Series Number 1, Tulsa, Oklahoma, USA.
- Dunham, R.J., 1962. Classification of Carbonate Rocks According to Depositional Texture, in: Ham, W.E. (Ed.), *Classification of Carbonate Rocks - A Symposium*. American Association of Petroleum Geologists, pp. 108–121.
- Embry, A.F., Klován, E., 1971. A Late Devonian Reef Tract on Northeastern Banks Island, N.W.T. *Bull. Can. Pet. Geol.* 19, 730–781.
- Fairchild, T.R., Sanchez, E.A.M., 2015. Microbialitos no Brasil: panorâmica de ocorrências e guia de caracterização morfológica, in: Fairchild, T.R., Rohn, R., Dias-Brito, D. (Eds.), *Microbialitos Do Brasil Do Pré-Cambriano Ao Recente: Um Atlas*. UNESP-IGCE-UNESPetro, Rio Claro, pp. 23–41.
- Freitas, B.T., Almeida, R.P., Carrera, S.C., Figueiredo, F.T., Turra, B.B., Varejão, F.G., Assine, M.L., 2017. Aptian sedimentation in the Recôncavo-Tucano-Jatobá Rift System and its tectonic and paleogeographic significance. *Journal of South American Earth Sciences* 80, 460–481. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.10.001>
- Gratzer, R., Neumann, V.H., Vortisch, W., Rocha, D.E.A., Bechtel, A., 2013. Stable isotopes of organics and inorganics, clay mineralogy and chemical environment of an Aptian lacustrine succession in northeastern Brazil. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* 382, 157 LP-183.
- Heimhofer, U., Ariztegui, D., Lenniger, M., Hesselbo, S.P., Martill, D.M., Rios-Netto, A.M., 2010. Deciphering the depositional environment of the laminated Crato fossil beds (Early Cretaceous, Araripe Basin, North-eastern Brazil). *Sedimentology* 57, 677–694. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2009.01114.x>
- Japsen, P., Bonow, J.M., Green, P.F., Cobbold, P.R., Chiossi, D., Lilletveit, R., Magnavita, L.P., Pedreira, A., 2012. Episodic burial and exhumation in NE Brazil after opening of the South Atlantic. *GSA Bull.* 124, 800–816.
- Koutsoukos, E.A.M., Mello, M.R., Azambuja Filho, N.C., Hart, M.B., Maxwell, J.R., 1991. The Upper Aptian-Albian Succession of the Sergipe Basin, Brazil: An Integrated Paleoenvironmental Assessment. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.* 75, 479–498.

- Magnavita, L.P., Davison, I., Kuszniir, N.J., 1994. Rifting, erosion, and uplift history of the Recôncavo-Tucano-Jatobá Rift, northeast Brazil. *Tectonics* 13, 367–388. <https://doi.org/10.1029/93TC02941>
- Marques, F.O., Nogueira, F.C.C., Bezerra, F.H.R., de Castro, D.L., 2014. The Araripe Basin in NE Brazil: An intracontinental graben inverted to a high-standing horst. *Tectonophysics* 630, 251–264. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.05.029>
- Marques, F.O., Moulin, M., 2011. Arm wrestling between two mountains: Andes and Mid-Atlantic Ridge, in: *Geophysical Research Abstracts*. EGU General Assembly, Viena, Austria, p. 1.
- Martill, D.M., Bechly, G., Loveridge, R.F., 2007. *The Crato Fossil Beds of Brazil: Window into an Ancient World*. Cambridge University Press.
- Martill, D.M., Loveridge, R., Heimhofer, U., 2007. Halite pseudomorphs in the Crato Formation (Early Cretaceous, Late Aptian–Early Albian), Araripe Basin, northeast Brazil: further evidence for hypersalinity. *Cretac. Res.* 28, 613–620. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cretres.2006.10.003>
- Matos, R.M.D., 1992. The Northeast Brazilian Rift System. *Tectonics* 11, 766–791. <https://doi.org/10.1029/91TC03092>
- Miall, A.D., 1974. Paleocurrent analysis of alluvial sediments; a discussion of directional variance and vector magnitude. *J. Sediment. Res.* 44, 1174–1185.
- Miall, A.D., 1996. *The geology of fluvial deposits: sedimentary facies, basin analysis and petroleum geology*. Springer-Verlag, Heidelberg, 582 p.
- Milani, E.J., Rangel, H.D., Bueno, G. V, Stica, J.M., Winter, W.R., Caixeta, J.M., Pessoa Neto, O.C., 2007. Brazilian Sedimentary Basins - Stratigraphic Charts: Introduction. *Bol. Geociencias da Petrobras* 15, 199–205.
- Morais Neto, J.M., Hegarty, K.A., Karner, G.D., Alkimin, F.F., 2009. Timing and mechanisms for the generation and modification of the anomalous topography of the Borborema Province, northeastern Brazil. *Mar. Pet. Geol.* 26, 1070–1086.
- Morales, N., Assine, M.L., 2015. Chapada Do Araripe: A Highland Oasis Incrusted into the Semi-arid Region of Northeastern Brazil BT - *Landscapes and Landforms of Brazil*, in: Vieira, B.C., Salgado, A.A.R., Santos, L.J.C. (Eds.), . Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 231–242. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8023-0_21
- Moulin, M., Aslanian, D., Unternehr, P., 2010. A new starting point for the South and Equatorial Atlantic Ocean. *Earth-Science Rev.* 98, 1–37. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.08.001>

- Neumann, V.H., Borrego, A.G., Cabrera, L., Dino, R., 2003. Organic matter composition and distribution through the Aptian-Albian lacustrine sequences of the Araripe Basin, northeastern Brazil. *Int. J. Coal Geol.* 54, 21–40. [https://doi.org/10.1016/S0166-5162\(03\)00018-1](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(03)00018-1)
- Neumann, V.H., 1999. Estratigrafia, Sedimentologia, Geoquímica y Diagénesis de los Sistemas Lacustres Aptiense-Albienses de la Cuenca de Araripe (Noreste de Brasil). Universitat de Barcelona.
- Neumann, V.H., Rocha, D.E.G.A., 2014. Stratigraphy of the Post-Rift Sequences of the Jatobá Basin, Northeastern Brazil BT - STRATI 2013, in: Rocha, R., Pais, J., Kullberg, J.C., Finney, S. (Eds.), Springer International Publishing, Cham, pp. 553–557.
- Owen, G., Moretti, M., 2011. Identifying triggers for liquefaction-induced soft-sediment deformation in sands. *Sedimentary Geology* 235, 141–147. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2010.10.003>
- Ponte, F.C., Ponte-Filho, F.C., 1996. Estrutura geológica e evolução tectônica da Bacia do Araripe. Recife.
- Ponte-Filho, F.C., Dauzacker, M. V, Porto, R., 1978. Origem e acumulação de petróleo nas bacias sedimentares sobre as Bacia do Tucano e Jatobá, nordeste do Brasil. *Bol. Geociencias da Petrobras* 1, 119–134.
- Posamentier, H.W., Jervey, M.T., Vail, P.R., 1988. Eustatic controls on clastic deposition I - conceptual framework, in: Wilgus, C.K., Hastings, B.S., Posamentier, H., Van Wagoner, J., Ross, C.A., Kendall, C.G.S.C. (Eds.), *Sea-Level Changes - An Integrated Approach*. SEPM Special Publication No. 42.
- Riding, R., 2002. Microbial carbonates: the geological record of calcified bacterial–algal mats and biofilms. *Sedimentology* 47, 179–214. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2000.00003.x>
- Santos, M.E.C.M., 1982. Ambiente deposicional da Formação Santana - Chapada do Araripe (PE/PI/CE), in: *Anais Do XXXII Congresso Brasileiro de Geologia*. Salvador, Bahia, Brazil, pp. 1413–1426.
- Selley, R.C., 1982. *Introduction to Sedimentology*, 2nd ed. Academic Press Inc.
- Silva Santos, R., 1947. Uma redescritção de *Dastilbe enlongatus* com algumas considerações sobre o gênero *Dastilbe*. *Div. Geol. e Mineral. Notas Prelim. e Estud.* 42, 1–7.
- Silva, M.A.M. da, 1986. Lower Cretaceous unconformity truncating evaporite-carbonate sequence, Araripe Basin, Northeast Brazil. *Rev. Bras. Geociências* 16, 306–310.

- Taylor, A.M., Goldring, R., 1993. Description and analysis of bioturbation and ichnofabric. *J. Geol. Soc. London*. 150, 141–148.
- Tedeschi, L.R., Jenkyns, H.C., Robinson, S.A., Sanjinés, A.E.S., Viviers, M.C., Quintaes, C.M.S.P., Vazquez, J.C., 2017. New age constraints on Aptian evaporites and carbonates from the South Atlantic: Implications for Oceanic Anoxic Event 1a. *Geology* 45, 543–546.
- Vail, P.R., Mitchum Jr., R.M., 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*. AAPG Memoir.
- Van Wagoner, J.C., Posamentier, H.W., Mitchum Jr., R.M., Vail, P.R., Sarg, J.F., Loutit, T.S., Hardenbol, J., 1988. An Overview of the Fundamentals of Sequence Stratigraphy and Key Definitions, in: Wilgus, C.K., Hastings, B.S., Posamentier, H.W., Van Wagoner, J., Ross, C.A., Kendall, C.G.S.C. (Eds.), *Sea-Level Changes: An Integrated Approach*. SEPM Special Publication No. 42.
- Varejão, F.G., Warren, L.V., Perinotto, J.A. de J., Neumann, V.H., Freitas, B.T., Almeida, R.P. de, Assine, M.L., 2016. Upper Aptian mixed carbonate-siliciclastic sequences from Tucano Basin, Northeastern Brazil: Implications for paleogeographic reconstructions following Gondwana break-up. *Cretac. Res.* 67, 44–58. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2016.06.014>
- Walker, R.G., James, N.P., 1992. *Facies Models: response to sea level change*. Geological Association of Canada, Ontario, Canada.
- Warren, L.V., Varejão, F.G., Quaglio, F., Simões, M.G., Fürsich, F.T., Poiré, D.G., Catto, B., Assine, M.L., 2017. Stromatolites from the Aptian Crato Formation, a hypersaline lake system in the Araripe Basin, northeastern Brazil. *Facies* 63(3). <https://doi.org/10.1007/s10347-016-0484-6>

VI. CONCLUSÕES

Na presente tese foi abordada de forma integrada a sedimentação mista carbonática-siliciclástica aptiana da Formação Crato, tendo como meta: (1) caracterizar a arquitetura deposicional e a evolução paleogeográfica da unidade; (2) identificar e interpretar os controles na sedimentação mista; (3) estabelecer critérios de correlação nas diferentes áreas de ocorrência da unidade; (4) estudar a gênese dos calcários laminados do intervalo Konservat-Lagerstätte; e (5) identificar os controles de preservação fossilífera excepcional.

A Formação Crato das bacias do Araripe, Jatobá e Tucano Norte, destaca-se pela deposição de microbialitos e evaporitos análogos aos que ocorrem no Pré-Sal. O intervalo dos calcários laminados portadores de fósseis excepcionalmente bem preservados (*Konservat-Lagerstätte*) apresenta evidências contundentes que atestam para mineralização microbialmente induzida e/ou influenciada. As diversas morfologias de microbialitos descritas, tais como domos, mounds, *MISS*, estromatólitos e oncóides, são elementos característicos de sistema lacustre restritos (com *input* reduzido de terrígenos), de águas calmas e rasas, com alta salinidade, e possivelmente deficientes em oxigênio. A descoberta de cianobactérias cocóides, filamentosas e espiraladas, e de mucilagem secretada por metabolismo de bactérias (*EPS*), corroboram a interpretação de que os calcários laminados portadores de fósseis com tecidos moles preservados, tenham grande influência de atividade microbiana. O paleoambiente restrito e extremo foi essencial, portanto, para a proliferação de esteiras microbianas e para a preservação excepcional dos restos orgânicos, incluindo no nível celular.

A descoberta de microbialitos no intervalo do *Konservat-Lagerstätte* inaugura, dessa forma, importante linha de pesquisa no que tange ao papel direto, ou indireto, de comunidades microbianas na preservação fossilífera. O estudo detalhado do modo de preservação da assembleia fossilífera da Formação Crato revelou a importante ação das esteiras microbianas na proteção contra degradação física e biológica dos restos orgânicos por constituir o ambiente de permineralização adequado, promovendo a preservação de tecidos moles de maneira excepcional. Nesse contexto, o sepultamento microbial é descrito pela primeira vez para a Formação Crato. Ressalta-se que esse processo difere bastante do modelo de *death mask* proposto para organismos Ediacaranos e constitui um novo mecanismo de preservação de assembleias fossilíferas excepcionais.

Os resultados obtidos nesta tese suportam interpretação de deposição lacustre para o intervalo de preservação fossilífera, porém a história deposicional da sucessão como um todo é bastante complexa. Durante a deposição da Formação Crato, o nível do mar estava em ascensão

e a atividade tectônica da fase rifte ainda estava em etapa de arrefecimento. Estratos tipicamente marinhos foram reconhecidos logo acima do intervalo do *Konservat-Lagerstätte* e constituem uma camada de lamitos ricos em gastrópodes e bivalves marinhos / salobros (Bruno & Hessel, 2006; Silva et al., 2017). Este nível estratigráfico bem delimitado é registrado em intervalo definido que se estende por dezenas de quilômetros, marcando também o nível de máxima inundação marinha na Formação Crato. Essa é a evidência mais antiga de ingresso marinha no Cretáceo das bacias interiores do Nordeste do Brasil e representa importante implicação no que se refere aos aspectos paleogeográficos, paleoclimáticos e paleoecológicos.

Durante a fase regressiva da Formação Crato, sistemas de sabkha costeiros são descritos acima dos depósitos dominados por maré (incluindo os lamitos com moluscos). Nestes sabkhas, predominou a deposição de calcários laminados intercalados a folhelhos com feições eodiagenéticas típicas de ambientes de alta evaporação (nódulos carbonáticos, contração de camadas por cristalização salina e precipitação tardia de sais). Estruturas *loop bedding* ocorrem em abundância nos laminitos em associação direta com gretas de sinérese produzidas por diferentes estágios de cristalização de gipsita. Em ambientes com alta salinidade, a cristalização de sais e sulfatos no sedimento inconsolidado causa aumento no volume do sedimento, produzindo compressão e distensão nos planos do acamamento sedimentar, originando o *loop bedding*. Estas estruturas são usualmente observadas em sedimentos finamente laminados e não litificados lacustres a marinhos e são relacionadas a deformação sinsedimentar produzidas por atividade sísmica. No entanto, a relação morfológica entre *loop bedding* e feições tipicamente evaporíticas geradas, portanto, sem nenhuma ação direta de sismicidade concomitante à sedimentação, sugere origem não tectônica para estas estruturas.

No topo da Formação Crato, a formação de calcários laminados com sinal isotópico tipicamente lacustre evidencia retorno de sedimentação tipicamente continental que transiciona para os depósitos francamente evaporíticos da Formação Ipubi. Como anteriormente citado, a grande variação de espessura, e o padrão arquitetural diverso no qual se organizam as diferentes associações verticais de facies descritas (e respectivos sistemas deposicionais) na unidade dificulta seu pleno entendimento quando esta é analisada em exposições localizadas. Deste modo, técnicas de correlação estratigráfica são fundamentais, tal como a construção de curvas isotópicas de C e O aliadas a curvas de variação de palinomorfos (autóctones x alóctones). Este procedimento foi essencial na correlação dos diferentes intervalos carbonáticos da unidade em suas diversas áreas de ocorrência e na comparação dos valores obtidos com aqueles conhecidos para o oceano aptiano. Os dados isotópicos apontam para deposição carbonática não-marinha

associada a alta quantidade de matéria orgânica amorfa, separada por intervalos siliciclásticos marinhos costeiros rasos onde prevalece a ocorrência de fitoclastos. Dessa forma, as curvas isotópicas e de palinomorfos permitiram delimitar precisamente e identificar a extensão dos eventos transgressivos-regressivos, possibilitando uma análise integrada entre a estratigrafia e a paleogeografia. Finalmente, Formação Crato constitui importante registro da extensão da sucessão evaporítica transicional das bacias marginais no interior do nordeste do Brasil e constitui um excelente análogo aos depósitos do Pré-Sal.