

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**EVOLUÇÃO DIAGENÉTICA E HETEROGENEIDADE DOS
RESERVATÓRIOS DO CARBONÍFERO NA ÁREA DE
JURUÁ, BACIA DO SOLIMÕES**

ELIAS CEMBRANI DA ROCHA

ORIENTADOR - Prof. Dr. Luiz Fernando De Ros

Porto Alegre, 2021

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**EVOLUÇÃO DIAGENÉTICA E HETEROGENEIDADE DOS
RESERVATÓRIOS DO CARBONÍFERO NA ÁREA DE
JURUÁ, BACIA DO SOLIMÕES**

ELIAS CEMBRANI DA ROCHA

ORIENTADOR - Prof. Dr. Luiz Fernando De Ros

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Amanda Goulart Rodrigues – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dr. Anderson José Maraschin – Instituto do Petróleo e dos Recursos Minerais, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Elírio Ernestino Toldo Júnior - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dissertação de Mestrado apresentada
como requisito parcial para a obtenção
do Título de Mestre em Geociências.

Porto Alegre, 2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Carlos André Bulhões Mendes

Vice Reitora: Patricia Pranke

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Diretor: Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Vice-Diretor: Tatiana Silva da Silva

CIP - Catalogação na Publicação

Cembrani da Rocha, Elias
EVOLUÇÃO DIAGENÉTICA E HETEROGENEIDADE DOS
RESERVATÓRIOS DO CARBONÍFERO NA ÁREA DE JURUÁ, BACIA
DO SOLIMÕES / Elias Cembrani da Rocha. -- 2021.
90 f.
Orientador: Luiz Fernando De Ros.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa
de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, BR-RS,
2021.

1. Depósitos eólicos costeiros. 2. Diagênese. 3.
Argilas autigênicas. 4. Qualidade de reservatório. 5.
Heterogeneidades. I. De Ros, Luiz Fernando, orient.
II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Campus do Vale - Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia
Porto Alegre – RS – Brasil.
CEP: 91501 – 970 / Caixa Postal: 15001
Telefone: +55 51 3308-6329; Fax: +55 51 33086337
E-mail: ensinoppggeo@ufrgs.br;

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Luiz Fernando De Ros, por todos os ensinamentos e oportunidades de desenvolver pesquisas como parte de seu grupo.

Ao professor Claiton Scherer, pelos ensinamentos, ajuda e participação no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus colegas de pesquisa Matheus Schirmbeck, Mariane Trombetta, Argos Schrank, Kenji Lacerda, Garibaldi Armelenti, Sabrina Altenhofen, André Schilling, Carrel Kifumbi, Bruno Angonese e William Freitas pela amizade, companhia e suporte a este trabalho, realizado durante a pandemia do COVID-19.

Aos meus colegas do Laboratório de Sedimentologia e Petrologia do Instituto do Petróleo e Recursos Naturais pela parceria na última fase de escrita do trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro.

À Petrobras pela disponibilização do material e permissão para a publicação dos resultados obtidos.

À minha família e amigos, que sempre me apoiaram em meus estudos e me ajudaram a superar todos os desafios que encontrei.

RESUMO

A Formação Juruá do Carbonífero representa os melhores reservatórios da vasta Bacia do Solimões, região oeste da Amazônia, norte do Brasil. Um estudo integrado petrológico-sedimentológico dos depósitos Juruá na área do Campo de Juruá permitiu a identificação dos principais processos diagenéticos e seu impacto na qualidade e heterogeneidade dos reservatórios. O intervalo foi depositado em ambiente costeiro sob clima árido e em um trato de sistema transgressivo. Quatro associações de fácies foram identificadas: dunas eólicas e lençóis de areia; canais fluviais e depósitos de overbank; frente deltaica e prodelta; e lagunar, incluindo depósitos do tipo sabkha. Os corpos arenosos que constituem os reservatórios variam em espessura e continuidade lateral. A porosidade primária foi controlada pelas fácies, sendo os depósitos de dunas e lençóis de areia eólicos, frente deltaica e de canais fluviais os mais porosos. A diagênese exerceu controle sobre a qualidade dos reservatórios através da preservação ou redução da porosidade por compactação e cimentação. A composição primária dos arenitos corresponde principalmente a arcósios e arcósios líticos. Quartzo é o cimento mesodiagenético mais volumoso, principalmente na forma de crescimentos descontínuos, limitados por franjas e cutículas de clorita. A transformação e neoformação de argilominerais foram extensas nos arenitos do Juruá e resultaram em illita, clorita e camadas mistas I/S e C/S. O cobrimento de grãos por illita-esmectita é a fase mais comum, sendo mais espesso nos arenitos deltaicos. Illita fibrosa intergranular causou redução da permeabilidade em alguns arenitos eólicos e fluviais. Clorita em feixes preencheu poros nos arenitos deltaicos, enquanto franjas e cutículas de clorita preservaram a porosidade da maioria dos arenitos eólicos, que constituem os melhores reservatórios da área. Essas observações podem ajudar a compreender e prever a distribuição da qualidade e heterogeneidades dos reservatórios Juruá e de sucessões costeiras-eólicas similares, de modo a reduzir os riscos exploratórios e melhorar a recuperação de campos produtores.

Palavras-chave: Depósitos eólicos costeiros; Diagênese; Argilas autigênicas; Qualidade de reservatório; Heterogeneidades.

ABSTRACT

The Carboniferous Juruá Formation represents the best reservoirs of the vast Solimões Basin, western Amazon region, northern Brazil. The study of these deposits in the Juruá Field area allowed the identification of the main diagenetic processes and their role in the reservoirs' quality and heterogeneity. The interval was deposited at a coastal setting, under an arid climate and within a transgressive system tract. Four facies associations were identified: eolian dunes and sand sheets; fluvial channel and overbank deposits; delta front and prodelta; and lagoonal, including sabkha deposits. The thickness and lateral continuity of the sand bodies that constitute the reservoirs varies among these environments. Depositional facies controlled primary porosity, with eolian dunes and sand sheets, delta front and fluvial channel deposits representing the most porous facies. Diagenesis controlled reservoir quality through the preservation or reduction of porosity by compaction and cementation. The primary composition of the sandstones corresponds mostly to arkoses and lithic arkoses. Quartz was the main mesodiagenetic cement, mainly as discontinuous overgrowths limited by chlorite coatings. Clay transformation and neoformation were extensive in the Juruá sandstones and resulted in illite, chlorite, illite-smectite and chlorite-smectite mixed-layers. Illite-smectite coatings are common and thick in the deltaic sandstones. Pore-filling chlorite occurs mostly in the deltaic sandstones, while chlorite coatings preserved the porosity of most eolian sandstones, which constitute the best reservoirs in the area. Intergranular fibrous illite reduced the permeability of some eolian and fluvial sandstones. These observations may help to understand and predict the distribution of quality and heterogeneities of the Juruá reservoirs and similar coastal-eolian successions, reduce exploration risks and improve the hydrocarbon recovery from producing fields.

Keywords: Coastal eolian deposits; Diagenesis; Clay authigenesis; Reservoir quality; Heterogeneity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de localização da Bacia do Solimões. Na sub-bacia do Juruá, a área de estudo (área do Juruá) é apresentada em destaque.....	16
Figura 2 – Carta cronoestratigráfica da Bacia do Solimões (Wanderley Filho <i>et al.</i> , 2007).....	21
Figura 3 - Evolução diagenética de arenitos eólicos, não eólicos e dolocretes da Formação Juruá na área de Urucu (de Elias <i>et al.</i> , 2004).....	24
Figura 4 - História de soterramento, evolução térmica e diagenética de reservatórios do leste do Campo de Urucu (de Elias <i>et al.</i> , 2006).....	27
Figura 5 - Diagrama composicional Folk (1968, acima) e de proveniência Dickinson (1985, abaixo) para as amostras estudadas.	38

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	12
3	MATERIAIS E MÉTODOS	13
	<i>3.1 Levantamento bibliográfico</i>	13
	<i>3.2 Petrografia quantitativa</i>	13
	<i>3.3 Fotomicrografias</i>	14
	<i>3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura</i>	14
	<i>3.5 Integração de dados</i>	15
4	ÁREA DE ESTUDO E CONTEXTO GEOLÓGICO	15
	<i>4.1 Localização da Bacia do Solimões</i>	16
	<i>4.2 Características gerais da bacia</i>	16
	<i>4.3 Evolução tectônica e litoestratigráfica da Bacia</i>	17
	4.3.1 Rife	17
	4.3.2 Sinéclises	18
	<i>4.4 Formação Juruá</i>	22
5	ESTADO DA ARTE: DIAGÊNESE EM ARENITOS EÓLICOS E DEPÓSITOS ASSOCIADOS	28
	<i>5.1 Controles</i>	28
	<i>5.2 Principais processos e produtos</i>	30
	<i>5.3 Padrões de evolução paragenética</i>	32
	<i>5.4 Impacto sobre a qualidade dos reservatórios</i>	33
	5.4.1 Grupo Rotliegend	33
	5.4.2 Formação Norphlet	34
6	SÍNTESE DOS RESULTADOS E INTERPRETAÇÕES	35

7	CONCLUSÕES	39
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
9	ARTIGO SUBMETIDO	48
1.	Introduction	51
2.	Geological Setting	51
3.	Methodology	54
4.	Facies analysis and stratigraphic framework	54
	<i>4.1. Facies and facies analysis</i>	<i>55</i>
	4.1.1. Eolian dunes and sand sheet facies association	55
	4.1.2. Fluvial channel and overbank deposits facies association	56
	4.1.3. Deltaic facies association	57
	4.1.4. Lagoonal facies association	60
	<i>4.2. Stratigraphy</i>	<i>61</i>
5.	Primary texture and composition of the sandstones	63
6.	Associated lithologies	65
7.	Diagenetic constituents	66
	<i>7.1. Silicates</i>	<i>66</i>
	<i>7.2. Sulfates</i>	<i>69</i>
	<i>7.3. Carbonates</i>	<i>71</i>
	<i>7.4. Fe and Ti oxides</i>	<i>73</i>
	<i>7.5. Other diagenetic constituents</i>	<i>73</i>
8.	Porosity and compaction	74
9.	Discussion	75

9.1. <i>Depositional environments and stratigraphy of the Juruá Formation</i>	75
9.2. <i>Diagenetic Evolution</i>	76
9.2.1. Eodiagenesis	77
9.2.2. Mesodiagenesis	79
9.2.3. Telodiagenesis	80
9.3. <i>Reservoir quality and heterogeneities</i>	81
10. Conclusions	83
10 ANEXOS	89

ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação de mestrado está estruturada em torno do artigo “Diagenetic evolution, reservoir quality and heterogeneity of Carboniferous coastal eolian-fluvial-deltaic deposits of the Juruá area, Solimões Basin, northern Brazil”, submetido ao periódico *Gondwana Research*. Consequentemente, sua organização compreende as seguintes partes principais:

- a) Introdução sobre o tema e descrição do objeto da pesquisa de mestrado, onde estão sumarizados os objetivos, localização e geologia da área de pesquisa, o estado da arte sobre o tema de pesquisa e a metodologia aplicada no estudo.
- b) Síntese dos resultados obtidos e interpretações decorrentes da análise dos dados.
- c) Artigo intitulado “Diagenetic evolution, reservoir quality and heterogeneity of Carboniferous coastal eolian-fluvial-deltaic deposits of the Juruá area, Solimões Basin, northern Brazil “, submetido ao periódico *Gondwana Research* (Qualis A1) e escrito pelo autor durante o desenvolvimento deste Mestrado.
- d) Anexos, compreendendo:
 1. Planilha em formato excel contendo o resultado das descrições de lâminas que foram quantificadas.
 2. Perfis integrados dos poços em formato PDF.
 3. Resultados obtidos em análises por EDS e imagens dos pontos analisados por MEV.

1 INTRODUÇÃO

Arenitos eólicos são importantes reservatórios de hidrocarbonetos em muitas bacias do mundo. A evolução diagenética de depósitos eólicos recebeu diversos estudos detalhados nos últimos quarenta anos devido à complexidade dos sistemas geoquímicos atuantes e ao impacto dos processos diagenéticos sobre a qualidade e a produção de hidrocarbonetos desses reservatórios, especialmente em depósitos costeiros (e.g., Mankiewicz e Steidtmann, 1979; Dixon *et al.*, 1989; Torres e Truckenbrodt, 1990; Elias *et al.*, 2007; Ajdukiewicz *et al.*, 2010). No Brasil, os arenitos carboníferos da Formação Juruá, Bacia do Solimões, contém as mais importantes acumulações *onshore* de gás do país. No Campo de Juruá, situado mais de 700 km a oeste de Manaus, cerca de 26 bilhões de m³ de gás estão contidos nos reservatórios do intervalo (ANP, 2016). A Formação Juruá compreende arenitos, lutitos, evaporitos e dolomitos e foi depositada em um ambiente transicional eólico costeiro-marinho, sendo os arenitos eólicos os melhores reservatórios (Elias *et al.*, 2004). No entanto, sua evolução diagenética altamente complexa afeta a produção de hidrocarbonetos. Estudos petrológicos da Formação Juruá no Campo de Urucu, localizado 110 km a oeste do Campo de Juruá, revelaram que os processos diagenéticos, fácies deposicionais e contexto estratigráfico, controlam a qualidade e a heterogeneidade dos reservatórios (Elias *et al.*, 2004). Dessa forma, pretendeu-se nesse estudo aplicar técnicas de petrografia e sedimentologia para a caracterização dos reservatórios da Formação Juruá, assim como identificação das heterogeneidades presentes na unidade, visando reduzir riscos de exploração e contribuir com o desenvolvimento do campo de Juruá e de outros reservatórios análogos no mundo.

2 OBJETIVOS

Este estudo tem como objetivo principal entender o impacto da diagênese sobre a qualidade e a heterogeneidade dos arenitos da Formação Juruá na área de Juruá através do estudo dos processos e produtos diagenéticos, suas relações com

a composição primária, fácies e ambientes deposicionais, e com unidades e limites estratigráficos, visando contribuir para o aumento da produção nestes reservatórios.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada compreendeu as seguintes etapas: revisão bibliográfica, análise petrográfica, documentação fotomicrográfica, microscopia eletrônica de varredura, e interpretação integrada com dados sedimentológicos e estratigráficos.

3.1 Levantamento bibliográfico

O levantamento bibliográfico compreendeu a compilação de artigos e dados sobre a Bacia do Solimões, com enfoque na Formação Juruá. Também foi feita uma revisão sobre importantes reservatórios eólicos de outras partes do mundo que compreendam possíveis sistemas análogos. Esse conjunto de informações foi utilizado como base para discutir as particularidades do intervalo de estudo deste trabalho.

3.2 Petrografia quantitativa

Foram descritas e analisadas 96 lâminas delgadas de sete poços testemunhados na área do Campo de Juruá e de um poço à leste do campo. As análises petrográficas foram realizadas de forma sistemática com auxílio de microscópios de luz polarizada com *charriot*, e do *software* Petroledge© (De Ros *et al.*, 2007).

As lâminas foram preparadas de amostras impregnadas com resina epoxy tingida na cor azul para facilitar a observação da porosidade. Os carbonatos foram tingidos utilizando uma solução de Alizarina e Ferrocianeto de Potássio, como forma de identificar sua composição mineralógica e elementar (Tucker, 1988). A calcita (CaCO_3) é tingida de rosa a vermelho, enquanto a calcita ferrosa $(\text{Ca,Fe})\text{CO}_3$ é tingida em tons violáceos a roxos. A dolomita sem ferro $(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2)$ e a siderita

(FeCO₃) não tingem, enquanto dolomita ferrosa e anquerita são tingidas em tons azulados.

Lutitos, evaporitos e carbonatos do intervalo foram avaliados qualitativamente, e os volumes de seus constituintes foram estimados visualmente. A descrição dos arenitos da Formação Juruá foi executada através da contagem de 300 pontos por lâmina, distribuídos segundo transversas perpendiculares à laminação ou orientação dos grãos, sendo a descrição dos constituintes primários realizada de acordo com o método Gazzi-Dickinson (Zuffa, 1985). O método consiste na contagem e identificação de grãos ou cristais maiores que o tamanho silte (> 0,0625 mm) individualmente, mesmo quando esses ocorrerem dentro de fragmentos de rocha, de forma que apenas fragmentos líticos de textura fina (como fragmentos de rochas ígneas afaníticas, metamórficas de baixo grau, ou pelitos e rochas sedimentares microcristalinas) são contados como tal.

As amostras siliciclásticas quantificadas foram classificadas textural e composicionalmente de acordo com Folk (1968).

3.3 Fotomicrografias

A documentação fotomicrográfica das amostras foi realizada com o auxílio de um microscópio Zeiss AXIO Imager A2 com câmera digital acoplada e do *software* ZEN™ 2011. Foram obtidas fotos digitais das principais feições composicionais primárias, diagenéticas, texturais, estruturais e de macroporosidade das lâminas analisadas.

3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi utilizada de forma complementar à microscopia ótica em algumas lâminas petrográficas. A elevada resolução do método (20 a 50 Å) permite a identificação e investigação de minerais diagenéticos, hábitos, características ou relações paragenéticas de difícil reconhecimento durante a análise petrográfica. As análises por MEV foram realizadas no Laboratório de Geologia Isotópica da Universidade Federal do Rio

Grande do Sul em um microscópio eletrônico da marca JEOL JSM-6610LV com suporte de análises elementares através de um equipamento de EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*) Bruker acoplado. Sete lâminas delgadas foram cobertas por carbono e analisadas por EDS com o intuito de melhor caracterizar argilominerais diagenéticos.

A técnica consiste no bombardeamento das amostras por elétrons emitidos a partir de um canhão com filamento de tungstênio. As amostras utilizadas devem estar cobertas por um material condutivo, como o carbono, de forma que se evite o acúmulo de carga pelos elétrons emitidos na superfície da amostra. Um resultado da interação são os elétrons secundários, que são elétrons de baixa energia refletidos da amostra após interagirem de forma inelástica com a superfície delas, sendo altamente dependentes do relevo. Elétrons primários, ejetados dos minerais pela interação com o feixe eletrônico, permitem visualizar a superfície da amostra na forma de tonalidades monocromáticas correspondentes à média de número atômico dos minerais. Outro resultado dessa interação é a liberação de energia na forma de raios X específicos quando os elétrons que migraram para camadas eletrônicas mais externas retornam a seus orbitais. A energia dos raios X específicos permite a identificação dos elementos e suas respectivas concentrações nos constituintes da amostra através da espectrometria de energia dispersada (EDS) por equipamento acoplado ao microscópio de varredura.

3.5 Integração de dados

As informações petrológicas geradas através da análise petrográfica das amostras foram integradas à perfis de descrição sedimentológica, com informações de fácies deposicionais e de estratigrafia provenientes da descrição e análise de testemunhos dos 7 poços pertencentes ao Campo de Juruá, excluindo-se o poço JOB-1A-AM, localizado a leste do campo. Parte das descrições de testemunho, além de dados de petrofísica de poço, foram fornecidos pela PETROBRAS.

4 ÁREA DE ESTUDO E CONTEXTO GEOLÓGICO

4.1 Localização da Bacia do Solimões

A Bacia do Solimões é localizada ao norte do país, na parte ocidental da Região Amazônica, e corresponde à uma área de cerca de 440.000 km² de forma alongada na direção leste-oeste (Fig. 1). Seus limites geográficos correspondem ao escudo das Guianas ao norte, ao escudo Brasileiro ao sul, ao Arco de Iquitos a oeste, e ao Arco do Purus a leste. Posicionada entre os paralelos 2 ° e 8 ° S e entre os meridianos 62 ° e 72 ° W, a bacia é dividida pelo Arco de Carauari entre as sub-bacias de Jandiatuba, a oeste, e de Juruá, a leste, (Caputo e Silva, 1990).

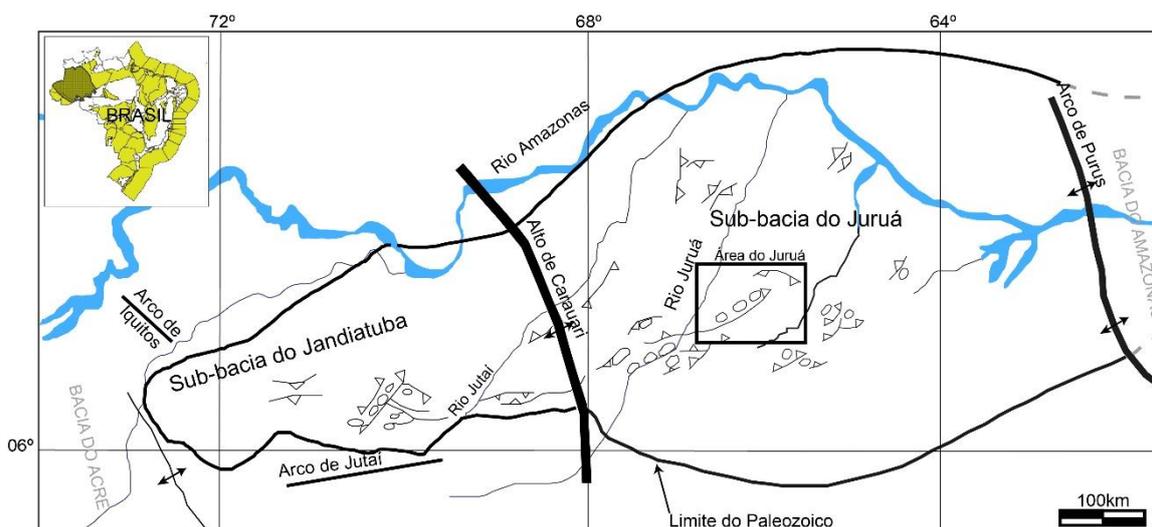


Figura 1 – Mapa de localização da Bacia do Solimões. Na sub-bacia do Juruá, a área de estudo (área do Juruá) é apresentada em destaque (adaptado de Caputo, 2014).

4.2 Características gerais da bacia

A Bacia do Solimões corresponde à uma das grandes áreas sedimentares intracratônicas Paleozóicas do Brasil. As atividades de exploração na bacia começaram no final dos anos 50 através da perfuração de 17 poços pela Petrobras. As primeiras descobertas de hidrocarbonetos datam do final dos anos 70. A bacia mostrou-se prolífica para gás, com descobertas de óleo associadas ou não às

acumulações de gás. Nos anos 80, esse óleo leve e o condensado relacionado começaram a ser produzidos. Em 2019, a produção média diária da Bacia do Solimões foi de 18.553 de bbl de óleo e 15.651 de m³ de gás, constituindo a terceira maior produtora de óleo e gás natural do país, perdendo apenas para as Bacias de Campos e Santos (ANP, 2019).

4.3 Evolução tectônica e litoestratigráfica da Bacia

A evolução tectônica da Bacia do Solimões foi tema de diversos estudos, que propuseram modelos estruturais divergentes e contraditórios (Eiras, 2007). Campos *et al.* (1991) consideram que a bacia teria se originado por rifteamento do continente Gondwana no Ordoviciano, que teria resultado em um regime flexural progressivo de leste a oeste que deu origem à bacia durante a fase de subsidência termomecânica que o sucedeu. Em contraste, Teixeira (2001) associa a origem da bacia à uma fase rifte que teve início ainda no Proterozóico, com a deposição da Formação Prosperança. Entretanto, Wanderley Filho & Costa (1991) argumentam que os sedimentos proterozóicos não corresponderiam à fase rifte da bacia devido à presença de um grande hiato temporal entre as sedimentações do Proterozóico e do Paleozóico, estando inviabilizada a aplicação do modelo rifte-subsidência térmica.

4.3.1 Rifte

Segundo a visão convencional, a fase rifte da bacia se deu no Proterozóico, através do rifteamento do Cráton Amazônico. A bacia do Solimões se desenvolveu na atual Sub-Bacia do Juruá sobre a Província Rio Negro-Juruena, composta por rochas ígneas, metamórficas e metassedimentares, segundo um eixo deposicional de direção NE-SO, e sobre o Cinturão Móvel Rondoniense-San Inácio, de orientação L-O e composto por rochas ígneas e metamórficas, na atual Sub-Bacia do Jandiatuba. Sobre esses substratos Pré-Cambrianos, instalou-se uma fase rifte no Paleoproterozóico que foi preenchida pelos depósitos do Grupo Purus, de idade mesoproterozóica. O Grupo Purus é representado pelos sedimentos depositados

em ambientes fluviais com influência marinha das formações Prosperança, Acari e Prainha (Lopes, 1989).

4.3.2 Sinéclises

As diferentes fases de preenchimento da bacia podem ser visualizadas na Figura 2. Segundo o descrito por Eiras (2007), ao início da deposição das sequências paleozóicas, a região atual da Sub-Bacia do Juruá compreendia uma plataforma estável que se separava por uma charneira (predecessora ao Arco de Carauari) da área do Jandiatuba, que era subsidente. Ao estabelecer-se um regime subsidente na área do Juruá, foram iniciadas as incursões marinhas, que passaram a ser fortemente controladas pelo Arco de Carauari, cuja primeira manifestação como divisor das sub-bacias se deu no Neo-Siluriano, constituindo uma feição proeminente no Meso-Devoniano. O arco exerceu forte controle sobre a sedimentação ordoviciano, siluriano e, de forma menos importante, permocarbonífera (Caputo & Silva, 1990).

Cinco sequências deposicionais paleozóicas de segunda ordem (supersequências deposicionais), limitadas por discordâncias regionais, preenchem a bacia, correspondendo ao: Ordoviciano, Siluriano Superior-Devoniano Inferior, Devoniano Médio-Carbonífero Inferior, Carbonífero Superior-Permiano e Cretáceo Superior-Quaternário (Wanderley Filho *et al.*, 2007). Essas sequências correspondem, na mesma ordem, às unidades litoestratigráficas denominadas Formação Benjamin Constant, Formação Jutaí, Grupo Marimari, Grupo Tefé e Grupo Javari, incluindo-se ainda o Magmatismo Penatecaua de idade Triássica (Fig. 2). A porção basal da sequência Carbonífero-Permiana, representada pela Formação Juruá, corresponde ao intervalo de estudo deste trabalho. Os depósitos paleozóicos da Bacia do Solimões hospedam um importante sistema petrolífero (o *play* Jandiatuba-Juruá), e representam a maior parte do seu preenchimento.

Correspondente à primeira supersequência, a Formação Benjamin Constant (Silva, 1987;1988), que ocorre restrita à Sub-Bacia do Jandiatuba, apresenta idade meso-ordoviciano identificada pela presença de microfósseis do grupo dos

acritarcas (Quadros, 1986), e representa o registro sedimentar mais antigo das bacias paleozóicas brasileiras. A unidade corresponde a depósitos siliciclásticos de ambiente marinho raso a costeiro dominado por ondas, passando gradualmente a um domínio de marés, depositados em *onlap* sobre o flanco oeste do Arco de Caruari durante a primeira transgressão marinha fanerozóica da bacia. Os sedimentos da Formação Benjamin Constant podem ser correlacionados aos sedimentos da Formação Contaya, da Bacia de Ucayali (Quadros, 1988).

A Formação Jutaí (Caputo, 1984) ocorre na Sub-Bacia de Jandiatuba e em *onlap* sobre o Arco de Caruari, sendo limitada acima e abaixo por contatos discordantes. Sua deposição ocorreu devido à novas incursões marinhas de caráter cíclico, direcionadas de oeste para leste, que ocorreram na bacia do Neossiluriano ao início do Devoniano. Os depósitos distais da unidade correspondem a folhelhos, enquanto os depósitos proximais do Membro Biá apresentam composição arenosa, argilosa, e subordinadamente dolomítica (Wanderley Filho *et al.*, 2007). A Formação Jutaí pode ser correlacionada com parte do Grupo Trombetas da Bacia do Amazonas (Eiras *et al.*, 1994).

Os sedimentos do Grupo Marimari foram depositados no Mesodevoniano, a partir de uma nova incursão marinha proveniente do oeste. Esta incursão foi a primeira a ultrapassar o Arco de Caruari, alcançando a área plataformal do Juruá, que passou a subsidir. A unidade, primeiramente proposta por Silva (1987; 1988), é constituída pelas Formações Uerê e Jandiatuba. Sobre o Arco de Carauri e na Sub-Bacia do Juruá ocorreu a deposição dos sedimentos arenosos ricos em espículas de esponjas da Formação Uerê, que se intercalam com sedimentos argilosos, por vezes associados a diamictitos (Membro Jaraqui), da Formação Jandiatuba, cuja deposição foi predominante na Sub-Bacia do Jandiatuba na forma de sedimentos argilosos de contexto marinho relativamente mais profundo. Condições climática frias a periglaciais, interpretadas por Caputo (1984) e Silva (1988), teriam sido responsáveis pela explosão endêmica de espongiários na Formação Uerê através de zonas de ressurgência no flanco oeste do Arco de Caruari. No auge da transgressão, condições de alta anorexia favoreceram a preservação de matéria orgânica em camadas argilosas da Formação Jandiatuba,

que corresponde ao principal gerador da bacia. O final do ciclo Devoniano foi caracterizado por uma regressão, cujo recuo marinho é associado a atuação da Orogênese Eoerciniana (Porsche, 1985; Silva 1988), passando a um longo período de erosão e exposição da bacia.

Durante o Mesocarbonífero, iniciou-se a deposição de sedimentos progradantes do Grupo Tefé, que reúne as Formações Juruá, Carauari e Fonte Boa (Silva, 1987, 1988). Esta fase é caracterizada pela continentalização parcial da Bacia do Solimões e início de um processo de desertificação. A deposição começou com os sedimentos terrígenos basais da Formação Juruá, que corresponde a uma seção arenosa posicionada entre o Grupo Marimari e a base de uma camada de anidrita. A unidade inicia-se com depósitos fluviais e estuarinos, passando a eólicos costeiros com acentuação da influência marinha em direção ao topo da formação. Foi então instaurado o domínio da quarta e última incursão marinha da bacia, a primeira a ultrapassar efetivamente a área do Arco de Purus e interligar as Bacias do Solimões e do Amazonas, resultando no afogamento e retrabalhamento dos amplos depósitos desérticos que se desenvolveram sobre as condições áridas do período. As sedimentações Ordovicianas, Devonianas e Permocarboníferas foram fortemente controladas pelo Alto de Carauari, localizado na zona de sutura entre a Província Rio Negro-Juruena e o Cinturão Rondoniense. Sobreposta à Formação Juruá, ocorre o pacote carbonático-evaporítico da Formação Carauari, formado em lagunas hipersalinas reabastecidos durante pulsos transgressivos sob regime de intensa evaporação. Os evaporitos da Formação Carauari constituem os melhores selos de toda a bacia. A partir do encerramento da grande incursão marinha, ocorreu a continentalização total da bacia e estabelecimento de um ambiente desértico representado pelas *red beds* sílticas com raras lentes de anidrita nodular e calcário da Formação Fonte Boa (Wanderley Filho *et al.*, 2007). A deposição desta sequência foi influenciada por períodos de máxima atuação do Evento Tectônico Jandiatuba, no Pensilvaniano, que limitou a ocorrência de evaporitos à Sub-Bacia do Juruá, gerou basculamento e erosão na Sub-Bacia do Jandiatuba, e resultou no hiato de 10,5 Ma identificado por Becker (1997).

A bacia passou então por um período de exposição e intensa erosão, principalmente da Formação Fonte Boa. Soerguimentos resultantes da Orogenia Eoherciniana e de intrusões de soleiras de diabásio resultaram na predominância de processos erosivos na bacia. Isso resultou na ausência de registro de sedimentação jurotriássica e em uma discordância entre o Paleozóico e o Mesozóico na Bacia. As intrusões ocorreram por volta de 205,7Ma, coincidindo com o evento magmático Penatecaua, correlacionado à abertura do Oceano Atlântico (Wanderley Filho *et al.*, 2007). Os eventos intrusivos ocorreram na área quando ocorreu a maior parte da geração, expulsão, migração e acumulação de hidrocarbonetos (Figueiredo & Milani, 2000). Durante este período, a bacia sofreu esforços compressivos e foi afetada por intenso falhamento e dobramento, resultando na formação de uma zona de falhas transcorrentes e escalonadas denominada Megacisalhamento do Solimões (Caputo, 1985). Este evento resultou no *trend* Juruá, de direção NE-SO, que representa um conjunto de falhas reversas e anticlinais presentes na Província do Juruá.

O retorno do comportamento subsidente da bacia ocorreu no Neocretáceo, quando foram depositados em ambiente continental os sedimentos arenosos da Formação Alter do Chão (Caputo *et al.*, 1972). À esta, sobrepõem-se discordantemente espessos depósitos argilosos de idade paleógena ricos em fósseis vegetais e animais da Formação Solimões. As formações Alter do Chão e Solimões compõem juntas o Grupo Javari (Eiras *et al.*, 1994). Ambas as sequências Cretácea e Terciária foram depositadas em função de subsidência ligada à atividade da Orogenia Andina. No Paleógeno, o soerguimento da cordilheira dos Andes causou flexura na placa litosférica e deslocou o depocentro da sedimentação terciária para a região subandina, em um comportamento correspondente ao de bacias do tipo *foreland*. O soerguimento andino também resultou na implantação de uma bacia de drenagem em direção ao Oceano Atlântico existente a partir do Mioceno, durante a deposição da última sequência da bacia (Eiras, 2007).

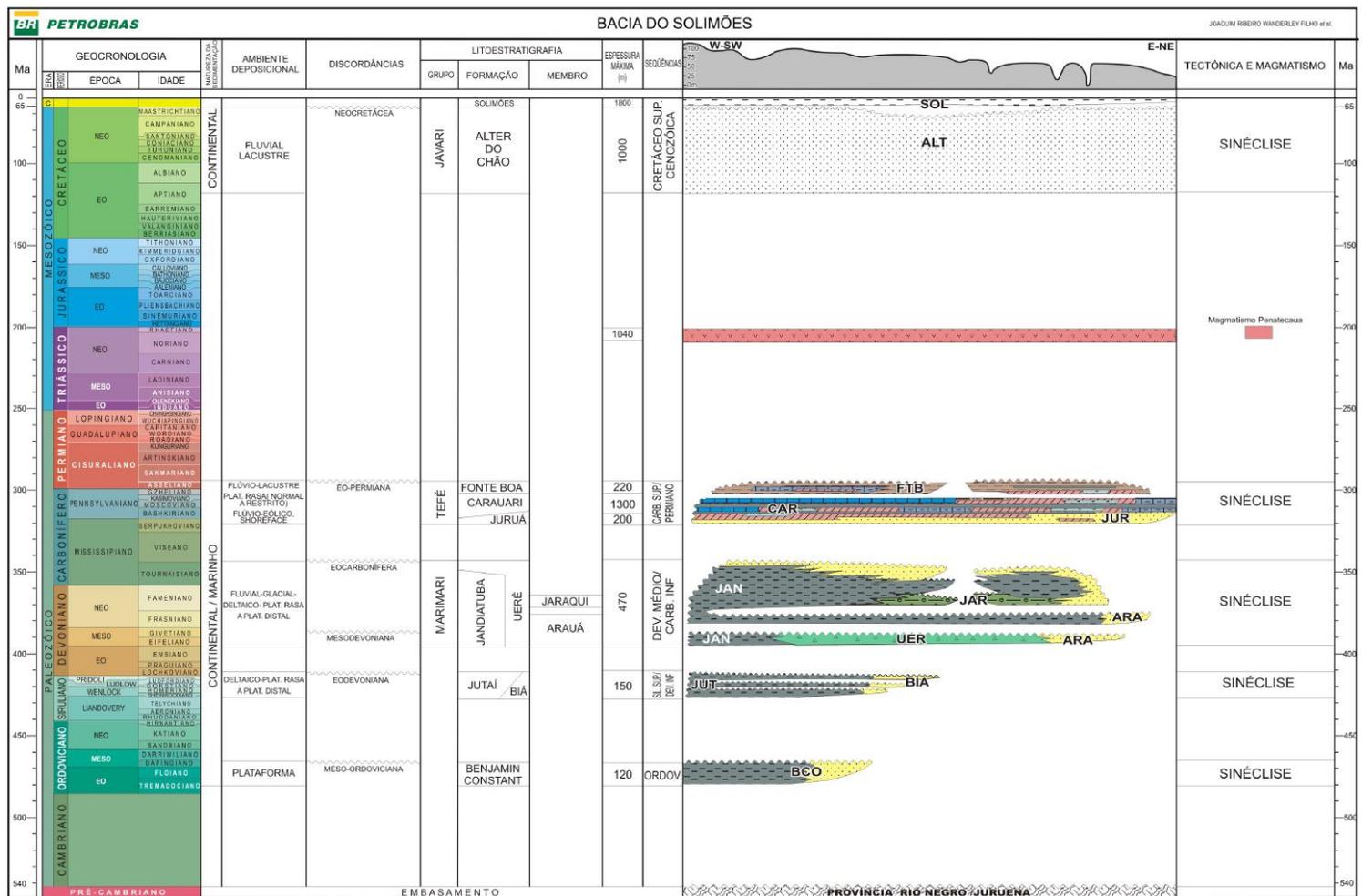


Figura 2 – Carta cronoestratigráfica da Bacia do Solimões (Wanderley Filho *et al.*, 2007).

4.4 Formação Juruá

Os arenitos carboníferos da Formação Juruá, primeiramente definida por Silva (1987) para individualizar uma seção predominantemente arenosa posicionada entre o Grupo Marimari e a base de uma camada de anidrita, representam o maior reservatório de gás e óleo da bacia. A Formação Juruá corresponde aos depósitos terrígenos da porção basal do Grupo Tefé, compreendendo arenitos, folhelhos, evaporitos e calcários depositados em ambiente eólico costeiro com crescente influência marinha (Eiras, 1994). O contato superior da formação é transicional para a Formação Carauari.

A Formação Juruá foi caracterizada na área do Rio Urucu por Cunha *et al.* (1988), que identificaram arenitos subarcósios e sublitarenitos (*sensu* Folk 1974), tendo como áreas-fonte rochas graníticas e metamórficas de alto grau do embasamento, e sedimentos silicosos da Formação Uerê. Cinco fácies sedimentares foram por eles identificadas, compreendendo: dunas eólicas, interdunas, lençóis de areia, *sand waves* e *shoreface*. Dentre essas, a fácies de dunas eólicas se mostrou o melhor reservatório. Os autores definiram uma evolução diagenética para os reservatórios R-7A e B para a área do Rio Urucu e identificaram, ainda, um forte controle faciológico sobre a distribuição da qualidade dos reservatórios. A eodiagênese foi caracterizada pela precipitação de anidrita, principal cimento, e de carbonatos. A mesodiagênese foi representada por duas fases de crescimentos de quartzo, desenvolvimento de franjas de illita-esmectita, seguidas pela formação de clorita em rosetas, e uma fase tardia de precipitação de cimentos de dolomita ferrosa e anquerita. A segunda fase de crescimentos de quartzo foi individualizada pelo fato de ter sido controlada pela presença de illita-esmectita recobrimdo os grãos. Foi identificada também dissolução de parte do cimento de anidrita e de grãos do arcabouço, que teria sido relacionada à ação de ácidos orgânicos e hidrocarbonetos, que também teriam causado a precipitação de pirita.

Elias *et al.* (2004) realizaram um estudo petrológico da evolução e os controles sobre a distribuição da diagênese nos reservatórios do Campo de Urucu. A porção analisada compreendeu arenitos, lutitos, evaporitos e dolomitos depositados em um ambiente de sabkha costeiro, com forte retrabalhamento eólico e influência marinha. Os arenitos caracterizados por Elias *et al.* (2004) são, em sua maioria, subarcósios e arcósios, ocorrendo sublitarenitos e arcósio-líticos (*sensu* Folk 1974) de forma subordinada. Os grãos de quartzo são essencialmente monocristalinos, e o microclínio corresponde ao principal feldspato. Ocorrem fragmentos vulcânicos, sedimentares, metamórficos e, de forma mais abundante, plutônicos. Constituintes acessórios importantes compreendem turmalina, micas, peloides argilosos e, principalmente em arenitos não-eólicos, intraclastos lamosos.

A evolução diagenética descrita por Elias *et al.* (2004) apresentou diferenças para os arenitos eólicos e não-eólicos, mas uma sequência geral pode ser definida. A eodiagênese foi caracterizada por cutículas de hematita e de argilas mecanicamente infiltradas, pirita framboidal, cimento de dolomita blocosa e microcristalina, e compactação mecânica. A mesodiagênese foi caracterizada por compactação química, crescimentos de quartzo e K-feldspato, anidrita poiquilotópica, dissolução de feldspatos e albitização, ilita fibrosa, dolomita ferrosa-anquerita e, localmente, clorita, calcita e siderita. Durante o soterramento, as cutículas de argilas esmectíticas infiltradas foram transformadas em agregados de ilita-esmectita cobertos por franjas de ilita. Evidências de telodiagênese foram identificadas localmente, associadas à oxidação dos cimentos mesodiagenéticos e precipitação de caulinita tardia pela infiltração profunda de águas meteóricas. A evolução diagenética dos arenitos da Formação Juruá pode ser visualizada na Figura 3.

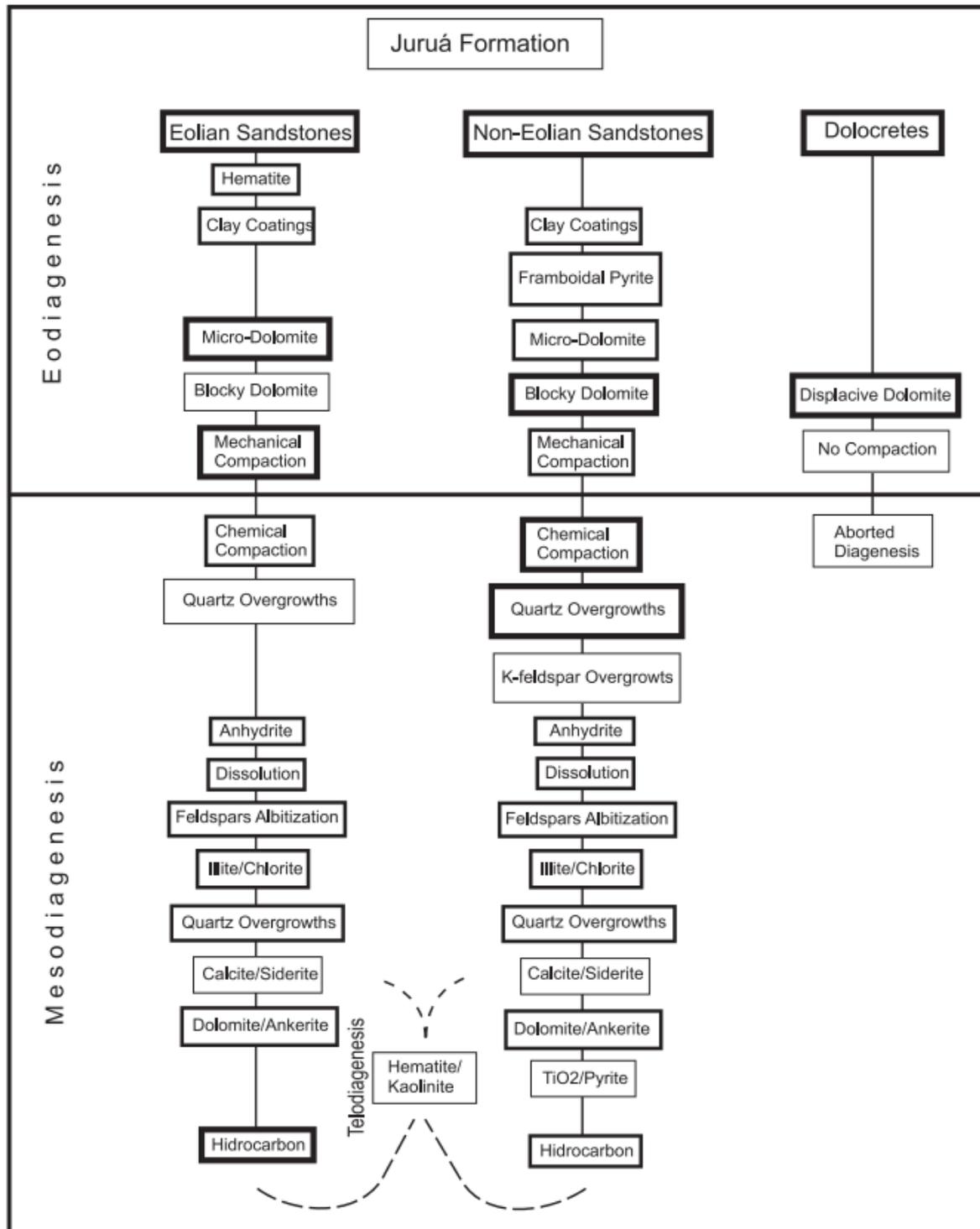


Figura 3 - Evolução diagenética de arenitos eólicos, não eólicos e dolocretes da Formação Juruá na área de Urucu (de Elias *et al.*, 2004).

Dolomita blocosa foi identificada como o principal cimento, mas não apresentou relação com os limites dos ciclos deposicionais. Anidrita é o segundo cimento mais volumoso, e ocorre com distribuição heterogênea ou seletiva em lâminas de textura mais grossa, sendo expressivo apenas próximo a contatos com camadas de evaporitos. Anidrita poiquilotópica mesodiagenética ocorre de forma mais abundante em arenitos eólicos, que também mostram mais cimento de dolomita microcristalina em relação à dolomita blocosa. Arenitos não-eólicos apresentaram cutículas mais espessas de argila e cimentação por quartzo mais abundante, principalmente próximo a contatos com lutitos. A maior parte do Si necessário para a precipitação de cimentos de quartzo teria origem interna, indicada pelos contatos intergranulares suturados e por estilólitos gerados pela compactação química, que foi mais intensa nos arenitos finos não-eólicos.

A presença de pirita associada à dolomita microcristalina em algumas amostras foi relacionada a redução bacteriana de sulfato, no entanto, a escassez de pirita em um ambiente rico em sulfato dissolvido indicou que as condições continuaram oxidantes durante a maior parte da eodiagênese. O estudo demonstrou, ainda, que a compactação foi o principal processo de redução da porosidade nos arenitos eólicos. Nos arenitos não-eólicos, a redução da porosidade deu-se principalmente pela cimentação.

O estudo conduzido por Elias *et al.* (2004) confirmou o controle da diagênese, fácies deposicional e contexto estratigráfico sobre a qualidade e heterogeneidade dos reservatórios da Formação Juruá da área de Urucu. Foram identificados 4 ciclos do tipo ressecamento/umedecimento para o topo, constituídos por fácies de sabkha na base, passando a depósitos eólicos no topo, seguidos por sabkha novamente. A diagênese mostrou-se responsável por grande impacto na qualidade e heterogeneidade dos reservatórios Juruá, principalmente pela compactação e cimentação preferencial de arenitos não-eólicos. A porosidade foi avaliada como sendo essencialmente primária, discordantemente de Cunha *et al.* (1988), que

consideraram a porosidade predominantemente secundária por dissolução de cimento de anidrita, dolomita, e grãos do arcabouço, como feldspatos.

Complementarmente, a composição isotópica dos principais constituintes diagenéticos dos arenitos da Formação Juruá no campo de Urucu foram analisados por Elias *et al.*, (2007). Valores $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$ medidos em dolomitas microcristalinas eodiagenéticas indicaram temperatura de precipitação de 34-70 °C, e seus valores de $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ indicaram uma fonte carbonática marinha modificada por influxo meteórico e redução bacteriana do sulfato. Valores de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ entre 0,7097048 e 0,7123545 sustentaram esta hipótese por desviarem dos valores da água do mar para o Carbonífero.

Os valores de $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$ medidos em cimento de dolomita mesodiagenética indicaram precipitação entre 99-155 °C, assumindo-se um valor de +3‰ para $\delta^{18}\text{O}_{\text{água}}$. Os valores de δC dessas dolomitas apresentam um *trend* positivo em relação ao oxigênio, interpretado como sugestivo para um influxo gradual da descarboxilação termocatalítica da matéria orgânica sobre a composição marinha inicial do fluido.

Valores $\delta_{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ medidos em cimentos de anidrita variaram de 9,5‰ à 17,8‰ foram interpretados como sugestivos de derivação da dissolução de nódulos de sulfato e/ou depleção em ^{34}S nos fluidos de poro devido à precipitação de nódulos de sulfato na eodiagenese. Além disso, valores extremamente baixos de $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$ medidos em anidritas foram associadas à oxidação de sulfetos, para a qual sugeriu-se relação com evento magmático básico Penatecaua, do Triássico. Esta interpretação foi suportada pelos valores de 0,7096907 à 0,7137169 de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ para a precipitação da anidrita, associados à interação rocha-fluido.

Ilitas datadas pelo método K-Ar em diferentes reservatórios apresentaram idades próxima à 200 Ma e 150 Ma. A primeira geração de ilitas teria se desenvolvido associada ao evento de magmatismo Triássico e acumulação de hidrocarbonetos, enquanto a segunda estaria associada ao Tectonismo Juruá, que teria rompido selos

de anidrita que antes mantiveram o reservatório isolado. A influência destes eventos sobre a evolução diagenética dos arenitos estudados pode ser vista na Figura 4.

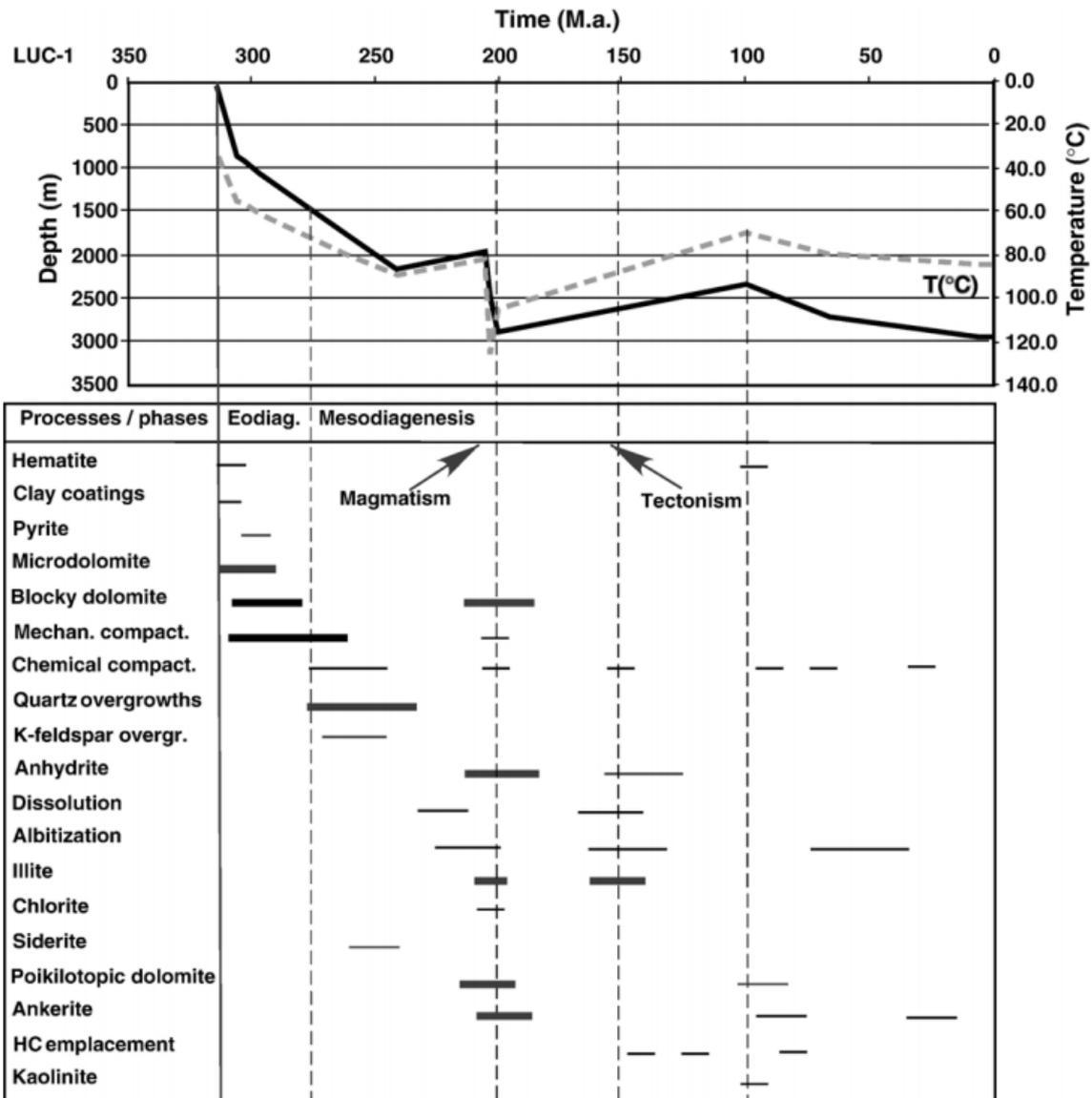


Figura 4 - História de soterramento, evolução térmica e diagenética de reservatórios do leste do Campo de Urucu (de Elias *et al.*, 2006).

5 ESTADO DA ARTE: DIAGÊNESE EM ARENITOS EÓLICOS E DEPÓSITOS ASSOCIADOS

5.1 Controles

A maioria dos depósitos eólicos está associada a ambientes de deserto ou dunas costeiras, sendo os depósitos desérticos os mais extensivos. Usualmente, ocorrem sob condições áridas e semi-áridas, de forma que estão relacionados à três principais ambientes sedimentares: leques aluviais e rios efêmeros, sabkhas e playas continentais, e ergs (Walker & James, 1992). Nestes ambientes, a pluviosidade é muito baixa, de forma que os minerais sofrem pouco intemperismo químico e os fluidos intersticiais são alcalinos e concentrados em íons como Ca^{2+} , Mg^{2+} e HCO_3^- (Worden & Burley, 2003).

Os ambientes de deposição continentais altamente oxidantes mantêm todo o ferro no estado férrico, que acaba por cobrir os minerais usualmente na forma de hidróxido. Além disso, alta taxa de evaporação presente nos ambientes quentes e secos permite a formação de calcretes, dolocretes e gipcretes (Worden & Burley, 2003). Características faciológicas atreladas aos diferentes sistemas deposicionais são apontadas como um dos principais controladores da qualidade de reservatório, exercendo controle sobre a porosidade e permeabilidade primária e sobre a diagênese. Os diferentes tipos de depósitos encontrados em um ambiente de deposição eólico apresentam diferentes tipos de cimentação, como cimento de calcita em arenitos de wadi, e de halita e gipso em arenitos eólicos (e.g., Glennie *et al.*, 1978; Kessler, 1978). Além disso, depósitos fluviais ou deltaicos ricos em intraclastos lamosos sofrem maior perda de porosidade por compactação e formação de pseudomatriz. Dessa forma, depósitos eólicos e não-eólicos associados acabam por apresentar evoluções diagenéticas e qualidade de reservatório divergentes.

A posição do nível freático é um fator importante nesse contexto. Sob climas áridos/semi-áridos, o nível freático encontra-se rebaixado, permitindo que o influxo de água meteórica introduza mecanicamente material argiloso pela zona vadosa de

depósitos aluviais e eólicos. Estas argilas detríticas poderão apresentar um importante papel na evolução diagenética do sedimento hospedeiro (Moraes & De Ros, 1990; Elias *et al.*, 2004). A posição do nível freático e o tipo de fluido presente no ambiente também controlam a autigênese de argilominerais, que poderão ser benéficos ou danosos à porosidade e permeabilidade dos reservatórios (Ajdukiewicz *et al.*, 2010). A formação de argilominerais durante a diagênese ocorre por precipitação ou substituição de grãos ou argilas detríticas ou diagenéticas pré-existentes, sendo fortemente controlada pela fácies deposicional, composição detrítica e condições climáticas (Worden & Morad, 2003). Em especial, deltas e ambientes fluviais costeiros, que também ocorrem em porções marginais de ambientes eólicos, constituem um ótimo cenário para a formação de cutículas e franjas de clorita, pois esses sistemas reúnem materiais que serão a base para a formação de clorita durante o soterramento (Dowey *et al.*, 2012).

A ocorrência de processos tectônicos é outro importante controle sobre processos diagenéticos. A reativação de falhas e o movimento de blocos afetam a história de soterramento dos depósitos que preenchem uma bacia sedimentar. Dessa maneira, esses eventos podem controlar parâmetros termais e hidrológicos que afetam a diagênese das rochas. Comuns durante a inversão de bacias, os falhamentos favorecem a entrada e mistura de fluidos de diferentes horizontes estratigráficos. Gluyas *et al.* (1997) atribuíram cimentos de barita e anidrita, responsáveis pela baixa produtividade de diversos poços perfurados nos depósitos do permiano do Grupo Rotliegend, à mistura de fluidos derivados de evaporitos do mesmo intervalo e de depósitos carboníferos sotopostos. Além disso, Lee *et al.* (1989) puderam identificar uma relação entre eventos tectônicos que afetaram o sul da Região do Mar do Norte e a formação de ilita em arenitos do Grupo Rotliegend através de datações K/Ar realizadas no argilomineral. No caso da Formação Juruá, Elias *et al.* (2007) concluíram através da análise de isótopos que a autigênese de ilita foi controlada pelos eventos de magmatismo triássico e tectonismo jurássico que afetaram a Bacia do Solimões, eventos que também influenciaram outros processos mesodiagenéticos na unidade.

5.2 Principais processos e produtos

O tingimento dos grãos por hematita corresponde à um dos primeiros processos diagenéticos usualmente presentes em arenitos eólicos. A precipitação na forma de cutículas é muito comum (e.g., Pye & Krinsley, 1986, Dixon *et al.*, 1989; Purvis, 1992) e provavelmente ocorre como produto da alteração de silicatos ferromagnesianos mais instáveis (Walker & Waugh, 1973; Glennie *et al.*, 1978). Por vezes, a abundância de hematita pode ser suficiente para formar *red beds* (e.g. McBride *et al.*, 1987).

Argilas podem ser mecanicamente infiltradas a partir da passagem de água rica em argila em suspensão pela zona vadosa dos sedimentos arenosos, aderindo aos grãos na forma de cutículas. A presença de um clima de aridez elevada e ausência de sistemas aluviais alimentados por enchentes periódicas, no entanto, reduz significativamente o volume de argilas infiltradas, como ocorrido na Formação Juruá (Elias *et al.*, 2004). Esmectita corresponde a composição usual de cutículas de argila infiltrada em arenitos eólicos, mas essas podem ser rapidamente transformadas por recristalização ou através de interestratificados, (Moraes & De Ros 1990, Ajdukiewicz *et al.*, 2012). Durante a eodiagênese, esmectitas e caulinita na forma de cimento ou substituindo grãos são comuns. Sob condições de altas taxas de evaporação, as altas atividades de Na e K no fluido restante nos poros dos sedimentos facilitam acumulação de argilominerais do grupo da esmectita, enquanto em ambientes de baixo pH da água pode ser precipitada caulinita (Worden & Burley, 2003). Durante a mesodiagênese, ilita, clorita e interestratificados de argilominerais são comumente precipitados como cobertura de grãos e também podem ocorrer preenchendo poros intergranulares.

A presença de franjas e cutículas de clorita em arenitos merece atenção particular, dada a sua capacidade de inibir ou atenuar o crescimento de quartzo, importante cimento em arenitos soterrados a grandes profundidades. Bertierina, esmectita e caulinita reagindo com fontes de ferro constituem as principais origens da clorita em arenitos, que pode ser resultado da recristalização de cutículas precursoras

ou produto de autigênese, isolando a superfície de grãos de quartzo dos fluidos intersticiais necessários para o crescimento do quartzo (Worden *et al*, 2020).

Cimentos carbonáticos de calcita, dolomita e siderita são comuns em arenitos e podem ser gerados tanto na eodiagênese quanto na mesodiagênese (Worden & Burley, 2003). A principal ocorrência de cimentos carbonáticos precoces em ambientes continental e costeiro corresponde a calcretes e dolocrete desenvolvidos sob clima quente, em regiões áridas a semiáridas. Nesse contexto, a pedogênese resulta na precipitação carbonatos com baixos teores de Mn e Fe devido à condição oxidante que permite que óxidos e hidróxidos permaneçam estáveis como fases discretas. Com o aumento da profundidade, os fluidos depletados em oxigênio passam a precipitar carbonatos mais enriquecidos em Mn e Fe segundo as zonas de redução identificadas para cada elemento considerado. A presença de sulfato reduzido, mais importante em sedimentos marinhos, é outro fator que impacta no tipo de carbonato que será precipitado, assim como a presença de compostos orgânicos em zonas onde todo o sulfato encontra-se em sua forma reduzida (Morad, 2009). Arenitos depositados em ambientes marinhos rasos são comumente cimentados por nódulos ou lâminas discretas de calcita, e apresentam uma grande variedade de cimentos carbonáticos devido à reação com argilominerais detríticos e a quebra da matéria orgânica. Seja qual for o caso, carbonatos precoces (calcita e dolomita) são recristalizados à formas ferrosas, podendo apresentar aumento no tamanho dos cristais ou zonação composicional (Worden e Burley, 2003).

Anidrita é outro cimento comum em arenitos eólicos e usualmente ocorre em depósitos de duna e interduna. Anidrita nodular em camadas também são comuns em sequências eólicas, e podem corresponder à deposição em lagos de deserto ou sabkha costeiro (Glennie, 1972). Diferentes teorias quanto à sua formação referem-se principalmente à precipitação direta no sedimento a partir da evaporação de água salgada concentrada por precipitação direta ou por recristalização de gipso durante soterramento progressivo. Análises geoquímicas demonstram que importantes fases de anidrita são tardias e mais provavelmente provenientes da remobilização de depósitos de sulfato de cálcio pré-existentes (Dworkin & Land, 1994). Nestes casos,

há uma importante interação rocha-fluido após o soterramento. Em outros casos, grãos de gipso e anidrita detríticos também atuam como fonte local de cimento de anidrita quando afetados por dissolução parcial ou completa, como evidenciado por Henares *et al.* (2014) para o Grupo Rotliegend. No caso da Formação Juruá, é o cimento mesodiagenético mais comum, e seu volume apresenta relação com o número e espessura de camadas evaporito intercaladas e com limites do sistema deposicional, sugerindo que sua precipitação pode ser relacionada a um maior fluxo de fluidos ao longo de fácies de granulometria mais grossa.

Sílica eodiagenética pode ocorrer em ambientes áridos na forma de nódulos de silcrete em algumas superfícies (Leckie & Cheel, 1990), podendo levar a formação de crescimentos de quartzo (Thiry *et al.*, 1998). Crescimento de quartzo é um importante cimento que comumente afeta a qualidade de reservatórios arenitos eólicos (Dixon *et al.*, 1989). No entanto, a precipitação de quartzo está bastante atrelada à temperatura, que controla a solubilidade do quartzo e as principais reações que liberam sílica, de forma que esse cimento pode obliterar completamente a porosidade de arenitos soterrados e aquecidos à mais de 80°C. Por necessitar de superfícies limpas para se formar, é comum que o cimento de quartzo ocorra em arenitos eólicos, sendo também comum que iniba o cobrimento dos grãos por outros constituintes como argilas e microquartzo (Worden & Morad, 2000). Dessa forma, litofácies mais ricas em micas e fragmentos líticos dúcteis tendem a apresentar uma cimentação por quartzo reduzida devido a formação de pseudomatriz, que cobre a superfície dos grãos de quartzo durante a compactação (Worden *et al.*, 1997).

5.3 Padrões de evolução paragenética

Na literatura sedimentar, foram descritos padrões diagenéticos para arenitos eólicos. Kessler (1978) definiu uma sequência diagenética geral para arenitos eólicos depositados em ambientes desérticos que é caracterizada por: cimentação precoce por gipsita, infiltração mecânica de argilas, dissolução de grãos instáveis e posterior alteração de argilas para hematita, autigênese de argilominerais e cimentação por

quartzo ou feldspato. De forma concordante para arenitos depositados em sistemas de sabkha costeiro-eólico, Elias *et al.* (2004) identificaram uma sequência diagenética recorrente: a eodiagênese geral pode ser caracterizada por hematita, esmectita, anidrita-gipsita, argila infiltrada, dissolução e dolomita microcristalina, podendo ser sucedida de sulfatos; a mesodiagênese é caracterizada por crescimentos de feldspato e quartzo, autigênese de illita e cimentos de calcita e anidrita. O estudo também evidenciou que a migração de fluidos provenientes de unidades adjacentes por eventos tectônicos se torna um fator importante na mesodiagênese. A telodiagênese, por sua vez, é pouco expressiva na maior parte dos casos analisados pelos autores e neste trabalho, e é caracterizada, quando presente, pela precipitação de hematita a partir da oxidação de constituintes mesodiagenéticos ferrosos, e de calcita ou caulinita tardias.

5.4 Impacto sobre a qualidade dos reservatórios

5.4.1 Grupo Rotliegend

Os arenitos eólicos do Grupo Rotliegend, Permiano da Europa Ocidental e Mar do Norte correspondem a um dos maiores reservatórios de gás do mundo e têm sido muito estudados nos últimos quarenta anos devido ao seu interesse comercial. Os sedimentos do Grupo Rotliegend representam uma sequência de origem desértica que foi depositada em uma bacia intracratônica em processo de subsidência e ocorrem principalmente como depósitos eólicos, fluviais, de sabkha e de lago de deserto (Purvis, 1992). Os maiores volumes de gás são extraídos de arenitos correspondentes a depósitos de migração de dunas eólicas (Seeman, 1982).

A diagênese exerce controle sobre a qualidade dos reservatórios, e foi diretamente controlada pelo ambiente deposicional (Glennie *et al.*, 1978; Pye & Krinsley, 1986). Purvis (1992) estudou a diagênese dos arenitos do Rotliegend no sul do Mar do Norte e a influência das sequências evaporíticas associadas. Segundo o estudo, os principais cimentos eodiagenéticos correspondem a cimentos precoces de

carbonato, cimento de quartzo e halita. Análises isotópicas sugerem que fluidos dos folhelhos da sequência Zechstein teriam controlado a formação dos cimentos carbonáticos precoces e da halita (Purvis, 1992). No entanto, alguns autores consideram uma influência de água meteórica na formação dos cimentos eodiagenéticos (Amthor & Okkerman, 1998).

A mesodiagênese foi bastante controlada pela migração de fluídos provenientes de camadas sobreposta e camadas sotopostas à sequência Rotliegend e pela tectônica. Durante o soterramento intermediário ou mesodiagênese rasa, dolomita ferrosa representa um cimento volumetricamente importante, que ocorre vinculado ao movimento de fluidos ricos em CO₂, ácidos e redutores em zonas de falhas e fraturas (Vincent *et al.*, 2018). Outros constituintes mesodiagenéticos importantes foram ilita e clorita. A formação de ilita foi controlada pela sequência Zechstein sobreposta (Rossel, 1982) e sua ocorrência apresenta-se extremamente danosa a permeabilidade destes reservatórios, que apresentam as menores permeabilidades em áreas onde ilita fibrosa é o argilomineral predominante Seeman (1979). Em algumas regiões, clorita foi formada pela evolução de esmectita trioctaédrica através do soterramento crescente, contexto no qual uma maior parte da porosidade dos arenitos eólicos foi preservada (Hillier *et al.*, 1995). Ainda, o grau de cobertura de cutículas de clorita e ilita, fator que define sua eficácia para a inibição de cimentação por quartzo, apresenta pouca relação com textura e ambiente deposicional no Grupo Rotliegend, dificultando a previsão da qualidade dos reservatórios (Busch *et al.*, 2020)

5.4.2 Formação Norphlet

Formação Norphlet consiste em sedimentos clásticos depositados em ambientes eólico, fluvial, lacustre e marinho raso em bacias rifte do Golfo do México durante o Jurássico Superior (McBride *et al.*, 1987) e seus reservatórios produzem gás natural de profundidades que ultrapassam os 6 km. Os melhores reservatórios

são representados por dunas eólicas, mas a porção superior do intervalo apresenta uma zona de intensa cimentação por quartzo e baixas porosidades. A porção inferior, por sua vez, apresenta arenitos porosos mesmo na margem do metamorfismo de baixo grau (Taylor *et al.*, 2004).

A ocorrência desses arenitos porosos está atrelada à presença de cutículas de clorita contínuas e bem formadas, que inibiram a cimentação de quartzo da porção inferior. As cloritas do intervalo são ricas em Mg e teriam se formado a partir de cutículas de argila e óxido de ferro precursores. Observações petrográficas permitiram demonstrar que a zona superior apresenta pequenas discontinuidades nas cutículas, enquanto resultados de modelamento de crescimento de quartzo indicaram que seria necessário cerca de 98% de cobertura para prevenir a cimentação por quartzo nessas condições de soterramento (Taylor *et al.*, 2004).

Outros eventos diagenéticos também afetaram a qualidade dos reservatórios da Formação Norphlet. A cimentação precoce por calcita, por exemplo, foi pervasiva nas fácies de interduna e sabkha. A entrada hidrocarbonetos durante a mesodiagênese gerados na Formação Smackover, depositada abaixo da Formação Norphlet, começou quando a temperatura alcançou 110°C, criou zonas de pressão anômala e retardou posterior cimentação nos arenitos porosos. Além disso, a geração de porosidade por ácidos orgânicos provenientes da descarboxilação da matéria orgânica e de reações de hidrocarbonetos com a anidrita resultou na geração de porosidade secundária por dissolução de cimento. A ausência de cimentação precoce pervasiva na fácies de duna e ação conjunta dos mecanismos de geração de porosidade secundária e inibição de cimentação permitiram que os reservatórios da Formação Norphlet apresentem altos valores de porosidade mesmo soterrados a mais de 6 mil metros (Dixon *et al.*, 1989).

6 SÍNTESE DOS RESULTADOS E INTERPRETAÇÕES

O presente estudo demonstrou que os depósitos da Formação Juruá na área de Juruá compreendem arenitos, pelitos, carbonatos e evaporitos depositados em

sistemas eólicos, fluviais, deltaicos e lagunares durante um evento transgressivo de segunda ordem (Sequência do Carbonífero-Permiano). A unidade foi dividida em três seções que apresentam assinaturas geofísicas distintas, e nele foram identificadas 4 associações de fácies: (i) dunas e lençóis de areia eólicos; (ii) canal fluvial e depósitos externos ao canal; (iii) frente deltaica e prodelta; e (iv) lagunar.

Os arenitos são muito finos a grossos, e apresentam uma composição essencial original que corresponde à de arenitos arcósios e arcósios líticos, sendo amplamente afetados por albitização e, secundariamente, dissolução de feldspatos, de forma que apresentam uma transição para a composição subarcósia atual (*sensu* Folk, 1968; Fig. 5). A composição essencial original também corresponde predominantemente àquela proveniente de ambientes transicionais continentais *sensu* Dickinson (1985; Fig. 5).

Os grãos do arcabouço são compostos predominantemente por quartzo monocristalino. Dentre os grãos de feldspato, o microclínio é o mais comum, ocorrendo comumente fresco ou parcialmente dissolvido, enquanto os grãos de plagioclásio e ortoclásio costumam se apresentar amplamente albitizados e substituídos por illita. Fragmentos de rochas metamórficas, principalmente de ardósias e filitos, são os mais abundantes, seguidos por fragmentos de rocha plutônica. Fragmentos de rocha ígnea vulcânica ocorrem em menor quantidade e frequentemente são substituídos por óxidos de ferro ou clorita, ou parcialmente dissolvidos. Intraclastos lamosos são comuns, e geralmente ocorrem compactados ou deformados. Minerais acessórios incluem zircão, turmalina, rutilo e grãos de mica, que ocorrem concentrados em arenitos muito finos e siltitos.

Foram identificados controles faciológicos e estratigráficos que influenciaram a diagênese dos arenitos Juruá, e a evolução diagenética foi diferente para as rochas siliciclásticas e evaporíticas-carbonáticas da sequência. De forma geral, a evolução diagenética foi similar àquela reconhecida por Elias *et al.* (2004). A eodiagênese ocorreu em condições oxidantes e foi caracterizada por cutículas de argila e hematita, dissolução de feldspatos, fragmentos de rocha vulcânica e intraclastos lamosos e cimentação localizada por calcita, dolomita e anidrita. Durante a mesodiagênese,

cutículas de argila precursoras foram transformadas, argilominerais autigênicos precipitaram e a maior parte da cimentação ocorreu. Ao final da mesodiagenese, fluidos redutores percolaram o intervalo e hidrocarbonetos se acumularam localmente nas rochas porosas. A telodiagenese foi muito limitada.

Albita é o principal constituinte diagenético, e ocorre usualmente na forma microcristalina substituindo grãos de plagioclásio e ortoclásio. Quartzo na forma de crescimentos corresponde ao principal cimento nos arenitos e siltitos, obliterando a porosidade em algumas amostras. Sua distribuição foi limitada pela ocorrência de franjas e cutículas de clorita, que cobriram parte dos grãos e inibiram a cimentação. A cimentação por quartzo foi mais expressiva em arenitos fluviais e deltaicos do que em eólicos, que constituem os melhores reservatórios da área.

Reações de transformação e autigênese de argilominerais foram expressivas, de forma de que illita, clorita, e interestratificados de illita-esmectita e clorita-esmectita foram formados. A composição dos argilominerais foi precisamente acessada através de análises por EDS. Cutículas de illita-esmectita são as mais comuns, e são melhor desenvolvidas nos depósitos deltaicos. Illita fibrosa também precipitou nos poros, reduzindo a permeabilidade em algumas amostras. Clorita é importante nos arenitos eólicos, fluviais e deltaicos como franjas e cutículas, além de ocorrer de forma abundante em arenitos deltaicos como feixes intergranulares por vezes associados à substituição de pseudomatriz.

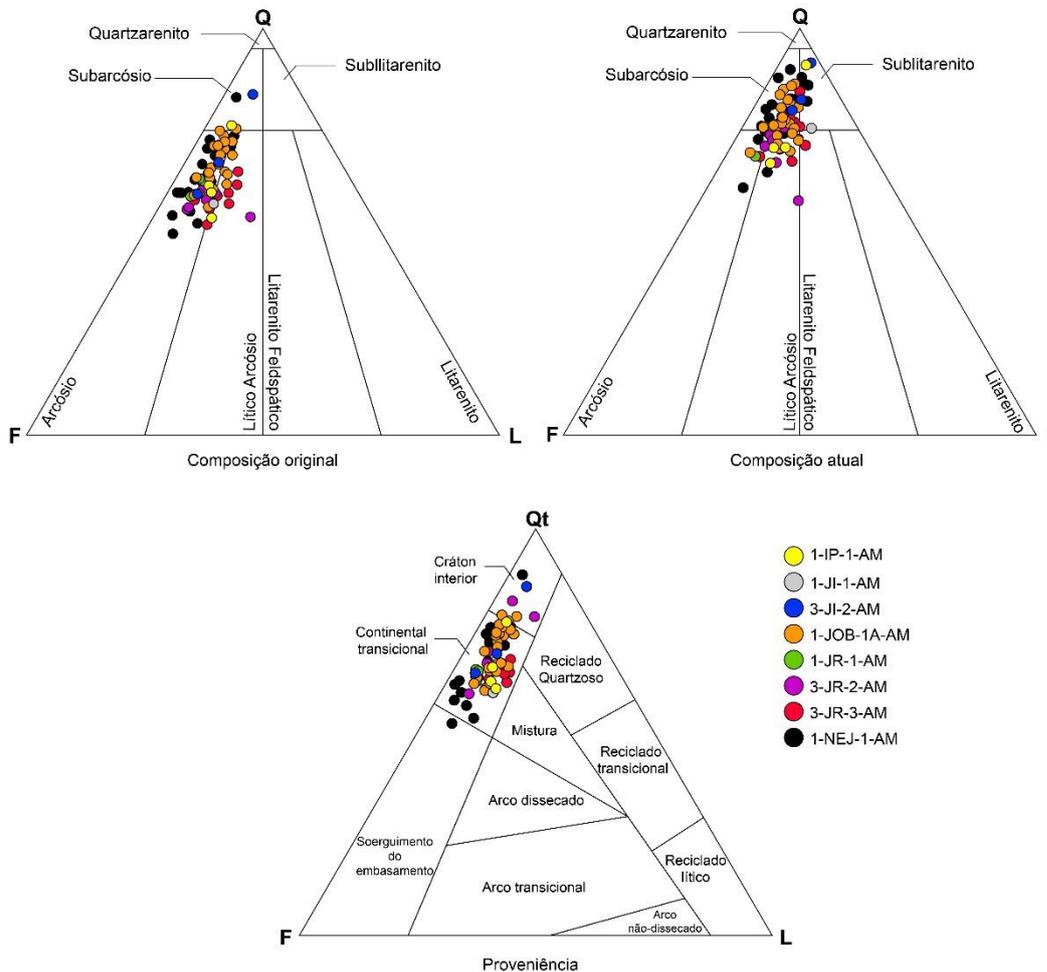


Figura 5 - Diagrama composicional Folk (1968, acima) e de proveniência Dickinson (1985, abaixo) para as amostras estudadas.

Outros cimentos importantes compreendem anidrita e carbonatos. Anidrita ocorre principalmente como cimento poiquilotópico e é mais abundante próximo a evaporitos, enquanto calcita poiquilotópica oblitera a porosidade de arenitos próximos a carbonatos. Essas características de distribuição dos cimentos sugere um forte controle estratigráfico sobre a mesodiagênese (Purvis, 1992; Elias *et al.*, 2004). Ambos os cimentos de anidrita e calcita também ocorrem substituindo clorita intergranular e cobrindo crescimentos de quartzo. Dolomita ferrosa e anquerita mesodiagenéticas foram localmente importantes, e estariam associadas à descarboxilação da matéria orgânica (Elias *et al.*, 2004).

A macroporosidade dos arenitos atinge valores de até 33%, e foi afetada por compactação e cimentação. Arenitos eólicos são mais porosos e sofreram menor impacto da cimentação, mas algumas amostras perderam sua porosidade por compactação. Arenitos fluviais sofreram maior cimentação, e arenitos deltaicos foram amplamente impactados pela compactação física e química, que resultaram em formação de pseudomatriz e estilolitos.

A qualidade de reservatório da Formação Juruá foi identificada como resultado de uma interação complexa de estratigrafia, ambientes deposicionais e diagênese. Como resultado, os intervalos inferior, intermediário e superior identificados na Formação Juruá apresentam características distintas do reservatório.

Os ambientes deposicionais exerceram controle direto na diagênese inicial e foram importantes para a preservação da porosidade durante o soterramento. Como em outros reservatórios eólicos profundos, o cobrimento dos grãos por clorita autigênica foi identificado como responsável por inibir a cimentação de quartzo, principal cimento identificado, preservando a porosidade primária em algumas amostras (Dixon *et al.*, 1989; Hillier *et al.*, 1995; Ajdukiewicz *et al.*, 2010). A preservação da porosidade devido à clorita foi de grande importância nos arenitos eólicos que, apesar de leve perda de porosidade devido à compactação, constituem os melhores reservatórios do intervalo. Além disso, onde a ilita fibrosa intergranular foi precipitada, as gargantas dos poros foram parcialmente obstruídas, causando redução na permeabilidade (e.g. Seeman, 1979; Ajdukiewicz *et al.*, 2010). Nas amostras analisadas, a ilita intergranular está comumente associada a arenitos eólicos e fluviais porosos que apresentam dissolução significativa de feldspato e intraclastos lamosos. Tanto a clorita intergranular quanto a ilita intergranular, ambas danosas à qualidade de reservatório, ocorrem em maiores quantidades no intervalo basal da Formação Juruá na área de estudo.

7 CONCLUSÕES

O estudo integrado de petrologia e sedimentologia permitiu identificar como se deu a deposição e evolução diagenética da Formação Juruá na área do campo de Juruá de forma a melhor compreender suas características como reservatório de hidrocarbonetos. A origem das heterogeneidades da Formação Juruá na área foi interpretada como deposicional (controlada por fácies e ambiente sedimentar) e diagenética. Os padrões reconhecidos de qualidade e heterogeneidades da Formação Juruá devem contribuir para reduzir os riscos exploratórios nestes e em outros reservatórios semelhantes, bem como otimizar a recuperação de hidrocarbonetos dos campos produtores. No entanto, mais estudos são necessários para uma previsão precisa de sua ocorrência e distribuição.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ajdukiewicz, J. M., Nicholson, P. H. & Esch, W. L. 2010. Prediction of deep reservoir quality using early diagenetic process models in the Jurassic Norphlet Formation, Gulf of Mexico. *AAPG bulletin*, v. 94, n. 8, p. 1189-1227.
- Ajdukiewicz, J. M., & Larese, R. E. 2012. How clay grain coats inhibit quartz cement and preserve porosity in deeply buried sandstones: Observations and experiments Clay-Coat Experiments. *AAPG bulletin*, 96(11), 2091-2119.
- Amthor, J.E. & Okkerman, J. 1998. Influence of early diagenesis on reservoir quality of Rotliegend sandstones, northern Netherlands. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 82, 2246–2265.
- ANP. Agência Nacional do Petróleo. Home page: www.anp.gov.br.
- Becker, C. R. 1997. *Estratigrafia de sequências aplicada ao permo-carbonífero da Bacia do Solimões, Norte do Brasil*. Abr. 18. 363p. Mestrado em Geociências. Orientador: Szatimari, P. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

- Busch, B., Hilgers, C., & Adelman, D. 2020. Reservoir quality controls on Rotliegend fluvio-aeolian wells in Germany and the Netherlands, Southern Permian Basin—Impact of grain coatings and cements. *Marine and Petroleum Geology*, 112, 104075.
- Campos, J. N. P., Murakami, C. Y., Mauro Filho, A. & Barbosa, C. M. 1991. *Evolução tectono-sedimentar, habitat do petróleo e exploração da Bacia do Solimões*. Manaus: Petrobras/Denoc. Relatório N° 131-08015.
- Caputo M.V., Rodriguez R. & Vasconcelos D.N.N. 1972. Nomenclatura Estratigráfica da Bacia do Amazonas: histórico e atualização. *In: 26° Congresso Brasileiro de Geologia*, Belém, Anais, 3:35-46 .
- Caputo, M.V. 1984. *Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of northern basins of Brazil*, Santa Barbara, 583 p. Ph.D Thesis, University of California.
- Caputo, M.V. 1985. Late Devonian glaciation in South America. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 51: 291-317.
- Caputo, M.V. & Silva, O. B., 1990. *Sedimentação e tectônica da Bacia do Solimões. Origem e evolução de bacias sedimentares*. Rio de Janeiro, Petrobras, p. 169-193.
- Cunha, P. R. C.; Silva, O. B. & Eiras, J. F., 1988. Interpretação faciológica e ambiental do principal reservatório de hidrocarbonetos da Bacia do Solimões—Área do Urucu. *In: 35 Congresso Brasileiro de Geologia*. SBG, Belém, Anais. p. 2439-2456.
- De Ros, L.F., Goldberg, K., Abel, M., Victoretti, F., Mastella, L. & Castro, E. 2007. Advanced Acquisition and Management of Petrographic Information from Reservoir Rocks Using the Petroledge® System. *In: American Association of Petroleum Geologists Annual Convention and Exhibition 2007*, Houston, Extended Abstracts Volume.

- Dickinson, W.R. 1985. Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones. *In: Provenance of arenites*. Springer, Dordrecht. p. 333-361.
- Dixon, S. A.; Summers, D. M. & Surdam, R. C. 1989. Diagenesis and preservation of porosity in Norphlet Formation (Upper Jurassic), southern Alabama. *AAPG Bulletin*, v. 73, n. 6, p. 707-728.
- Dowey, P. J., Hodgson, D. M. & Worden, R. H. 2012. Pre-requisites, processes, and prediction of chlorite grain coatings in petroleum reservoirs: a review of subsurface examples. *Marine and Petroleum Geology*, v. 32, n. 1, p. 63-75.
- Dworkin, S.I. & Land, L.S. 1994. Petrographic and geochemical constraints on the formation and diagenesis of anhydrite cements, Smackover Sandstones, Gulf of Mexico; *Journal of Sedimentary Research*, v. A64, no. 2, p. 339–348.
- Eiras, J. F., Becker, C. R., Souza, E. M., Gonzaga, F. G., da Silva, J. G., Daniel, L.M.F, Matsuda, N. S. & Feijó, F. J., 1994. *Bacia do Solimões*. Boletim de Geociências da Petrobras, v. 8.
- Eiras J.F. 2007. Tectônica, sedimentação e sistemas petrolíferos da Bacia do Solimões, Estado do Amazonas. *In: Schlumberger (ed.) Apostila sobre prospecção e desenvolvimento de campos de petróleo e gás*. Cap. 2. Livro-Texto. Projeto Multimin.
- Elias, A. R., De Ros, L. F., Mizusaki, A. M., & Anjos, S. M. 2004. Diagenetic patterns in eolian/coastal sabkha reservoirs of the Solimões Basin, northern Brazil. *Sedimentary Geology*, v. 169, n. 3-4, p. 191-217.
- Elias, A. D., De Ros, L. F., Mizusaki, A. M., & Kawashita, K., 2007. Isotopic evidence on the diagenetic evolution of coastal sabkha reservoirs from the Solimões Basin, northern Brazil. *Gondwana Research*, v. 11, n. 4, p. 553-567.
- Figueiredo, A. D., Milani, E. J., Cordani, U. G., Thomaz Filho, T., & Campos, D. A. 2000. Petroleum systems of South American basins. *Tectonic Evolution of South America*, 689-718.

- Folk, R.L. 1968. *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill's Pub., Austin, Texas, 107p.
- Folk, R.L. 1974. *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill Publishing Co., Austin, 170 p.
- GLENNIE, K. W. 1972. Permian Rotliegendes of northwest Europe interpreted in light of modern desert sedimentation studies. **AAPG Bulletin**, v. 56, n. 6, p. 1048-1071.
- Glennie, K. W. 1987. Desert sedimentary environments, present and past — A summary. *Sedimentary Geology*, v. 50, n. 1-3, p. 135-165.
- Glennie, K.W., Mudd, G.C. & Nagtegaal, P.J.C. 1978. Depositional environment and diagenesis of Permian Rotliegendes sandstones in Lemn Bank and Sole Pit areas of the UK southern North Sea. *Journal of the Geological Society of London* 135, 25 e 34.
- Gluyas, J., Jolley, L. & Primmer, T.J. 1997. Element mobility during diagenesis; sulfate cementation of Rotliegendes sandstones, southern North Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 14: 1001-1011.
- Henares, S., Caracciolo, L., Cultrone, G., Fernandez, J. & Viseras, C. 2014. The role of diagenesis and depositional facies on pore system evolution in a Triassic outcrop analogue (SE Spain). *Marine and Petroleum Geology*, 51, 136–151.
- Hillier, S., Fallick, A.E. & Matter, A. 1996. Origin of pore-lining chlorite in the aeolian Rotliegendes of northern Germany. *Clay Minerals*, 31(2), 153-171.
- Kessler, L.G. 1978. Diagenetic sequence in ancient sandstones deposited under desert climatic conditions. *Journal of the Geological Society*, 135(1), 41-49.
- Leckie, Dale & Cheel, R. 2006. Nodular silcretes of the Cypress Hills Formation (Upper Eocene to Middle Miocene) of Southern Saskatchewan, Canada. *Sedimentology*. 37. 445 - 454.

- Lee, M., Aronson, J.L. & Savin, S.M. 1989. Timing and conditions of Permian Rotliegende Sandstone diagenesis, southern North Sea. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 73: 195-215.
- Lopes, P.R.M. 1989. *Contribuição para o conhecimento da Formação Prosperança da Bacia do Solimões - uma análise sismoestratigráfica*. Manaus, Petrobras. Relatório Interno.
- Mankiewicz, D. & Steidtmann, J.R. 1979. Depositional environments and diagenesis of the Tensleep Sandstone, Eastern Big Horn Basin, Wyoming. In: P.A. Scholle and P.R. Schluger (Editors), *Aspects of Diagenesis*. SEPM Special Publication. *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists*, Tulsa, Ok. 31, 9-336.
- McBride, S.L., Clark, A.H., Farrar, E., & Archibald, D.A. 1987. Delimitation of a cryptic Eocene tectono-thermal domain in the Eastern Cordillera of the Bolivian Andes through K-Ar dating and ⁴⁰Ar-³⁹Ar stepheating. *Geological Society of London Journal*, v. 144, 243-255.
- Morad, S. 2009. Carbonate cementation in sandstones: distribution patterns and geochemical evolution. Vol. 72. *John Wiley & Sons*.
- Moraes, M.A. & De Ros, L. F. 1990. Infiltrated clays in fluvial Jurassic sandstones of Recôncavo Basin, northeastern Brazil. *Journal of Sedimentary Research*, v. 60, n. 6, 809-819.
- Porsche, E. 1985. *Tectônica da faixa de dobramentos do Juruá, Bacia do Alto Amazonas, Brasil - um modelo estrutural*. Ouro Preto, 124 p. (Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Geologia).
- Purvis, K. 1992. Lower Permian Rotliegend sandstones, southern North Sea: a case study of sandstone diagenesis in evaporite-associated sequences. *Sedimentary Geology*, 77(3-4), 155-171.

- Pye, K. & Krinsley, D.H. 1986. Diagenetic carbonate and evaporite minerals in Rotliegend aeolian sandstones of the southern North Sea: their nature and relationship to secondary porosity development. *Clay Minerals*, 21(4), 443-457.
- Quadros, L.P. 1986. Ocorrência de microfósseis (Acritarchae) ordovicianos na Sub-bacia do Alto Amazonas, Brasil. *In: Congresso Argentino de Paleontologia y Bioestratigrafia*, 4. Argentina. Actas, v. 1, p. 151-156
- Quadros, L.P. 1988. Zoneamento bioestratigráfico do Paleozóico Inferior e Médio (Seção Marinha) da Bacia do Solimões. Rio de Janeiro, *Boletim de Geociências da Petrobras*, v.2, n.1, 95-109.
- Rossel, N. C. 1982. Clay mineral diagenesis in Rotliegend aeolian sandstones of the southern North Sea. *Clay minerals*, v. 17, n. 1, 69-77.
- Seemann, U. 1982. Depositional facies, diagenetic clay minerals and reservoir quality of Rotliegend sediments in the Southern Permian Basin (North Sea): a review. *Clay Minerals*, v. 17, n. 1, 55-67.
- Silva, O. B. 1987. *Análise da Bacia do Solimões (revisão litoestratigráfica magmatismo e geoquímica)*. 177p. M. Sc. Thesis. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Silva, O. B. 1988. Revisão estratigráfica da Bacia do Solimões. *In: Congresso Brasileiro de Geologia*. p. 2428-2438.
- Taylor, T., Stancliffe, R., Macaulay, C., & Hathon, L. 2004. High temperature quartz cementation and the timing of hydrocarbon accumulation in the Jurassic Norphlet Sandstone, offshore Gulf of Mexico, USA. *Geological Society*, London, Special Publications, 237(1), 257-278.
- Teixeira, L.B. 2001. *Evidência geofísica de rifts precursores nas bacias paleozóicas do Amazonas, Paraná, Parecis, Parnaíba, Solimões e Alto Tapajós*. *In: Melo, J.H.G., Terra, G.J.S. (eds.). Correlação de Seqüências Paleozóicas Sul-*

- americanas. Rio de Janeiro, PETROBRAS, 7p. (Ciência-Técnica-Petróleo. Seção Exploração de Petróleo, 20).
- Thiry, M., Ayrault, M.B. & Grisoni, J.C. 1988. Ground-water silicification and leaching in sands: Example of the Fontainebleau Sand (Oligocene) in the Paris Basin. *Geological Society of America Bulletin*, 100, 1283–1290.
- Torres, A.M. & Truckenbrodt, W. 1990. Características petrográficas e diagenéticas dos arenitos da Formação Monte Alegre na Região da Foz do Rio Tapajós, Bacia do Amazonas. *In: 36º Congresso Brasileiro de Geologia. Anais... Sociedade Brasileira de Geologia, Natal, RN, 360-373.*
- Tucker, M. 1988. Techniques in Sedimentology. *Blackwell Scientific Publications*, Oxford, 394 p.
- Vincent, B., Waters, J., Witkowski, F., Daniau, G., Oxtoby, N., Crowley, S. & Ellam, R. 2018. Diagenesis of Rotliegend sandstone reservoirs (offshore Netherlands): The origin and impact of dolomite cements. *Sedimentary Geology*, 373, 272-291.
- Walker, T.R. & Waugh, B. 1973. Intrastratal alteration of silicate minerals in Late Tertiary Fluvial Arkose, Baja California, Mexico. *Geological Society of America Bulletin* 7 (7), 853-854.
- Wanderley Filho J.R. 1991. *Evolução estrutural da bacia do amazonas e sua relação com o embasamento*. Dissertação de Mestrado, Centro de Geociências, UFRPA. 125p.
- WANDERLEY FILHO, J. R. & COSTA, J. B. S. 1991. Contribuição à evolução estrutural da Bacia do Amazonas e sua relação com o embasamento. Simpósio de Geologia da Amazônia, v. 3, p. 222-259.
- Wanderley Filho, J. R., Eiras, J. F. & Vaz, P. T. 2007. Bacia do Solimões. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 15, n. 2, 217-225.

-
- Worden, R.H., Mayall, M.J. & Evans, I.J. 1997. Pre-dicting reservoir quality during exploration: lithic grains, porosity and permeability in Tertiary clastics of the SouthChina Sea basin. In: Petroleum Geology of S.E. Asia. (eds Fraser. A.J., Matthews, S.J. & Murphy, R.W.). 107–115. *Special Publications of the Geological Society of London*, 126.
- Worden, R. H. & Morad, S. 2000. Quartz cementation in oil field sandstones: a review of the key controversies. *Quartz cementation in sandstones*, v. 29, 1-20.
- Worden, R. H. & Burley, S.D. 2003. Sandstone diagenesis: the evolution of sand to stone. *Sandstone diagenesis: Recent and ancient*, v. 4, p. 3-44.
- Worden, R. H., Griffiths, J., Wooldridge, L. J., Utlely, J. E. P., Lawan, A. Y., Muhammed, D. D., Simon, N. & Armitage, P. J. 2020. Chlorite in sandstones. *Earth-Science Reviews*, 204, 103105.
- Zuffa, G. G. 1985. Optical analyses of arenites: influence of methodology on compositional results. In *Provenance of arenites* (pp. 165-189). Springer, Dordrecht.

9 ARTIGO SUBMETIDO

Submission Confirmation Caixa de entrada x



Gondwana Research <em@editorialmanager.com>

qua., 7 de jul. 22:29 (há 3 horas)



 para mim ▾

Article Type: Research Paper

Dear Mr. Elias Cembrani,

Your submission entitled "Diagenetic evolution, reservoir quality and heterogeneity of Carboniferous coastal eolian-fluvial-deltaic deposits of the Juruá area, Solimões Basin, northern Brazil" has been received by Gondwana Research

You may check on the progress of your paper by logging on to the Editorial Manager as an author. The URL is <https://www.editorialmanager.com/gwr/>.

Your manuscript will be given a reference number once an Editor has been assigned.

Thank you for submitting your work to this journal.

Kind regards,

Editorial Manager
Gondwana Research

Diagenetic evolution, reservoir quality and heterogeneity of Carboniferous coastal eolian-fluvial-deltaic deposits of the Juruá area, Solimões Basin, northern Brazil

Cembrani, E.^{1*}; Scherer, C.M.S¹; Schirmbeck, M. M.¹; De Ros, L.F.¹

¹ Programa de Pós-Graduação em Geociências

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Brazil.

*E-mail: elias.cembrani@gmail.com.

ABSTRACT

The Carboniferous Juruá Formation represents the best reservoirs of the vast Solimões Basin, western Amazon region, northern Brazil. The study of these deposits in the Juruá Field area allowed the identification of the main diagenetic processes and their role in the reservoirs' quality and heterogeneity. The interval was deposited at a coastal setting, under arid climate and within a transgressive system tract. Four facies associations were identified: eolian dunes and sand sheets; fluvial channel and overbank deposits; delta front and prodelta; and lagoonal, including sabkha deposits. The thickness and lateral continuity of the sand bodies that constitute the reservoirs varies among these environments. Primary porosity was controlled by the depositional facies, with eolian dunes and sand sheets, delta front and fluvial channel deposits representing the most porous facies, and fine-grained prodelta, fluvial overbank and lagoonal deposits constituting non-reservoirs. Diagenesis controlled reservoir quality through the preservation or reduction of porosity by compaction and cementation. The primary composition of the sandstones corresponds mostly to arkoses and lithic arkoses. Early anhydrite and calcite cemented sandstones close to evaporite and limestone beds. Quartz was the main mesodiagenetic cement, mainly as discontinuous overgrowths limited by chlorite coatings. Clay transformation and

neof ormation were extensive in the Juruá sandstones and resulted in illite, chlorite, illite-smectite and chlorite-smectite mixed-layers. Illite-smectite coatings are common and thick in the deltaic sandstones. Pore-filling chlorite occurs mostly in the deltaic sandstones, while chlorite coatings preserved the porosity of most eolian sandstones, which constitute the best reservoirs in the area. Intergranular fibrous illite reduced the permeability of some eolian and fluvial sandstones. These observations may help to understand and predict the distribution of quality and heterogeneities of the Juruá reservoirs and similar coastal-eolian successions, reduce exploration risks and improve the hydrocarbon recovery from producing fields.

Keywords: Coastal eolian deposits; Diagenesis; Clay authigenesis; Reservoir quality; Heterogeneity.

1. Introduction

Eolian successions are widely studied for constituting highly porous reservoirs holding expressive hydrocarbon accumulations, even at great depths (Seemann, 1982; Dixon *et al.*, 1989). However, a complex scenario is found in coastal eolian sequences, in which sabkha, fluvial, eolian and deltaic deposits are commonly found (e.g., Mankiewicz e Steidtmann, 1979; Purvis, 1992). Additionally, diagenetic processes imprint significant control on the distribution of reservoir quality and the heterogeneities of eolian successions, receiving significant attention in the literature (e.g., Mankiewicz e Steidtmann, 1979; Pye e Krinsley, 1986; Dixon *et al.*, 1989; Torres e Truckenbrodt, 1990; Hillier *et al.*, 1996; Vincent *et al.*, 2018). In Brazil, the Solimões Basin, located in the Amazon Region, represents the third most important oil and gas producer in the country, with 116,995 boe/d being produced from 7 fields (ANP, 2019). The main reservoirs are the coastal-sabkha/eolian sandstones of the Carboniferous Juruá Formation, which contain 26 billion m³ of gas in place (ANP, 2016).

Reservoir quality distribution in the Juruá Formation was affected by the complex diagenetic evolution of the deposits (Elias *et al.*, 2004). An integrated study was carried out in the Juruá Field area, located more than 700 km southwest of Manaus and 110 km west of the Rio Urucu oil and gas province, where all previously published studies were developed (Cunha *et al.*, 1988; Elias *et al.*, 2004). To our knowledge, no study of the Juruá Field sandstones has been previously published. This investigation, integrating systematic petrography and core analysis, was undertaken on the main production intervals of the Juruá Field with the aim to identify the diagenetic processes and products and their distribution and impact on reservoir quality. The enhanced understanding of the occurrence, distribution, evolution, and heterogeneities of the Juruá Formation may reduce the exploration risks in these and other similar reservoirs and optimize hydrocarbon recovery from the producing fields.

2. Geological Setting

The Solimões Basin, located in northern Brazil, is an intracratonic basin with E-W elongation, limited towards North by the Guyanas Shield, towards South by the Brazilian Shield, towards East by the Purus Arch, and towards West by the Iquitos Arch (Fig. 1). It is positioned between parallels 2° and 8°S and meridians 62° and 72°W and subdivided by the Carauari Arch into the Jandiátuba and Juruá sub-basins (Caputo & Silva, 1990).

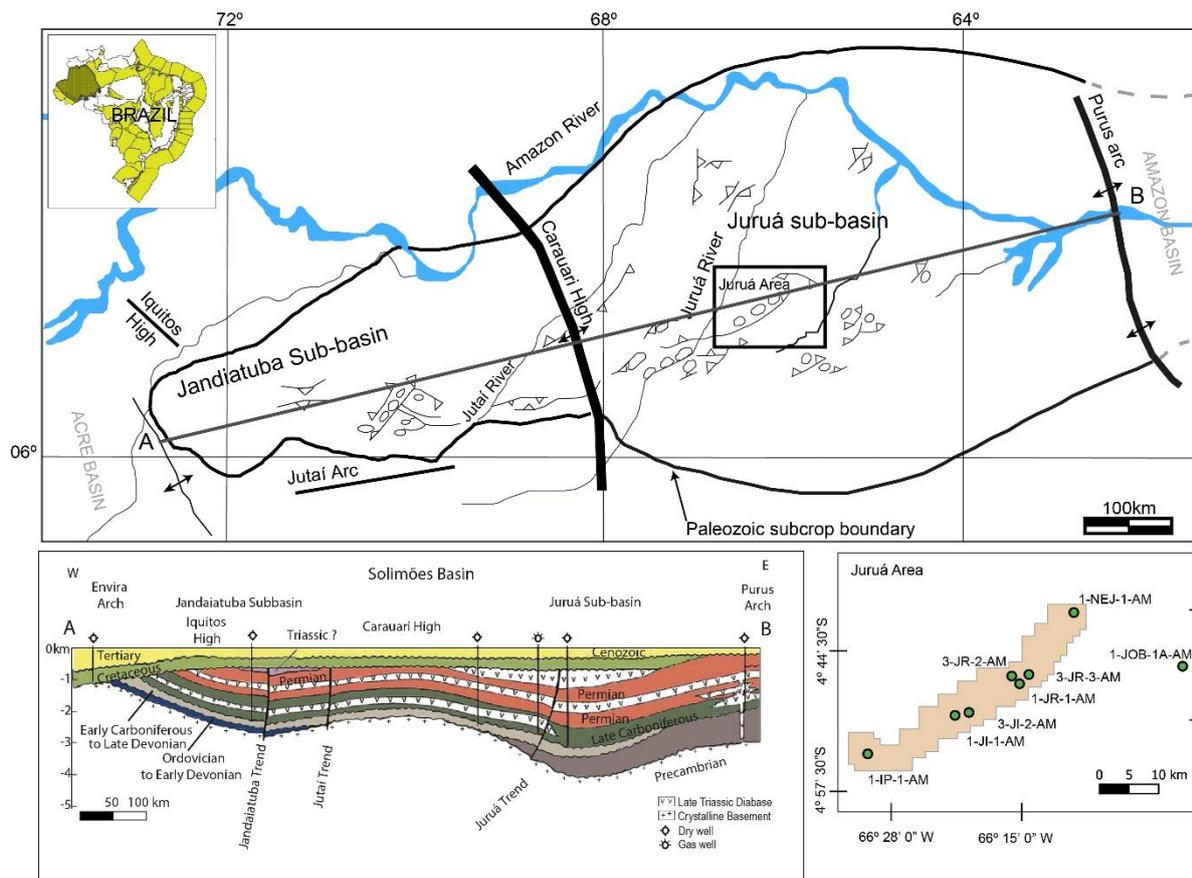


Figure 1. Geological context of the Solimões Basin and studied location. The position of 8 wells in the Juruá Area that were analyzed can be seen in detail at the bottom right. Schematic section in the lower left shows the sedimentary fill of the basin (adapted from Caputo, 2014).

The Solimões Basin is the third most important basin of Brazil in terms of petroleum production, with an average daily production of over 18.553 bbl of oil and 15.651 m³ of gas, only standing behind Santos and Campos Basin (ANP, 2019).

Sedimentation in the Solimões Basin started with the deposition of the Purus Group of Mesoproterozoic age after a rifting phase. The Purus Group is represented by the sediments deposited by fluvial systems with marine influence of the Prosperança, Acari and Prainha formations. The basin was then filled by five second-order depositional sequences limited by regional unconformities: Ordovician (Benjamin Constant Formation), Upper Silurian-Lower Devonian (Jutaí and Biá Formations), Middle Devonian-Lower Carboniferous (Marimari Group), Upper Carboniferous-Permian (Tefé Group), and Upper Cretaceous-Quaternary (Javari Group) (Wanderley Filho *et al.*, 2007; Fig. 1). The basal part of the Carboniferous-Permian sequence, known as the Juruá Formation, corresponds to the focus of this study.

The Tefé Group of Middle Carboniferous age, comprising the Juruá, Carauari, and Fonte Boa formations (Silva, 1987, 1988), was deposited during the partial continentalization and desertification of the Solimões Basin. The basal terrigenous sediments are represented by the Juruá Formation, which comprises the sandy section positioned between the Marimari Group and the base of the first thick anhydrite layer. The unit basal deposits comprise fluvial and transitional deposits, shifting to coastal eolian deposits with an accentuated marine influence towards the top of the formation. A marine incursion resulted in the drowning and reworking of the desert deposits. As a result, carbonate-evaporitic beds of the Carauari Formation were deposited over the Juruá Formation. The Carauari evaporites constitute the best seals in the entire basin.

The Juruá Formation corresponds to terrigenous deposits of the basal portion of the Tefé Group, comprising subarkose and sublitharenite sandstones (*sensu* Folk, 1968), shales, evaporites, and limestones deposited in a coastal eolian environment with increasing marine influence (Eiras, 1994). The upper contact of the formation is transitional to the Carauari Formation. Five sedimentary facies were identified by Cunha *et al.* (1988) in the Rio Urucu Area, comprising eolian dunes, interdunes, sand sheets, sand waves, and shoreface deposits. The eolian sandstones constitute the best reservoirs of the Juruá Formation (Cunha *et al.*, 1988).

3. Methodology

In this study, ninety-six epoxy-impregnated thin sections sampled from cores from 8 wells, seven of them within the limits of the Juruá Field and one to the east of the field (Fig. 1), were examined with standard petrographic microscopes. The volumes of detrital, diagenetic components, and porosity types were systematically quantified by counting 300 points in each of the sandstone samples using polarized light microscopes and recorded through the Petroledge© software (De Ros *et al.*, 2007). Staining with Alizarin red-S and potassium ferricyanide was applied to all thin sections to differentiate the carbonate minerals, as outlined by Dickson (1965). The petrographic description of associated lithologies was executed only in a qualitative mode through visual estimation of the volumes of the components. The photographic documentation of the analyzed samples was carried out with a Zeiss AXIO Imager A2 microscope equipped with a digital camera and ZEN TM 2011 software. The identified diagenetic processes and products were interpreted in accordance with the concepts described by Worden and Burley (2003).

Seven thin sections were carbon-coated and analyzed with a JEOL JSM-6610LV electron microscope equipped with a Bruker EDS (energy dispersive spectroscopy) equipment to examine the habits and paragenetic relationships of diagenetic constituents.

The petrological information was integrated with interpreted depositional facies and stratigraphy derived from the descriptions of cores from 7 wells belonging to the Juruá Field and additional well log and petrophysics data provided by Petrobras.

4. Facies analysis and stratigraphic framework

The analysed interval comprises essentially sandstones, pelites, limestones, dolostones, and evaporites. The main lithofacies (Fig. 2) and the interpreted depositional processes are described in Table 1. Four facies associations

were identified: (i) eolian dunes and sand sheet, (ii) fluvial channel and overbank deposits, (iii) delta front and prodelta, and (iv) lagoonal (Fig. 3).

4.1. Facies and facies analysis

4.1.1. Eolian dunes and sand sheet facies association

The eolian dunes and sand sheet facies association comprehends packages up to 9 meters thick, predominantly composed of very fine- to medium-grained, well-sorted sandstones presenting sets of low angle stratification (lithofacies Sl(e); Table 1), with thicknesses ranging from 0.3 to 2m, separated by sub-horizontal erosive surfaces. Internally, the low-angle strata are composed of inversely-graded climbing translantent wind ripples, with thicknesses of 1 -10mm. Sometimes, the low angle strata are composed of irregular and wavy laminae of fine- to medium-grained sandstones with thicknesses of 1 – 2 mm interspersed with millimeter levels (<1mm) of pelites, defining a crinkled texture (lithofacies Sla(e); Table 1). Intercalated with the low-angle strata, fine- to medium-grained, well-sorted sandstones are arranged in isolated sets of cross-trough stratification with thicknesses ranging from 0.2 to 2 m (lithofacies St(e); Table 1). The crossed layers are tangential to the base of the sets and are made up entirely of wind-ripple lamination.

Sandstones with sub-horizontal stratification, composed of inversely grading, climbing translantent ripple lamination are interpreted as sand sheet deposits formed by the migration and thrust of subcritical eolian ripple marks on a dry depositional surface (Hunter, 1977). Horizontal strata with millimeter, irregular and corrugated laminations are interpreted as adhesion structures (Kocurek & Fielder, 1982) generated by the adherence of sand grains to a wet surface. The cross-through stratifications (St(e)) that occur intercalated with the sub-horizontal strata are interpreted as residual deposits from eolian dunes. The fact that foresets are composed exclusively of wind-ripple laminations indicate well-developed or severely truncated slip-face dunes (Kocurek, 1991). The restricted lateral extension of the sets

suggests that the dunes were spatially isolated, separated by large areas of eolian sand sheets (Scherer et al., 2007).

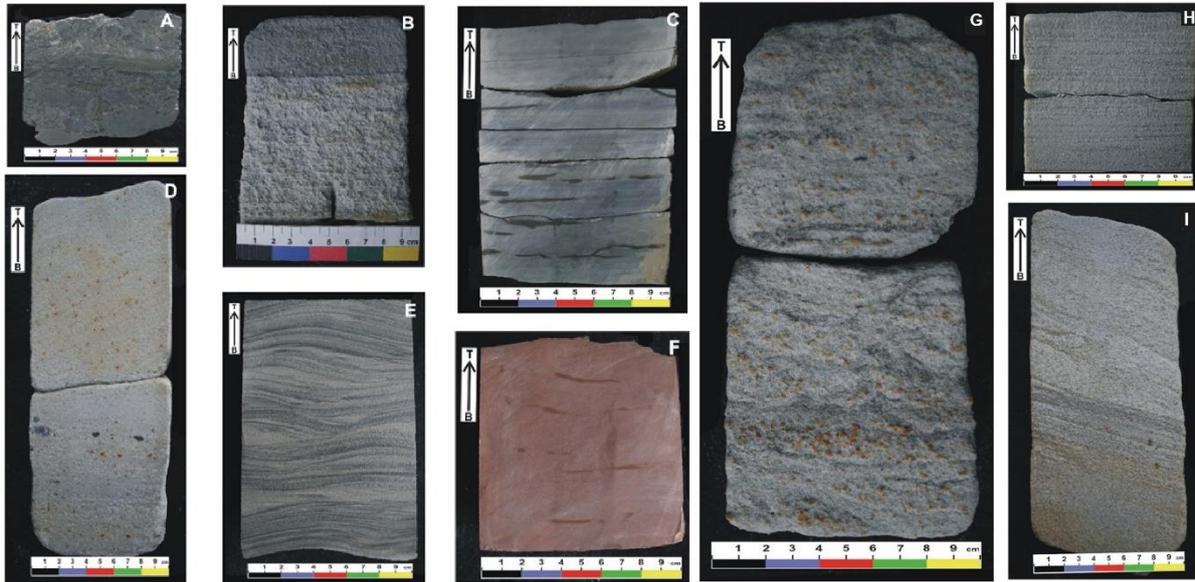


Figure 2. Main lithofacies of the Juruá Formation in the Juruá Area. Subaqueous lithofacies (A-F): (A) Intraformational, massive conglomerate (Gm); (B) Fine- to medium-grained sandstones with plane-parallel to low-angle cross laminations (Sl); (C) Laminated mudrock, gray (Fl); (D) Fine- to medium-grained sandstones with tangential cross-bedding; (E) Very fine- to fine-grained sandstones with supercritical ripple cross-lamination; (F) Massive, reddish pelite (Fm). Eolian lithofacies of the Juruá Formation (G-I): (G) Fine sandstones intercalated with discontinuous films of pelites, with wavy and corrugated laminations (Sl(a,e)); (H) Fine- to medium-grained sandstones with horizontal wind ripple laminations (Sl(e)); (I) Cross-bedded fine- to medium-grained sandstones composed of grain flows at the top and wind ripple lamination at the base of the cross-strata sets (St(e)).

4.1.2. Fluvial channel and overbank deposits facies association

The fluvial channel and overbank facies association comprehends fining-upward successions with thickness varying from 2 to 7 meters, with an average of 2 meters. The facies successions are limited at the base by erosive surfaces capped

by residual deposits (lags) of intraformational conglomerates (lithofacies Gm; Table 1), composed of pelite intraclasts, with thicknesses less than 10cm. The basal lags are overlaid by fine- to medium-grained sandstones with tangential cross-bedding (lithofacies St; Table 1), massive (lithofacies Sm; Table 1) or with low-angle cross-lamination (lithofacies Sl; Table 1), culminating in very fine-grained sandstone with ripple cross-lamination (lithofacies Sr; Table 1). Sometimes, the top of the succession is characterized by massive pelite deposits (lithofacies Fm; Table 1), reddish or, more rarely, dark gray.

This facies association is interpreted as fluvial channel deposits. The erosive surfaces that delineate the base of the sandy bodies and are capped by intraformational conglomerates can be interpreted as fifth order surfaces (terminology of Miall, 1988), representing the base of the fluvial channels. The vertical successions of facies composed predominantly of the St, Sl and Sr lithofacies are interpreted as channel-filling deposits of mixed charge. The fine sediments that occur at the top of the some cycles are interpreted as deposits outside the channel, formed by the settlement of fine sediments in floodplain lakes.

4.1.3. Deltaic facies association

The deltaic facies association is composed of dark gray, massive or finely laminated pelites (lithofacies Fm and Fl; Table 1), very fine- to fine-grained sandstones with ripple cross-lamination (lithofacies Sr; Table 1), tangential cross bedding (lithofacies St; Table 1) or massive (lithofacies Sm, Table 1), arranged in coarsening-upward successions (lithofacies Fm/Fl→Sr→Sm/St), with thicknesses from 3 to 6m.

Coarsening-upward cycles are interpreted as deltaic deposits formed by the deceleration of distal river flows as they enter an aqueous body. Fine deposits are formed by settling in a pro-delta context, while sandstones with ripples cross-lamination, tangential cross-bedding, massive or fluidized sandstones are interpreted

as delta-front deposits. The absence of facies indicative of wave and tide suggests a calm watery body protected from the action of marine processes.

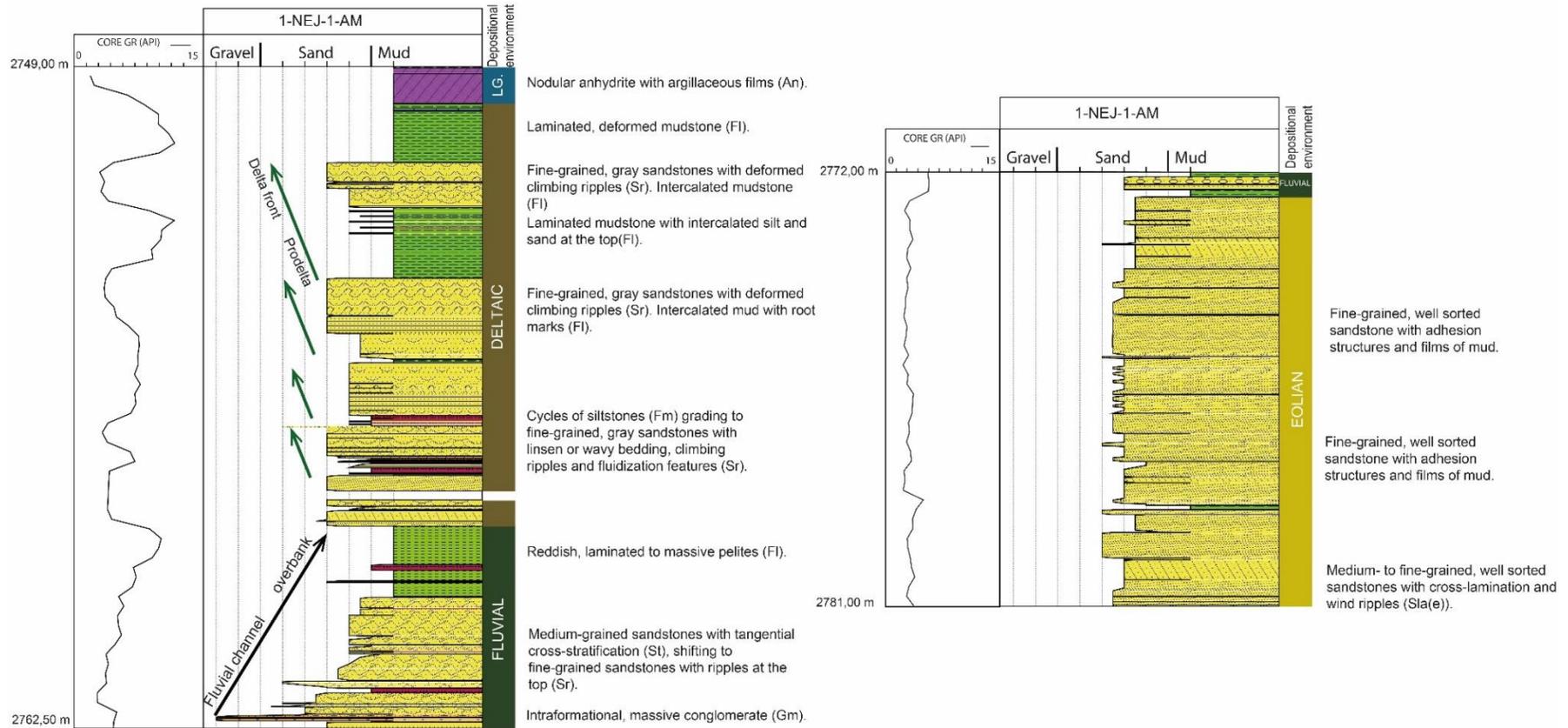


Figure 3. Facies successions in the Juruá Formation: succession of fining-upward fluvial and overbank deposits (black arrow) and coarsening-upward prodelta to front delta cycles (green arrows) ending in lagoonal deposits (left); sand bodies of eolian sand sheet with rare dune deposits (right).

4.1.4. Lagoonal facies association

The lagoonal facies association is represented by dark gray, massive or laminated pelites (lithofacies Fm and FI; Table 1), bioclastic mudstones, packstones and wackestones (lithofacies Lm; Table 1), dolostones (lithofacies Dm; Table 1) and white beds composed of coalesced nodules of anhydrite (lithofacies An; Table 1), 1-5m in thickness. Bioturbation is common in the pelites, and brachiopod fossils are abundant in the limestones and dolostones. Interbedding fine sand laminae occurs occasionally, often deformed by nodules of anhydrite.

The anhydrite beds are interpreted as the product of sulphate precipitation as nodules that displaced mud deposits in a coastal sabkha. Bioclastic limestones and dolostones are interpreted as deposition and dolomitization of carbonate mud and bioclasts deposited at the bottom of coastal lagoons during periods of high relative sea levels.

Code	Description	Interpretation
Gm	Intraformational conglomerate, massive, with subrounded to subangulosed fragments of mudrocks (0.3 to 5 cm) and sand matrix.	Channel lag deposits.
Sh	Very fine- to medium-grained, moderately to well sorted sandstones with plane-parallel laminations disposed in layers 0.2 to 1.5m thick.	Upper flux regime deposits.
SI	Fine- to medium-grained, moderately to well sorted sandstones presenting low angle (<5°) cross stratification sets 0.2 to 0.5m thick, resulting in cosets up to 1m thick.	Depression filling, humpback or attenuated dunes.
St	Fine- to medium-grained, moderately to well-sorted sandstones with cross-through stratification and sometimes mud intraclasts at the base of the sets or at the stratification planes. Sets are 0.1 to 0.6m thick and form cosets up to 3m in thickness.	3D subaqueous dunes migration.
Sm	Fine-grained, moderately to well sorted massive sandstones with disperse mud intraclasts.	Hiperconcentrated flux.
Sr	Fine to medium grained, moderately sorted sandstones with subcritical to supercritical climbing ripples.	Subaqueous wave forms
Fm	Massive, red or gray colored mudrocks in layers of 1 to 4m in thickness.	Gravitational settlement of particles in suspension with loss of internal structure due to bioturbation of mud flocculation.
FI	Red to gray colored mudrocks with plane-parallel lamination and discrete ripple marks.	Gravitational settlement of particles and small currents.
St(e)	Fine- to medium-grained, well sorted sandstones disposed in sets of cross through-tangencial beds 0.5 to 1m thick. Grain flux deposits of 1 to 3cm thick in the steepest part of the stratification grade to laminations of ondulated eolian forms at the base.	Eolian dunes migration.

Sl(e)	Medium- to fine-grained, well sorted sandstones disposed in sets of low angle cross stratification (<math><5^\circ</math>), 0.2 to 1m thick, resulting in cossets up to 7m in thickness. Internal lamination is undulated and eolian in origin.	Agradation of eolian wavy forms (sand sheets).
Sla(e)	Very fine- to fine-grained sandstones with horizontal and wavy laminations 0.3 to 1 cm thick intercalated with regular laminations of mudrocks, composing a crinkled texture. Cossets 0.2 to 2m thick.	Alternation between aqueous and eolian processes. Adhesion of sand to a wet surface creating wavy laminations.
An	Anhydrite in white beds of 1 to 5m with remains of carbonate mud matrix displaced by highly coalesced nodules.	Early displacive sulphate precipitation in coastal sabkha mud deposits.
Lm	Bioclastic limestones in thin beds (1m) presenting deformed lamination. Bioclasts comprehend mostly brachiopods, ostracodes and bivalve shells.	Deposition of mud and bioclasts in a calm, lagoonal setting during marine incursions.
Dm	Dolostones in beds 1 – 5m thick, locally biurbated, showing rare bioclasts.	Deposition of carbonate mud and bioclasts in a calm, lagoonal setting during marine incursions. Early dolomitization.

Table 1 – Lithofacies of the Juruá Formation described from cores from seven boreholes within the Juruá Field.

4.2. Stratigraphy

The studied stratigraphic succession was divided into three intervals, represented by different well log signatures (Fig. 4).

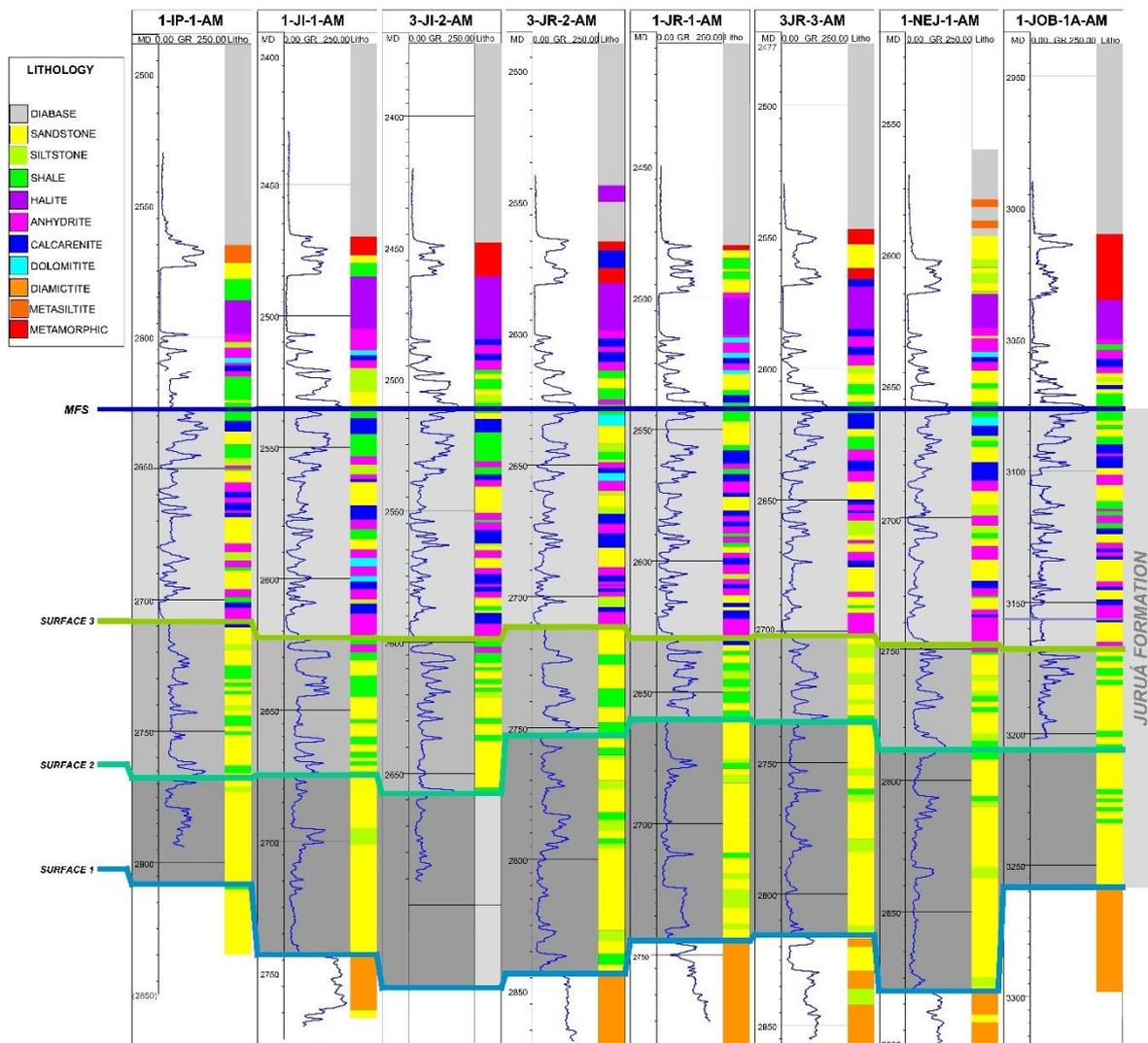


Figure 4. Juruá Formation occurrence in 8 wells from the Juruá area. The interval was divided into three sections based on well log signatures: basal (between surfaces 1 and 2); middle (between surfaces 2 and 3) and top (between surface 3 and a maximum flooding surface used as a datum).

The basal interval is characterized by mainly fluvial and eolian amalgamated sandy bodies, with rare and discontinuous levels of muddy deposits. This range has the greatest thickness (about 115m) in the northeast portion of the field (NEJ-1-AM well area; Fig. 1). The intermediate interval is, in turn, constituted by sandy bodies immersed in fine deposits. The sandy bodies are predominantly composed of fluvial and eolian deposits, with eolian deposits having higher permeability and porosity values, but lower lateral continuity. This interval is thicker

(about 60 meters) in the southwest portion of the field (IP-1-AM well; Fig. 1). The upper interval comprehends cycles of lagoonal to deltaic successions controlled by increasing marine incursions and ends in a maximum flooding surface, which was used as a datum. The cycles present significant thickness variations and may even be absent in some wells (Fig. 3).

5. Primary texture and composition of the sandstones

The sandstones are very fine- to coarse-grained, with an original essential detrital composition corresponding mostly to arkoses and lithic arkoses (*sensu* Folk, 1968; Figs. 5, 6A). Feldspar dissolution and intense albitization are responsible for most of the samples shift to their present predominant subarkose composition *sensu* Folk (1968; Fig. 5). This original essential primary composition corresponds to a predominant transitional continental provenance detrital mode *sensu* Dickinson (1985; Fig. 5).

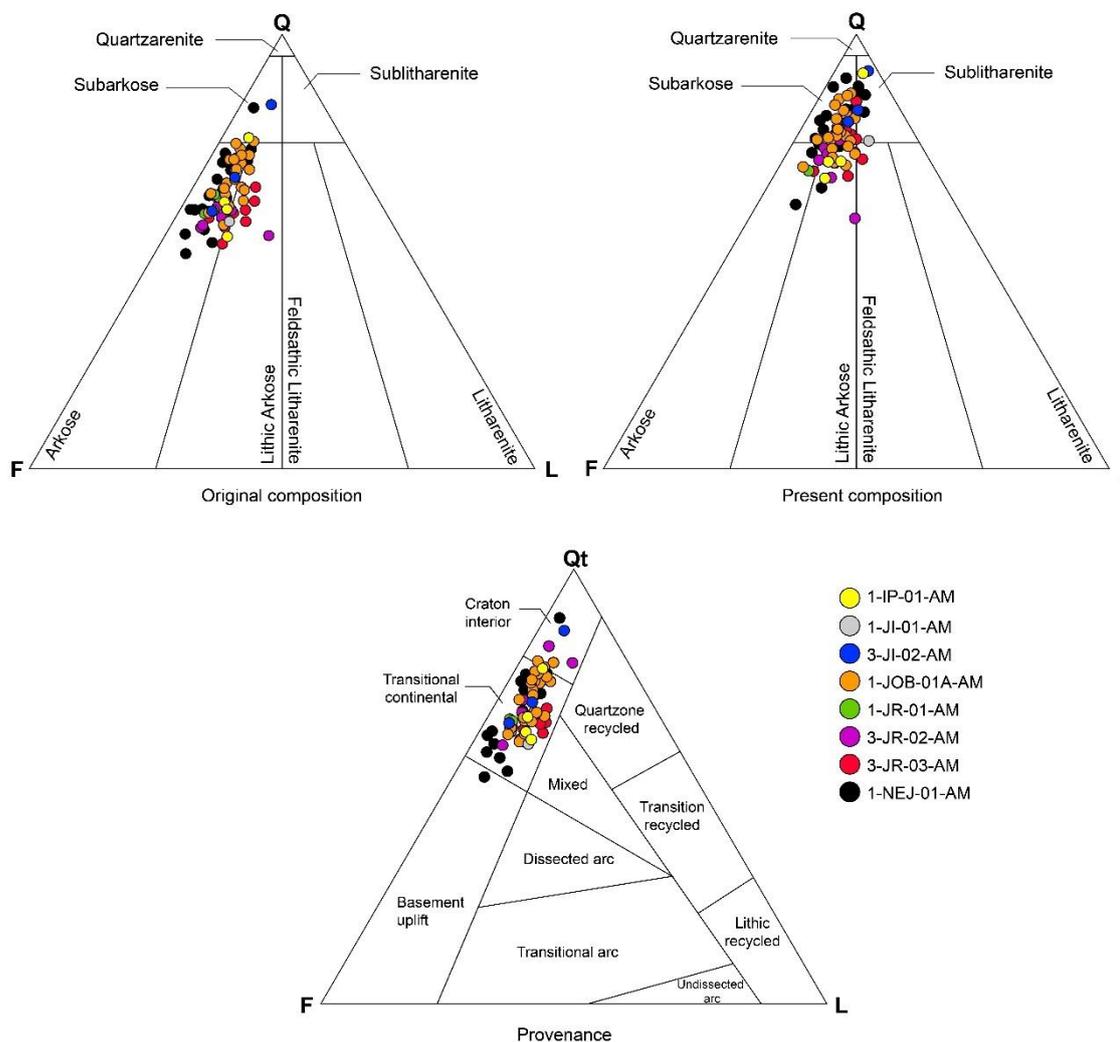


Figure 5. Original (top left) and present (top right) essential detrital composition of the sandstones of the Juruá Formation from 8 cores, plotted on Folk (1968) diagram. Original composition of the studied sandstones plotted on Dickinson (1985) tectonic provenance diagram.

The framework grains are predominantly composed by monocrystalline quartz (Table 2). Among the feldspar grains, microcline is the most common, occurring commonly fresh or partially dissolved, while plagioclase and orthoclase grains are usually extensively albitized and replaced by illite. Fragments of metamorphic rocks, mainly of slates and phyllites, are the most abundant, followed by plutonic rock fragments. Igneous volcanic rock fragments occur in lesser amounts and often replaced by iron oxides or chlorite, or partially dissolved. Mud intraclasts

are common, usually deformed by compaction. Accessory minerals include zircon, tourmaline, rutile and mica grains, which occur concentrated in very fine-grained sandstones and siltstones (Table 2).

Primary Constituent	All samples n=72		1-IP-1-AM n=4		1-JI-1-AM n=1		1-JOB-1A-AM n=26		1-JR-1-AM n=2		1-NEJ-1-AM n=17		1-JI-2-AM n=3		3-JR-2-AM n=10		3-JR-3-AM n=9	
	Max.	Av.	Max.	Av.	Max.	Av.	Max.	Av.	Max.	Av.	Max.	Av.	Max.	Av.	Max.	Av.	Max.	Av.
	Quartz - monocrystalline	61.7	43.5	55.3	45.2	39.0	39.0	54.7	43.7	45.0	42.3	58.0	43.9	61.7	52.4	47.3	43.6	47.0
Quartz - polycrystalline	9.0	1.7	2.7	1.8	2.0	2.0	9.0	2.4	0.7	0.5	4.0	1.1	3.3	1.2	7.0	1.6	2.7	0.9
Microcline	12.7	4.8	12.0	6.3	3.7	3.7	9.0	5.5	9.0	7.5	12.7	4.6	4.0	1.6	7.7	4.5	4.3	3.3
Plagioclase	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Perthite	1.0	0.2	0.7	0.3	0.0	0.0	0.7	0.1	0.0	0.0	0.3	0.0	0.7	0.2	0.7	0.2	1.0	0.5
Feldspar undifferentiated	2.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	1.7	1.0	2.3	0.6	1.7	0.6	1.0	0.2	0.0	0.0
Plutonic rock fragment	10.7	3.2	6.0	3.4	1.7	1.7	7.0	3.1	5.3	4.2	9.0	3.0	3.7	2.2	10.7	6.4	1.0	0.5
Sedimentary rock fragment	5.0	0.5	0.3	0.3	0.3	0.3	1.7	0.5	0.7	0.5	1.0	0.3	1.0	0.3	5.0	1.1	1.3	0.7
Metamorphic rock fragment	6.3	2.5	5.3	3.9	6.0	6.0	6.3	2.4	1.7	1.5	3.7	2.0	5.0	3.1	3.3	1.9	5.3	3.3
Volcanic rock fragment	6.3	1.6	2.3	1.5	1.7	1.7	3.0	1.6	2.0	1.5	2.3	1.4	3.3	1.6	6.3	2.0	2.7	1.8
Mud intraclast	7.3	1.7	4.0	1.6	0.7	0.7	5.7	1.3	4.3	3.2	6.3	1.9	3.0	1.1	3.0	0.8	7.3	3.5
Muscovite	1.7	0.3	0.3	0.2	0.0	0.0	1.0	0.3	0.7	0.5	1.7	0.4	0.3	0.2	0.3	0.0	1.0	0.5
Biotite	1.0	0.0	0.3	0.1	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	1.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Calcite - monocrystalline	3.7	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	3.7	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Carbonaceous organic matter	1.0	0.0	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.1	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0
Siliciclastic mud matrix	18.7	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	3.7	0.1	0.0	0.0	18.7	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Carbonate matrix	53.5	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	53.5	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Carbonate particles	11.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	11.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Primary constituent undifferentiated	1.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	0.6
Heavy mineral undifferentiated	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Apatite	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Rutile	0.7	0.2	0.3	0.1	0.3	0.3	0.3	0.1	0.3	0.2	0.3	0.2	0.0	0.0	0.3	0.1	0.7	0.4
Tourmaline	0.7	0.3	0.7	0.4	0.3	0.3	0.7	0.3	0.3	0.3	0.7	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.7	0.3
Zircon	1.0	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.7	0.3	0.3	0.3	0.7	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	1.0	0.5

Table 2 - Modal primary composition of the Juruá sandstones from 8 cores.

6. Associated lithologies

Carbonates, evaporites, and mudrocks occur intercalated with the sandstones in the studied interval. Thirteen samples from three wells (1-JOB-1A-AM, 3-JR-03-AM, and 3-JR-2-AM) correspond to carbonates, represented mostly by

bioclastic micritic rocks classified as bioclastic packstones, wackestones, and mudstones, and subordinately by bioclastic peloidal packstones and marls. Most of the samples show irregular textural lamination modified by stylolitization. Siliciclastic grains are common, and the bioclasts include crinoids, echinoids, brachiopods, bryozoans, mollusks, ostracodes, and foraminifers recrystallized and replaced by silica, dolomite and anhydrite.

Evaporites occur rarely intercalated to the sandstones of well 3-JR-3-AM, represented by nodular or massive anhydrite, which were recognized as a product of diagenetic replacement of an organic micritic matrix.

Mudrocks are represented by siltstones and sandy siltstones in wells 1-JI-1-AM, 1-JR-1-AM, and 1-NEJ-1-AM, and by sandy claystones in wells 3-JR-3-AM and 1-NEJ-1-AM. The siltstones show irregular or deformed lamination due to intense bioturbation, except for one sample that shows partially preserved tangential cross lamination. They show levels with high concentrations of mica and carbonaceous organic matter and are cemented by quartz and carbonates. The sandy claystones show textural lamination and extensive hematite replacement, except for one ooidal claystone sample containing compacted clay ooids and intense replacement by siderite.

7. Diagenetic constituents

The volumes and locations of the main diagenetic constituents and pore types are presented in Table 3. The main diagenetic constituents of the interval were separated according to the interpreted depositional environment for each sandstone sample from the described cores and are presented in table 4.

7.1. Silicates

Diagenetic silicates include quartz, feldspars, tourmaline, illite, chlorite, and their mixed-layers with smectite, and vermiculite. Albite is the most abundant diagenetic constituent in the studied sandstones (Table 3), replacing almost completely the orthoclase and plagioclase grains (Fig. 6B). It also occurs in limited

amount as overgrowths on replaced feldspar grains, which in places show partial dissolution while the grains are still preserved. K-feldspar epitaxial overgrowths on microcline grains are rare. Syntaxial quartz overgrowths represent the most important cement in Juruá sandstones (Table 3), as well as in the siltstones. Quartz cementation was, on average, less expressive in the eolian, than in fluvial and deltaic sandstones (Table 4). The overgrowths discontinuously cover the grains, postdating diagenetic clay coatings and compaction in most of the samples (Fig. 6C), but completely obliterated intergranular porosity in some (Fig. 6D). Although the overgrowths engulfed some illite rims, they were usually inhibited by chlorite rims (Fig. 7B). Quartz ingrowths also filled grain fractures. Fractures in the mudrocks were filled by coarse-crystalline quartz. Microcrystalline quartz and chalcedony replaced particle and matrix in associated carbonates and evaporites. Diagenetic tourmaline occurs in trace amounts as syntaxial overgrowths and prismatic crystals, covering discontinuously the detrital tourmaline grains in some samples.

Diagenetic Constituent and Porosity type	All samples n=72		1-IP-1-AM n=4		1-JI-1-AM n=1		1-JOB-1A-AM n=26		1-JR-1-AM n=2		1-NEJ-1-AM n=17		1-JI-2-AM n=3		3-JR-2-AM n=10		3-JR-3-AM n=9	
	Max.	Av.	Max.	Av.	Max.	Av.	Max.	Av.	Max.	Av.	Max.	Av.	Max.	Av.	Max.	Av.	Max.	Av.
	Albite - overgrowth	1.3	0.4	1.3	0.6	0.7	0.7	1.0	0.3	1.0	0.8	1.0	0.2	0.0	0.0	1.3	0.6	1.0
Albite - intragranular	20.3	9.9	14.0	9.9	16.3	16.3	16.0	7.6	10.3	9.5	20.3	13.0	20.3	11.8	17.0	10.3	12.7	9.2
Anhydrite - interparticle	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Anhydrite - intergranular	11.7	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0	0.8	0.0	0.0	11.7	0.7	1.3	0.4	0.7	0.3	10.0	2.3
Anhydrite - intragranular	10.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	3.7	0.3	0.0	0.0	4.0	0.3	0.0	0.0	2.0	0.3	10.0	2.1
Anhydrite - intraparticle	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Barite - intergranular	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	2.0	0.3
Bitumen halo - intergranular	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0
Calcite - intergranular	10.0	0.5	2.7	0.7	0.0	0.0	10.0	1.2	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	4.7	0.5	0.0	0.0
Calcite - intragranular	11.7	0.7	2.3	0.6	0.0	0.0	11.7	1.4	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	8.7	0.9	0.0	0.0
Chlorite - grain cover total	5.0	1.5	5.0	1.3	3.0	3.0	3.7	0.7	3.3	1.8	5.0	2.9	1.7	0.6	5.0	1.7	3.0	1.0
Chlorite - coating	5.0	0.9	0.0	0.0	3.0	3.0	3.7	0.6	0.7	0.3	5.0	2.0	0.0	0.0	3.3	0.7	2.7	0.9
Chlorite - intergranular	10.3	0.7	0.0	0.0	1.0	1.0	2.0	0.1	3.0	2.0	10.3	2.1	2.3	0.8	5.7	0.6	0.0	0.0
Chlorite - intragranular	7.3	0.8	1.0	0.4	0.7	0.7	1.0	0.1	1.0	1.0	7.3	1.7	1.0	0.3	2.7	0.5	4.3	1.4
Chlorite - rim	5.0	0.5	5.0	1.3	0.0	0.0	0.7	0.1	2.7	1.5	3.7	0.9	1.7	0.6	4.3	1.0	0.7	0.1
Tourmaline overgrowth	0.3	0.1	0.3	0.2	0.0	0.0	0.3	0.1	0.3	0.2	0.0	0.0	0.3	0.2	0.3	0.2	0.0	0.0
Diagenetic clay undifferentiated - intergranular	9.7	1.7	4.0	2.8	2.0	2.0	4.3	1.4	3.0	1.7	9.7	1.6	5.0	3.6	2.7	0.9	5.0	2.4
Diagenetic silica - fibrous - intraparticle	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Diagenetic titanium mineral - intragranular	2.0	0.4	0.3	0.2	0.0	0.0	0.7	0.3	0.3	0.3	2.0	0.7	0.7	0.4	1.0	0.4	1.0	0.6
Dolomite - intergranular	9.0	1.0	6.0	1.6	0.3	0.3	9.0	1.6	1.0	0.7	0.7	0.1	0.3	0.1	9.0	1.2	3.7	1.0
Dolomite - intragranular	5.3	0.9	1.7	1.1	0.0	0.0	5.3	1.5	1.7	0.8	2.0	0.3	0.0	0.0	1.7	0.5	3.7	1.3
Dolomite - intraparticle	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Smectite - intragranular	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.1	0.0	0.0
Fe-Calcite - intergranular	3.7	0.2	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	0.1	0.0	0.0	3.0	0.6	3.7	1.0
Fe-Calcite - intragranular	4.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.1	0.0	0.0	2.7	0.6	4.3	1.1
Fe-Dolomite/Ankerite - intergranular	4.0	0.2	4.0	1.2	0.7	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.2	1.0	0.7	0.0	0.0	2.7	0.7
Fe-Dolomite/Ankerite - intragranular	2.0	0.3	2.0	0.7	0.0	0.0	0.7	0.0	0.7	0.3	1.3	0.4	2.0	0.9	0.7	0.2	1.7	0.5
Hematite - intergranular	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.1

Hydrocarbon - intergranular	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Illite - intergranular	7.3	0.2	4.3	1.2	1.0	1.0	7.3	0.3	0.0	0.0	3.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Illite - intragranular	6.7	1.0	1.7	0.9	1.0	1.0	3.7	1.1	0.7	0.7	1.3	0.7	1.0	1.0	1.3	0.7	6.7
K-Feldspar - overgrowth	0.7	0.2	0.7	0.4	0.0	0.0	0.7	0.3	0.3	0.3	0.3	0.1	0.0	0.0	0.3	0.2	0.3
Lithic pseudomatrix	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.1	0.0
Mud pseudomatrix	10.3	1.0	3.0	1.3	0.7	0.7	3.7	0.5	3.3	2.0	5.3	1.3	1.7	0.6	5.7	0.8	10.3
Oil - intergranular	1.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.1	1.0
Pyrite - Intraparticle	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Pyrite - intergranular	5.7	0.2	0.0	0.0	0.3	0.3	5.7	0.4	0.0	0.0	1.7	0.1	0.0	0.0	1.7	0.2	1.0
Pyrite - intragranular	5.0	1.1	2.3	1.4	1.0	1.0	3.3	0.9	0.7	0.7	3.7	0.7	0.3	0.3	1.0	0.7	5.0
Quartz - intergranular	2.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3
Quartz - internal growth	0.3	0.0	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Quartz - overgrowth	18.0	5.4	10.7	4.5	1.0	1.0	18.0	7.2	2.3	2.0	15.3	4.4	15.7	9.0	12.0	4.7	9.3
Siderite - intergranular	3.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3	0.2	1.3	0.4	0.0	0.0	0.0
Siderite - intragranular	3.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	3.0	0.3	0.7	0.4	0.0	0.0	0.0
Diagenetic iron oxide/hydroxide - intragranular	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.1	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0
Diagenetic iron oxide/hydroxide undifferentiated - intergranular	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0
Vermiculite - intergranular displacive	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Porosity - Framework	5.7	1.3	1.3	0.8	1.0	1.0	4.0	1.7	1.7	1.5	3.0	1.0	0.7	0.4	3.0	1.4	5.7
Porosity - Interstitial	33.3	4.7	12.7	3.9	14.3	14.3	19.3	3.7	11.0	9.8	17.0	4.4	6.3	2.6	33.3	7.8	11.3
Porosity - Other	3.7	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	3.7	0.5	0.0	0.0	2.7	0.4	0.3	0.1	0.0	0.0	1.0
Porosity - Total	33.3	6.4	14.0	4.7	15.3	15.3	22.7	6.0	12.7	11.3	19.3	5.8	6.7	3.1	33.3	9.1	17.0

Table 3. Modal diagenetic composition and pore types of the Juruá sandstones from 8 cores.

Diagenetic clay minerals are expressive in the Juruá sandstones and are represented essentially by illite, chlorite, and chlorite-smectite and illite-smectite mixed-layers. Diagenetic undifferentiated clay were identified by SEM-EDS analysis to be mostly coatings of interstratified illite-smectite (I/S) and constitute the most common authigenic clays (Table 3; Fig. 6E). They are usually thicker and more common in deltaic sandstones with pseudomatrix. Microcrystalline illite replaces mud intraclasts and feldspar grains (Table 3; Fig. 6F, 7A). Fibrous illite commonly fills and bridges across intergranular pores in fluvial sandstones (Table 3; Fig. 7A). Chlorite is important in eolian, fluvial and deltaic sandstones, as coatings, rims, intergranular sheaves or microcrystalline, pore-filling and grain-replacive aggregates (Table 3; Figs. 7B, 7C, 7D). Interstratified chlorite/smectite coatings and rims were also identified in some samples by SEM-EDS analysis. Chlorite rims are thicker in the most porous fluvial sandstones, where they are in places impregnated by oil. Some samples show thick chlorite sheaves that completely filled intergranular pore spaces, occasionally associated with pore-filling microcrystalline chlorite (Table 3). Microcrystalline chlorite replaced more commonly mud intraclasts, biotite, and volcanic rock fragments (Table 3; Fig. 7D). Additionally, SEM-EDS analysis of the

ooidal claystone sample showed that the clay ooids are composed of chamosite, while the remains of the replaced matrix are composed of interstratified C/S. Lamellar vermiculite rarely occurs replacing and expanding biotite grains.

7.2.Sulfates

Diagenetic sulfates are represented by anhydrite, barite and gypsum. Anhydrite occurs in the sandstones as poikilotopic pore-filling cement and replacing grains (Table 3; Fig. 7E) and is more abundant close to evaporites. Grain packing is looser in areas cemented by anhydrite. In most samples, anhydrite cement occurs in small amounts, locally replacing intergranular chlorite or being replaced by carbonates. In contrast, anhydrite is the most important cement in sandstones close to evaporites. Furthermore, average anhydrite cement volumes are higher in eolian sandstones (Table 4). Barite is rare and occurs locally as poikilotopic pore-filling cement in a couple of samples. All evaporites in the studied interval are a product of replacement of organic micritic matrix by fibrous to prismatic anhydrite nodules. Gypsum occurs only filling fractures in the mudrocks.

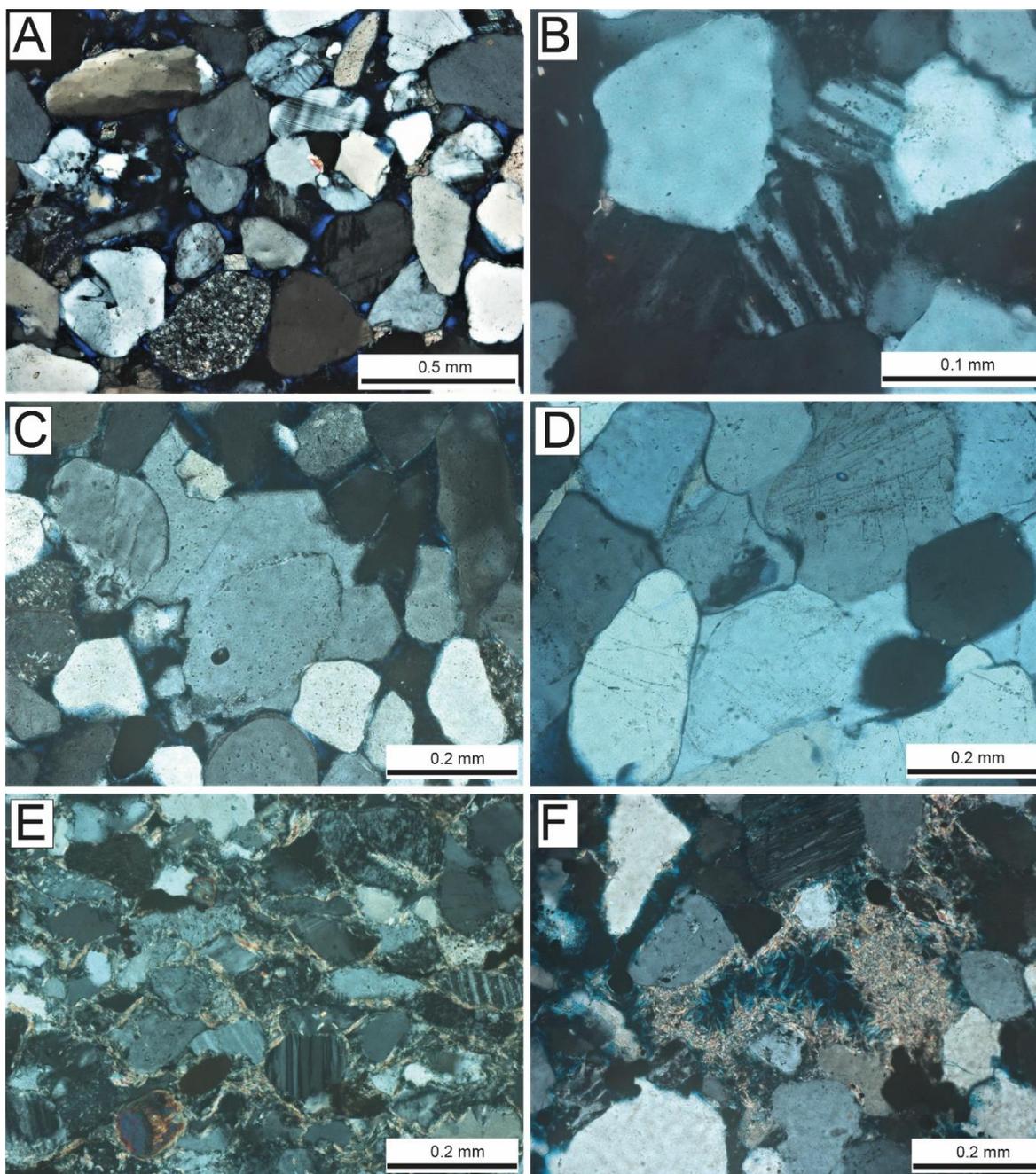


Figure 6. Optical photomicrographs with crossed polarizers representing: (A) Typical Juruá sandstones detrital composition. (B) Plagioclase grains replaced by albite. (C) Quartz overgrowth covering clay-hematite coatings. (D) Quartz overgrowths obliterating intergranular porosity. (E) Thick illite-smectite clay coatings. (F) Fibrous illite replacing mud intraclast and filling intergranular pores.

7.3. Carbonates

Coarse-crystalline to poikilotopic calcite fills intergranular pores and replaces grains (Fig. 7F). Calcite commonly filled partially of the porosity in most samples, usually covering quartz overgrowths and replacing pore-filling anhydrite and chlorite, constituting locally up to 10% volume of pore-filling cement (Table 3). The porosity of sandstones close to the carbonates is obliterated by calcite cement. Dolomite cementation is equally expressive and was identified in a variety of forms. Small rhombs of slightly ferroan dolomite occur as an early phase, replacing mud intraclasts and filling intergranular pores, postdating clay coatings but preventing compaction where in larger amounts. Macrocrystalline and saddle dolomite filled intergranular pores and replaced grains locally. These areas lack quartz cementation and are thus interpreted to have been cemented by anhydrite previously to dolomite. Coarse-crystalline ferroan dolomite/ankerite and ferroan calcite often occur together replacing grains and filling pores. Fe-Calcite seems to have replaced Fe-dolomite. Macrocrystalline to blocky siderite filled intergranular pores and mostly replaced the grains in 3 wells. Its distribution is scattered throughout the samples, usually oxidized and associated with Fe-dolomite and sulfides. Overall, carbonate cementation is more significant in fluvial and deltaic sandstones (Table 4). In the evaporites, micro- to coarse-crystalline dolomite occurs replacing remnants of the micritic matrix. Siderite replaced extensively some mudrocks, and partially the chamosite clay ooids. The carbonate rocks were often dolomitized, and their bioclasts were replaced by dolomite and Fe-calcite after being silicified and replaced by anhydrite.

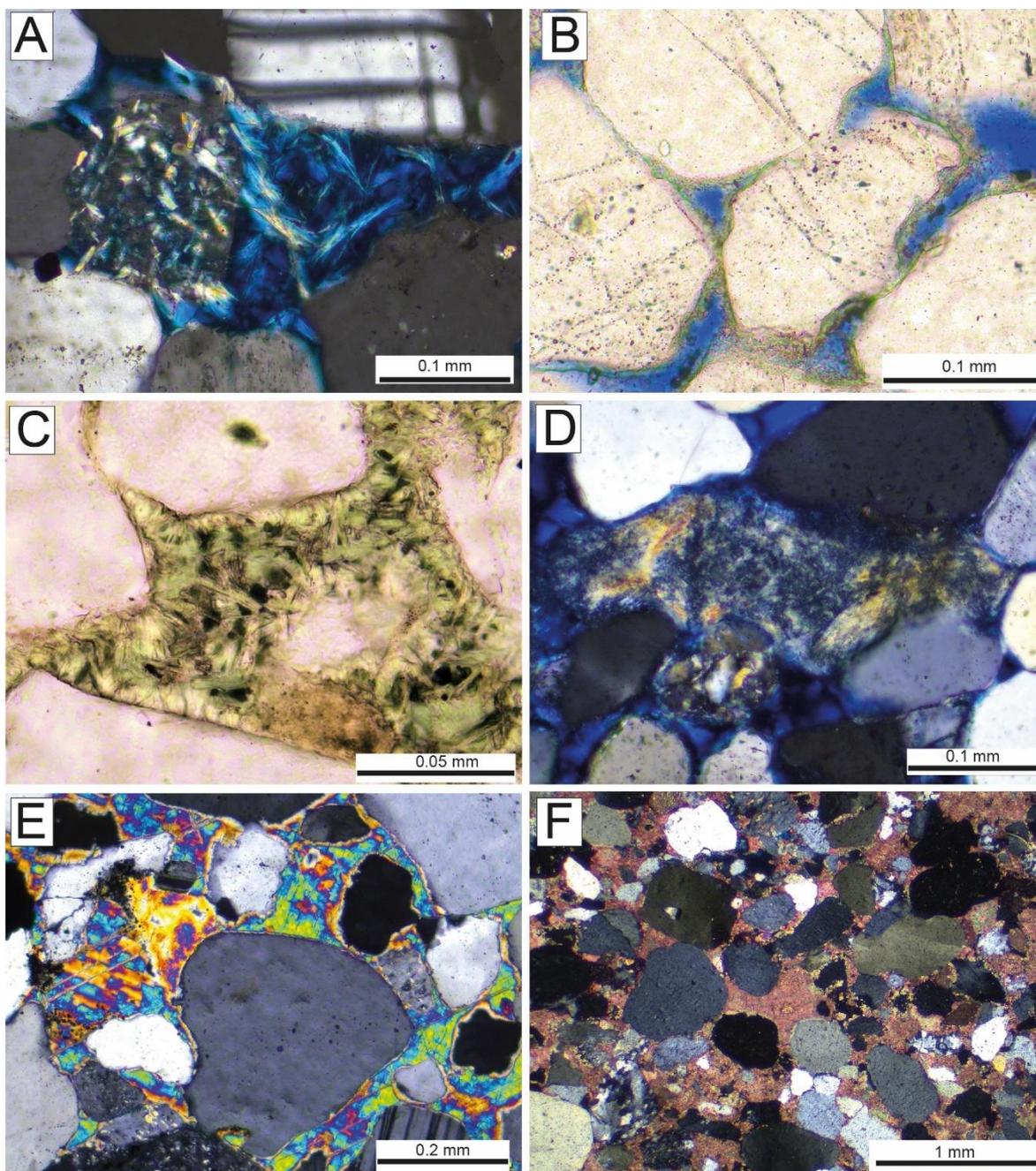


Figure 7. (A) Fibrous illite replacing feldspar grain (central left) and filling intergranular porosity (central right). Crossed polarizers (XP). (B) Chlorite rims in porous sandstone under plane polarizers (PP). (C) Chlorite sheaves replacing pseudomatrix. Uncrossed polarizers (PP). (D) Microcrystalline chlorite replacing mud intraclast (XP). (E) Poikilotopic anhydrite filling intergranular porosity and replacing grains (XP). (F) Macrocrytalline calcite (stained pink) cement obliterating intergranular porosity(XP).

7.4. Fe and Ti oxides

Microcrystalline iron oxides occur mostly replacing heavy minerals and volcanic rock fragments. They also replace titanium minerals and siderite, and locally clay coatings or the framework dispersed throughout the samples. Hematite is rare in the sandstones, occurring as coatings that produce a reddish color, but substantially replaced some of the mudrocks. Diagenetic titanium minerals often replaced heavy minerals, in places forming agglomerates of small prismatic crystals.

7.5. Other diagenetic constituents

Pyrite occurs in most of the samples, with framboidal, microcrystalline or blocky habits. It can constitute locally up to 5.66% as intergranular, and up to 5% as grain-replacive forms (Table 3). Framboidal pyrite is the more common than microcrystalline, commonly replacing mud intraclasts, heavy minerals, or volcanic and metasedimentary rock fragments. Blocky pyrite occurs locally, replacing framework and interstitial materials as scattered concretions, or as discrete crystals replacing the other diagenetic phases. In the evaporites, microcrystalline and framboidal pyrite replaced anhydrite and matrix remnants. Bitumen and oil are present in some of the porous samples as intergranular stains or bubbles. Oil also impregnated chlorite rims in some samples.

Constituent	Deltaic n = 20		Eolian n = 11		Fluvial n = 15	
	Max.	Av.	Max.	Av.	Max.	Av.
Quartz overgrowth	10.7	4.4	10.0	2.7	15.7	4.6
Anhydrite cement	11.7	0.7	10.0	1.6	0.0	0.0
Carbonate cement	9.0	1.4	4.0	1.1	9.0	1.9
Illite pore filling	0.0	0.0	5.0	2.4	4.0	0.3
Chlorite pore filling	10.3	2.0	0.0	0.0	1.0	0.1
I/S pore-lining	9.7	1.8	2.3	1.0	5.0	2.1
Chlorite pore-lining	7.0	2.1	5.0	1.3	5.0	2.0
Pseudomatrix	10.7	3.5	3.3	1.1	10.3	1.7
Pyrite	5.0	1.1	3.3	1.1	5.0	1.5
Porosity	10.0	2.2	19.3	9.4	17.7	8.2

Table 4. Distribution of main diagenetic products and petrographic porosity in the Juruá sandstones in each of the identified depositional environments.

8. Porosity and compaction

Macroporosity reaches up to 33% in the analyzed samples, and it is mainly intergranular (Table 3). Secondary porosity is represented mostly by intragranular pores from feldspars and intraclasts dissolution or, more rarely, by rock and grain fractures and intergranular cement dissolution. Porosity is higher in the eolian and fluvial sandstones than in deltaic sandstones (Table 4). A plot of intergranular volume versus intergranular cement (Fig. 8; cf. Ehrenberg, 1989) shows that eolian sandstones were less cemented, but that some samples lost much of their porosity due to compaction. Deltaic sandstones lost more porosity due to compaction than to cementation and contain more pseudomatrix. Fluvial sandstones were the less affected by compaction but suffered considerable cementation.

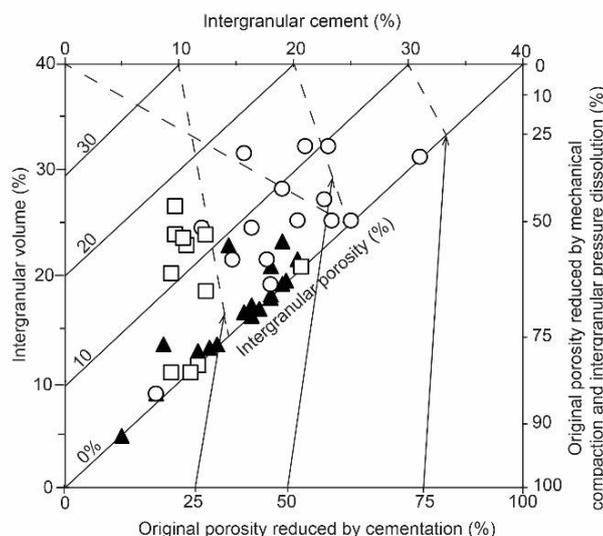


Figure 8. Plot of intergranular volume (%) versus cement (%) (cf. Ehrenberg, 1989; modif. Houseknecht, 1987) for 46 sandstone samples of the Juruá Formation. (Different symbols represent the three types of deposits identified in this study: open squares = eolian; open circles = fluvial; black triangles = deltaic).

9. Discussion

9.1. Depositional environments and stratigraphy of the Juruá Formation

The interpreted facies and facies successions indicate that the Juruá Formation was deposited by eolian, fluvial, deltaic and lagoonal systems at a coastal area under an arid condition. Sand sheets were probably positioned proximal to the sea, constituting a transition between the dune and marine environments (Cunha *et al.*, 1988). Sea level rises represented by the deposition of bioclastic mud are thought to have caused the flooding of the erg's margin, resulting in lagoons and evaporite and carbonate precipitation environments along the coastal areas.

The studied stratigraphic succession is marked by a fluvial-eolian domain at the base, passing to a fluvial-eolian-deltaic context in the intermediate portion and culminating with deltaic deposits at the top, suggesting that the Juruá

Formation is included within a second-order transgressive system tract (Carboniferous-Permian sequence). The transition from amalgamated sand bodies (basal section) to sand bodies immersed in fine deposits (intermediate section) to increasing lagoonal deposition (upper section) ending in a maximum flooding surface represents a wetting-upward pattern, which is interpreted as the response to the rise of the water table during advance of the marine incursion that settled in the central-western region of Gondwana during the Early Pennsylvanian (Wanderley Filho *et al.*, 2007; Da Silva Costa *et al.*, 2020).

9.2. Diagenetic Evolution

A diagenetic evolution for the Juruá area was defined based on petrographic evidence of textural relationships among the diagenetic minerals and their timing with compaction. The diagenetic sequence is presented in Figure 9.

The succession of diagenetic events was similar to that interpreted by Elias *et al.* (2004). Eodiagenesis took place under oxidizing conditions and was characterized by clay and hematite coatings, dissolution of feldspars, volcanic rock fragments, and mud intraclasts, and localized cementation by dolomite and anhydrite. During mesodiagenesis, precursor clay coatings were transformed, authigenic clays precipitated, and most cementation occurred. At the end of mesodiagenesis, reducing fluids percolated the interval, and hydrocarbons were locally accumulated in the porous rocks. Telodiagenesis was very limited.

	Eodiagenesis	Mesodiagenesis	Telodiagenesis
SILICICLASTIC ROCKS			
Hematite	■		
Clays	■ smectite → I/S	■ chlorite and illite	
Dissolution	■		■
Dolomite	■ microrhombs to blocky	■ poikilotopic	
Mechanical compaction	■		
Chemical compaction		■	
Albitization		■	
Quartz overgrowths		■	
Feldspar overgrowths		■	
Anhydrite	■ poikilotopic		
Fe-Dolomite/Ankerite		■ poikilotopic, blocky and saddle	
Calcite/Siderite	■ non-Fe calcite	■ non-Fe calcite and siderite	
TiO ₂ /Pyrite			■
Barite		■	
Hydrocarbons			■
Iron oxides/hydroxides			■
Gypsum			■ fibrous
CARBONATES-EVAPORITES			
Anhydrite	■ fibrous	■ prismatic	
Dolomite	■ mosaic	■ blocky and saddle	
Silica (microquartz, chalcedony and megaquartz)	■ micro-	■ chalcedony	■ mega-
Calcite	■ non-ferroan		■ ferroan
Pyrite	■		■

Figure 9. Generalized sequence of the main diagenetic events for siliciclastic rocks and carbonate and evaporites of the Juruá Formation.

9.2.1. Eodiagenesis

Early diagenetic processes occurred under arid conditions. Anhydrite and dolomite precipitation took place in a marginal sabkha environment soon after deposition, as suggested by the displacive nodular fabric found in the evaporites and dolostones (Fig. 9-10). Limited anhydrite cementation in the eolian sandstones

resulted from the precipitation in dunes flanks and sand sheets by the infiltrating marine pore waters (Glennie, 1987; Cunha *et al.*, 1988). As observed in the Urucu area, the very limited clay infiltrated in the eolian deposits indicated the absence of meteoric supply, even as ephemeral streams, when the sequence was deposited (Elias *et al.*, 2004).

The oxidizing environmental conditions promoted the precipitation of iron oxides from the dissolution of detrital heavy minerals. Much of the iron oxides were dissolved by the percolation of reducing fluids during burial and are preserved only in fine-grained deltaic deposits (cf. De Ros & Scherer, 2012). The absence of eodiagenetic pyrite in the analyzed sandstones indicates that oxidizing conditions prevailed in subaerial environments until the end of eodiagenesis. In contrast, eodiagenetic pyrite associated with anhydrite in the evaporites may have formed by bacterial sulfate reduction in sabkha sediment (e.g., Mankiewicz and Steidtmann, 1979).

The abundant mud intraclasts (Table 3) resulted in additional porosity reduction by mechanical compaction due to pseudomatrix formation. The larger volume of mud intraclasts in the eolian sand sheet facies (Fig. 10) are attributed to their short eolian reworking. In the fluvial channel sandstones, however, the effects of mechanical compaction were reduced by early dolomite cementation, as indicated by the loose packing of samples cemented by dolomite microrhombs or small blocky crystals. However, calcite cement precipitated locally in sandstones containing reworked carbonate grains and particles that served as nucleation surfaces and may cause microscale heterogeneities by cementing lag deposits at the base of fluvial channel facies or more probably deltaic sandstones in the upper interval (e.g., Scherer & De Ros, 2007).

The proximal, coarser facies display diagenetic alterations different from the lagoonal facies association. The early dolomitization of lagoonal micrite was followed by silicification. Fibrous anhydrite extensively replaced part of these deposits, resulting in evaporite beds that can be traced throughout the basin. The diagenesis of the carbonates and evaporites continued during mesodiagenesis with recrystallization to coarser anhydrite, which was replaced by ferroan dolomite and in places calcite (Fig. 9).

9.2.2. Mesodiagenesis

Mechanical compaction was responsible for formation of mud pseudomatrix and local grain fracturing. Chemical compaction was limited but contributed to quartz overgrowth cementation, which is present in higher volumes at greater depths in the analyzed wells. The cementation by quartz overgrowths was dominant throughout burial diagenesis and was probably supplied by Si mostly coming from dissolution of feldspars and other silicate grains. Albite intensively replaced plagioclase and orthoclase grains, and precipitated as small overgrowths or discrete crystals. The precipitation of K-feldspar overgrowths was limited, and they commonly show later dissolution.

With progressive burial, clay coatings of original smectitic composition were transformed into illite–smectite mixed-layers, illite and chlorite (cf. Moraes and De Ros, 1990; Fig. 9). The direct neoformation of chlorite rims was probably the result of the alteration and dissolution of volcanic rock fragments and heavy minerals. Chlorite coatings and directly neoformed rims were responsible for intergranular porosity preservation through the inhibition of quartz overgrowths (Hillier *et al.*, 1996; Anjos *et al.*, 2003; Bahlis & De Ros 2013; Fig. 10). Illite replaced plagioclase and orthoclase grains, while chlorite replaced volcanic rock fragments and mud intraclasts. Well-developed fibrous illite is related to the dissolution of feldspars and mud intraclasts. As indicated by the K-Ar ages, the authigenesis of illite in the Juruá Formation is related to the late Triassic magmatism (200 Ma) and the Jurassic tectonism (150 Ma) (Elias *et al.*, 2007). The replacement of pseudomatrix by chlorite sheaves occurred mainly in the deltaic sandstones (Fig. 7C). Some rare thick platy chlorite is interpreted to represent a *llb* polytype, formed under higher temperatures (Spötl *et al.*, 1994).

Burial anhydrite cementation occurred mainly as widespread poikilotopic cement or filling selectively the pores of coarser laminae of sandstones close to the evaporite beds. The predominant occurrence of anhydrite in the sandstones in contact with the evaporites (Fig. 11) represents a strong stratigraphic

control during mesodiagenesis (Purvis, 1992; Elias *et al.*, 2004). Anhydrite was later replaced by non-ferroan calcite, especially in the top section of the Juruá Formation. This section was better sampled at the JOB-1A-AM well, showing calcite cementation obliterating intergranular pores in most samples. Calcite cement precipitated after quartz, anhydrite and chlorite when fluids probably derived from the limestones beds of the interval percolated through nearby sandstones beds that still had some permeability. Post-compactional ferroan carbonates are interpreted to have formed at higher temperatures due to organic matter decarboxylation (Elias *et al.*, 2004). The last carbonate phases were ankerite and siderite, both occurring replacing the other carbonates.

Mesodiagenetic corrosive replacive pyrite is probably a result of thermal reduction of sulphate (Machel, 2001; Worden *et al.*, 2000). The percolation of reducing fluids containing organic acids or similar solvents was probably responsible for the generation of limited amounts of secondary porosity due to the dissolution of feldspars and mud intraclasts (e.g. Vincent *et al.*, 2018).

9.2.3. *Telodiagenesis*

The telodiagenesis of the studied section is quite limited, being represented by local dolomite and siderite oxidation and by the precipitation of fibrous gypsum in fractures. These products are probably related to the deep percolation of meteoric fluids during the Mesozoic uplift related to the Jurassic-Cretaceous tectonism.

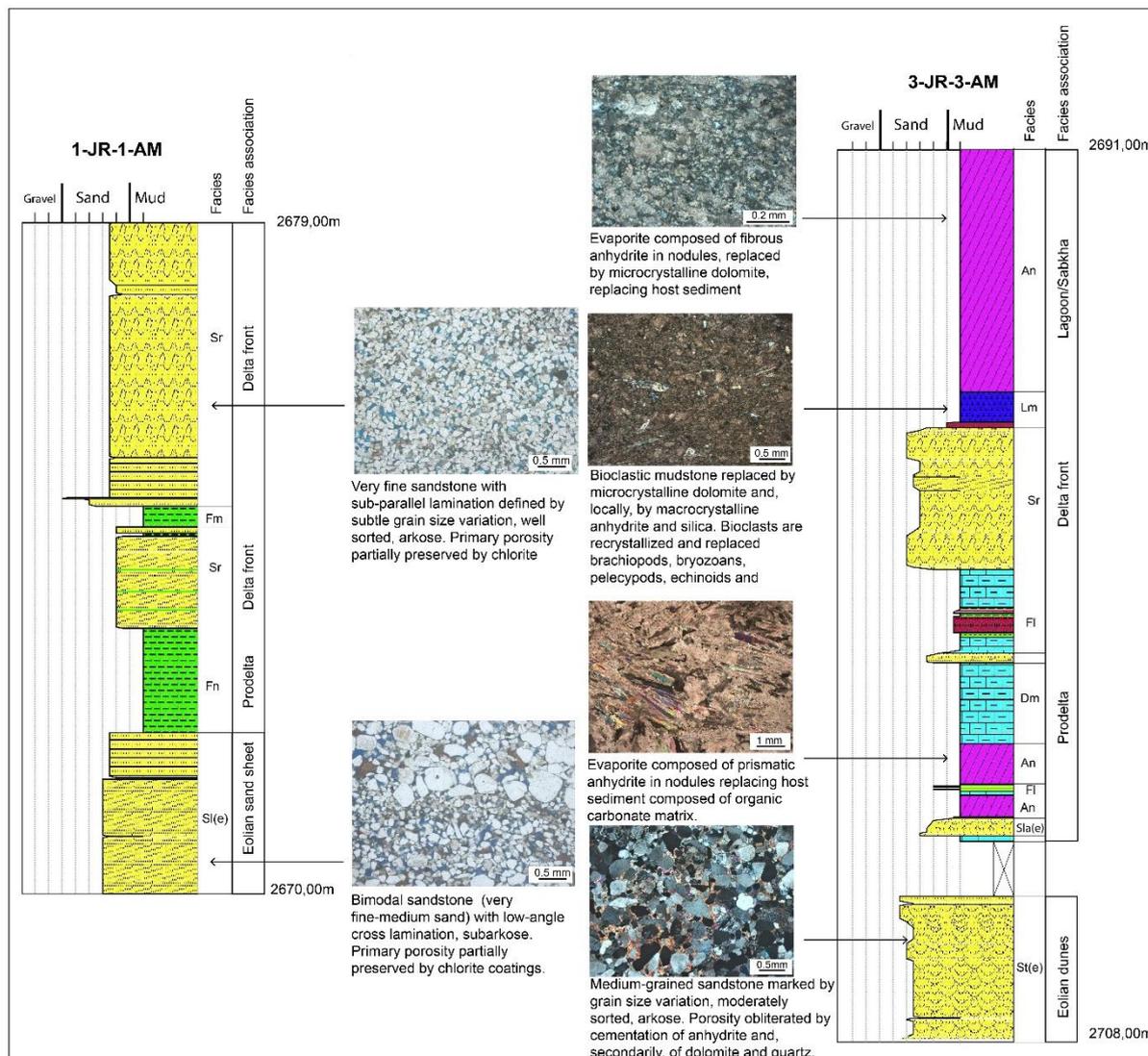


Figure 10. Examples of the impact of diagenesis on reservoirs of the Juruá Formation. Porous sandstones of eolian sand sheet and delta front deposits in which cementation was inhibited due to chlorite coatings (left). Anhydrite cementation of eolian dune deposits close to evaporites (right).

9.3. Reservoir quality and heterogeneities

The reservoir quality of the studied Juruá Formation interval is a complex interplay of stratigraphy, depositional environments, and diagenesis. The identified lower, intermediate, and upper stratigraphic intervals of the Juruá Formation show distinct reservoir characteristics. The thick sandy bodies of the basal

interval constitute reservoirs with high lateral and vertical depositional connectivity. The fine deposits of the intermediate interval result in mostly fluvial and eolian reservoirs with low vertical and lateral continuity (in sometimes cases without correlation between adjacent wells with spacing < 3km). Lastly, the deltaic cycles of the upper interval show reduced thicknesses but may represent reservoirs with significant volumes due to extensive lateral continuity of some of the sandstone cycles.

Petrographic porosity can reach more than 30% in the Juruá sandstones (Table 3), while the reservoirs in the studied production zones show moderate intergranular porosities (10-20%, Fig. 8). The best reservoirs are represented by eolian and, secondly, by fluvial (channel) deposits (Fig. 8). Deltaic sandstones show low porosities, mostly due to mechanical and chemical compaction, generating stylolites and pseudomatrix (Fig. 8, Table 4), with the exception of the less compacted delta front sand bodies with chlorite coatings (Fig. 10).

The depositional environments exerted direct control on early diagenesis and also were important to the preservation of porosity during burial. As in other deep eolian reservoirs, pore-lining authigenic chlorite was identified to inhibit quartz cementation, preserving primary porosity in some samples (Dixon *et al.*, 1989; Hillier *et al.*, 1996; Ajdukiewicz *et al.*, 2010). Porosity preservation due to chlorite was of major importance in the eolian sandstones that, despite slight porosity loss due to compaction, constitute the best reservoirs of the interval (Fig. 8). Nevertheless, deltas and coastal fluvial environments constitute a best scenario for pore-lining chlorite formation, as these systems bring together materials that will be the basis for chlorite formation during burial (Dowey *et al.*, 2012). The formation of chlorite coatings was probably favored in the Juruá sandstones by the rising sea level, as these coatings were noted to be more prevalent in deltaic deposits during transgressive and early highstand systems tracts (Morad *et al.*, 2010).

The paleogroundwater system represents a possible controlling mechanism in the type of clay coat formed in eolian deposits and their potential for porosity preservation in deep reservoirs. Intergranular chlorite was, however, detrimental to reservoir quality in deltaic sandstones with high content of mud

intraclasts and pseudomatrix. The distribution of pore-lining authigenic clays in the described deposits of eolian sand sheets or lower flanks of dunes suggests that these sediments were soon positioned below the phreatic level (see Ajdukiewicz *et al.*, 2010). However, where intergranular fibrous illite was precipitated, the pore throats were partially obstructed, causing reduction in permeability. In the analyzed samples, intergranular illite is commonly associated with porous sandstones that show significant feldspar and mud intraclasts dissolution. Both intergranular chlorite and illite occur in higher amounts in the basal interval.

Overall, the mesodiagenetic processes were mostly linked to stratigraphic controls and to migration of fluids during events of tectonism and magmatism that affected the Solimões Basin. The facies distribution exerted local control over anhydrite, calcite, and quartz cementation processes. Cementation by Fe-dolomite/ankerite and, in smaller amounts, siderite significantly occluded part of the porosity in some samples, and its distribution may be related to migration paths of fluids sourced from the Devonian shales, being more abundant close to faults. Secondary porosity due to the dissolution of mostly feldspar and mud intraclasts was not substantial (Table 3). Anhydrite cement dissolution is, however, responsible for a significant part of the present porosity in some of the sandstones that were not affected by other types of cementation, but the volumetric importance of this process was hard to access.

10. Conclusions

The Juruá Formation was deposited during a second-order transgressive system tract (Upper Carboniferous-Permian sequence) under an arid climate. Four facies associations were identified in cores from seven wells from the Juruá field: eolian dunes and sand sheets; fluvial channel and overbank deposits; delta front and prodelta; and lagoonal. Well log analysis allowed the division of the interval represented by the Juruá Formation into three intervals, defined by different well log signatures. Fluvial-eolian deposits are predominant at the base, passing to a fluvial-eolian-deltaic context in the intermediate portion and culminating with deltaic

and lagoonal/sabkha deposits at the top. The three intervals contain sand bodies that constitute reservoirs of different thicknesses and lateral continuities.

The systematic petrographic analysis focused on investigating the diagenetic evolution of the rocks at the Juruá area showed a complex interplay of depositional, diagenetic and stratigraphic controls on reservoir quality. Eolian sandstones represent the best reservoirs, with fluvial and deltaic sandstones being more affected by compaction and cementation processes. Depositional environment and facies controlled the primary porosity of the sandstones. Eodiagenesis occurred mostly under oxidizing conditions, resulting in hematite and clay coatings and anhydrite, calcite and dolomite cementation. Early dolomite was responsible for inhibiting the mechanical compaction of fluvial sandstones. Mesodiagenetic percolation of fluids was strongly related to the stratigraphy and the influence of tectonic-magmatic events that disturbed the basin. Quartz overgrowths, anhydrite, dolomite, and calcite were precipitated as cements during mesodiagenesis. Illite and chlorite authigenesis was expressive in the interval, both as pore-filling and pore-lining phases. Chlorite coatings and rims had a major role in the preservation of porosity of some intervals. The origin of the heterogeneities of the Juruá Formation in the area were therefore interpreted to be depositional (facies-controlled), stratigraphic and diagenetic. The recognized patterns of quality and heterogeneities of the Juruá Formation shall contribute to reduce the exploration risks in these and other similar reservoirs, as well as to optimize hydrocarbon recovery from the producing fields. Nevertheless, further studies are required for a precise prediction of their occurrence and distribution.

Acknowledgments

The authors wish to thank Petrobras for access to samples and well data. Special acknowledgments to the research support granted by Brazil National Research Council— CNPq. We acknowledge the access to the support and analytical facilities of the Institute of Geosciences of Rio Grande do Sul Federal University.

References

- Ajdkiewicz, J. M., Nicholson, P. H. & Esch, W. L., 2010. Prediction of deep reservoir quality using early diagenetic process models in the Jurassic Norphlet Formation, Gulf of Mexico. *AAPG bulletin*, v. 94, n. 8, 1189-1227.
- ANP. Agência Nacional do Petróleo. Home page: www.anp.gov.br.
- Anjos, S. M. C., De Ros, L.F. & Silva, C. M. A. 2003. Chlorite authigenesis and porosity preservation in the Upper Cretaceous marine sandstones of the Santos Basin, offshore Eastern Brazil, in R. H. Worden and S. Morad, eds., *Clay cements in sandstones: International Association of Sedimentologists Special Publication 34*, 291–316.
- Bahlis, A. B. & De Ros, L.F. 2013. Origin and impact of authigenic chlorite in the Upper Cretaceous sandstone reservoirs of the Santos Basin, eastern Brazil. *Petroleum Geoscience*, v. 19, n. 2, 185-199.
- Caputo, M.V. & Silva, O. B., 1990. *Sedimentação e tectônica da Bacia do Solimões. Origem e evolução de bacias sedimentares*: Rio de Janeiro, Petrobras, 169-193.
- Caputo, M. V. 2014 Juruá orogeny: Brazil and Andean countries. *Brazilian Journal of Geology*, v. 44, p. 181-19.
- Cunha, P. R. C.; Silva, O. B. & Eiras, J. F. 1988. Interpretação faciológica e ambiental do principal reservatório de hidrocarbonetos da Bacia do Solimões-Área do Urucu. *In: 35° Congresso Brasileiro de Geologia*. SBG, Belém, Anais. 2439-2456.
- Da Silva Costa, M., De Oliveira, R. S., De Mendonça Barbosa, R. C., De Barros Mota, C. 2020. Early Pennsylvanian fluvial-Aeolian interplay in the Amazonas Basin (central-western Gondwana) and its relation to marine transgression. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 104, 102857.
- De Ros, L.F., Goldberg, K., Abel, M., Victoretti, F., Mastella, L. & Castro, E. 2007. Advanced Acquisition and Management of Petrographic Information from Reservoir Rocks Using the Petroledge® System. *In: American Association of Petroleum Geologists Annual Convention and Exhibition 2007*, Houston, Extended Abstracts Volume.

- De Ros, L.F. & Scherer, C. M. S. 2012. Stratigraphic controls on the distribution of diagenetic processes, quality and heterogeneity of fluvial-aeolian reservoirs from the Recôncavo Basin, Brazil. *Int. Assoc. Sedimentol. Spec. Pub.*, v. 45, p. 105-132.
- Dickinson, W.R. 1985. Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones. *In: Provenance of arenites*. Springer, Dordrecht. p. 333-361.
- Dixon, S. A.; Summers, D. M. & Surdam, R. C., 1989. Diagenesis and preservation of porosity in Norphlet Formation (Upper Jurassic), southern Alabama. *AAPG Bulletin*, v. 73, n. 6, 707-728.
- Dowey, P. J., Hodgson, D. M., Worden, R. H. 2012. Pre-requisites, processes, and prediction of chlorite grain coatings in petroleum reservoirs: a review of subsurface examples. *Marine and Petroleum Geology*, v. 32, n. 1, 63-75.
- EHRENBERG, S. N. 1989. Assessing the relative importance of compaction processes and cementation to reduction of porosity in sandstones: discussion; compaction and porosity evolution of Pliocene sandstones, Ventura Basin, California: discussion. *AAPG bulletin*, v. 73, n. 10, p. 1274-1276.
- Eiras, J. F., Becker, C. R., Souza, E. M., Gonzaga, F. G., da Silva, J. G., Daniel, L.M.F, Matsuda, N. S. & Feijó, F. J. 1994. Bacia do Solimões. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 8.
- Elias, A. R., De Ros, L. F., Mizusaki, A. M., & Anjos, S. M. 2004. Diagenetic patterns in eolian/coastal sabkha reservoirs of the Solimões Basin, northern Brazil. *Sedimentary Geology*, v. 169, n. 3-4, 191-217.
- Elias, A. D., De Ros, L. F., Mizusaki, A. M., & Kawashita, K. 2007. Isotopic evidence on the diagenetic evolution of coastal sabkha reservoirs from the Solimões Basin, northern Brazil. *Gondwana Research*, v. 11, n. 4, 553-567.
- Folk, R.L. 1968. *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill's Pub., Austin, Texas, 107 pp.
- Glennie, K. W. 1987. Desert sedimentary environments, present and past—A summary. *Sedimentary Geology*, v. 50, n. 1-3, 135-165.
- Hillier, S., Fallick, A.E. & Matter, A. 1996. Origin of pore-lining chlorite in the aeolian Rotliegendes of northern Germany. *Clay Minerals*, 31(2), 153-171.

- Hunter, R. E. 1977. Basic types of stratification in small eolian dunes. *Sedimentology*, v. 24, n. 3, p. 361-387.
- Kocurek, G. 1991. Interpretation of ancient eolian sand dunes. Annual review of Earth and planetary sciences, v. 19, n. 1, p. 43-75.
- Kocurek, G. & Fielder, G. 1982. Adhesion structures. *Journal of Sedimentary Research*, v. 52, n. 4, 1229-1241.
- Machel, H.G. 2001, Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings – old and new insights: *Sedimentary Geology*, v. 140, 143-175.
- Mankiewicz, D. & Steidtmann, J.R. 1979. Depositional environments and diagenesis of the Tensleep Sandstone, Eastern Big Horn Basin, Wyoming. In: P.A. Scholle and P.R. Schluger (Editors), Aspects of Diagenesis. SEPM Special Publication. *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists*, Tulsa, Ok., 31, 9-336.
- Miall, A. D. 1988. Architectural elements and bounding surfaces in fluvial deposits: anatomy of the Kayenta Formation (Lower Jurassic), southwest Colorado. *Sedimentary Geology*, v. 55, n. 3-4, 233-262.
- Morad, S., Al-Ramadan, K., Ketzer, J. M. & De Ros, L. F. 2010. The impact of diagenesis on the heterogeneity of sandstone reservoirs: A review of the role of depositional facies and sequence stratigraphy. *AAPG bulletin*, v. 94, n. 8, 1267-1309.
- Moraes, M.A. & De Ros, L. F. 1990. Infiltrated clays in fluvial Jurassic sandstones of Recôncavo Basin, northeastern Brazil. *Journal of Sedimentary Research*, v. 60, n. 6, 809-819.
- Purvis, K. 1992. Lower Permian Rotliegend sandstones, southern North Sea: a case study of sandstone diagenesis in evaporite-associated sequences. *Sedimentary Geology*, 77(3-4), p.155-171.
- Pye, K. & Krinsley, D.H. 1986. Diagenetic carbonate and evaporite minerals in Rotliegend aeolian sandstones of the southern North Sea: their nature and relationship to secondary porosity development. *Clay Minerals*, 21(4), 443-457.
- Scherer, C. M., Lavina, E. L., Dias Filho, D. C., Oliveira, F. M., Bongioiolo, D. E., & Aguiar, E. S. 2007. Stratigraphy and facies architecture of the fluvial–aeolian–lacustrine Sergi Formation (Upper Jurassic), Recôncavo Basin, Brazil. *Sedimentary Geology*, v. 194, n. 3-4, 169-193.

- Seemann, U., 1982. Depositional facies, diagenetic clay minerals and reservoir quality of Rotliegend sediments in the Southern Permian Basin (North Sea): a review. *Clay Minerals*, v. 17, n. 1, 55-67.
- Silva, O. B. 1987. *Análise da Bacia do Solimões (revisão litoestratigráfica magmatismo e geoquímica)*. 177p. M. Sc. Thesis. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Silva, O. B. 1988. Revisão estratigráfica da Bacia do Solimões. *In: Congresso Brasileiro de Geologia*. p. 2428-2438.
- Spötl, C., Houseknecht, D. W. & Longstaffe, F. J. 1994. Authigenic chlorites in sandstones as indicators of high-temperature diagenesis, Arkoma foreland basin, USA. *Journal of Sedimentary Research*, v. 64, n. 3a, 553-566.
- Torres, A.M., Truckenbrodt, W. 1990. Características petrográficas e diagenéticas dos arenitos da Formação Monte Alegre na Região do Rio Tapajós, Bacia do Amazonas. *In: 36º Congresso Brasileiro de Geologia. Anais...* Sociedade Brasileira de Geologia, Natal, RN, 360-373.
- Vincent, B., Waters, J., Witkowski, F., Daniau, G., Oxtoby, N., Crowley, S. & Ellam, R., 2018. Diagenesis of Rotliegend sandstone reservoirs (offshore Netherlands): The origin and impact of dolomite cements. *Sedimentary Geology*, 373, 272-291.
- Wanderley Filho, J. R., Eiras, J. F. & Vaz, P. T. 2007. Bacia do Solimões. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 15, n. 2, 217-225.
- Worden, R.H., Smalley, P.C. & Cross, M.M. 2000. The influence of rock fabric and mineralogy on thermochemical sulfate reduction: Khuff Formation, Abu Dhabi. *Journal of Sedimentary Research*, v. 70, no. 5, 1210–1221.
- Worden, R. H. & Burley, S.D. 2003 Sandstone diagenesis: the evolution of sand to stone. *Sandstone diagenesis: Recent and ancient*, v. 4, 3-44.

10 ANEXOS

Uma pasta em formato digital contendo:

- Planilha em formato excel contendo o resultado das descrições de lâminas que foram quantificadas.
- Perfis integrados dos poços em formato PDF.
- Resultados obtidos em análises por EDS e imagens dos pontos analisados por MEV.

ANEXO I

Título da Dissertação/Tese:

Evolução Diagenética e Heterogeneidade dos Reservatórios do Carbonífero na Área de Juruá, Bacia do Solimões

Área de Concentração: Estratigrafia

Autor: **ELIAS CEMBRANI DA ROCHA**

Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando De Ros

Examinador: **Dr. Anderson José Maraschin**

Data: 27/07/2021

Conceito: A

PARECER:

O estudo desenvolvido pelo aluno ELIAS CEMBRANI DA ROCHA e seu orientador proporcionou uma importante contribuição à geologia da Bacia do Solimões, pois escassos são os estudos geológicos nesta bacia. Mais raros ainda são os estudos petrográficos/diagenéticos dos depósitos arenosos carboníferos, potenciais reservatórios de gás natural e óleo da bacia.

Assim, a dissertação supre a falta de um estudo petrográfico dos arenitos carboníferos e litologias associadas da Formação Juruá, contemplando o reconhecimento dos processos e produtos diagenéticos e, integrado aos dados de perfis de poços e reconhecimento de associações de fácies, possibilitou a constatação das fácies reservatório da formação.

Em termos gerais, a dissertação está muito bem escrita com raros erros de digitação ou ortográficos, o que possibilita ao leitor uma fácil compreensão do conteúdo. Os objetivos foram atingidos, as referências, embora algumas um tanto antiquadas, são apropriadas para o estudo e as figuras são de ótima resolução e autoexplicativas.

Demais observações e sugestões estão elencadas em arquivo anexo, o qual poderá ser consultado pelo autor e seu orientador.

Parabenizo o autor e seu orientador pela qualidade técnica e científica do trabalho, o qual contribuiu para uma melhor compreensão não apenas do potencial petrolífero da Bacia do Solimões, mas também da evolução geológica da bacia durante o Carbonífero.



Assinatura:

Data: 27/07/2021

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno:



PARECER COMPLEMENTAR – DISSERTAÇÃO – ELIAS CEMBRANI DA ROCHA
EVOLUÇÃO DIAGENÉTICA E HETEROGENEIDADE DOS RESERVATÓRIOS DO
CARBONÍFERO NA ÁREA DE JURUÁ, BACIA DO SOLIMÕES

Das Disposições Gerais da Dissertação:

A Dissertação desenvolvida pelo aluno Elias Cembrani da Rocha traz uma série de importantes contribuições à geologia do petróleo das bacias sedimentares intracratônicas brasileiras. Primeiramente, a escolha da área geológica por se tratar de uma bacia significativa em termos de produção de gás natural, porém com escassos e antigos estudos geológicos publicamente disponíveis. Vide as datas das publicações, tais como as de: Caputo *et al.* (1972), Caputo (1985), Silva (1987), Eiras *et al.* (1994), Becker (1997), Cunha *et al.* (1988), entre outros. Estes estudos geralmente são frutos de teses/dissertações ou resumos de eventos científicos, nem sempre contemplando a geologia da bacia como um todo. Para o estudo da clorita, embora as referências sejam muito bem adequadas, sugiro o recente trabalho de Worden *et al.* (2020).

Mais raros ainda são os estudos petrográficos/diagenéticos dos reservatórios que a compõem, assim como para a Bacia do Amazonas. Pode-se citar muito limitadamente, os estudos de Elias *et al.* (2004, 2007), este muito bem explorado na dissertação e o de Lima & De Ros (2002), focado nos arenitos-reservatórios devonianos da Formação Uerê, no qual os autores detalharam a evolução diagenética destes reservatórios, muito semelhante a diagênese que ocorre nos arenitos carboníferos Juruá, foco da dissertação.

Muito oportuno o comparativo entre o estudo desenvolvido na dissertação envolvendo os arenitos-reservatório Juruá na área de Juruá e o trabalho desenvolvido por Elias *et al.* (2004) nos reservatórios Juruá na área de Urucu, porém o estudo de Lima & De Ros (2002) poderia ter sido, ao menos, citado e brevemente comentado, pois trata-se de uma importante contribuição à qualidade dos reservatórios da bacia por meio de estudos petrográficos. Ademais, foi citado o estudo de Cunha *et al.* (1988) sobre a diagênese da Formação Uerê.

Em termos de estrutura, a Dissertação obedeceu às normas do PPGGEO em estruturá-la na forma de: (1) (a) Introdução, objetivos, localização e geologia da área de pesquisa, estado da arte, metodologia e (b) síntese dos resultados e (2) Artigo científico submetido a periódico internacional.

Os erros de digitação são escassos e quando ocorrem, geralmente são referentes a não aplicação do itálico nas palavras de origem estrangeira.

No geral, a Dissertação está muito bem escrita, permitindo ao leitor uma leitura fluida e dinâmica e, conseqüentemente, uma fácil assimilação do conteúdo. Percebe-se, assim, que o aluno tem um amplo domínio sobre o assunto.

Ademais, atendeu aos objetivos propostos no título do artigo: Diagenetic evolution (ok!), reservoir quality (ok!) and heterogeneity (ok!) of the coastal-eolian-fluvial-deltaic deposits of the Juruá area, assim como os objetivos (pg. 11): (1) O impacto da diagênese sobre a qualidade e a heterogeneidade dos arenitos da Formação Juruá através do estudo dos processos e produtos diagenéticos (ok!), (2) relações com a composição primária, fácies e ambientes deposicionais (ok!) e (3) com unidades e limites estratigráficos (ok!).

A caracterização petrográfica dos arenitos do intervalo Juruá, bem como das litologias associadas resultou em um reconhecimento preciso da mineralogia primária e diagenética, incluindo os processos e produtos diagenéticos, os quais influenciaram a qualidade dos reservatórios, principalmente pelo estudo dos diferentes hábitos da clorita autigênica, além da influência dos ambientes deposicionais, os quais exerceram controle sobre a diagênese inicial e foram importantes para a preservação de porosidade durante o soterramento. Somam-se a eles a distribuição de fácies exercendo o controle local sobre a cimentação.

Resultados estes a partir da integração dos dados petrográficos e de perfis de poços.

Como análise complementar, sugiro técnicas adicionais, tais como difração de Raios-X, principalmente para o reconhecimento dos argilominerais, carbonatos e sulfatos, e análises em MEV/EDS para fins de identificação de morfologia e relações texturais, por exemplo. Embora no Artigo haja a menção de análises em SEM/EDS, não as vi no trabalho.

Demais observações serão feitas individualmente, a seguir.

Em suma, um estudo petrográfico com imensa contribuição à geologia da Bacia do Solimões e seus reservatórios, quebrando um hiato de 14 anos desde a publicação de Elias *et al.* (2007).

Assim, parabeno o autor e seu orientador pela qualidade científica do trabalho e no aguardo da publicação do artigo.

Porto Alegre, 27/07/2021

Anderson J. Maraschin

Anderson José Maraschin
IPR-PUCRS
anderson.maraschin@pucrs.br

Da Estrutura da Dissertação – Parte 01

Dos Erros de Digitação:

- Corrigir o FEDER na contracapa em UNIVERSIDADE FEDER DO RIO GRANDE DO SUL.
- Pg. 7 – Lista de Figuras: Corrigir a numeração, pois não corresponde às páginas no decorrer do texto.
- Pg. 11 – 1. Introdução: Inserir o ponto após o *et al*, em Dixon *et al*, 1989; retirar a vírgula em Ajdukiewicz, *et al.*, 2010, bem como o negrito.
- Pgs. 12 e 13: *software* (em itálico).
- Pg. 13: “...dentro de fragmentos **de** rocha...”.
- Pgs. 13/14: *Energy Dispersive Spectroscopy* (em itálico).
- Pg. 15 – 4.2 Característica gerais da **Bacia** (ou **bacia**?).
- Pg. 16 – 4.3.1: **Bacia** do Solimões.
- Pg. 17: 4.3.2: Arco de Carauari / *Play* (em itálico).
- Pg. 18: 1º parágrafo: *Onlap* (em itálico) / “...os depósitos proximais do Membro Biá, apresentam...”.
- Pg. 19: “...depósitos desérticos que se desenvolveram sobre as condições **de** áridas do período” / “...com raras lentes de anidrita nodular e calcários, da Formação Fonte Boa...”
- Pg. 22: ~~Lençóis~~ Lençóis de areia.
- Pg. 26: “ ...em cimento de dolomita mesodiagenética **foram** indicaram precipitação entre...”.
- Pg. 28: ~~Características~~ Características faciológicas. ~~Reservatórios~~ Reservatórios
- Talvez no original esteja K/Ar e embora a datação não deixe de ser uma razão entre elementos, o mais usual é K-Ar.
- Pg. 30: 1º parágrafo: Recuo.
- Pg. 30: ~~ilita~~ ilita / Bertierina, esmectita, e caulinita.

- Pg. 31: ~~Contexto~~ Contexto / Todos os demais elementos químicos estão representados com símbolos, apenas o oxigênio não.
- Pg. 32: ~~argilominerais~~ argilominerais.
- Pg. 34: ~~CO2~~ CO₂
- ~~Seeman (1979)~~ Seemann (1979).
- Pg. 35: “Outros eventos diagenéticos...”. Verificar o recuo.
- Pg. 36: ~~lítico-arcósios~~ arcósios líticos / ~~Entre~~ Dentre os grãos de feldspato... / Dickinson ~~1985~~-(1985)
-

Do Resumo:

Resumo bem escrito, abrangendo a área de estudo, resultados (descrição petrográfica/diagenética) e breves conclusões.

Entretanto:

- Não tenho certeza se os arenitos Juruá são os melhores reservatórios da Bacia do Solimões, conforme inicia o Resumo, pois os arenitos devonianos Uerê têm até 28% de porosidade de acordo com Lima & De Ros (2002).
- “O Problema Intervalo”: Aqui aparece pela primeira vez algo que irá se repetir ao longo do texto e que não ficou muito claro ao leitor. Exatamente qual intervalo da Formação Juruá foi analisado? A porção basal? A formação é constituída por siltitos, carbonatos, evaporitos e arenitos. Os depósitos arenosos foram os analisados, certo? A seguir veremos mais exemplos do uso do termo intervalo.
- Quatro associações de fácies identificadas: dunas eólicas, lençóis de areia, frente deltáica e canais fluviais. Este é o intervalo analisado no estudo? Ou apenas os corpos arenosos considerados reservatórios (dunas, lençóis, canais fluviais e frente deltaica)? (Dentre estes, os eólicos são os melhores, de acordo com o final do texto.)

- “A composição primária dos arenitos corresponde principalmente a arcósios e arcósios líticos”. Para todas as fácies reservatório?
- Introdução:
 - Pg. 11: “No Brasil, os arenitos **eólicos (?)** carboníferos da Formação Juruá...”
 - Sugiro finalizar o item com um parágrafo relacionado ao estudo desenvolvido na dissertação. Por exemplo: “Assim, pretendeu-se neste estudo aplicar técnicas de petrografia e sedimentologia para a caracterização dos arenitos eólicos da Formação Juruá, considerados os melhores reservatórios da Bacia do Solimões o qual servirá, também, para estudo de reservatórios análogos em bacias mundiais”. Algo do gênero, desde que não repita o conteúdo do próximo item, Objetivos.
- Objetivos: Ok! Item claro e “objetivo”.
- Materiais e métodos:
 - 3.1 Levantamento bibliográfico: “...discutir as particularidades do intervalo de estudo...”. Quais particularidades? Complexidade diagenética? Intervalo arenoso com todas as quatro fácies ou apenas as fácies consideradas reservatórios? Ou apenas os arenitos eólicos, os melhores reservatórios?
 - 3.2 Petrografia quantitativa: “sete poços testemunhados na área do Campo de Juruá e de um poço à leste do campo”. Este poço está inserido no Campo de Juruá?
 - Pg. 13: “Lutitos, evaporitos e carbonatos do intervalo foram avaliados qualitativamente e o volumes de seus constituintes foram estimados visualmente.” Até então eu havia entendido que o intervalo analisado era apenas o arenoso e não a Formação Juruá como um todo. Mas a seguir: “A descrição dos arenitos do intervalo...”. Então o intervalo analisado corresponde à porção basal da Formação Juruá, por sua vez composto

por carbonatos, lutitos, evaporitos e arenitos? Ou seria a porção basal do Grupo Tefé?

- 3.3 Fotomicrografias: Entendo que as imagens estão concentradas na segunda parte da dissertação, o artigo. Mas não seria interessante também inserir algumas fotomicrografias das feições primárias, diagenéticas, texturais, estruturais e de macroporosidade no item 6 – pg. 36?
- 3.4 Microscopia eletrônica de varredura: Ótica está correto, pois é uma variante de óptica, porém o termo está mais relacionado ao ouvido (por exemplo, inflamação do ouvido – otite).
- Pg. 14: Sugiro excluir o último parágrafo. Extenso e o funcionamento da técnica pode ser pesquisado pelo leitor, caso haja interesse.
- 3.5 Integração de dados: “...parte das descrições dos testemunhos...foram fornecidos pela Petrobras” (PETROBRAS sem acento!). E o restante das descrições foram feitas pelo autor da dissertação?

4. Localização e contexto geológico da área de estudo

- Pg. 15: Talvez seja interessante complementar as datas “anos 50, 70 e 80” por 1950, 1970 e 1980 para situar cronologicamente o leitor, uma vez que para quem desconhece a história da exploração do petróleo no Brasil poderá confundir com 1850, 1870 e 1880.
(Embora no Brasil Império já houvesse interesse no betume superficial.)
Ademais, na literatura popular as décadas já são assim escritas.
- Pg. 22 - 4.4: “A segunda fase de crescimentos de quartzo foi...**controlada** pela presença de illita-esmectita recobrando os grãos”. Controlada ou inibida? Ou apenas a clorita inibe o crescimento do quartzo? Se foi controlada, os crescimentos ainda se desenvolviam, porém moderadamente, mas se inibe aí me parece que cessam de vez.
- Pg. 23: Embora seja do trabalho de Elias *et al.* (2004), arenitos não-eólicos são fluviais? Deltáicos?

- Pg. 26: “Ilitas datadas pelo método K-Ar em diferentes reservatórios (**da Bacia do Solimões?**) apresentam idades próximas à 200 Ma e 150 Ma. Acredito que seja o trabalho de Mizusaki *et al.* (1990) do BGP, não?”

5. Estado da Arte:

- Pg. 32: “ No caso da Formação Juruá, é o cimento mesodiagenético mais comum...” A anidrita é mesmo o cimento mais comum no Juruá? (De acordo com Cunha *et al.* (1988) é o cimento mais comum na Formação Uerê.)

6. Síntese dos resultados e interpretações

- Pg. 36: Aqui surge novamente a questão do “Problema Intervalo”: “O intervalo pode ser dividido em três seções...” No caso, seria o intervalo apenas arenoso com as 04 associações de fácies, excluindo-se os pelitos (lutitos), carbonatos e evaporitos?
- Pg. 36: “...e a evolução diagenética foi diferente para as rochas siliciclásticas e evaporíticas-carbonáticas da sequência”. Então ao autor caracterizou toda a sequência ou apenas o intervalo arenoso? Cimento de crescimentos de quartzo nos arenitos e siltitos. Então as siliciclásticas foram todas analisadas?
- Pg. 36: 04 associações de fácies: Quem as definiu?
- Pg. 37: Argilominerais autigênicos? Quais? Pseudomatriz produto de intraclastos lamosos ou fragmentos metamórficos de baixo grau? (Ok, na página 36 consta intraclastos lamosos...)
- Pg. 37: “...e a maior parte da cimentação ocorreu...”. Cimentação por anidrita poiquilitópica? Calcita poiquilitópica? Quartzo?
- Pg. 39: “A macroporosidade dos arenitos (**eólicos ?**) atinge valores de até 33%.
- Pg. 39: Novamente o “Problema Intervalo”: “Os intervalos inferior, intermediário e superior identificados na Formação Juruá...”?? Agora são três intervalos compreendendo as 04 associações de fácies ou compostos pelos evaporitos, carbonatos, pelitos e arenitos?

- Pg. 39: "...a ilita intergranular está comumente associada a arenitos porosos..." (Quais? Eólicos? Fluviais? Deltáicos?)

Das Referências:

- Pg. 11 – ANP/(substituir por vírgula) 2016 e Pg. 16 ANP, 2019, porém nas Referências (pg. 40) consta ANP sem data.
- Pg. 16: Wanderley Filho & Costa (1991) não referenciado. Além disso, quando há dois autores a separação está com "e". Aqui está com "&".
- Pg. 28: Walker & e James, 1992 não referenciado / Worden ~~and~~ e Burley, 2003/ Glennie *et al.*, 1978 / Kessler, ~~L.G.~~ 1978.
- Pgs. 29 e 30: Talvez seja interessante atualizar Moraes e De Ros (1990) por De Ros e Scherer (2012).
- Pg. 30: Verificar os "&" e os "e".
- Pg. 31: Glennie, 1972 não referenciado.
- Pg. 32: Leckie & Cheel, 1990 ou 2006 conforme consta nas Referências?
- Pg. 43: Glennie, 1983, 1987; Hiller, Fallick, Matter, 1996; Teixeira, 2001; Wanderley Filho, 1991; Worden, Smalley, Cross, 2000 não referenciados.

Das Figuras:

- Figura 1 – Pg. 15: Figura extraída/modificada de? Caputo e Silva (1990)?
- Figura 4 – pg. 27: Elias *et al.* (2006) ou (2004)?

Referências citadas neste documento:

De Ros, L.F. & Scherer, C.M.S. 2012. Stratigraphic controls on distribution of diagenetic processes, quality and heterogeneity of fluvial-aeolian reservoirs of the Recôncavo Basin, Brazil. In: Morad, S., Ketzer, J.M.m. & De Ros, L.F. (Eds.), Linking Diagenesis to Sequence Stratigraphy. Int. Assoc. Sedimentol. Spec. Publ. 45: 105-132. Wiley-Blackwell, UK.

Lima, R.D. & De Ros, L.F. (2002). The role of depositional setting and diagenesis on the reservoir quality of Devonian sandstones from the Solimões Basin, Brazilian Amazonia. *Marine and Petroleum Geology*, 19: 1047-1071.

Worden, R.H., Utley, J.E.P., Butcher, A.R., Griffiths, J., Wooldridge, L.J. & Lawan, A.Y. 2020. Improved imaging and analysis of chlorite in reservoirs and modern day analogues: new insights for reservoir quality and provenance. In: Dowey, P., Osborne, M. & Volk, H. (Eds.), Application of Analytical Techniques to Petroleum Systems. Geological Society, London, Special Publication, 484: 189-204.

DO ARTIGO

Abstract: Compreende todos os elementos necessários para um bom resumo: Abordagem do tema, área geográfica de estudo e os resultados preliminares.

1. Introduction:

Introdução breve e explicativa, apresenta de forma clara ao leitor o objetivo do trabalho.

- Excluir os “e” nas referências (Pye e Krinsley, 1986, entre outros).
- “To our knowledgment, no study of the Juruá Field sandstones has been previously published. ” Mas e os trabalhos de Elias *et al.* (2004, 2007) no Juruá na área de Urucu?

2. Geological setting:

Perfeito! Em um parágrafo apresenta a estratigrafia da bacia, enquanto nos dois últimos apenas a unidade geológica de interesse.

3. Methodology

- Pg. 54: “The petrological information was integrated with interpreted depositional facies...derived from the descriptions of cores...provided by Petrobras.”
- Mas na pg. 14 da primeira parte da dissertação, está escrito que “parte das descrições de testemunhos foram fornecidos pela Petrobras.”
- A descrição dos poços já estava integralmente feita pela Petrobras?
- Pg. 54 – 4. Facies analysis and stratigraphic framework: Aqui parece que o “Problema Intervalo” está mais esclarecido: “The analysed interval comprises essentially sandstones, pelites, limestones, dolostones, and evaporites. ”

- Alguma relação dos evaporitos na seção Juruá (anidrita nodular/maciça) com os evaporitos sobrepostos selantes da Formação Carauari?
- “The main lithofacies (Fig. 2), the interpreted depositional processes (Table 1) and the four facies associations (Figure 3)”, tudo isso foi realizado a partir dos perfis de poços disponibilizados pela Petrobras? Ou melhor, reformulando a pergunta: O autor descreveu os 07 testemunhos da área + o testemunho adicional (seria o 1-JOB-1A-AM?) a partir dos dados da Petrobras ou os testemunhos já estavam interpretados? (Acredito que devido à pandemia, o autor não obteve autorização para acessá-los).
- Todo este item estratigráfico descritivo/interpretativo foi feito a partir das descrições dos 07 poços + pertencentes à área de Juruá + um poço adicional *well log* e dados de petrofísica disponibilizados pela Petrobras? Pergunta: Como o autor descreveu com detalhes as fácies (Figura 2)? Ou as descrições já estavam prontas pelas Petrobras?
- Pg. 65 – “Mud intraclast deformed by compaction”. Formando pseudomatriz?
- Ok, aqui no artigo estão descritas as demais litologias do intervalo Juruá, pois não consta na primeira parte da dissertação!
- Item descritivo muito bem redigido com detalhes das fácies reconhecidas. Entretanto: O autor descreveu as fácies (por exemplo, figura 2 – pg. 56) a partir dos poços fornecidos pela Petrobras ou essas interpretações já estavam disponíveis no próprio banco de dados da Petrobras?

7. Diagenetic constituents

- ~~Pg. 67: K-Feldspar~~ K-feldspar
- Pg. 68: “Coatings of interstratified illite-smectite (I/S) constitute the most common authigenic clays (Table 3; Fig.

6A). Na tabela 3 constam apenas Diagenetic clay undifferentiated, illite intragranular e illite intergranular. Nada de I/S ou C/S.

- Onde estão as imagens de SEM/EDS dos C/S coatings and rims, conforme consta no texto?
- Diferentes hábitos dos argilominerais em diferentes fácies pode-se considerar um excelente trabalho futuro!
- Pg. 69: “Anhydrite is the most importante cement in sandstones close to evaporites. ” Arenitos próximos aos evaporitos Cararuari ou dos evaporitos do intervalo Juruá?
- “All evaporites in the studied interval are a product of replacement of organic micritic matriz by fibrous to prismatic anhydrite nodules.” Então o cimento de anidrita poiqilotópica preenchendo poro nos arenitos é um produto e os nódulos de anidrita prismática no evaporito do intervalo é outro processo?
- As amostras dos poços 1-JI-1-AM, 1-JR-1-AM, 1-JI-2-AM e 3-JR-2-AM desprovidas de calcita é simplesmente pelo fato de estarem distantes dos carbonatos do intervalo?
- Pg. 79: “Chlorite coatings and directly neofomed **rims** were responsible for intergranular porosity preservation through **the inhibition** of quartz overgrowths.” Ok, de acordo com o estudo de Anjos *et al.* (2003) as cutículas e as franjas de clorita inibiram o crescimento do quartzo nos arenitos turbidíticos do Membro IlhaBela, conforme também consta no estudo da dissertação. Mas no trabalho de Bahlis & De Ros (2013) também para os arenitos IlhaBela consta: “Discontinuous and thin coatings and rims **were not effective** in inhibiting quartz cementation while those too thick severely reduced the permeability. The rosette aggregates **exerted no inhibition** on quartz cementation, while reducing intergranular porosity.”

- **Pore-lining chlorites**, evolved from precursor smectitic coatings, promoted the preservation of porosity by **inhibiting** quartz overgrowth cementation and intergranular pressure solution. The role of eodiagenetic coatings of precursor smectitic clays was important for such porosity preservation, as **rims** purely neoformed during mesodiagenesis **would not be effective** to prevent quartz cementation and intergranular pressure dissolution. Conversely to the coatings, chlorite rosettes have not contributed to porosity preservation, as they partially filled intergranular spaces, and had no effect on quartz cement nucleation and growth. (Pg. 197 do artigo de Bahlis & De Ros, 2013)
- Para Anjos *et al.* (2003) as cutículas e franjas inibiram o crescimento do quartzo, enquanto que para Bahlis & De Ros, 2013 apenas as cloritas *pore-lining*? No caso dos arenitos da Formação Juruá, as cutículas de clorita da fácies eólicas foram as responsáveis pela preservação da porosidade, inibindo o crescimento do quartzo? Ou algum outro hábito da clorita foi o maior responsável pela preservação da porosidade?

9. Discussion

- 9.2. Diagenetic evolution: Por que volcanic rock fragments estão neste item?
- Figura 9: Siliciclastic rocks são os arenitos e também os pelitos?
- Cimentação por anidrita nos arenitos eólicos foi produto da infiltração de águas marinhas enquanto que a anidrita dos evaporitos foi pela ação de ácidos orgânicos e hidrocarbonetos?
- Pg. 79: (Fig. 87C).
- Figura 10: Muito boa! Autoexplicativa!

- Pg. 81 - 9.3: “The identified lower (**fluvial-eolian or eolian dunes?**), intermediate (**fluvial-eolian-deltaic or prodelta/delta front?**), and upper (**deltaico or lagoon/sabkha?**) stratigraphic intervals of the Juruá Formation...” (Está mais claro no item 10. Conclusions.)
- Pg. 82: “...while the reservoirs... intergranular porosities (10-20%, fig. 9). Não há menção de porosidades na figura 9, bem como estilólitos e pseudomatrizes. Também não há a figura 11, conforme consta no texto.
- Pg. 83: “The Juruá Formation was deposited during a third-order transgressive system tract (Carboniferous-Devonian sequence) ou “...the Juruá Formation is included within a second-order transgressive system tract (Carboniferous-Permian sequence), pg. 76?”
- Pg. 83: Seven wells or eight, conforme a legenda da Figure 1?

References:

- Hiller *et al.* 1995 (pg. 79 e 82) ou 1996 (pgs. 51 e 86)?
- Pg. 78: Scherer & De Ros, 2007 não consta nas referências.
- Pg. 78: Cunha, 1988 ou Cunha *et al.* 1988 (pg. 85)?
- Pg. 88: Inserir um espaço em &Vaz. P.T. 2007.
- Pg. 75: Ehrenberg, 1989 ou Houseknecht, 1987 não constam nas referências.
- Pg. 55: Hunter, 1977 não consta nas referências.
- Kocurek, 1991 (pg. 55) ou 1981 (pg. 86)?
- Pg. 52 – figura 1: Caputo, 2014 não consta nas referências.
- Pg. 85: ANP 2016 (pg. 51) ou 2019 (Pgs. 51 e 52)?
- Não encontrei Kessler, L.G. 1978 (pg. 86), Seemann, U. 1982 (pg. 87) e Scherer *et al.* (2007) (pg. 87) no texto.

ANEXO I

Título da Dissertação/Tese:

Evolução Diagenética e Heterogeneidade dos Reservatórios do Carbonífero na Área de Juruá, Bacia do Solimões

Área de Concentração: Estratigrafia

Autor: **ELIAS CEMBRANI DA ROCHA**

Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando De Ros

Examinador: Profa. Dra. Amanda Goulart Rodrigues

Data: 16/07/2021

Conceito: A

PARECER:

Os comentários e sugestões que compõem este parecer estão organizados e sintetizados em duas partes: **(1) Texto integrador** e **(2) Artigo submetido para *Gondwana Research***. No entanto, também há anotações no arquivo .pdf, que deverão ser enviadas ao aluno e seu orientador.

(1) Texto integrador:

De modo geral, o texto apresenta-se com qualidade técnica e está organizado. Contudo, a existência de erros ortográficos e gramaticais, bem como a falta de informações em algumas frases, dificultam a fluidez da leitura. Além disso, em algumas frases faltaram as citações dos trabalhos originais. Pontua-se também que não há padronização nas citações, por vezes são usados "&", "and" e "e" para citações contendo 2 autores.

A **introdução** é concisa, porém o aluno poderia ter trazido uma explicação mais aprofundada dos diferentes depósitos (não somente os eólicos) para melhor caracterizar o problema geológico. Sugere-se também a inclusão de dados mais atualizados da ANP sobre o campo de Juruá. O **objetivo** geral é bastante amplo, sugere-se dividir em objetivos secundários.

No item **Materiais e Métodos** poderia ter sido especificado quais são os dados faciológicos e estratigráficos (quais poços descritos) que foram gerados nesta pesquisa, de modo a diferenciar dos dados pré-existentes disponibilizados pela Petrobras. O mapa de articulação e a legenda da Figura 1 devem ser revisadas, incluir a localização dos poços. São 7 poços ou 8 poços?

O **Estado da Arte** é bem construído e direcionado a problemática da dissertação, pois detalha os principais processos diagenéticos em sistemas eólicos e depósitos associados. No entanto, sugere-se a inclusão de estudos de casos recentes (últimos 10 anos), pois grande parte das citações são de livros-textos e/ou publicações antigas. Algumas informações dos estudos de casos (p.ex. págs. 33 e 34) precisam ser complementadas para se entender o contexto.

No item **Síntese dos resultados e interpretações** as informações de qualidade dos reservatórios não são detalhadas por associações de fácies, sugere-se a inclusão de informações sobre a variação da macroporosidade em relação a cimentação e compactação de cada uma das associações. No texto não são especificados quais são os controles faciológicos e estratigráficos que influenciaram no diagênese dos arenitos da Formação Juruá. Não são apresentadas as características distintas dos reservatórios de cada intervalo da Formação Juruá (inferior, intermediário e superior).

A **conclusão** está bastante genérica. Faltou especificar quais são os principais aspectos estratigráficos, deposicionais e diagenéticos que impactam na qualidade dos reservatórios da Formação Juruá. Além disso, é importante complementar quais seriam os tipos de estudos futuros necessários

para uma melhor caracterização destes reservatórios, e.g., escalas de trabalho, técnicas analíticas, geoquímica, etc.

(2) Artigo submetido:

O artigo apresenta um excelente conjunto de dados, especialmente petrográficos, e traz importantes informações sobre os controles faciológicos e petrológicos na qualidade dos reservatórios da Formação Juruá. Contudo, além de uma revisão detalhada no inglês (gramática e ortografia), é necessário reescrever algumas frases, pois apresentam repetição de palavras e falta de complementação, dificultando o entendimento do texto. Fiz anotações diretas no arquivo .pdf para ajudar a resolver essas questões, além dos apontamentos específicos abaixo.

Introduction: Quais são os processos e como eles impactam na qualidade dos reservatórios segundo os estudos prévios nessa unidade? Incluir dados atualizados da ANP sobre a Formação Juruá. Especificar como teu trabalho vai agregar informações novas em comparação com trabalhos anteriores na Bacia e em depósitos similares. Incluir objetivos secundários, pois o objetivo geral é amplo.

Geological Setting: Na Fig. 1, incluir as letras A, B e C do lado de cada quadro, para poder melhor referenciar na legenda. Arrumar o mapa de articulação. Aumentar a seção geológica. Melhorar a resolução da imagem.

Methodology: Substituir o título para *Methods*. Colocar o nome e localização do laboratório que realizou as análises de MEV-EDS, bem como as condições analíticas.

Results: Na Figura 2, aumentar as imagens para facilitar a identificação das estruturas. Na Tabela 1, a interpretação das fácies deve ser revista, algumas tem a informação da forma de leito, mas não do regime de fluxo e o meio. Além disso, algumas apresentam interpretação do ambiente deposicional, o que não é usualmente feito em estudos de fácies. Na Figura 5, os campos dos diagramas estão com os nomes errados. O item *Diagenetic constituents* traz os constituintes diagenéticos de cada ambiente deposicional descritos conjuntamente, o que dificulta, por vezes, o entendimento do texto.

Discussion: Sugere-se a inclusão de um esquema ou bloco diagrama que mostre a distribuição lateral dos ambientes deposicionais descritos, bem como um aprofundamento na discussão dos processos e implicações para a qualidade de reservatórios. Incluir referências mais recentes. As imagens da Figura 10 estão muito pequenas. O controle estratigráfico na qualidade dos reservatórios deve ser melhor explicado.

A dissertação do Elias Cembrani da Rocha consiste numa importante contribuição à Bacia do Solimões no que tange a caracterização das heterogeneidades em reservatórios da Formação Juruá. Os dados petrológicos e faciológicos foram adquiridos com qualidade e precisão, mostrando que o aluno possui domínio técnico sobre os assuntos, bem como capacidade de discuti-los com base na literatura. Por fim, cabe salientar que mesmo com todas as limitações impostas pela pandemia da COVID-19, o aluno conseguiu dar encaminhamento e ótima finalização da dissertação. Portanto, a dissertação aqui avaliada cumpre plenamente os requisitos para a obtenção do título de mestre. Parabéns o aluno Elias e seu orientador Prof. De Ros pela excelente pesquisa.

Assinatura: *Amanda J. Rodrigues*

Data: 16/07/2021

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno:

ANEXO I

Título: EVOLUÇÃO DIAGENÉTICA E HETEROGENEIDADE DOS RESERVATÓRIOS DO CARBONÍFERO NA ÁREA DE JURUÁ, BACIA DO SOLIMÕES

Autor: ELIAS CEMBRANI DA ROCHA

Orientador: Prof. Luiz Fernando De Ros

Examinador: Prof. Elírio E. Toldo Jr

Data: 24/07/2021

Conceito: A

O tema principal da Dissertação – Processos Diagenéticos, foi muito bem desenvolvido. O manuscrito contém, desde o Estado da Arte até as Conclusões, uma estrutura de redação de fácil leitura e fácil compreensão.

O objetivo de investigar a diagênese dos depósitos terrígenos (Fm Juruá), e as implicações na qualidade e heterogeneidade dos reservatórios, foi plenamente atingido com a descrição de 96 lâminas de rocha e com a integração dos dados sedimentológicos e estratigráficos (sucessão vertical de fácies).

Na Tabela 1 as 14 litofácies podem ser agrupadas e apresentadas nas 4 associações de fácies. Também, o autor não descreveu mais detalhadamente a distribuição espacial (área e profundidade) das associações de fácies.

Embora não seja o objetivo da Dissertação, o modelo faciológico – associação de fácies, poderia ter sido utilizado para propor o modelo deposicional.

A afirmação “The absence of facies indicative of wave and tide suggests a calm watery body protected from the action of marine processes” é insuficiente, considerando o tamanho da área estudada (aproximadamente 400 km²), e a quantidade de poços (7 ou 8?).

Os dados gerados permitiram apresentar importantes conclusões, como o processo da diagênese (compactação e cimentação) ter preservado a porosidade durante o soterramento em 2 das 4 associações de fácies (canais fluviais e, principalmente, as dunas eólicas costeiras), e também, sobre a origem da heterogeneidade das fácies deposicionais.

