



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**UNIDADES EVAPORÍTICAS CARBONÍFERAS DO DEPÓSITO POTASSÍFERO
DE AUTAZES, REGIÃO OCIDENTAL DA BACIA DO AMAZONAS: análises
estratigráficas de sequências, geoquímicas, mineralógicas e paleoambientais**

AUTOR: Gustavo Kiefer Lage Sousa

ORIENTAÇÃO: Alexandre Uhlein

Nº198

**BELO HORIZONTE
DATA (28/03/2019)**

Gustavo Kiefer Lage Sousa

**UNIDADES EVAPORÍTICAS CARBONÍFERAS DO DEPÓSITO POTASSÍFERO
DE AUTAZES, REGIÃO OCIDENTAL DA BACIA DO AMAZONAS: análises
estratigráficas de sequências, geoquímicas, mineralógicas e paleoambientais**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências (Geologia).

Área de concentração:

Geologia Regional

Orientador:

Alexandre Uhlein – Universidade
Federal de Minas Gerais - UFMG

K47u
2019 Kiefer, Gustavo Lage Sousa.
Unidades evaporíticas carboníferas do depósito potássífero de Autazes,
Região Ocidental da Bacia do Amazonas [manuscrito] : análises
estratigráficas de sequências, geoquímicas, mineralógicas e paleoambientais /
Gustavo Kiefer Lage Sousa – 2019.
vii,107 f.: il. (principalmente color.)

Orientador: Alexandre Uhlein.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais,
Instituto de Geociências, 2019.

Área de concentração: Geologia Regional.

Bibliografia: f. 103-107.

1. Geologia estratigráfica – Teses. 2. Evaporitos – Amazonas – Teses.
3. Amazonas, Rio, Bacia – Teses. I. Uhlein, Alexandre. II. Universidade
Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 551.7 (811.3)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA



FOLHA DE APROVAÇÃO

UNIDADES EVAPORÍTICAS CARBONÍFERAS DO DEPÓSITO POTASSÍFERO DE AUTAZES, REGIÃO OCIDENTAL DA BACIA DO AMAZONAS: análises estratigráficas de sequências, geoquímicas, mineralógicas e paleoambientais

GUSTAVO KIEFER LAGE SOUSA

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOLOGIA, área de concentração GEOLOGIA REGIONAL.

Aprovada em 28 de março de 2019, pela banca constituída pelos membros:

Prof. Alexandre Uhlein - Orientador
UFMG

Prof. Gabriel Jubé Uhlein
UFMG

Prof. André Danderfer Filho
UFOP

Belo Horizonte, 28 de março de 2019.

À minha esposa, Camila Lúcia Campos Kiefer

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, pela amplitude paterna magnífica que representa.

Ao Professor Dr. Alexandre Uhlein, orientador e amigo, agradeço a sempre disponível atenção na transmissão de conhecimentos, revisões, e profícuas discussões, fundamentais para a conclusão deste trabalho.

À Potássio do Brasil e sua qualificada equipe, pelo incentivo e disponibilização de acesso aos dados do Projeto Potássio Amazonas na região de Autazes-AM, imprescindíveis para a conclusão deste trabalho.

Aos diretores e colegas da Potássio do Brasil, Hélio Botelho Diniz, Guilherme Jácome e José Fanton, pelo importante incentivo e permanente abertura em todas as etapas deste trabalho.

Ao geólogos e colegas Rodolfo Sena, Thiago Bonas e Thiago Diniz, pelas sempre pertinentes observações e discussões.

À ARANZ Geo Ltd - Proprietários da *Leapfrog*, pela permissão e suporte ao uso do *Leapfrog Geo*®.

Agradeço aos meus pais Jane e Lafaiete e aos meus irmãos, Daniel, Eduardo e Adriana, pelo exemplo de retidão e permanente incentivo na busca por nobres ideais.

Aos meus avós (*in memoriam*), pelo legado de caráter e justiça deixado a todos os seus descendentes.

À minha amada esposa, por todo o incondicional amor, carinho, atenção, compreensão e incentivo, manifestados em todas as etapas deste trabalho.

“O homem não é nada em si mesmo. Não passa de uma probabilidade infinita. Mas ele é o responsável infinito dessa probabilidade.”

(Albert Camus)

Resumo

A região ocidental da Bacia do Amazonas, abriga unidades de rochas evaporíticas Permo-Carboníferas, pertencentes à Formação Nova Olinda, hospedeiras de importantes mineralizações de sais de potássio. Os modelos propostos para a evolução tectônica regional e paleoambiental da bacia, consideram que a ampla deposição do conjunto de sedimentos químico-evaporíticos da Formação Nova Olinda, do Grupo Tapajós, seria resultado das fases de restrição continental da bacia. Nas proximidades do município de Autazes, Estado do Amazonas, entre os anos de 2008 a 2014, foi empreendida uma campanha de pesquisa mineral, pela empresa Potássio do Brasil Ltda., que resultou na descoberta do Depósito Potassífero de Autazes. Os resultados inéditos das caracterizações petrográficas, geoquímicas e mineralógicas, bem como as variações faciológicas regionais da seção mineralizada em Autazes, indicam para controles associados à sequência de precipitação dos sais evaporíticos, e para alterações diagenéticas pervasivas secundárias. Tais caracterizações permitiram abordagens mais amplas, a partir das perspectivas deposicionais de sucessões carbonáticas-evaporíticas, à luz dos conceitos da Estratigrafia de Sequências. Nessas interpretações considerou-se que, dentre os dois principais estilos deposicionais de ambientes de escala de placa, associados às grandes acumulações fanerozoicas evaporíticas mundiais, a saber: evaporitos marinho-plataformais; e evaporitos de amplo preenchimento de bacias (*basinwide*), apenas o primeiro permitiria uma interpretação marinha eustática, alinhada às flutuações dos níveis dos mares. Com base nesses conceitos, e nas condicionantes deposicionais e erosionais suscetíveis de ocorrer nos estágios de *icehouse*, operantes na Bacia do Amazonas na transição dos períodos Carbonífero e Permiano, foi proposto um modelo estratigráfico de sequências, para a seção sedimentar avaliada na área de Autazes. Duas sequências deposicionais foram assim definidas, denominadas S1 e S2, associadas às fases de isolamento hidrográfico e conexão parcial ou efetiva com o oceano aberto, durante a evolução paleogeográfica de um mar epicontinental que teria coberto grandes áreas da bacia intracratônica. Nessas sequências, os tratos de sistema de mar alto são representados por fácies de carbonatos marinhos plataformais, enquanto os de mar baixo, definidos pelas fácies evaporíticas associadas aos períodos de isolamento hidrográfico da bacia. Foram também propostas três sequências autocíclicas intrabaciais, relacionadas a sistemas climáticos: S2-1, S2-2 e S2-3, associadas às composições das unidades evaporíticas de mar baixo da Sequência S2. A posição estratigráfica da mineralização potassífera de Autazes seria assim correspondente às fácies de silvinitas da Sequência S2-2. Essas subdivisões estariam relacionadas às oscilações do nível de base interno da bacia, determinadas por controles autocíclicos intrabaciais, em associação com sistemas climáticos semiáridos a áridos.

Palavras-chave: Evaporitos, Estratigrafia de Sequências, Depósito de Autazes, Pensilvaniano-Permiano, Bacia do Amazonas.

Abstract

The western region of the Amazon Basin harbor units of Permo-Carboniferous evaporite rocks, belonging to the Nova Olinda Formation, which hosts important occurrences of potash mineralization. The proposed models for the regional tectonic and paleoenvironmental evolution of the basin consider that the wide deposition of the set of chemical and evaporite sediments of the Nova Olinda Formation of the Tapajós Group would be the result of the continental restriction phases of the basin. In the vicinity of the Autazes city, Amazonas, between the years of 2008 and 2014, an exploration mineral campaign was conducted by the company Potássio do Brasil Ltda., Which resulted in the discovery of the Autazes Potash Deposit. The unpublished results of the petrographic, geochemical and mineralogical characterizations, as well as the regional faciological variations of the mineralized section in Autazes, indicate for controls associated with the precipitation sequence of the evaporite salts, along with the secondary pervasive diagenetic alterations. Such characterizations have allowed broader approaches, from the depositional perspectives of the mixed carbonate-evaporite settings, in the light of the Sequence Stratigraphy concepts. In these interpretations, it was considered that, among the two main depositional styles of plate scaling environments, associated with the Phanerozoic saline giants, namely: marine-platform evaporites; and basinwide evaporites, only the first would allow an eustatic marine interpretation, in line with fluctuations in sealevels. Based on these concepts, and in the depositional and erosional conditions susceptible to occur in the icehouse stages, operating in the Amazon Basin in the transition of the Carboniferous and Permian periods, a stratigraphic sequence model was proposed for the sedimentary section evaluated in the Autazes area. Two depositional sequences were thus defined, S1 and S2, associated to the phases of hydrographic isolation and partial or effective connection with the open ocean during the paleogeographic evolution of an epicontinental sea that would have covered large areas of the intracratonic basin. In these sequences, the highstand system tracts are represented by the platform marine carbonates facies, while those of lowstand system tracts, defined by the evaporitic facies associated to the periods of hydrographic isolation of the basin. Three climate-related intrabasinal autocyclic sequences were also proposed: S2-1, S2-2 and S2-3, associated with the compositions of the lowstand evaporitic units of the S2 sequence. The stratigraphic position of the Autazes potash mineralization would thus correspond to the sylvinite facies of the Sequence S2-2. These subdivisions would be related to internal base level fluctuations inside the basin, determined by intrabasinal autocyclic controls, in association with semi-arid to arid climatic systems.

Key-Words: Evaporites, Sequence Stratigraphy, Autazes Potash Deposit, Pennsylvanian-Permian, Amazon Basin.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| AGRADECIMENTOS..... | 1 |
| RESUMO | 3 |
| ABSTRACT | 3 |
| 1- INTRODUÇÃO | 8 |
| 1.1 Objetivos | 11 |
| 1.2 Metodologia | 11 |
| 2- ARTIGO – O DEPÓSITO POTASSÍFERO DE AUTAZES NO CONTEXTO ESTRATIGRÁFICO DA BACIA DO AMAZONAS | 15 |
| <i>THE AUTAZES POTASH DEPOSIT IN THE STRATIGRAPHIC CONTEXT OF THE AMAZON BASIN.</i> | 15 |
| 3- PESQUISA BIBLIOGRÁFICA SOBRE SOBRE ESTRATIGRAFIA DE SEQUÊNCIAS EM SUCESSÕES CARBONÁTICAS-EVAPORÍTICAS | 45 |
| 3.1 Evaporitos | 45 |
| 3.2 Modelos conceituais para a deposição evaporítica | 46 |
| 3.3 Estilos deposicionais para sedimentação evaporítica..... | 47 |
| 3.4 Modelo estratigráfico de sequências de Tucker | 57 |
| 3.5 Modelo estratigráfico de sequências de Warren | 62 |
| 4- QUADRO TECTONO-CLIMÁTICO NO CARBONÍFERO DA BACIA DO AMAZONAS..... | 68 |
| 4.1 Contexto climático na transição Pensilvaniano-Permiano..... | 68 |
| 4.2 Evolução tectono-sedimentar Pensilvaniana-Permiana | 70 |
| 4.3 Estilo deposicional das sucessões carbonáticas evaporíticas da Bacia do Amazonas | 72 |
| 5- MODELO ESTRATIGRÁFICO DE SEQUÊNCIAS PARA OS EVAPORITOS DA ÁREA DO DEPÓSITO DE AUTAZES | 73 |
| 5.1 Considerações regionais..... | 73 |
| 5.2 Sequências Depositionais | 73 |
| 5.3 Sequência Depositional S1 | 76 |
| 5.4 Sequência Depositional S2..... | 79 |
| 6- MODELO EVOLUTIVO PARA AS SEQUÊNCIAS DEPOSITIONAIS DEFINIDAS NA ÁREA DO DEPÓSITO DE AUTAZES | 94 |
| 7- MINERALIZAÇÃO POTÁSSIFERA DE AUTAZES PRINCIPAIS TEXTURAS DOS CRISTAIS EVAPORÍTICOS | 96 |

| | |
|---------------------------------|-----|
| 8- CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 101 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 103 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Mapa de localização dos depósitos Potássiferos na Bacia do Amazonas com destaque para o Depósito de Autazes (modificado de Kiefer et al., 2019). | 8 |
| Figura 2. Classificação da formação dos evaporitos nos reinos deposicionais-diagenéticos enfatizando a progressiva evolução pós-deposicional da mineralogia e textura (modificado de Warren, 2006). | 45 |
| Figura 3. Relação entre as proporções da área de corte transversal de uma superfície de entrada (A_i) e a área superficial da bacia hipersalina associada (A_o) plotada contra a salinidade da bacia, com exemplos de várias depressões evaporíticas modernas. Notar que os exemplos Quaternários que estão acumulando substanciais camadas evaporíticas não têm conexão superficial e são alimentados ou por influxo continental ou por infiltração marinha (modificada de Lucia, 1972; Handford, 1991; Warren, 2006, 2016). | 47 |
| Figura 4. Playa continental/ <i>Sabkha</i> mostrando as várias compartimentações de fácies incluindo os evaporitos lacustrinos e processos de fornecimento de solutos que incluem escoamento superficial, águas subterrâneas meteóricas e hidrotermais (modificado de Kendall 1992; Eugster & Hardie, 1978; Warren, 2006, 2016). | 49 |
| Figura 5. Geometrias deposicionais: A. Depósitos evaporíticos de <i>Mudflat</i> ; e B. Depósitos Evaporíticos de <i>Saltern</i> . Ambos ocorrem em seções de rampa ou plataforma. A notação XYZ refere-se às subdivisões de rampa de Irwin (1965). C. Localização em seção desses depósitos plataformais (Modificado de Warren, 2006). | 50 |
| Figura 6. Mares epéiricos (epicontinentais) que teriam coberto grandes áreas do interior continental com águas marinhas rasas, são conhecidos como bacias intracratônicas; enquanto mares epéiricos formados em plataformas marginais muito amplas ao longo das margens continentais são conhecidos como mares pericontinentais. Mares pericontinentais que teriam evoluído para <i>Salterns</i> e / ou <i>Mudflats</i> evaporíticos são mais típicos dos estilos eustáticos marinho-marginais dos períodos climáticos de <i>greenhouse</i> , quando a ausência de calotas polares permanentes, especialmente associadas a taxas mais altas de espalhamento dos assoalhos oceânicos, teriam resultado em bordas continentais livres muito maiores do que as atuais (modificado de Warren, 2017). | 51 |
| Figura 7. Curvas eustáticas dos níveis dos mares, destacando a curva de 1º ordem de Vail na parte superior. O restante do diagrama mostra as amplitudes e periodicidades típicas das curvas dos níveis dos mares de ordens mais altas. Curvas de 3º ordem tem periodicidades de 1-10 Ma. Curvas esquemáticas de 4º ordem com curvas de 5º ordem sobrepostas são mostradas para as condições de <i>greenhouse</i> e <i>icehouse</i> (modificado de Warren, 2006, 2016, 2017). | 53 |
| Figura 8. Exemplo de um trato de sistemas transgressivo carbonático, sujeito a queda dos níveis dos mares de ordem alta, que isola uma depressão passível de infiltração na plataforma, e que resulta na deposição de espessas sequências de evaporitos plataformais (modificado de Warren, 2006, 2016). | 54 |
| Figura 9. Situações de margens continentais tectônicas, hidrograficamente isoladas (endorréicas marinhas), nas quais os evaporitos de <i>basinwide</i> tendem a ser acumulados (as camadas de evaporitos são sombreadas de preto). As posições estão amplamente vinculadas aos períodos de proximidades continente-continente e, portanto, podem ser associadas às várias etapas do Ciclo de Wilson. Assim os depósitos de <i>basinwide</i> são relacionados à tectônica, e podem abranger tanto os períodos de <i>greenhouse</i> como os de <i>icehouse</i> (modificado de Warren, 2006, 2016, 2017). | 57 |
| Figura 10. Bacias intracratônicas carbonáticas-evaporíticas: Modelo estratigráfico de sequências para uma bacia submetida a rebaixamento incompleto do nível dos mares, com formação de gipso a cunhas de gipso nas margens da bacia (modificado de Tucker, 1991; Catuneanu et al., 2011). | 58 |

- Figura 11.** Bacias intracratônicas carbonáticas-evaporíticas: Modelo estratigráfico de seqüências para uma bacia submetida a rebaixamento completo do nível dos mares, com formação de halita (modificado de Tucker, 1991; Catuneanu *et al.*, 2011). 59
- Figura 12.** Modelo estratigráfico de seqüências para evaporitos de *basinwide* em uma bacia submetida ao isolamento completo da superfície de conexão com os oceanos mundiais e subsequente rebaixamento (Modificado de Warren, 2006)..... 64
- Figura 13.** Evaporitos fanerozoicos ao longo tempo. A) Massa de halitas fanerozoicas atualmente residindo nas bacias evaporíticas. B) Massa reconstruída de halita fanerozoica perdida por combinação de erosão e dissolução (após Hay *et al.*, 2006). C) Alterações de salinidade oceânica nos últimos 500 Ma (após Hay *et al.*, 2006). (Modificado de Warren, 2017). 69
- Figura 14.** Mapa de localização da Bacia do Amazonas no contexto do Cráton Amazônico e localização do Arco (ou Alto) de Purus entre as Bacias do Solimões e Amazonas. A posição Depósito de Autazes é indicada no mapa como referência (modificado de Kiefer *et al.*, 2019). 70
- Figura 15.** Correlação dos poços PBAT-14-38, no Depósito de Autazes e 9FZ-2-AM, no Depósito de Fazendinha, exemplificando os tratos de sistemas e as seqüências deposicionais, nas transições entre os Ciclos VI e VII na Bacia do Amazonas. A fim de facilitar a leitura, os tratos de sistemas foram abreviados como se segue: TMA – Mar Alto; TST – Transgressivo; TMB – Mar Baixo. 74
- Figura 16.** Coluna estratigráfica exemplificando os tratos de sistemas e as seqüências deposicionais definidas nas transições entre os Ciclos VI e VII na Bacia do Amazonas, em Autazes. A fim de facilitar a leitura, os tratos de sistemas foram abreviados como se segue: TMA – Mar Alto; TST – Transgressivo; TMB – Mar Baixo. Para as geometrias intrabacinais, tem-se: TSNA: Nível de Base Alto; TSNB: Nível de Base Baixo. 75
- Figura 17.** Limite inferior da Sequência S1 definido pela transição das fácies de siltitos e folhelhos com intercalações de calcarenitos no Trato de Sistemas de Mar Alto – TMA, para as fácies de anidritas (nodulares que gradam verticalmente para laminares) no estágio de mar baixo e isolamento da bacia, com hidrologia interna associada ao Trato de Sistemas de Nível de Base Alto (TSNA). Furo PBAT-14-38 do Depósito de Autazes. Profundidades representadas na seqüência da foto: 910,07 m a 933,06 m. 77
- Figura 18.** Limite inferior da Sequência S2 (seqüência autocíclica S2-1), definido pela transição das fácies de rochas carbonáticas no Trato de Sistemas de Mar Alto – TMA tardio, para as fácies de anidritas (laminares a nodulares) no estágio de mar baixo e isolamento da bacia, com hidrologia interna associada ao Trato de Sistemas de Nível de Base Alto (TSNA). Profundidades representadas na seqüência da foto: 807,83 m a 840,11 m. 81
- Figura 19.** Contato entre halitas cristalinas com textura do tipo mosaico suturado e presença de material argiloso preenchendo os interstícios entre os cristais (base) e anidritas laminares (topo) que marca a transição do estágio de nível baixo para uma progressiva elevação do nível de base, no estágio transgressivo intrabacinal da Sequência autocíclica S2-1 (Sequência S2). Furo PBAT-14-38 do Depósito de Autazes. Profundidades representadas na seqüência da foto: 805,00 m a 807,83 m. 82
- Figura 20.** Anidritas nodulares a laminares, com passagens arenosas e vesículas e cavidades preenchidas por halita. Furo PBAT-14-38 do Depósito de Autazes. Profundidades representadas na seqüência da foto: 795,35 m a 797,32 m. 83
- Figura 21.** Limite inferior da Sequência autocíclica S2-2 (Sequência S2), definido pela transição das fácies de anidritas do topo da Sequência S2-1, para as halitas sobrepostas do Trato de Sistemas de Nível de Base Baixo (TSNB). Furo PBAT-14-38 do Depósito de Autazes. Profundidades representadas na foto: 779,05 m a 807,83 m. 85
- Figura 22.** Amostras de testemunhos de sondagem do Depósito de Autazes com exemplos de halitas grosseiras na base da Sequência S2-2, formadas pelo acúmulo de cristais prismáticos e/ou piramidais de halitas. A. Furo PBAT-13-33 do Depósito de Autazes. Profundidades representadas na foto: 778,66 m a 779,15 m. B. Furo PBAT-12-11 do Depósito de Autazes. Profundidades representadas na foto: 868,49 m a 868,17 m. C. Furo PBAT-11-09 do Depósito de Autazes. Profundidades representadas na foto: 880,46 m a 880,87 m. 86
- Figura 23.** Perfis das concentrações de Bromo (Br %) ao longo da seção salina hospedeira da mineralização em alguns dos furos do Depósito de Autazes (modificado de Potássio do Brasil, 2014). 89

- Figura 24.** Principais fases minerais identificadas na análise por Qemscan. Furo PBAT-13-28 do Depósito de Autazes. Profundidades da amostra analisada: 847,89 m a 848,00 m. (modificado de SGS, 2014). 91
- Figura 25.** Modelo proposto para a deposição das sucessões carbonáticas evaporíticas a Bacia do Amazonas em Autazes (Adaptado de Warren, 2017). **A.** Sequência Depositional S1, com estágios de conexão e isolamento da bacia sobre influência de um sistema semiárido. **B.** Sequencia Depositional S2, com estágios e conexão e isolamento da bacia, sobre influência de sistemas semiárido a árido..... 95
- Figura 26.** Exemplos das principais variações texturais dos cristais evaporíticos dos horizontes da mineralização potássifera do Depósito de Autazes. 97
- Figura 27.** Superfície do topo da mineralização potássifera, com ampla expressão e distribuição regional ao longo do Depósito de Autazes. Em sentido horário: Visualização em planta, e em perspectiva do modelo digital 3D da superfície. A superfície é correspondente à Superfície de Regressão Máxima - SRM da Sequência Depositional S2-2. Interpolações efetuadas nos *softwares*: *Mapinfo*[®] Versão 17.0 (64-bit) Release Build 71 e *Leapfrog Geo*[®] Versão 4.5. 99
- Figura 28.** Superfície do topo da mineralização potássifera, com ampla expressão e distribuição regional ao longo do Depósito de Autazes. Visualização em detalhe e perspectiva do modelo digital 3D da superfície. A superfície é correspondente à Superfície de Regressão Máxima - SRM da Sequência Depositional S2-2. Interpolações efetuadas no *software*: *Leapfrog Geo*[®] Versão 4.5..... 100

1- INTRODUÇÃO

O Depósito Potassífero de Autazes, na porção ocidental da Bacia do Amazonas, está localizado a 22 km de distância do município de Autazes e a 120 km de Manaus, no Estado do Amazonas. Sua área é de aproximadamente 155 km², com reservas minerais totais superiores a 767 Mt e teor médio de 30,71% de KCl, com espessura média de 2,07 m, entre as profundidades de 685 m e 865 m, (Kiefer *et al.*, 2019). (Fig. 1).

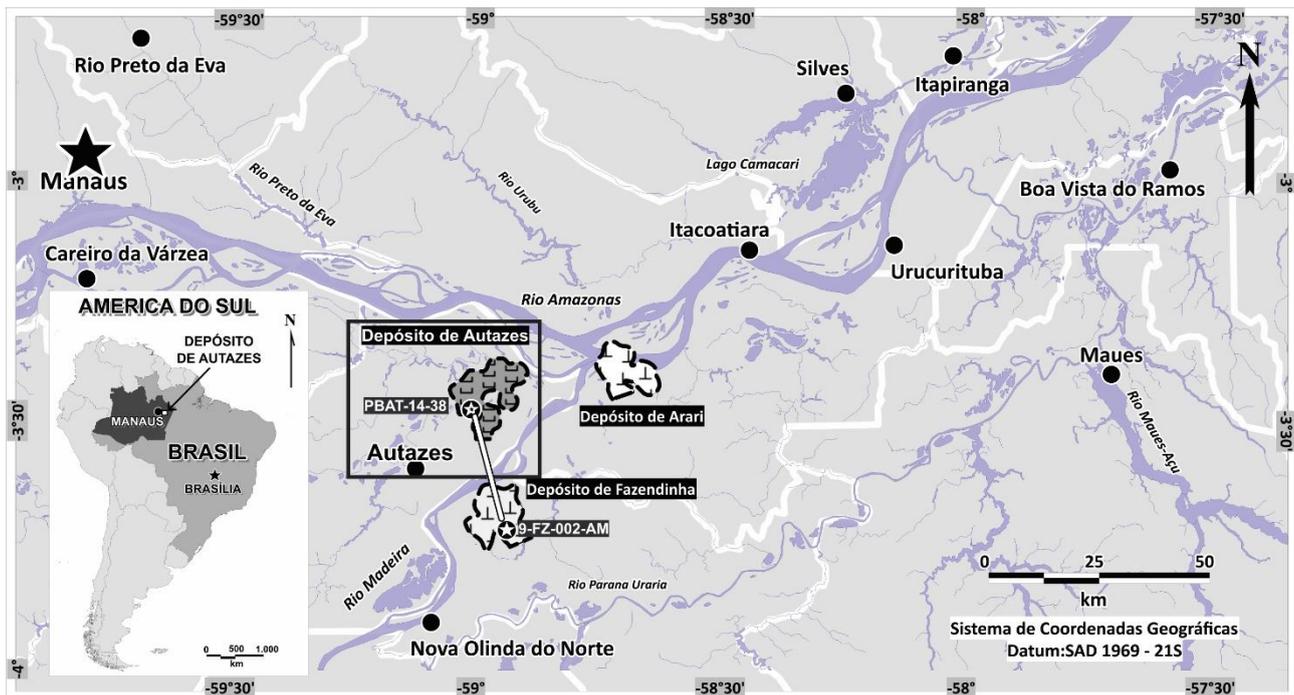


Figura 1. Mapa de localização dos depósitos Potassíferos na Bacia do Amazonas com destaque para o Depósito de Autazes (modificado de Kiefer *et al.*, 2019).

A mineralização de potássio em Autazes corresponde a um horizonte subhorizontal de minerais evaporíticos, com composição média caracterizada pelo predomínio silvitas (KCl) e halitas (NaCl), associadas a anidritas (CaSO₄) e sulfatos de magnésio e potássio (kieserita (MgSO₄) e kainita (K₂SO₄)), inseridos na porção superior da Formação Nova Olinda, da Sequência Pensilvaniana-Permiana da Bacia do Amazonas (Kiefer *et al.*, 2019).

A sedimentação paleozoica da Bacia do Amazonas está associada a amplas ingressões marinhas que evoluíram em sentidos opostos ao longo do tempo. No período compreendido entre o Siluriano até o final do Devoniano as ingressões ocorreram de leste para oeste. Após um generalizado período

de emersão no Carbonífero, a inclinação da bacia sofreu uma suave deflexão para oeste, seguido pelo soerguimento da sua porção oriental. Tal evento resultou na inversão do sentido das invasões marinhas, que passaram a ocorrer de oeste para leste, com a deposição de uma sequência transgressiva, correspondente aos sedimentos pensilvanianos das Formações Monte Alegre e Itaituba. Essa sequência foi sucedida pelos sedimentos evaporíticos da Formação Nova Olinda, associados a um intervalo de restrição acentuada da bacia que imperou no final do Carbonífero e pelos sedimentos continentais da Formação Andirá, no Permiano Superior (Cunha, 2000; Cunha *et al.*, 2007; Dardenne & Schobbenhaus, 2001).

O conjunto de sedimentos químico-evaporíticos e terrígenos das formações Itaituba, Nova Olinda e parte da Formação Andirá foram denominados por Szatmari *et al.* (1975), como a Sequência Evaporítica da Bacia do Amazonas. Esses autores definiram a sequência como um Ciclo Principal, caracterizado pela variação cíclica da salinidade paleoambiental. Segundo essa definição o Ciclo Principal subdivide-se em onze Ciclos Secundários, correlacionáveis ao longo da bacia e limitados no topo e na base por sedimentos terrígenos (folhelhos e mais raramente siltitos e arenitos).

A mesma classificação cicloestratigráfica foi proposta por Sad *et al.* (1982, 1997), que atribuíram à associação de fácies da Sequência Evaporítica a recorrência cíclica de fases de alta e baixa salinidade, limitadas por folhelhos pretos ou por sais menos solúveis (calcários ou anidritas), que permite a sua subdivisão em onze ciclos. Cada ciclo seria então composto de uma sequência de sedimentos clásticos na base (folhelhos e/ou arenitos) e outra, superior, de sedimentos químicos, iniciada com carbonatos e anidrita, e finalizada com halita no topo (Szatmari *et al.*, 1975; Costa & Wanderley Filho, 2009).

Dessa forma, apesar dos vários trabalhos publicados na literatura mundial, com as discussões sobre a evolução deposicional de sucessões carbonáticas-evaporíticas à luz dos conceitos da Estratigrafia de Sequências (Kendall, 1988; Tucker, 1991, Warren, 2006, 2016; Catuneanu *et al.* 2011), a análise cicloestratigráfica dos sedimentos evaporíticos da Bacia do Amazonas tem imperado ao longo das publicações científicas sobre o tema nas últimas décadas.

Conforme destacado por Tucker (1991), a ênfase da cicloestratigrafia está em eventos desenvolvidos no centro da bacia. Na estratigrafia de sequências, por outro lado, as sequências deposicionais são definidas por limites de sequência, associados a maiores ou menores quedas relativas do nível de base nas bacias. Conseqüentemente, a abordagem de sequências considera os eventos que ocorrem tanto nas margens como no centro da bacia, proporcionando uma perspectiva mais abrangente da sedimentação do que os conceitos cicloestratigráficos.

Assim, a seção evaporítica da Bacia do Amazonas ainda permanece carente de estudos aprofundados, com revisões conceituais em relação aos controles deposicionais das sucessões salinas, por meio de análises atualizadas, com detalhamentos faciológicos que permitam a proposição de modelos estratigráficos de sequências.

Diante da problemática apresentada, a motivação para a realização da presente dissertação está fundamentada nos seguintes questionamentos:

- Quais seriam as definições atuais consagradas sobre o conceito de evaporitos, e os seus controles deposicionais passíveis de interpretações a partir análises petrográficas texturais?
- Quais seriam as interrelações entre as variações de salinidade para a precipitação dos sais evaporíticos, o balanço hídrico interno das bacias e as necessidades de conexão superficial contínua com os oceanos?
- Quais seriam os estilos deposicionais dos ambientes de escala de placa nos quais os grandes depósitos fanerozoicos mundiais teriam acumulado significativos volumes de evaporitos?
- Quais desses estilos deposicionais permitiriam interpretações marinhas eustáticas, alinhada às flutuações dos níveis dos mares?
- Quais seriam as implicações deposicionais associadas aos períodos de *greenhouse* e *iceshouse* que imperariam sobre esses estilos passíveis de interpretações marinhas eustáticas?
- Como seriam organizados estratigraficamente esses estilos em relação aos tratos de sistemas, limites de sequência e definição das sequências deposicionais?
- Quais os estilos mais adequados à evolução paleomabiental da Bacia do Amazonas, que suportariam os controles deposicionais associados aos estágios de *icehouse*, na transição dos períodos Carbonífero e Permiano, e que teriam permitido a ampla deposição dos sais evaporíticos na bacia?
- Como estariam organizados estratigraficamente as sucessões evaporíticas-carbonáticas na área do Depósito de Autazes?
- Quais seriam os ambientes de sedimentação mais adequados para explicar as variações

das fácies evaporíticas observadas na área do Depósito de Autazes?

- Quais seriam os controles deposicionais que teriam operado no condicionamento das variações faciológicas observadas na seção mineralizada em potássio do Depósito de Autazes?

1.1 Objetivos

Considerando as questões geológicas apontadas na seção anterior, esta dissertação foi elaborada diante da perspectiva da apresentação de proposições inéditas, para uma ampla compreensão dos aspectos deposicionais evolutivos das unidades evaporíticas Carboníferas que hospedam a mineralização potássifera do Depósito de Autazes, na região ocidental da Bacia do Amazonas. Dessa forma, constituem os principais objetivos deste trabalho:

- Caracterizar as fácies sedimentares carbonáticas-evaporíticas, intersectadas na área do Depósito de Autazes, e estratigraficamente inseridas na porção superior da Formação Nova Olinda, sob os aspectos petrográficos, geoquímicos, mineralógicos e faciológicos;
- Elaborar um modelo estratigráfico de sequências adequado às perspectivas deposicionais dos ambientes de sedimentação, propícios ao desenvolvimento das fácies carbonáticas-evaporíticas, intersectadas na área do Depósito de Autazes;
- Elaborar um modelo deposicional para a evolução paleoambiental das sequências deposicionais definidas na área do Depósito de Autazes;
- Discutir os aspectos composicionais e texturais da faciologia da mineralização potássifera de Autazes, sob o ponto de vista dos controles deposicionais intrabaciais.

1.2 Metodologia

Com o objetivo de responder às questões por ora apresentadas, e atingir os objetivos propostos para esta dissertação, foram utilizados os métodos e técnicas descritos a seguir. Detalhamentos adicionais sobre as metodologias utilizadas são também descritos no artigo científico anexo a esta dissertação (Capítulo 2).

1.2.1 - Compilação e revisão bibliográfica

A etapa de compilação e revisão bibliográfica compreendeu os seguintes estágios: (i) análise bibliográfica pormenorizada dos principais trabalhos científicos (artigos, livros, mapas e relatórios

técnicos), referentes à estratigrafia, evolução tectônica regional e paleoambiental da Bacia do Amazonas; (ii) análise bibliográfica dos principais trabalhos científicos (artigos, livros, mapas e relatórios técnicos), referentes aos aspectos deposicionais da sequência evaporítica da Bacia do Amazonas, sobretudo da seção sedimentar superior da Formação Nova Olinda, hospedeira da mineralização de potássio; (iii) análise bibliográfica dos principais trabalhos científicos (principalmente artigos e livros), sobre os modelos estratigráficos de sequências propostos para deposição de sucessões carbonáticas evaporíticas em bacias fanerozoicas. Essas revisões ocorreram principalmente nos estágios iniciais, mas também foram extensivas às demais etapas de desenvolvimento deste trabalho. A partir da avaliação dessas referências, foram reunidas importantes informações sobre a ocorrência regional das unidades carbonáticas evaporíticas na Bacia do Amazonas, bem como identificados aspectos inerentes às interpretações estratigráficas dessas rochas na área do Depósito de Autazes.

1.2.2 – Amostragem de litotipos

A sondagem rotativa diamantada pelo sistema wireline foi a metodologia de pesquisa utilizada pela empresa Potássio do Brasil Ltda. para obtenção de amostras de litotipos utilizados na definição do Depósito de Autazes, no Amazonas (Fig.1). Os furos de sondagem foram executados em três etapas subsequentes: 1) Perfuração com brocas tricônicas com diâmetros entre 21,6 cm a 30,5 cm e amostragem de fragmentos sedimentares de calha até aproximadamente 400 m de profundidade; 2) Perfuração com coroas diamantadas (padrões HQ e PQ) e recuperação de testemunhos de rochas sedimentares clásticas, até aproximadamente 770 m de profundidade; 3) Perfuração com coroas diamantadas (padrões NQ e HQ) e recuperação de testemunhos de rochas salinas, até aproximadamente 850 metros de profundidade. Os dados obtidos a partir dessas campanhas de sondagens foram disponibilizados pela Potássio do Brasil e subsidiaram grande parte das etapas de pesquisa descritas a seguir nesta dissertação.

1.2.3 – Descrições petrográficas

Nessa etapa foram realizadas análises descritivas e interpretações faciológicas de dados oriundos de amostras de testemunhos de sondagem, executados pela empresa Potássio do Brasil Ltda., na área do Depósito de Autazes. Num primeiro estágio essas descrições e definições faciológicas foram empreendidas para o conjunto dos intervalos de rochas das Formações Alter do Chão, Andirá e Nova Olinda, além de rochas intrusivas associadas ao magmatismo Penatecaua, nessa porção ocidental da Bacia do Amazonas. Essas avaliações permitiram as definições do quadro litoestratigráfico geral dessas formações na área de Autazes, coerente com a carta estratigráfica proposta para a bacia, conforme Cunha *et al.* (2007).

No segundo estágio, essas caracterizações de detalhe foram empreendidas para as fácies evaporíticas interceptadas no Depósito de Autazes, sobretudo nos intervalos hospedeiros da mineralização potássifera da área. Os resultados dessas definições preliminares são apresentados no artigo científico anexo a esta dissertação (Capítulo 2), e em maiores detalhes no Capítulo 3 desta dissertação.

Finalmente, numa terceira etapa, as caracterizações petrográficas e faciológicas foram avaliadas para o conjunto de sedimentos carbonáticos-evaporíticos estratigraficamente posicionados entre os Ciclos VI e VII, nas seções evaporíticas superiores da Formação Nova Olinda, conforme originalmente definido por Szatmari *et al.* (1975). Para tanto, foram considerados os dados de testemunhos de sondagem obtidos no furo de carácter estratigráfico PBAT-14-38, executado pela Potássio do Brasil em Autazes, bem como os dados descritivos do furo estratigráfico 9-FZ-2-AM, executado pela Petrobras na década de 1970. Esse furo está situado no Depósito Potássifero de Fazendinha, a cerca de 29km a SSE do Depósito de Autazes, no município de Nova Olinda do Norte, no Estado do Amazonas. Os dados referentes às unidades intersectadas no furo 9-FZ-2-AM foram acessados por consultas aos trabalhos de Szatmari *et al.* (1975). Os resultados dessas caracterizações faciológicas que permitiram interpretações estratigráficas de sequência, para o conjunto desses sedimentos carbonáticos-evaporíticos na área de Autazes, são apresentados e discutidos em detalhe no Capítulo 3 desta dissertação.

1.2.4 – Análises geoquímicas por ICP-OES e ICP-MS

Para a determinação analítica dos teores de potássio presentes, foram executadas 1557 análises químicas, num total de 280,03 m de amostras de rochas salinas do Ciclo VII selecionadas em todos os furos de sondagem realizados em Autazes. As análises químicas das amostras obtidas com as sondagens em Autazes foram realizadas nos laboratórios do Saskatchewan Research Council em Saskatchewan, no Canadá. Esse centro é um dos principais desenvolvedores de pesquisa aplicada daquele país, com clientes em todo mundo, e detentor da acreditação internacional ISO/IEC 17025 para o conjunto de determinações analíticas para potássio. Os métodos analíticos utilizados pela SRC para as análises das amostras de Autazes foram (Potássio do Brasil, 2014):

(1) Solúveis e análises por ICP-OES (espectrometria de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado), destinado às análises das frações mineralógicas altamente solúveis em água, e cujos resultados correspondem às concentrações multielementares utilizadas para a determinação das proporções dos diversos sais nas amostras;

(2) A partir da fração solúvel, também foram realizadas análises para as concentrações de Bromo (Br) e Cloro (Cl) pela metodologia ICP-MS (espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado);

(3) Digestão total e análises por ICP-OES e ICP-MS, destinadas às análises multielementares totais, tanto das frações solúveis quanto as insolúveis das amostras.

1.2.5 – Análises mineralógicas: Determinações semi-quantitativas por Difração de Raios X

Para a determinação analítica semi-quantitativa das fases minerais presentes na mineralização potássifera do Depósito de Autazes, também foram executadas análises por meio da tecnologia de difratometria de Raios X (DRX), no Centro de Microanálises Avançadas da SRC. Nessa técnica, as alíquotas preparadas são submetidas ao analisador por meio de um anel de alumínio e irradiadas com radiação de Cu K α . A porcentagem mineralógica das amostras é então definida a partir da análise comparativa dos resultados do difratômetro com espectros de intensidade de referência para os minerais do Centro Internacional de Padrão Dados de Difração (ICDD PDF4 2008). Ao todo foram realizadas 1248 análises mineralógicas, correspondentes a um total de 265,04 m de amostras salinas analisadas (Potássio do Brasil, 2014).

1.2.6 – Análises por QEMSCAN

Foram também efetuadas análises microscópicas de detalhe em amostras de testemunhos de sondagem da seção da mineralizada do Depósito de Autazes, por meio da tecnologia de QEMSCAN. Essas análises foram executadas nos laboratórios da SGS Mineral Services no Canadá. O termo QEMSCAN é um acrônimo para Quantitative Evaluation of Materials by Scanning Electron Microscopy (avaliação quantitativa de materiais por microscopia eletrônica de varredura), um sistema que permite medir a variabilidade mineralógica com base na química de uma escala micrométrica. A QEMSCAN é a ferramenta mineralógica de processo mais rigorosa, empregada atualmente na indústria de minerais (SGS, 2014).

1.2.7 – Composição de resultados amostrais e estimativas de reservas

A composição dos intervalos amostrados e as estimativas das reservas minerais presentes em Autazes foram executadas pela equipe da Potássio do Brasil, a partir dos resultados obtidos pelas análises por ICP e validações mineralógicas por meio por meio das análises de Difração de Raios X (Potássio do Brasil, 2014).

Todo esse conjunto de dados, incluindo as determinações por Qemscan, pertence ao acervo do Projeto Autazes da Potássio do Brasil Ltda. e foi disponibilizado pela empresa em apoio ao desenvolvimento deste trabalho. Os resultados dessas determinações são apresentados e sumarizados no artigo científico anexo a esta dissertação (Capítulo 2), bem como subsidiam as discussões e interpretações dos capítulos seguintes deste trabalho.

**2- ARTIGO – O DEPÓSITO POTASSÍFERO DE AUTAZES NO CONTEXTO
ESTRATIGRÁFICO DA BACIA DO AMAZONAS**

***THE AUTAZES POTASH DEPOSIT IN THE STRATIGRAPHIC CONTEXT OF THE
AMAZON BASIN***

**O DEPÓSITO POTASSÍFERO DE AUTAZES NO CONTEXTO
ESTRATIGRÁFICO DA BACIA DO AMAZONAS**
*THE AUTAZES POTASH DEPOSIT IN THE STRATIGRAPHIC CONTEXT
OF THE AMAZON BASIN*

Gustavo Lage Sousa KIEFER^{1,3}, Alexandre UHLEIN², José Jacob FANTON³

- (1) Programa de Pós-graduação em Geociências - Instituto de Geociências - Universidade Federal de Minas Gerais; Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Pampulha - CEP 31270-901 - Belo Horizonte – MG – gkiefer@potassiodobrasil.com.br.
 (2) Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências - Centro de Pesquisa Manoel Teixeira da Costa – CPMTC; Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Pampulha - CEP 31270-901 - Belo Horizonte – MG - auhlein@gmail.com.
 (3) Potássio do Brasil Ltda.; Rua Antônio de Albuquerque, 156 - 15º andar – Funcionários - CEP 30112-010 - Belo Horizonte – MG - jfanton@potassiodobrasil.com.br.

Introdução
 Área, materiais e métodos
 Bacia intracratônica do Amazonas
 Contexto tectono-estratigráfico
 Sequência Evaporítica
 Depósito potassífero de Autazes
 Histórico
 Estratigrafia da área do depósito
 Formação Nova Olinda
 Formação Andirá
 Migmatismo Penatecaua
 Formação Alter do Chão
 Depósitos Aluvionares Recentes
 Espessuras e teores de potássio da mineralização
 Mineralogia e geoquímica da mineralização
 Estratigrafia da mineralização
 Intervalo mineralizado inferior
 Intervalo mineralizado intermediário
 Intervalo mineralizado superior
 Conclusões
 Agradecimentos
 Referências bibliográficas

RESUMO - O Depósito Potassífero de Autazes, com reservas totais superiores a 767 Mt e teor médio de 30,71% de cloreto de potássio (KCl), corresponde a um horizonte mineralizado subhorizontal, posicionado nos estratos superiores da Formação Nova Olinda, da Sequência Pensilvaniana-Permiana da Bacia do Amazonas. Este trabalho apresenta as características mineralógicas-geoquímicas, estratigráficas e petrográficas da mineralização, a partir dos dados oriundos do programa de pesquisa mineral para sais de potássio empreendido pela Potássio do Brasil Ltda., entre os anos de 2008 e 2014, na região de Autazes, Amazonas, Brasil. Esses dados indicam que a mineralização abrange uma área de 155 km², com espessura média de 2,07 m e situa-se entre as profundidades de 685 m e 865 m. O horizonte mineralizado foi subdividido, da base para o topo, em: 1) Intervalo Mineralizado Inferior, com predomínio de silvinitas brancas, finas e laminadas; 2) Intervalo Mineralizado Intermediário, que apresenta principalmente silvinita castanha e sulfatos disseminados; 3) Intervalo Mineralizado Superior, constituído por silvinitas avermelhadas, com granulação grosseira. As distribuições dos teores de KCl e espessuras da mineralização estão relacionados às características distintas dessas unidades ao longo do depósito.

Palavras-Chaves: Evaporitos, Silvinita, Formação Nova Olinda, Pensilvaniano-Permiano, Bacia do Amazonas.

ABSTRACT - The Autazes Potash Deposit, with more than 767 Mt and average grade of 30.71% of potassium chloride (KCl), corresponds to a sub-horizontal mineralized horizon located in the upper strata of the Nova Olinda Formation, from PensilvanianaPermian Sequence of Amazon Basin. This study reports the mineralogical-geochemical, stratigraphic and petrographic features of the potash mineralization, based on the database obtained by Potássio do Brasil Ltd. during a mineral exploration campaign for potash salts undertaken from the years 2008 to 2014, in Autazes region, Amazonas State, Brazil. These data indicate that mineralization covers an area of 155 km², with an average thickness of 2.07 m and lies at depth from 685 m to 865 m. The mineralized horizon was subdivided from bottom to top as: 1) Lower Mineralized Interval, with predominance of white, fine and laminated sylvinites; 2) Intermediate Mineralized Interval, which mainly presents brown sylvinite and disseminated sulphates; 3) Upper Mineralized Interval, consisting of reddish coarse sylvinites. The KCl content and thickness distributions of the mineralization are related to the distinctive features of these sections along the deposit.

Keywords: Evaporite, Sylvinite, Nova Olinda Formation, Pensilvanian-Permian, Amazon Basin.

INTRODUÇÃO

Os depósitos evaporíticos de potássio no Brasil são encontrados, em grande parte, no Aptiano da Bacia Sergipe-Alagoas. Nesta região, a produção de potássio está restrita à Mina de Taquari/Vassouras, em Sergipe, que está sob controle da mineradora Mosaic Fertilizantes. Destacam-se também as reservas Permo-Carboníferas das bacias intracratônicas do Solimões e Amazonas (Kulaif & Góes, 2016) que, no futuro, podem assumir grande importância no fornecimento de potássio para a indústria de fertilizantes do Brasil. A maior parte dos fertilizantes potássicos utilizados na agricultura mundial é obtida a partir do cloreto de potássio (KCl), devido à sua alta concentração e baixo custo de produção (Dias & Fernandes, 2006). Assim, os depósitos da Bacia do Amazonas constituem-se na melhor perspectiva de elevar significativamente a produção de cloreto de potássio no Brasil (Marini, 2006).

Entre os anos de 2008 e 2009, a companhia Potássio do Brasil iniciou um robusto projeto de pesquisa mineral para sais de potássio na Bacia do Amazonas, a partir da aquisição e interpretação de dados públicos regionais do Banco de Dados de Exploração e Produção (BDEP) da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Dentre as áreas selecionadas pela companhia, a região de Autazes, na Bacia do Amazonas, foi a primeira a receber o programa de sondagem, executado entre os anos de 2010 a 2014, que culminou na definição do Depósito de Autazes, com reservas totais superiores a 767 Mt e teor médio de 30,71% de KCl (Potássio do Brasil, 2014).

Este trabalho objetiva apresentar dados de estratigrafia, geoquímica e mapas de espessura e teores de potássio, mineralogia, petrografia e descrições dos intervalos da mineralização de potássio, que corresponde ao denominado Depósito de Autazes, situado na Bacia do Amazonas (Figura 1). Os dados geológicos aqui apresentados são inéditos e representam um caso de grande sucesso de pesquisa mineral empreendido na Bacia do Amazonas (Potássio do Brasil, 2014).

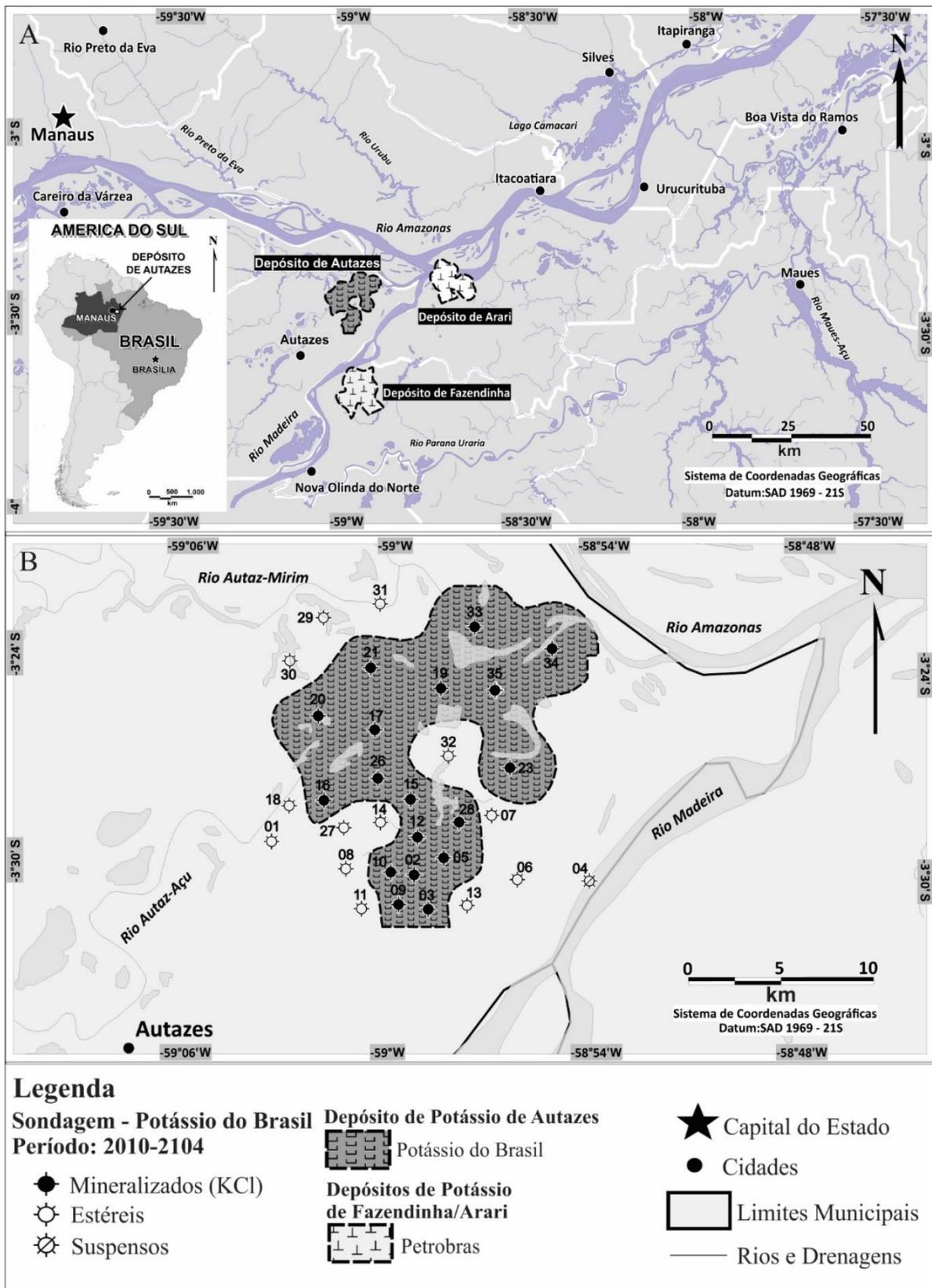


Figura 1. Mapas de localização. A) Depósitos Potassíferos na Bacia do Amazonas; B) Limites estimados para o Depósito Potassífero de Autazes (modificado de Potássio do Brasil, 2014).

ÁREA, MATERIAIS E MÉTODOS

O Depósito Potássífero de Autazes, objetivo principal deste trabalho, corresponde a uma área de 155 km², com reservas totais superiores a 767 Mt e teor médio de 30,71% de KCl. O depósito está localizado entre as longitudes -59° 03' 25,308"W e -58° 53' 49,088"W e latitudes -03° 31' 44,652"S e -03° 21' 44,920"S, distante cerca de 22 km a nordeste do município de Autazes e a 120 km a sudeste da capital do Estado, Manaus (Fig. 1) A área do depósito está inserida na porção oeste da Bacia do Amazonas, próxima à confluência dos rios Autaz Mirim, Autaz- Açu, Madeira e Amazonas (Potássio do Brasil, 2014).

O trabalho apresentado é resultado da avaliação e interpretação de dados de sondagem, oriundos da campanha de pesquisa mineral empreendida pela Potássio do Brasil na região de Autazes. Esses dados correspondem a um total aproximado de 27.000 m de amostras de rochas do espectro sedimentar Fanerozoico da Bacia do Amazonas, obtidas a partir de 33 furos de sondagem executados pela empresa nessa região, até o ano de 2014.

A sondagem rotativa diamantada pelo sistema *wireline* foi a metodologia de pesquisa mineral utilizada na definição do Depósito de Autazes. Os furos de sonda foram executados em três etapas subsequentes: 1) Perfuração com brocas tricônicas com diâmetros entre 21,6 cm a 30,5 cm e amostragem de fragmentos sedimentares de calha até aproximadamente 400 m de profundidade; 2) Perfuração com coroas diamantadas (padrões HQ e PQ) e recuperação de testemunhos de rochas sedimentares clásticas, até aproximadamente 770 m de profundidade; 3) Perfuração com coroas diamantadas (padrões NQ e HQ) e recuperação de testemunhos de rochas salinas, até aproximadamente 850 metros de profundidade

Para a determinação analítica dos teores de potássio presentes, foram executadas 1557 análises químicas, num total de 280 m de amostras de rochas salinas selecionadas em todos os furos de sondagem realizados em Autazes. As análises químicas foram realizadas nos laboratórios do *Saskatchewan Research Council (SRC)* em Saskatchewan, no Canadá. As amostras foram analisadas por ICP-OES (espectrometria de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado) (Potássio do Brasil, 2014).

Para a determinação das frações mineralógicas, foram executadas análises por meio de difratometria de Raios X (DRX), no Centro de Microanálises Avançadas da SRC. Ao todo, foram realizadas 1248 análises mineralógicas, correspondentes a um total de 265,04 m de amostras salinas (Potássio do Brasil, 2014).

Os resultados das análises químicas foram compostos em intervalos variados para cada furo de sondagem. Nesse processo, foram selecionados intervalos com teores iguais e superiores a 10% de KCl para a definição da mineralização. Esse critério foi definido a partir do tratamento estatístico dos resultados químicos que indicou um padrão de continuidade do horizonte mineralizado com esse teor de corte. Dessa forma, foram definidos 18 furos com intersecções mineralizadas em KCl que permitiram a avaliação das reservas geológicas em Autazes (Potássio do Brasil, 2014).

A estimativa das reservas foi executada com auxílio do software GeoviaGems (versão 6.6). Este processo considerou a interpolação de diversas seções verticais a partir dos furos de sondagem obtendo-se um modelo 3D do corpo mineralizado e o volume e o teor das reservas contidas, conforme o método dos polígonos (Yamamoto, 2001) (Potássio do Brasil, 2014).

BACIA INTRACRATÔNICA DO AMAZONAS

Contexto tectono-estratigráfico

A Bacia do Amazonas situa-se na porção setentrional do Brasil e distribui-se por uma área de aproximadamente 500.000 km² entre os estados do Amapá, Amazonas e Pará (Almeida & Hasui, 1984; Santos, 2003). A bacia está localizada no interior do Cráton Amazônico, cuja porção norte denomina-se: Escudo das Guianas e a porção sul, Cráton Brasil Central (ou Guaporé), ambos constituídos por rochas granito-gnáissicas arqueanas e várias coberturas paleo-mesoproterozoicas (Santos, 2003; Tassinari & Macambira, 2004; Uhlein *et al.*, 2015) (Fig. 2).

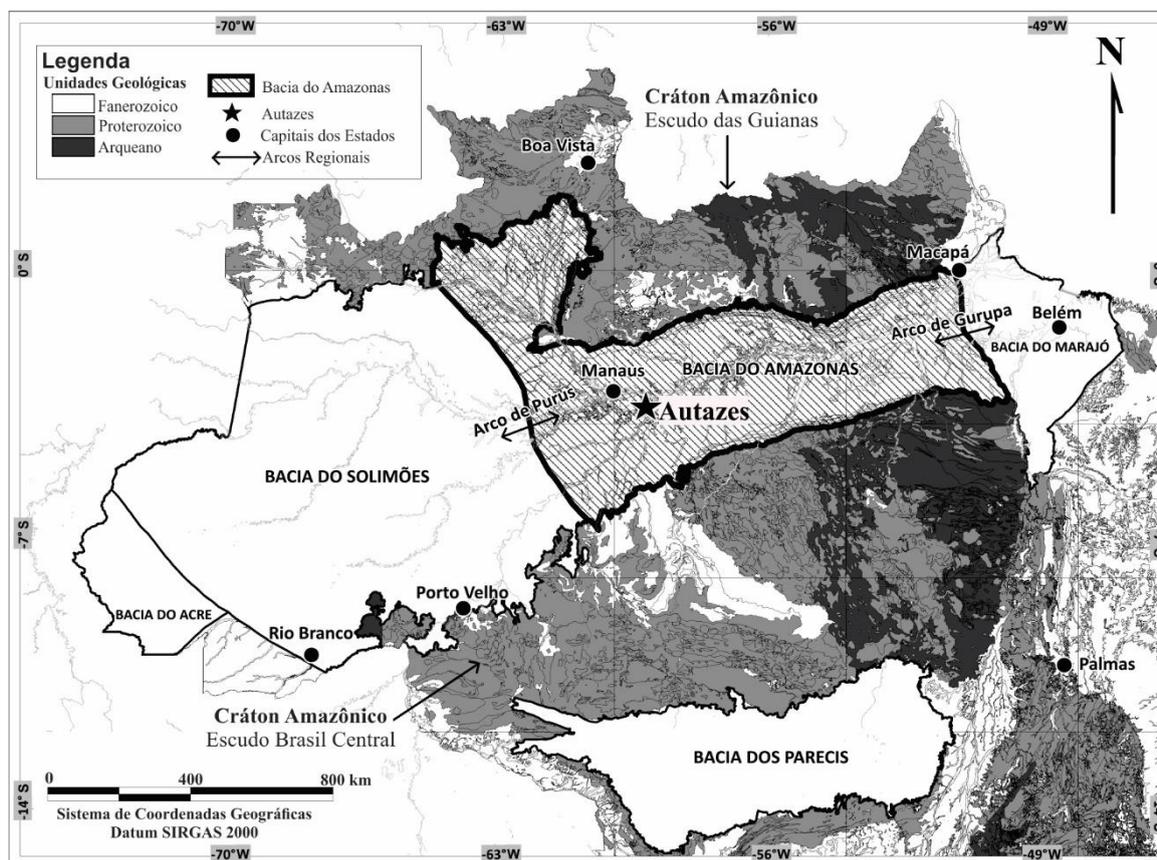


Figura 2. Mapa de localização da Bacia do Amazonas no contexto do Cráton Amazônico (adaptado de CPRM, 2004) e localização do Depósito de Autazes.

Segundo Neves *et al.* (1989, 1990) e Cunha (1994, 2000), o surgimento da Bacia do Amazonas estaria associado aos estágios colisionais finais do Ciclo Brasileiro (Neoproterozoico). A colisão dos crátons do São Francisco e Amazônico no Neoproterozoico teria originado esforços distensivos de relaxamento, que possibilitaram a geração do rifte precursor da Bacia do Amazonas. A compartimentação do embasamento e os “trends” estruturais mais antigos teriam controlado a sedimentação ordoviciana (~460 Ma) da base da Bacia do Amazonas (Cunha, 2000; Cunha *et al.*, 2007).

O preenchimento sedimentar da Bacia do Amazonas é representado principalmente por rochas paleozoicas, com espessuras que atingem mais de 5.000 m. A estratigrafia da bacia corresponde a duas megassequências de primeira ordem: uma paleozoica, representada por rochas sedimentares de variados ambientes deposicionais, associadas à volumosa ocorrência de intrusões de diques e soleiras de diabásio de idades mesozoicas; e outra de idades meso cenozoicas (Caputo *et al.*, 1972; Campos & Teixeira, 1988; Cunha *et al.*, 1994; Cunha, 2000; Cunha *et al.*, 2007).

A Megassequência Paleozoica é ainda subdividida em quatro sequências de segunda ordem,

denominadas: Sequência Ordovício-Devoniana, Sequência Devono-Tournaisiana, Sequência Neoviseana e Sequência Pensilvaniano-Permiana. Em todas essas divisões são registradas variações deposicionais associadas a discordâncias regionais, decorrentes dos eventos tectônicos ocorridos nos limites da Placa Gondwânica no Paleozoico (Cunha *et al.*, 2007).

A Sequência Ordovício-Devoniana representa o estágio inicial de deposição da bacia intracratônica do Amazonas. Possui espectro sedimentar de origem glacial a marinha, com influência de ciclos transgressivos-regressivos. A Sequência Devono-Tournaisiana corresponde ao estabelecimento de um novo ciclo transgressivo-regressivo, associado a sedimentação glacial, iniciado após a discordância basal. A Sequência Neoviseana é representada pelos sedimentos da Formação Faro, constituída por arenitos e pelitos flúvio-deltaicos a litorâneos. A Sequência Pensilvaniano-Permiana, hospedeira da mineralização de potássio, representa o estabelecimento de um novo ciclo transgressivo-regressivo na Bacia do Amazonas, a partir do Neocarbonífero, após um hiato deposicional de cerca de 15 Ma desde a deposição da Sequência Neoviseana. Essa sequência é representada pelas formações Monte Alegre, Itaituba, Nova Olinda e Andirá, pertencentes ao Grupo Tapajós. A sedimentação da sequência é iniciada por arenitos eólicos e de wadis, intercalados com siltitos e folhelhos de interdunas e lagos da Formação Monte Alegre (Costa, 1984; Cunha, 2000; Cunha *et al.*, 2007). No avanço do evento transgressivo, foram depositados em seguida os sedimentos de fácies lagunar e marinho rasa/inframaré, compostos por folhelhos, carbonatos e anidritas (CaSO₄) da Formação Itaituba (Lemos, 1990; Cunha *et al.*, 2007). Estratigraficamente acima, estão os sedimentos da Formação Nova Olinda que correspondem a calcários, anidritas e halitas (NaCl) de ambiente de planície de maré (inframaré) e planícies de sabkha, onde ocorre o Depósito Potassífero de Autazes, objetivo principal deste trabalho. No topo da sequência, ocorrem os sedimentos da Formação Andirá, de caráter predominantemente continental, compostos por siltitos e arenitos avermelhados (redbeds) e raras anidritas, correspondentes às fácies fluviais e lacustrinas. Essa associação sedimentar representa a generalização do assoreamento continental na bacia no Permiano (Cunha *et al.*, 2007).

Diques e soleiras de diabásio, ocorrem intrudidos na Megassequência Paleozoica, associados à processos distensivos. As datações Ar-Ar dessas rochas ígneas indicam idades entre 210 Ma e 191 Ma, com idade mais provável de 200 Ma para os eventos magmáticos (Aires, 1983; Thomaz Filho *et al.* 1974; Zalán, 2004; Cunha *et al.*, 2007).

A Megassequência Meso-Cenozoica representa o topo da Bacia do Amazonas, e é constituída pelo Grupo Javari, subdividido nas Formações Alter do Chão e Solimões. Essas formações recobrem a superfície de discordância relacionada à Orogenia Gonduanide (discordância pré-

cretácea), que marca o topo das sequências paleozoicas (Caputo *et al.*, 1972; Cunha *et al.*, 1994; 2007). A Formação Alter do Chão é composta por arenitos grossos, atribuídos a um sistema fluvial de alta energia desenvolvido durante o Cretáceo, além de arenitos e conglomerados de fácies de planície e leques aluviais. Acima, em discordância, ocorrem os sedimentos da Formação Solimões, que correspondem a um prisma argiloso com distribuição limitada a porção ocidental da bacia, até o limite do Arco de Purus (Cunha *et al.*, 2007).

Sequência evaporítica da Bacia do Amazonas

Szatmari *et al.* (1975) propuseram a denominação de Sequência Evaporítica para o conjunto de sedimentos químico-evaporíticos e terrígenos das formações Itaituba, Nova Olinda e parte da Formação Andirá do Grupo Tapajós, na Bacia do Amazonas. Esses autores efetuaram excelente trabalho de estratigrafia cíclica, descrevendo diversos ciclos sedimentares associados a variações maiores ou menores na salinidade paleoambiental, para as Formações Itaituba e Nova Olinda. Definiram, desta forma, um Ciclo Principal que subdivide-se em onze ciclos secundários, correlacionáveis ao longo da bacia e limitados no topo e na base por sedimentos terrígenos (folhelhos e mais raramente siltitos e arenitos). Dentre os ciclos secundários assim definidos, o Ciclo VII é o que representa o alcance máximo de saturação da salinidade paleoambiental, representando o período de mais efetivo isolamento da bacia. No Ciclo VII as salmouras atingiram altas concentrações, que resultaram na deposição de halitas bandadas finamente cristalizadas e sais solúveis na forma de cloretos e sulfatos de potássio e magnésio (Szatmari *et al.*, 1975; Sad *et al.*, 1982, 1997).

No Quadro I observa-se a estratigrafia cíclica conforme trabalho original de Szatmari *et al.* (1975), estabelecida para as Formações Itaituba, Nova Olinda e Andira. Nesses ciclos, as variações de salinidade das salmouras residuais baciais são inferidas pelas fácies evaporíticas. Assim, os carbonatos e sulfatos representam as fases de baixa a média salinidades originais, enquanto os cloretos, os estágios de alta concentração salina paleoambiental (Warren, 2006).

Quadro 1. Associação faciológica do Ciclo Principal da Sequência Evaporítica da Bacia do Amazonas (modificado de Szatmari *et al.*, 1975; Sad *et al.*, 1982, 1997).

| Bacia do Amazonas | | | |
|--------------------------|---|----------------------|---------------------------|
| Salinidade | Litologia | Espessura (m) | Ciclos Secundários |
| Mínima | Halitas grosseiras | 350 | IX |
| Descrescente | Anidritas | | |
| | Arenitos | | |
| | Halitas grosseiras recristalizadas | 200 | VIII |
| | Halitas cristaloblásticas | | |
| Máxima | Halitas finas de alta concentração | 150/200 | VII |
| | Silvinitas (NaCl + KCl) | | |
| Crescente | Halita grosseira | 175 | VI |
| | Anidrita nodular | 255 | V |
| | Anidrita nodular com intercalação arenitos e siltitos | | |
| | Calcário e anidrita | 175 | IV |
| | Calcário e anidrita com intercalação de arenito | 300 | III |
| | Calcário e anidrita + arenito | 90 | II-A |
| | Ausente | - | II |
| | Ausente | - | I-A |
| Mínima | Ausente | - | I |

A mesma classificação cicloestratigráfica foi proposta por Sad *et al.* (1982, 1997), que atribuíram à associação de fácies da Sequência Evaporítica a recorrência cíclica de fases de alta e baixa salinidade, limitadas por folhelhos pretos ou por sais menos solúveis (calcários ou anidritas), que permite a sua subdivisão em onze ciclos. Cada ciclo seria então composto de uma sequência de sedimentos clásticos na base (folhelhos e/ou arenitos) e outra, superior, de sedimentos químicos, iniciada com carbonatos e anidrita, e finalizada com halita no topo (Szatmari *et al.*, 1975; Costa & Wanderley Filho, 2009).

Assim, embora nas últimas décadas a análise cicloestratigráfica dos evaporitos da Bacia do Amazonas tenha imperado ao longo das publicações científicas, destaca-se aqui, a possibilidade de abordagens mais amplas à luz dos conceitos da moderna Estratigrafia de Sequências.

DEPÓSITO POTASSÍFERO DE AUTAZES

Histórico

A presença de evaporitos na Bacia do Amazonas foi descoberta durante a execução do furo de sondagem (1-NO-1-AM) pela Petrobras, entre os anos de 1953 e 1957, em Nova Olinda do Norte, no Amazonas. Posteriormente, em 1974 foi possível identificar a presença de camada de silvinita nessa região com a execução dos poços 1-FZ-1-AM e 1-FZ-2-AM (Costa & Wanderley Filho, 2009; Kulaif & Góes, 2016).

Ao final da década de 1970, foi iniciado um amplo programa de avaliação do potencial potassífero da Bacia do Amazonas, com a criação de um consórcio de pesquisa entre a Petrobras Mineração S.A. (Petromisa) e a CPRM. A fase seguinte correspondeu à campanha de sondagem exploratória na área denominada Fazendinha, pertencente ao município de Nova Olinda do Norte, às margens do rio Madeira, a 130 km de Manaus. Os furos executados nessa região, permitiram a identificação de camadas portadoras de sais de potássio com espessuras e teores suficientes para definição do Depósito de Fazendinha, com reservas medidas, *in situ*, superiores a 520 Mt de minério com 28,8% de KCl. Com a descoberta de Fazendinha, uma segunda área denominada Arari, também na região de Nova Olinda do Norte, foi alvo de campanha exploratória pelo consórcio, entre os anos de 1982 e 1987. Nessa área, localizada aproximadamente a 150 km de Manaus, próxima à confluência dos rios Madeira e Amazonas, os furos executados também intersectaram mineralização potássífera e permitiram a identificação do Depósito de Arari, com reservas da ordem de 659 Mt com 17,7% de KCl (Sad et al. 1982, 1997; Dardenne & Schobbenhaus, 2001; Agapito, 2008).

Entre os anos de 2008 a 2014, a companhia Potássio do Brasil desenvolveu um projeto de pesquisa mineral para sais de potássio na Bacia do Amazonas, que culminou na identificação do Depósito de Autazes.

Estratigrafia da área do depósito

A sondagem empreendida pela Potássio do Brasil interceptou 5 unidades litoestratigráficas na área do Depósito de Autazes, dispostas em sequência, da base para o topo: 1) Formação Nova Olinda (Carbonífero); e 2) Formação Andirá (Permiano), ambas pertencentes ao Grupo Tapajós; 3)

soleiras de diabásio relacionadas ao magmatismo Juro-Triássico Penatecaua; 4) Formação Alter do Chão (Cretáceo), pertencente ao Grupo Javari; e (5) depósitos aluvionares recentes (Holoceno). As unidades paleozoicas apresentam grande continuidade lateral ao longo do depósito e estão dispostas na direção NE-SW, com suave mergulho para sudeste. O contato entre as Formações Nova Olinda e Andirá é brusco e, entre a Formação Andirá e Alter do Chão, é marcado por discordância angular erosiva. Os depósitos aluvionares recentes também estão sobrepostos, de forma discordante, à Formação Alter do Chão.

A coluna estratigráfica do Depósito de Autazes, deduzida pelas sondagens realizadas é mostrada na figura 3.

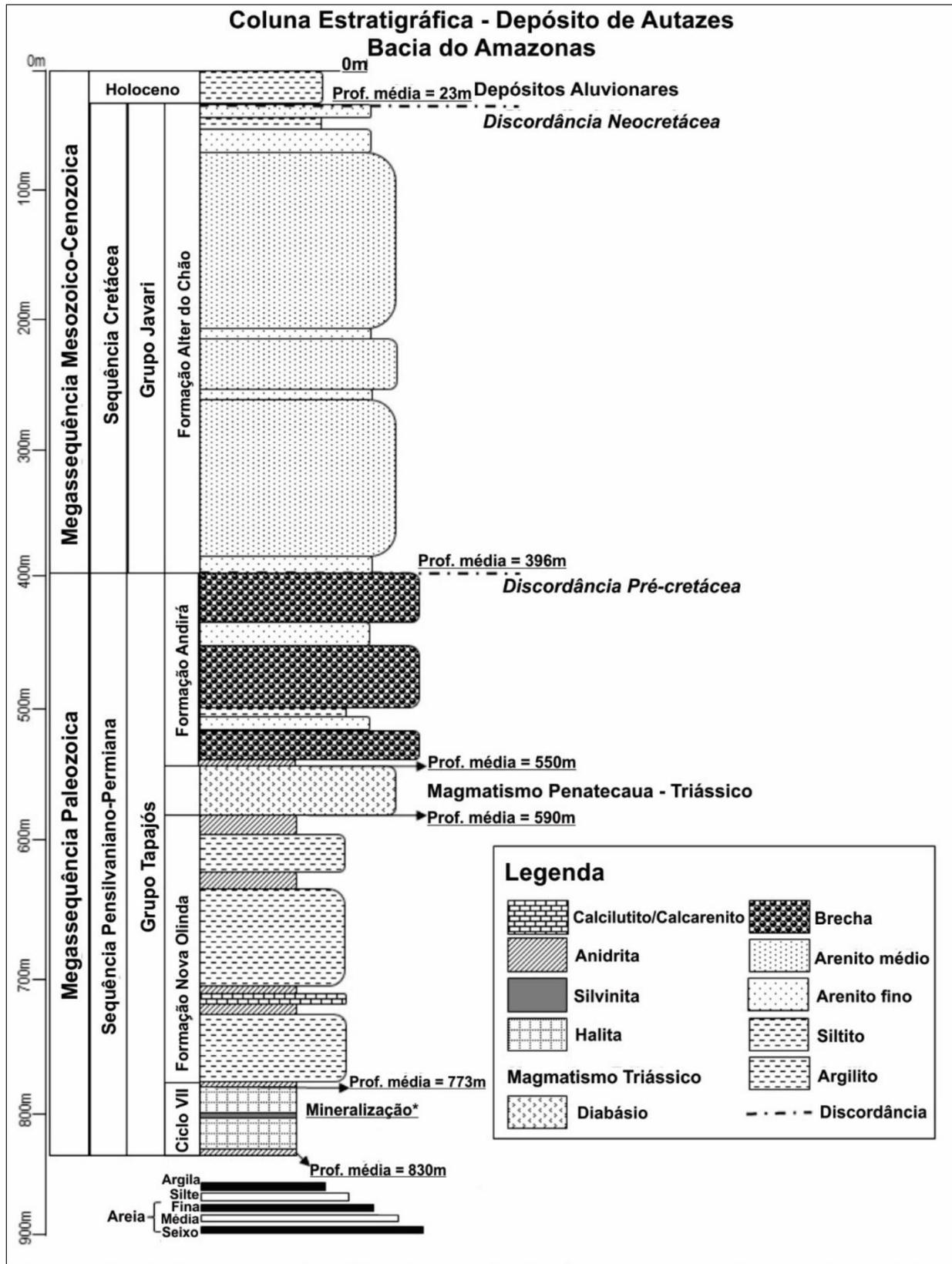


Figura 3. Coluna estratigráfica da Bacia do Amazonas na área do Depósito de Autazes (modificado de Potássio do Brasil, 2014). *A estratigrafia da mineralização é apresentada na Figura 5.

Formação Nova Olinda

A Formação Nova Olinda foi intersectada em todos os furos executados em Autazes, com espessuras mínima, máxima e média identificadas, respectivamente de 208,00 m, 334,45 m e 275,98 m, sendo ligeiramente menos espessa em direção a NW. Essa formação está distribuída homoganeamente por todo o depósito entre as profundidades de 428 m no extremo noroeste e 960 m no extremo sudeste. Os estratos da unidade possuem direção NE-SW e mergulho suave em direção a sudeste. O contato basal com a Formação Itaituba não foi intersectado pelas sondagens realizadas em Autazes, enquanto o contato de topo, com a Formação Andirá, é definido pela última sequência de anidritas da formação, que marca o fim do caráter químico e a efetiva continentalização da bacia. Na área do Depósito de Autazes, a Formação Nova Olinda foi individualizada em: 1) Sequência Basal, ou evaporítica, correspondente ao topo do Ciclo Transgressivo-Regressivo VII, constituído por halitas, anidritas e pela mineralização potássifera na forma de cloretos e sulfatos de potássio e magnésio; e 2) Sequência Superior, predominantemente clástica, constituída por siltitos carbonáticos maciços de coloração marrom a cinza, com variações gradacionais de calcarenitos e arenitos muito finos, e cristais subédricos milimétricos a centimétricos de anidrita, dispostos de maneira dispersa, em aglomerados ou níveis centimétricos. Também são comuns intercalações de anidritas nodulares e laminadas e brechas sedimentares, com arcabouço constituído por grânulos e seixos de anidrita, siltito e arenito. O contato da sequência superior, com a basal é definido por anidritas laminadas ou nodulares sobrepostas a um horizonte de halita de granulação grossa com alto conteúdo de terrígenos (Potássio do Brasil, 2014).

Formação Andirá

A Formação Andirá foi identificada em todos os furos executados pela Potássio do Brasil em Autazes, com espessura média de 152,50 m. A exemplo da Formação Nova Olinda, os sedimentos da Formação Andirá dispõem-se na direção NE-SW, com mergulho suave para sudeste e tornam-se menos espessos em direção a noroeste. O contato de topo da unidade é discordante e erosivo com os sedimentos arenosos da Formação Alter do Chão.

Na Formação Andirá predominam calcilitos de coloração marrom a cinza, com intercalações métricas a decamétricas de calcarenito marrom amarelado. Também são comuns espessos pacotes de brecha sedimentar suportada por matriz carbonática, arenosa ou silto-argilosa de coloração marrom, com arcabouço constituído por clastos de siltito, arenito e anidrita. Na base, ocorrem intercalações centimétricas a métricas de anidrita nodular de coloração cinza claro e, no topo,

predominam arenito lítico de matriz carbonática e fragmentos angulosos de arenito e silito (Potássio do Brasil, 2014).

Magmatismo Penatecaua

Na região do Depósito de Autazes há a ocorrência de uma soleira principal intrudida no topo da Formação Nova Olinda, com espessura média de 42,82 m. Essas rochas ígneas relacionam-se ao magmatismo Penatecaua e são constituídas por diabásio cinza escuro a preto esverdeado, com textura fanerítica fina à média, com cristais prismáticos de plagioclásio, piroxênio e magnetita, além de anfibólio e clorita secundários.

Formação Alter do Chão

A Formação Alter do Chão foi intersectada em todos os furos executados pela Potássio do Brasil na região, constituindo a formação mais expressiva na área de estudo, com espessura média de 373,31 m. Os contatos de base e de topo desta unidade com os sedimentos da Formação Andirá, e com os Depósitos Aluvionares recentes, representam, respectivamente, as discordâncias regionais Pré-Cretácea e Neocretácea da Bacia do Amazonas (Fig. 3). Na área do depósito a formação é constituída principalmente por espesso pacote de quartzo arenitos predominantemente de coloração bege a avermelhada, com ampla maturidade textural e mineralógica, frequentemente intercalados com sedimentos silto-argilosos.

Depósitos Aluvionares Recentes

Depósitos aluvionares recentes afloram em amplas porções da área do Depósito de Autazes, tendo sido identificados em quase todas as sondagens executadas pela Potássio do Brasil na região. Possuem espessura média de 22,95 m, constituídos por sedimentos argilosos e arenosos, parcialmente lateritizados.

ESPESSURAS E TEORES DE POTÁSSIO DA MINERALIZAÇÃO

O depósito potassífero de Autazes compreende um horizonte de minerais evaporíticos inseridos

na Formação Nova Olinda. Através do programa de sondagens da Potássio do Brasil, foi possível delimitar o corpo mineralizado, bem como avaliar a distribuição das espessuras e teores (Tab.1).

Tabela 1. Espessuras e teores de KCl dos intervalos mineralizados intersectados no Depósito de Autazes (modificado de Potássio do Brasil, 2014).

| Furo | Profundidade (m) | Espessura (m) | KCl% | Furo | Profundidade (m) | Espessura (m) | KCl% |
|-------------|-------------------------|----------------------|-------------|-------------|-------------------------|----------------------|-------------|
| 02 | 841,78 | 1,46 | 39,16 | 19 | 738,72 | 1,90 | 25,41 |
| 03 | 863,32 | 1,37 | 25,76 | 20 | 685,45 | 2,14 | 31,87 |
| 05 | 849,23 | 0,69 | 4,40 | 21 | 695,00 | 2,03 | 15,26 |
| 09 | 843,08 | 1,82 | 38,32 | 23 | 843,44 | 2,51 | 43,39 |
| 10 | 808,65 | 1,05 | 8,58 | 26 | 753,04 | 4,03 | 32,53 |
| 12 | 823,59 | 2,07 | 38,62 | 28 | 847,89 | 2,08 | 33,85 |
| 15 | 771,21 | 1,86 | 32,76 | 33 | 732,92 | 2,72 | 33,04 |
| 16 | 723,44 | 2,03 | 28,45 | 34 | 790,24 | 1,31 | 9,70 |
| 17 | 719,64 | 2,81 | 35,56 | 35 | 768,27 | 3,40 | 34,46 |

As interseções definidas indicam que a mineralização em Autazes possui uma espessura mínima de 0,69 m e máxima de 4,03 m, respectivamente, nos furos 05, no sul do depósito e 26, na porção noroeste, sendo a média geral de 2,07 m. O teor de KCl, por sua vez, oscila entre 4,40% no furo 05, até 43,39% no furo 23 na porção leste, sendo a média geral de 30,86% (Fig.4).

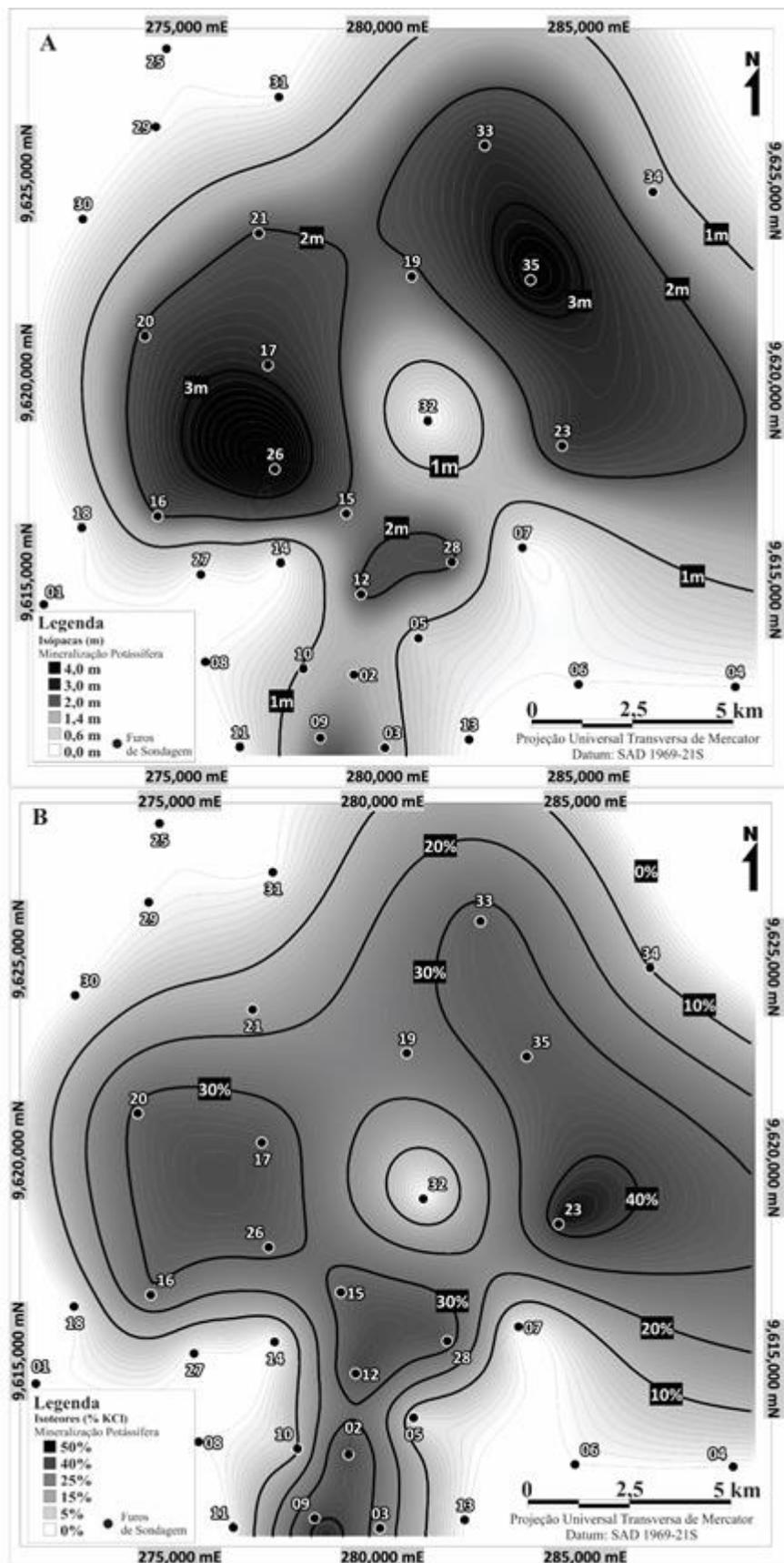


Figura 4. Mapas com a distribuição da mineralização potássifera no Depósito de Autazes. Os furos de sondagem são mostrados para referência. A) Isópacas da mineralização; B) Isohalos de KCl da mineralização (modificado de Potássio do Brasil, 2014).

A mineralização em Autazes distribui-se por uma área de 155 km², em dois domínios distintos: um a norte e outro a sul. O domínio norte tem formato ovalado, com eixo ligeiramente maior na direção nordeste-sudoeste, parcialmente subdividido em duas sub feições positivas menores por uma zona não mineralizada de orientação noroeste-sudeste, que se estende do furo 32 ao furo 07. Os limites do Depósito na porção sul são bem estabelecidos, com furos laterais de teores marginais (furos 05 e 10) e estéreis, assim como os limites a noroeste, nos furos 29, 30 e 31. Os limites norte, nordeste e leste do depósito ainda representam fronteiras de expansão da mineralização, com furos de teores e espessuras significativas (Fig. 4).

Quanto à distribuição espacial do corpo mineralizado, os resultados obtidos apontam para uma equivalência entre espessura e teor, com as maiores espessuras e os mais elevados teores coincidindo na porção norte do depósito. Tal correspondência não ocorre na porção estreita do corpo mineralizado a sul, o qual, apesar dos elevados teores, apresenta espessuras menos expressivas (Fig. 4).

Mineralogia e geoquímica da mineralização

As fases minerais presentes no Depósito de Autazes foram determinadas a partir dos resultados das análises químicas e da difratometria de raios-X (DRX). A partir dos resultados obtidos em cada intervalo mineralizado intersectado, foi possível estabelecer a concentração média total das principais fases minerais para o depósito (Tabela 2). Tais concentrações representam o produto da associação entre a recomposição mineralógica normativa, obtida com os resultados químicos, e a validação das fases minerais presentes, por meio das determinações mineralógicas semiquantitativas por DRX.

Tabela 2. Mineralogia normativa do Depósito de Autazes (Potássio do Brasil, 2014).

| Compostos | Fases Minerais | Composição Média % |
|--------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| KCl | Silvita | 30,86 |
| NaCl | Halita | 56,24 |
| MgSO ₄ | Kieserita | 0,91 |
| K ₂ SO ₄ | Polyalita, Langbeinita, Kainita | 1,45 |
| MgCl ₂ | Carnalita | 0,01 |
| CaSO ₄ | Anidrita | 6,91 |
| Insolúveis | Argilominerais e quartzo | 3,36 |

Estratigrafia da mineralização

Em face dos resultados apresentados, o Depósito de Autazes foi subdividido, estratigraficamente, em três horizontes, com características petrográficas, mineralógicas e químicas distintas, denominados, da base para o topo, como: 1) Intervalo Mineralizado Inferior, rico em silvinita branca; 2) Intervalo Mineralizado Intermediário, rico em sulfatos; 3) Intervalo Mineralizado Superior, rico em Silvinita Vermelha (Potássio do Brasil, 2014) (Fig. 5). As diferenças de cada intervalo mineralizado são apresentadas a seguir.

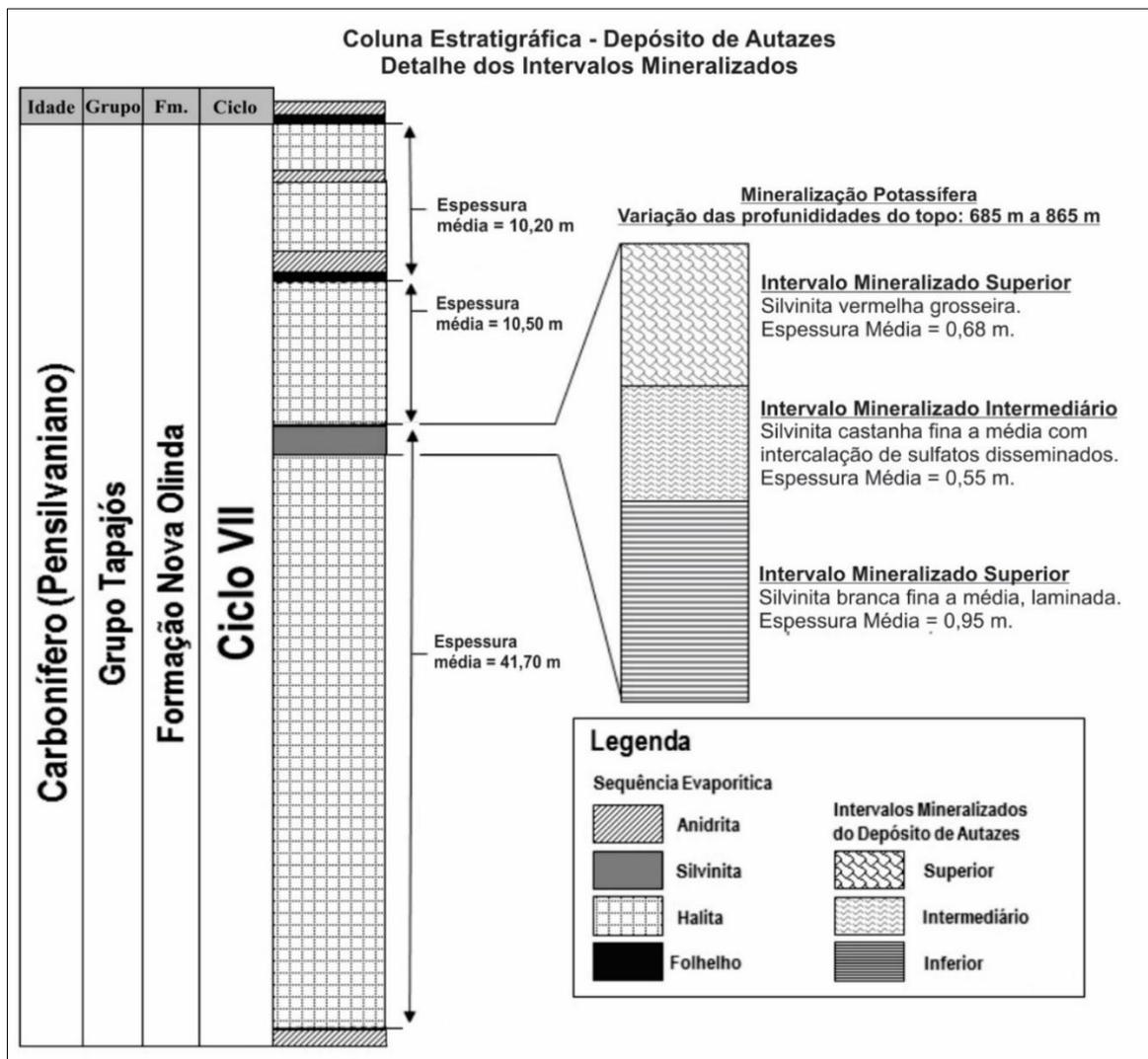


Figura 5. Coluna estratigráfica de detalhe dos intervalos mineralizados do Depósito de Autazes, conforme descrição das sondagens (modificado de Potássio do Brasil, 2014).

Intervalo Mineralizado Inferior

O Intervalo Mineralizado Inferior do Depósito de Autazes é constituído predominantemente por silvinitas brancas leitosas, de granulação fina a média, laminadas, em contato gradacional com o Intervalo Mineralizado Intermediário no topo e, na base, com um espesso pacote de halitas finas laminadas. Também na base ocorrem interlaminções de halita transparente, gradativamente mais espessas, alternadas com lâminas de silvita e, no topo do intervalo, ocorrem silvinitas de coloração rosa, laminadas, contendo sulfatos de magnésio e potássio como kieserita e kainita, respectivamente.

Em relação à concentração das fases minerais presentes, o intervalo inferior é caracterizado pelo predomínio de cloretos (halitas e silvitas), seguidos por anidritas e sulfatos de magnésio e potássio (kieserita e kainita), além de argilominerais insolúveis e traços de cloreto de magnésio (carnalita) (Tab. 3).

Tabela 3. Concentração normativa das fases minerais presentes no Intervalo Mineralizado Inferior do Depósito de Autazes (modificado de Potássio do Brasil, 2014).

| Furo | NaCl% | KCl% | CaSO₄% | MgSO₄% | K₂SO₄% | MgCl₂% | Insolúveis% | Total% |
|-------------|--------------|-------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------|---------------|
| 2 | 45,76 | 41,08 | 8,37 | 0,41 | 1,81 | 0,00 | 2,18 | 99,60 |
| 3 | 79,59 | 11,87 | 5,66 | 0,03 | 1,06 | 0,00 | 1,87 | 100,07 |
| 5 | 90,36 | 4,40 | 3,90 | 0,03 | 0,93 | 0,00 | 1,41 | 101,04 |
| 9 | 54,14 | 37,62 | 2,44 | 2,31 | 1,54 | 0,00 | 0,80 | 98,85 |
| 10 | 84,01 | 8,58 | 2,28 | 2,14 | 1,50 | 0,00 | 0,37 | 98,88 |
| 12 | 63,70 | 30,34 | 4,99 | 0,25 | 0,45 | 0,00 | 0,29 | 100,03 |
| 15 | 48,23 | 32,76 | 6,34 | 4,36 | 3,92 | 0,00 | 2,23 | 97,84 |
| 16 | 63,10 | 32,26 | 3,54 | 0,19 | 1,02 | 0,00 | 0,17 | 100,29 |
| 17 | 66,76 | 27,08 | 2,86 | 1,35 | 0,83 | 0,00 | 0,21 | 99,09 |
| 19 | 87,23 | 6,46 | 3,59 | 0,73 | 1,39 | 0,00 | 0,28 | 99,69 |
| 20 | 59,41 | 31,68 | 2,97 | 2,43 | 2,02 | 0,00 | 0,63 | 99,14 |
| 21 | 87,18 | 6,35 | 4,86 | 0,08 | 0,92 | 0,00 | 0,90 | 100,30 |
| 23 | 42,34 | 51,13 | 3,43 | 1,07 | 1,68 | 0,00 | 0,33 | 99,97 |
| 26 | 63,28 | 29,37 | 2,78 | 2,05 | 0,41 | 0,00 | 0,75 | 98,65 |
| 28 | 67,28 | 24,88 | 3,57 | 1,63 | 1,61 | 0,00 | 0,49 | 99,45 |
| 33 | 58,27 | 33,91 | 2,06 | 3,72 | 0,33 | 0,04 | 0,44 | 98,77 |
| 34 | 81,29 | 10,07 | 5,73 | 1,31 | 0,05 | 0,05 | 0,40 | 98,89 |
| 35 | 57,13 | 33,47 | 6,82 | 0,14 | 1,78 | 0,00 | 0,95 | 100,30 |

O Intervalo Mineralizado Inferior foi identificado em todos os 18 furos mineralizados

considerados para o Depósito de Autazes, com espessuras que variam de 0,62 m no furo 19 a 1,43 m no furo 35. Os teores de KCl, por sua vez, variam de 4,40% no furo 03 a 51,13% no furo 23.

No setor nordeste do depósito o Intervalo Mineralizado Inferior apresenta o maior teor médio de KCl (32,15%), que varia de 10,07% no furo 34, até 51,13% no furo 23. A espessura média do intervalo nesse setor é de 0,91 m, variando de 0,69 m no furo 23, até 1,43 m no furo 35. A mineralização no setor é composta por variações de silvinita branca leitosa, translúcida a opaca, com textura nodular, sacaroidal a laminada fina e silvinita alaranjada intensa à rósea, opaca a translúcida, com textura sacaroidal a laminada fina a média. Em menor quantidade há sulfatos disseminados, que tendem a aumentar em concentração em direção ao extremo nordeste do depósito (Fig. 6).

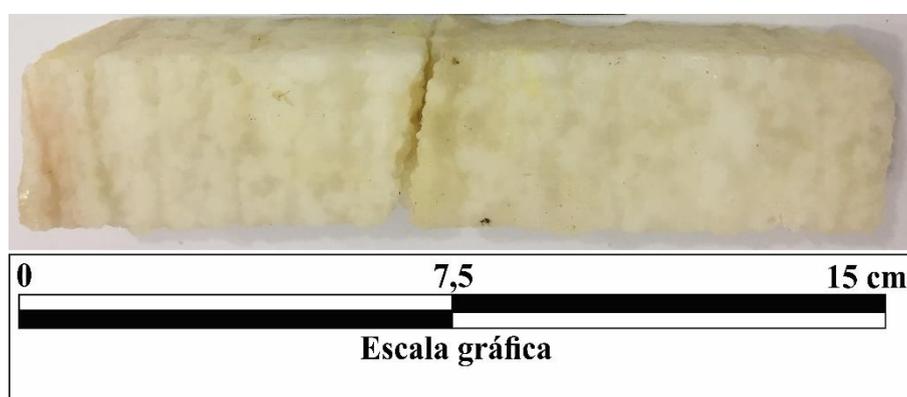


Figura 6. Amostra do Intervalo Mineralizado Inferior na porção nordeste do Depósito de Autazes: Silvinita branca leitosa, opaca, nodular. Furo 35, profundidades: 770,16 m a 770,31 m (modificado de Potássio do Brasil, 2014).

No setor noroeste do depósito, o Intervalo Mineralizado Inferior apresenta um teor médio de KCl de 23,71%, com mínimo de 6,35% no furo 21 a norte e máximo de 32,76% no furo 15, na porção centro-sul. A espessura média do intervalo é de 1,05 m, com variações de 0,58 m no furo 15, até 1,37 m no furo 26. A mineralização no setor é composta por silvinita branca leitosa com porções ou bandas de coloração alaranjada a rósea, além de lâminas de coloração cinza clara, translúcidas a opacas. A textura dos litotipos é extremamente fina e laminada.

No setor sul do depósito o Intervalo Mineralizado Inferior apresenta um teor médio de KCl de 26,58%, com mínimo de 4,40% no furo 03, no extremo sul, até um máximo de 41,08% no furo 02, na porção centro-norte do setor. A espessura média do intervalo no setor é de 1,13 m, com extremos de 0,66 m no furo 02 e de 1,28 m furo 12. A mineralização é composta por silvinita branca a cinza

clara, com níveis castanhos a avermelhados ou róseos, translúcida a opaca, com intercalações de lâminas de sulfatos esbranquiçados e halita com textura variando de laminada fina a sacaroidal (Potássio do Brasil, 2014).

Intervalo Mineralizado Intermediário

O Intervalo Mineralizado Intermediário é constituído predominantemente por silvinitas que variam de coloração alaranjada a vermelha, até tons castanhos acinzentados. A granulação é média a grossa, com cristais bem desenvolvidos e texturas que variam de maciças a laminadas, com lâminas e redes de sulfatos cinza claros disseminados. Na base ocorrem silvinitas de coloração alaranjada a avermelhada, opacas a translúcidas, com intercalações de lâminas de sulfatos esbranquiçados, em contato gradacional com os litotipos do intervalo inferior. No topo o contato também é gradacional e ocorre entre silvinitas de coloração vermelha a levemente esbranquiçada, com tons castanhos, com as silvinitas vermelhas do intervalo mineralizado superior.

A concentração das fases minerais presentes no intervalo intermediário é caracterizada pelo predomínio de cloretos (halitas e silvinitas). As anidritas também são abundantes, com ocorrências de sulfatos de potássio e magnésio (kainita e kieserita), argilominerais insolúveis e traços de cloreto de magnésio (carnalita) (Tab. 4).

Tabela 4. Concentração normativa das fases minerais presentes no Intervalo Mineralizado Intermediário do Depósito de Autazes (modificado de Potássio do Brasil, 2014).

| Furo | NaCl% | KCl% | CaSO₄% | K₂SO₄% | MgSO₄% | MgCl₂% | Insolúveis% | Total% |
|-------------|--------------|-------------|--------------------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------|---------------|
| 2 | 44,71 | 49,57 | 3,43 | 0,32 | 0,05 | 0,00 | 1,40 | 99,48 |
| 9 | 40,09 | 39,72 | 16,34 | 1,98 | 0,02 | 0,00 | 2,49 | 100,64 |
| 12 | 43,57 | 52,02 | 3,72 | 0,24 | 0,12 | 0,00 | 0,20 | 99,87 |
| 15 | 30,52 | 29,37 | 14,88 | 4,67 | 3,52 | 0,00 | 15,35 | 98,31 |
| 16 | 27,10 | 19,15 | 18,30 | 3,49 | 0,02 | 0,00 | 32,30 | 100,37 |
| 17 | 32,32 | 40,81 | 13,13 | 1,62 | 0,05 | 0,00 | 12,37 | 100,29 |
| 19 | 54,86 | 28,64 | 8,80 | 1,47 | 0,05 | 0,00 | 5,39 | 99,21 |
| 20 | 27,78 | 33,67 | 15,20 | 3,68 | 0,10 | 0,00 | 20,23 | 100,67 |
| 21 | 36,45 | 27,95 | 16,56 | 2,90 | 0,05 | 0,00 | 16,59 | 100,50 |
| 23 | 34,81 | 36,91 | 13,75 | 3,55 | 0,22 | 0,00 | 11,35 | 100,59 |
| 26 | 38,86 | 35,42 | 10,70 | 2,24 | 0,70 | 0,00 | 11,80 | 99,72 |
| 28 | 42,17 | 51,07 | 4,90 | 1,08 | 0,08 | 0,00 | 0,58 | 99,89 |
| 33 | 43,45 | 32,14 | 7,22 | 1,54 | 6,38 | 0,12 | 6,49 | 97,34 |
| 35 | 34,08 | 44,43 | 12,77 | 3,84 | 0,48 | 0,00 | 5,00 | 100,60 |

O Intervalo Mineralizado Intermediário foi intersectado em 14 dos 18 furos mineralizados considerados para o Depósito de Autazes com espessuras que variam de 0,30 m no furo 12 a 1,40 m no furo 26. Os teores de KCl oscilam entre 19,15% no furo 16 a 52,02% no furo 02.

No setor nordeste do depósito, o Intervalo Mineralizado Intermediário apresenta um teor médio de KCl de 37,83%, com um mínimo de 32,14% no furo 33 e máximo de 44,43% no furo 35. A espessura média do intervalo no setor é de 0,73 m, com extremos de 0,55 m no furo 35, até 0,98 m no furo 33. A mineralização é composta por silvinita avermelhada a alaranjada com finas lâminas esbranquiçadas de halita, translúcida a opaca, textura laminada e granulometria fina a média. Também são frequentes disseminações de material sulfatado de coloração acinzentada e/ou azulada, preenchendo os espaços intersticiais, com textura em rede ou esqueletal (Szatmari *et al.*, 2008; Warren, 2006).

No setor noroeste o Intervalo Mineralizado Intermediário apresenta um teor médio de KCl de 30,72% e extremos entre 19,15% a 40,81% nos furos 16 e 17, respectivamente. A espessura média do intervalo no setor é de 0,60 m, com um mínimo de 0,32 m no furo 21 e máximo de 1,40 m no furo 26. A mineralização é composta por silvinita de coloração cinza azulada a castanha, a avermelhada ou alaranjada, translúcida a opaca, com granulação média a grossa. A textura dos litotipos varia entre laminada a maciça, com redes e/ou lâminas enterolíticas de sulfatos, além de bandas e cristais grosseiros de halitas disseminados.

No setor sul do depósito, o Intervalo Mineralizado Intermediário apresenta o teor médio mais rico em cloreto de potássio, com 48,09%, distribuído de forma regular por todas as regiões, desde um mínimo de 39,72% no furo 09, no extremo sul, até um máximo de 51,07% no furo 28, na porção norte. A espessura também acompanha essa regularidade, porém confere ao setor a menor média para o intervalo intermediário, com 0,33 m e extremos entre 0,30 m no furo 12 e 0,40 m no furo 02. A mineralização no setor é composta por silvinita alaranjada a castanha esbranquiçada, opaca a translúcida, granulação fina a média, textura laminada com intercalações de lâminas e/ou redes de sulfatos de coloração acinzentada e bandas e cristais grosseiros de halitas disseminados (Fig. 7) (Potássio do Brasil, 2014).

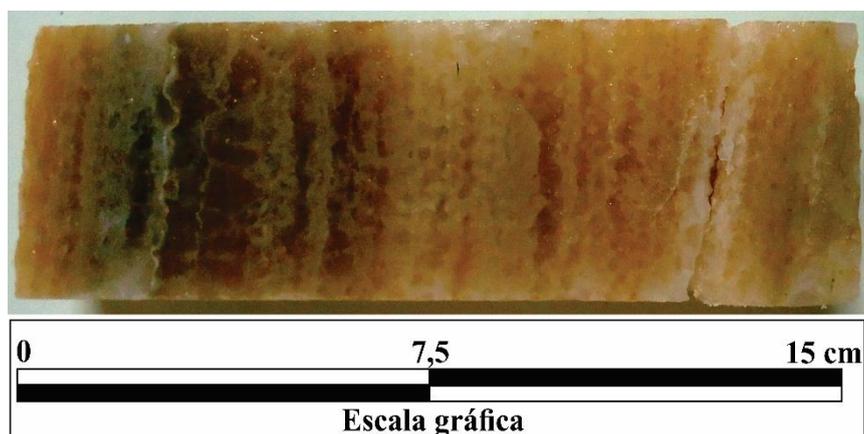


Figura 7. Amostra do Intervalo Mineralizado Intermediário na porção sul do Depósito de Autazes. Silvinita alaranjada, opaca, granulação média, textura laminada, com alternância de lâminas sulfatadas brancas a castanha acinzentadas. Furo 12, profundidades: 824,23 m a 824,38 m (modificado de Potássio do Brasil, 2014).

Intervalo Mineralizado Superior

O Intervalo Mineralizado Superior do Depósito de Autazes é constituído predominantemente por silvinitas de coloração vermelha, com bandas esbranquiçadas, translúcidas a opacas e de granulação grosseira. Também são frequentes as ocorrências de redes ou lâminas enterolíticas (Szatmari *et al.*, 2008; Warren, 2006) de sulfatos acinzentados preenchendo os espaços intersticiais. Similar aos demais intervalos inferiores, as fases minerais presentes no intervalo superior caracterizam-se pelo predomínio de cloretos (halitas e silvinitas), seguidos por anidritas e sulfatos de potássio e magnésio (kainita e kieserita) disseminados, além de argilominerais insolúveis e traços de cloreto de magnésio (carnalita) (Tab. 5).

Tabela 5. Concentração normativa das fases minerais presentes no Intervalo Mineralizado Superior do Depósito de Autazes (modificado de Potássio do Brasil, 2014).

| Furo | NaCl% | KCl% | CaSO₄% | K₂SO₄% | MgSO₄% | MgCl₂% | Insolúveis% | Total% |
|-------------|--------------|-------------|--------------------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------|---------------|
| 2 | 33,10 | 25,59 | 31,70 | 0,33 | 0,10 | 0,00 | 9,05 | 99,86 |
| 3 | 47,30 | 41,61 | 7,43 | 1,32 | 0,03 | 0,00 | 2,21 | 99,91 |
| 9 | 32,94 | 38,79 | 20,81 | 2,54 | 0,02 | 0,00 | 5,27 | 100,37 |
| 12 | 37,77 | 52,06 | 8,18 | 0,59 | 0,04 | 0,00 | 1,45 | 100,10 |
| 15 | 57,64 | 34,54 | 6,05 | 1,52 | 0,04 | 0,00 | 0,53 | 100,32 |
| 16 | 53,97 | 23,10 | 14,13 | 3,16 | 0,03 | 0,00 | 6,39 | 100,78 |
| 17 | 50,12 | 45,13 | 3,79 | 0,51 | 0,05 | 0,00 | 0,33 | 99,93 |
| 19 | 49,44 | 37,49 | 8,98 | 1,47 | 0,06 | 0,00 | 2,23 | 99,67 |
| 20 | 62,87 | 30,60 | 4,14 | 0,93 | 0,07 | 0,00 | 1,55 | 100,16 |
| 21 | 75,77 | 20,31 | 3,26 | 0,53 | 0,05 | 0,00 | 0,27 | 100,19 |
| 23 | 51,65 | 42,48 | 4,42 | 0,98 | 0,03 | 0,00 | 0,69 | 100,26 |
| 26 | 54,09 | 35,03 | 8,03 | 0,93 | 0,03 | 0,00 | 2,71 | 100,82 |
| 28 | 33,61 | 44,06 | 10,35 | 2,23 | 0,02 | 0,00 | 10,37 | 100,64 |
| 33 | 55,75 | 33,28 | 5,86 | 0,06 | 0,01 | 0,04 | 4,90 | 99,89 |
| 34 | 77,44 | 9,13 | 8,00 | 0,48 | 0,13 | 0,01 | 4,92 | 100,12 |
| 35 | 51,77 | 30,62 | 11,77 | 2,63 | 0,05 | 0,00 | 3,48 | 100,32 |

O Intervalo Mineralizado Superior foi intersectado em 16 dos 18 furos mineralizados considerados para o Depósito de Autazes, com espessuras que variam de 0,23 m no furo 16 a 1,16 m no furo 23. Os teores de KCl variam de 9,13% no furo 34 a 52,06 % no furo 12.

No setor nordeste do depósito o Intervalo Mineralizado Superior apresenta um teor médio de KCl de 28,88%, com um mínimo de 9,13% no furo 34 e máximo de 42,48% no furo 23. A espessura média é de 0,91 m, com extremos de 0,52 m no furo 34 e 1,16 metros no furo 23. A mineralização é composta por silvinitas de coloração vermelha a esbranquiçada, translúcidas a opacas, com cristais de granulação fina a grossa, envolvidos por películas de óxidos de ferro, além de redes e lâminas enterolíticas de sulfatos cinza claros preenchendo os espaços intersticiais, e intercalações de halitas brancas, translúcidas.

No setor noroeste do depósito o intervalo superior apresenta um teor médio de KCl de 32,31% e variações de 20,31% no furo 21, até 45,13% furo 17. A espessura média é de 0,67 m, com um mínimo de 0,23 m no furo 16 e máximo de 0,86 m no furo 19. A mineralização é composta por silvinitas vermelhas com bandas esbranquiçadas, translúcidas a opacas, com granulação grosseira. São também frequentes ocorrências de bandas acinzentadas grosseiras e faixas esbranquiçadas de halita, além de redes e lâminas enterolíticas de sulfatos acinzentados disseminados.

No setor sul do Depósito de Autazes o Intervalo Mineralizado Superior apresenta o teor médio mais rico de cloreto de potássio (40,42%), que varia de um mínimo de 25,59% no furo 02 até um máximo de 52,06% no furo 12, na porção centro norte. A distribuição das espessuras também acompanha essa irregularidade e confere ao setor a menor média geral entre todas as do intervalo superior, com 0,51 m e extremos que variam entre 0,40 m no furo 02 e 0,64 m no furo 03. A mineralização é composta por silvinitas vermelhas a alaranjadas, translúcidas a opacas, com granulometria fina a média e textura laminada com intercalações de lâminas sulfatadas enterolíticas de coloração cinza, regularmente espaçadas, além de bandas de cristais de halita grosseiros disseminados (Fig. 8) (Potássio do Brasil, 2014).

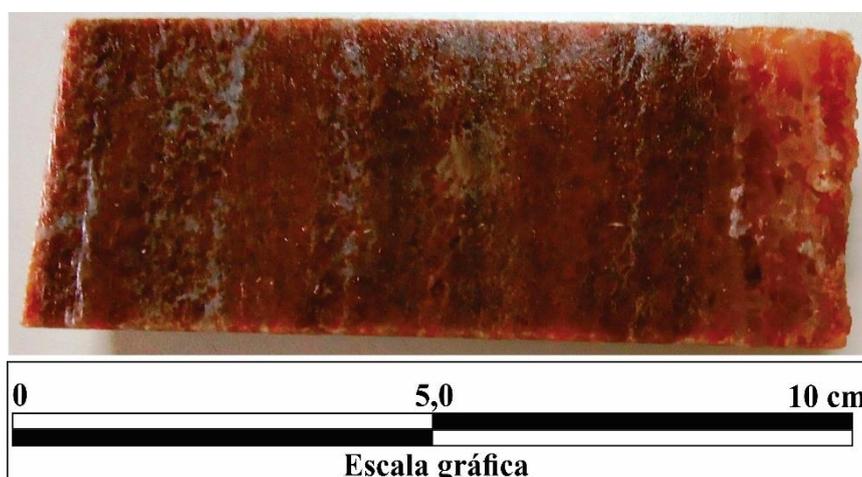


Figura 8. Amostra do Intervalo Mineralizado Superior na porção sul do Depósito de Autazes. Silvinita vermelha intensa, opaca, granulometria média, textura laminada, com lâminas sulfatadas de tons cinza a brancos. Furo 12, profundidades: 823,59 m a 823,72 m (modificado de Potássio do Brasil, 2014).

CONCLUSÕES

O Depósito Potassífero de Autazes compreende um horizonte subhorizontal de minerais evaporíticos inseridos na porção superior da Formação Nova Olinda, da Sequência Pensilvaniana-Permiana da Bacia do Amazonas. A partir do programa de sondagens da Potássio do Brasil, foi possível definir a estratigrafia, delimitar o corpo mineralizado, avaliar a distribuição das espessuras e teores do depósito mineral. A amostragem permitiu significativo estudo químico, mineralógico e petrográfico. Estes dados inéditos, aqui apresentados, possibilitaram a divisão da mineralização em três horizontes ou intervalos, denominados, da base para o topo: 1) Intervalo Mineralizado Inferior,

com predomínio de silvinitas brancas, finas e laminadas; 2) Intervalo Mineralizado Intermediário, que apresenta principalmente silvinita castanha e sulfatos disseminados; 3) Intervalo Mineralizado Superior, constituído por silvinitas avermelhadas, com granulação grosseira. As texturas das fácies evaporíticas apontam para um caráter deposicional primário da mineralização, em especial das silvinitas brancas laminadas finas do intervalo inferior.

As caracterizações faciológicas da mineralização potássifera do Depósito de Autazes, aqui empreendidas, abrem perspectivas para abordagens mais amplas e atualizadas para a evolução deposicional das sucessões evaporíticas da Bacia do Amazonas. Tais análises encontram paralelo nos trabalhos propostos para análises estratigráficas de sequências de sucessões carbonáticas e evaporíticas desenvolvidos, principalmente, por Kendall (1988, 1992, 2010); Tucker (1991); Warren (2006, 2016) e Catuneanu *et al* (2011).

A pesquisa mineral desenvolvida pela Potássio do Brasil e sintetizada aqui, identificou ainda uma reserva geológica total superior a 767 Mt e teor médio de 30,71% de KCl, com 2,07 m de espessura média, entre as profundidades de 685 m e 865 m. Esta descoberta abre perspectiva para aproveitamento econômico do bem mineral, em futuro próximo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Potássio do Brasil Ltda. pela liberação dos dados inéditos do Projeto Potássio Amazonas na região de Autazes-AM, que permitiram a realização deste estudo, e ao Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (IGC-UFMG), por meio do apoio do Programa de Pós-Graduação em Geologia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F. F. M. & HASUI, Y. **O Pré-Cambriano do Brasil**. São Paulo: Blücher, 378p., 1984.

AIRES, J.R. **Estudo do vulcanismo básico da Bacia Amazônica**. Rio de Janeiro: Petrobras-Cenpes, 61p. (Rel. 478), 1983.

AGAPITO ASSOCIATES, INC. **Technical Report Concerning Mineral and Resource Estimates, Fazendinha and Arará Deposits, Amazonas, Brazil**. Grand Junction: Agapito, 57p., 2008.

BIZZI, L.A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTI, R.M.; GONÇALVES, J.H. (Eds.), **Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil**. Brasília: CPRM, Serviço Geológico do Brasil, 643 p., 2004.

CAMPOS, J. N. P. & TEIXEIRA, L. B. Estilos tectônicos da Bacia do Amazonas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35, 1988, Belém. **Anais**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1988. v. 5, p. 2161-2172.

CAPUTO, M. V.; RODRIGUES, R.; VASCONCELOS, D. N. N. Nomenclatura estratigráfica da Bacia do Amazonas: histórico e atualização. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 26, 1972, Belém. **Anais**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1972. v. 3, p. 35-46.

CATUNEANU, O.; GALLOWAY, W.E.; KENDALL, C. G. St. C.; MIAL, A. D.; POSAMENTIER, H.W.; STRASSER, A.; TUCKER, M. E. Mixed carbonate-evaporite settings. In: Sequence Stratigraphy: Methodology and nomenclature Stratigraphy. Stuttgart: Newsletters on Stratigraphy, v. 44/3, p. 220-225. 2011.

COSTA, M. G. F. **Fácies deposicionais e ambientes de sedimentação da Formação Monte Alegre (neocarbonífero) na área de Autás Mirim e adjacências, Bacia do Médio Amazonas**. Recife, 1984. 90p. il. Tese (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco.

COSTA, A.R.A. & WANDERLEY FILHO, J.R. Os evaporitos e halocinese na Amazônia. In: MOHRIAK, W.; SZATMARI, P.; ANJOS, S.M.C. (Org.), **Sal: Geologia e Tectônica**. São Paulo: Ed. Beca, p. 210-221, 2009.

CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo**. Escala 1:1.000.000. Sistema de Informações Geográficas. Programa Geologia do Brasil. Brasília: CPRM. CD-ROM, 2004.

CUNHA, P.R.C.; GONZAGA, F.G.; COUTINHO, L.F.C.; FEIJÓ, F.J. Bacia do Amazonas. **B. Geoci. Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 47-55, 1994.

CUNHA, P.R.C. **Análise estratigráfica dos sedimentos Eo/Mesodevonianos da porção ocidental da Bacia do Amazonas sob a ótica da estratigrafia de seqüências no interior cratônico**. Porto Alegre, 2000. 248p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

CUNHA, P.R.C.; MELO, J.H.G.; SILVA, O.B. Bacia do Amazonas. **B. Geoci. Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 227-251, 2007.

DARDENNE, M.A. & SCHOBENHAUS, C. **Metalogênese do Brasil**. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 392p., 2001.

DIAS, V.P. & FERNANDES, E. Fertilizantes: Uma visão global sintética. In: BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, v. 24, p. 97-138, 2006.

KENDALL, A. C. Aspects of evaporite basin stratigraphy, in B. C. Schreiber, eds., *Evaporites and hydrocarbons*: New York, Columbia University Press, p. 11-65, 1988.

KENDALL, A. C. Evaporites, in R. G. Walker, and N. P. James, eds., *Facies Models: Responses to sea level change*, Geological Association of Canada, p. 375-409, 1992.

KENDALL, A. C. Marine evaporites, in James, N. P., and Dalrymple, R. W., eds., *Facies Models 4: St. Johnhs, Newfoundland, and Labrador, Canada*, Geological Association of Canada, p. 505-539, 2010.

KULAIIF, Y. & GÓES, A.M. Potássio no Brasil. In: MELFI, A.J.; MISI, A.; CAMPOS, D.A.; CORDANI, U.G. (Org.), **Recursos Minerais no Brasil: problemas e desafios**. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências. p. 84-95, 2016.

LE MOS, V. B. **Assembléias de conodontes do carbonífero da Bacia do Amazonas**. Porto Alegre, 1990. 259p. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MARINI, O. Potencial Mineral do Brasil. In: MELFI, A.J.; MISI, A.; CAMPOS, D.A.; CORDANI, U.G. (Org.), **Recursos Minerais no Brasil: problemas e desafios**. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências. p. 18-31, 2016.

NEVES, C.A.O. Prospectos potenciais e áreas prioritárias para exploração na bacia do Amazonas. *Bol. Geociências da Petrobras*, 4 (1): 95-103, 1990

NEVES, C.A.O.; CAMPOS, J.N.P.; ARANA, J.; TEIXEIRA, L.B.; RODRIGUES, R.; TRIGÜIS, J.A. **Integração Geológica e Exploratória da Bacia do Amazonas**. Manaus: Petrobras/Depex, Relatório Interno, 113p., 1989.

PLAYFORD, G. & DINO, R. Palynostratigraphy of upper Palaeozoic strata (Tapajós Group), Amazonas Basin, Brazil. **Palaeontographica. Abt. B. Palaeophytologie**, Stuttgart, n. 255, p. 1-46, 2000.

POTÁSSIO DO BRASIL. **Relatório Final Positivo Único de Pesquisa, Sais de Potássio, Municípios de Autazes e Itacoatiara, Amazonas**. Belo Horizonte: Potássio do Brasil, 286p., 2014.

SAD, A.R.; CAMPOLINA, A.; COSTA, A. M.; LIMA, F.R.T.; CARVALHO, R.S. Depósito de Potássio de Fazendinha, Nova Olinda do Norte, Amazonas. In: SCHOBENHAUS C.; QUEIROZ, E.T.; COELHO, C.E.S. (Coords.), **Principais Depósitos Minerais do Brasil**. Brasília: DNPM-CPRM, v. IV-C, p. 257-276, 1997.

SAD, A.R.; LIMA, F.R.T.; WOLF, F.; SOARES, J.A.M.; CARVALHO, R.S. Depósito Potassífero da Fazendinha - Bacia do Médio Amazonas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 32, 1982, Salvador. **Anais**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1982. v. 3, p. 1086-1099.

SANTOS, J.O.S. Geotectônica dos escudos das Guianas e Brasil Central. In: BIZZI, L.A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTI, R.M.; GONÇALVES, J.H. (Eds.), **Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil**. Brasília: CPRM, Serviço Geológico do Brasil. p. 169-226, 2003.

SZATMARI, P; SIMÕES, I.A.; CARVALHO, R.S. **Evaporitos da Bacia do Amazonas**. Rio de Janeiro: Petrobras, Relatório Interno, 128 p., 1975.

SZATMARI, P; TIBANA, P; SIMÕES, I.A.; CARVALHO; R.S.; LEITE, D.C. Atlas Petrográfico dos Evaporitos. In: MOHRIAK, W.; SZATMARI, P.; ANJOS, S.M.C. (Org.), **Sal: Geologia e Tectônica**. São Paulo: Ed. Beca, p. 42-63, 2008.

TASSINARI, C.C.G. & MACAMBIRA, M.J.B. A evolução do Cráton Amazônico. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; BRITO-NEVES, B.B. (Eds.), **Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo: Ed. Beca, p. 471-485, 2004.

THOMAZ FILHO, A.; CORDANI, U.G.; MARINO, O. Idades K-Ar de rochas basálticas da Bacia Amazônica e sua significação tectônica regional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28, 1974, Porto Alegre. **Anais**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, v. 6, p. 273-278, 1974.

TUCKER, M. E. Sequence stratigraphy of carbonateevaporite basins, models and application to the UpperPermian (Zechstein of northeast England and adjoiningNorth Sea. *Journal of the Geological Society*. v. 148,p. 1019-1036, 1991.

UHLEIN, A.; PAIM, P.S.G.; TASSINARI, C.C.G.; PEDREIRA, A.J. Análise Estratigráfica de Bacias Rifte Paleo-Mesoproterozoicas dos Crátos Amazônico e São Francisco, Brasil. **Geonomos**, Belo Horizonte, v.23, n.2, p. 1-13, 2015.

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

WARREN, J. K. *Evaporites: A compendium* (ISBN 9783-31913511-3): Berlin, Springer, 1854 p, 2016

YAMAMOTO, J.K. 2001. Avaliação e classificação de reservas minerais. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 232p., 2001.

ZALÁN, P. V. Evolução fanerozoica das bacias sedimentares brasileiras. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; BRITO-NEVES, B.B. (Eds.), **Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo: Ed. Beca, p. 595-612, 2004.

*Submetido em 11 de novembro de 2017
Aceito em 3 de maio de 2019*

3-PESQUISA BIBLIOGRÁFICA SOBRE SOBRE ESTRATIGRAFIA DE SEQUÊNCIAS EM SUCESSÕES CARBONÁTICAS-EVAPORÍTICAS

3.1 Evaporitos

Conforme a definição de Warren (2006, 2016) evaporito é uma rocha salina que foi originalmente precipitada de uma salmoura saturada superficial ou próxima à superfície, por hidrologias direcionadas pela evaporação solar. Essa definição engloba uma ampla variedade de sais precipitados quimicamente e também inclui os carbonatos alcalino-terrosos. Alguns autores, entretanto, restringem o termo evaporito para aqueles sais formados diretamente por evaporação solar de águas hipersalinas na superfície da Terra. Na definição de Warren (2006, 2016), que enfatiza a natureza altamente reativa dos evaporitos no reino sedimentar, tais sais são considerados evaporitos primários, precipitados a partir de um corpo de salmoura superficial, que mantém as evidências cristalográficas do processo deposicional (Fig. 2).

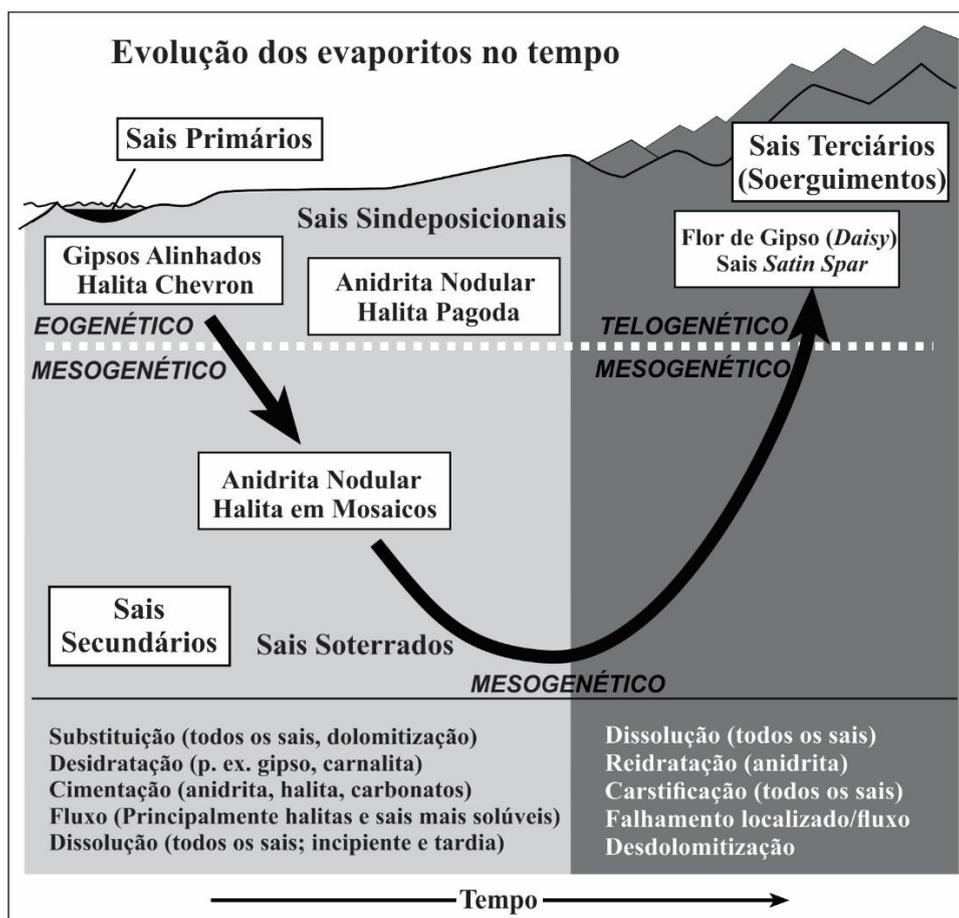


Figura 2. Classificação da formação dos evaporitos nos reinos deposicionais-diagenéticos enfatizando a progressiva evolução pós-deposicional da mineralogia e textura (modificado de Warren, 2006).

Ainda segundo essa definição, os evaporitos secundários seriam formados nas seções subsuperficiais e corresponderiam aos sais diageneticamente alterados, frequentemente com texturas indicativas de recristalizações pervasivas incipientes, ou por vezes associados a fluxos tardios de águas basais. Assim, esses sais estariam relacionados aos reinos de porosidade eogenética e mesogenética similar às definições de porosidade propostas para carbonatos sedimentares por Choquette & Pray (1970). De acordo com Warren (2006, 2016), haveria ainda uma classificação para texturas evaporíticas terciárias que tenderiam a se formar no reino telogenético e, como na diagênese dos carbonatos, a alteração mais pervasiva ocorreria ou no início da história de soterramento dos sais (eodiagênese), ou nos estágios mais tardios, relacionados aos soerguimentos das bacias e erosão (telodiagênese) (Fig. 2).

3.2 Modelos conceituais para a deposição evaporítica

Um dos primeiros modelos conceituais elaborados para a deposição de evaporitos foi proposto pelo químico e geólogo Ochsenius no século XIX, a partir de observações realizadas na região do Lago Kara-Bogaz, na zona ocidental norte do Turquemenistão. Nesse trabalho, o pesquisador observou que havia uma barreira física separando o Mar Cáspio do Lago Kara-Bogaz, e que essa feição controlava o ressecamento do lago, ou a invasão por correntes de turbidez, nos períodos nos quais o Mar Cáspio estivesse mais alto. Assim o modelo de Ochsenius previu pioneiramente algumas das condições necessárias para a deposição de evaporitos, ao formular a “teoria da barreira”, que trata da separação entre o mar aberto com salinidade normal e uma bacia evaporítica (Mohriak & Szatmari, 2008; Moriack *et al.*, 2008).

Dentre os trabalhos seguintes ao modelo de Ochsenius que avaliaram as condições de controle para a deposição evaporítica, merece destaque os estudos conduzidos por Lucia (1972) referentes à interrelação entre a salinidade máxima em uma bacia moderna de evaporitos e o balanço hídrico da bacia (perda de água versus ganho). Nesse trabalho o autor demonstrou que, para uma camada de halita precipitar a partir de uma coluna de salmoura formada por alimentação marinha, qualquer superfície de entrada do oceano deverá ser pelo menos cem milhões de vezes menor em área transversal do que a área superficial da bacia; para camadas de gipso, essa diferença deverá ser pelo menos um milhão de vezes menor. Ou seja, qualquer bacia que acumule espessos leitos de evaporitos efetivamente não possui uma conexão superficial contínua com o oceano ou outro corpo permanente de água salobra (Warren 2006, 2016) (Fig. 3).

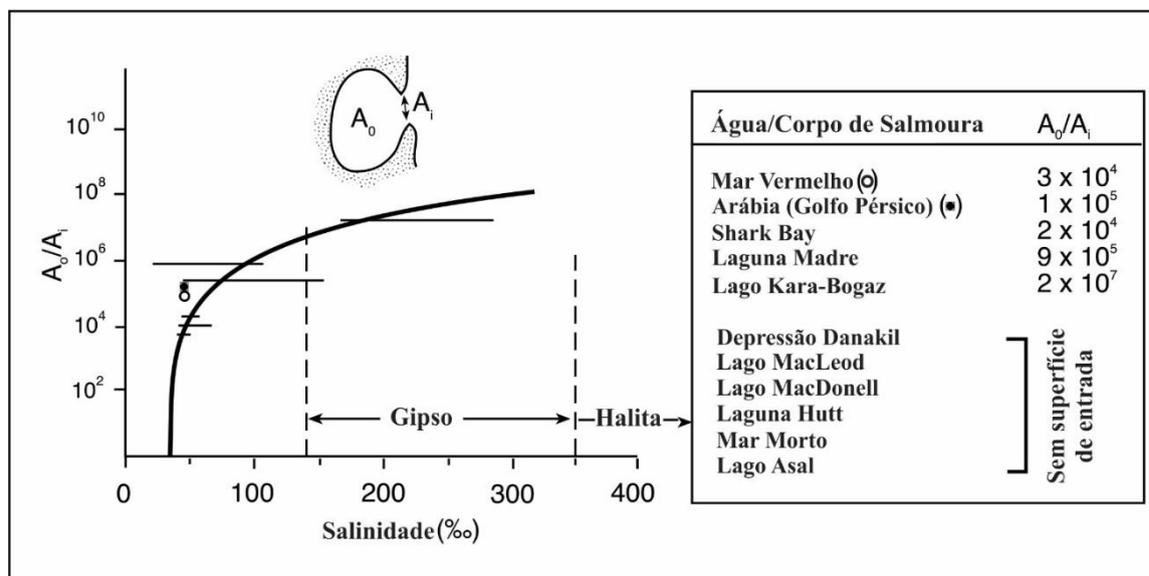


Figura 3. Relação entre as proporções da área de corte transversal de uma superfície de entrada (A_i) e a área superficial da bacia hipersalina associada (A_o) plotada contra a salinidade da bacia, com exemplos de várias depressões evaporíticas modernas. Notar que os exemplos Quaternários que estão acumulando substanciais camadas evaporíticas não têm conexão superficial e são alimentados ou por influxo continental ou por infiltração marinha (modificada de Lucia, 1972; Handford, 1991; Warren, 2006, 2016).

Demais autores (Maiklem, 1971; Kendal, 1989) a partir de estudos associados à deposição evaporítica na Bacia de Elk Point no Canadá, demonstraram também que, uma vez que a bacia tenha sido isolada, as barreiras hidrográficas não teriam transmissividade suficiente para evitar o rebaixamento evaporativo das colunas de salmouras nas bacias. Dessa forma, qualquer grande depósito evaporítico (conhecidos como gigantes salinos) que precipite espessas camadas de sais, estará sujeito ao rebaixamento evaporativo e influxo por infiltração freática de águas marinhas (Warren, 2006, 2016).

Assim, a partir do estabelecimento desses conceitos que controlam a deposição evaporítica nas bacias, um corolário que surge é que, no período de uma espessa precipitação evaporítica, haverá uma inconformidade ou hiato correlativo nas litologias não evaporíticas adjacentes, que compõem o entorno das depressões hidrograficamente isoladas (Warren, 2006, 2016).

3.3 Estilos deposicionais para sedimentação evaporítica

Ao longo do tempo geológico, registram-se vários episódios de sedimentação evaporítica, nos mais diversos contextos tectônicos. Alguns dos modelos deposicionais tectono-sedimentares para evaporitos propostos correspondem a: (1) bacias de águas rasas a profundas, com barreira numa

das entradas – elaborado a partir das observações de campo em ambientes modernos (p.ex. Lago Kara-Bogaz e Mar Mediterrâneo), esse modelo prevê uma barreira restritiva numa das entradas da bacia evaporítica, que impede a livre circulação com o mar aberto; (2) bacias interconectadas com múltiplos estágios de evaporação e com várias barreiras – a precipitação é fracionada ao longo do trajeto da salmoura. Assim, nas bacias proximais, seriam depositados carbonatos, enquanto os sais mais solúveis, numa concentração progressiva, seriam depositados nas bacias mais afastadas da ligação com o oceano aberto; (3) bacias costeiras do tipo sabkhas gradando para plataformas carbonáticas-evaporíticas na região distal (Mohriak & Szatmari, 2008; Moriack *et al.*, 2008).

Entretanto, de forma a distinguir os ambientes das grandes acumulações evaporíticas mundiais, Warren (2006, 2016) interpretou as variações nos três estilos deposicionais para formação dos depósitos evaporíticos antigos: evaporitos lacustrinos continentais; evaporitos marinho plataformais; e evaporitos de amplo preenchimento de bacias (*basinwide*). Assim, segundo o autor, os últimos dois estilos corresponderiam aos ambientes de escala de placa nos quais os grandes depósitos fanerozoicos mundiais teriam acumulado significativos volumes de evaporitos (depósitos de megahalita / megasulfatos), por vezes também podendo ter sido fundidos um no outro. Além disso, dos três estilos deposicionais, o único que permitiria uma interpretação marinha eustática, alinhada às flutuações dos níveis dos mares, seriam as sucessões evaporíticas marinhas plataformais, conforme descrito a seguir.

3.3.1 Evaporitos lacustrinos (não marinhos)

Os depósitos quaternários lacustrinos / *playa* continental são constituídos por unidades salinas estratiformes, com os maiores volumes acumulados nas porções mais inferiores e de mais altas salinidades da paisagem lacustre. Esses depósitos tendem a ser separados verticalmente, e geralmente limitados por depósitos lacustres argilosos, canais efêmeros, leitos de inundação, areias eólicas e redbeds. Similar aos análogos modernos, os depósitos lacustrinos antigos teriam sido acumulados em bacias endorréicas ou bacias de descarga altamente restritas, com as massas perenes de águas salinas tendendo a ocorrer nas linhas de drenagem de bacias de drenagens íngremes (Warren, 2006, 2016, 2017) (Fig. 4).

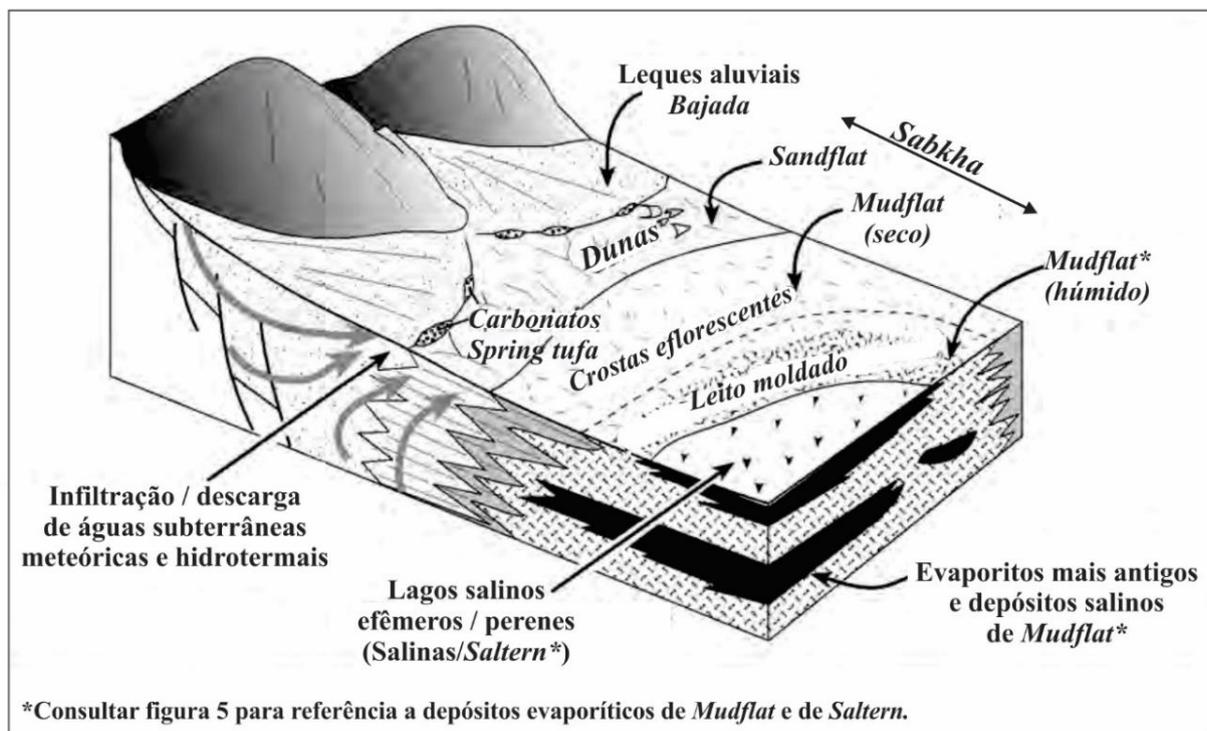


Figura 4. Playa continental/Sabkha mostrando as várias compartimentações de fácies incluindo os evaporitos lacustrinos e processos de fornecimento de solutos que incluem escoamento superficial, águas subterrâneas meteoricas e hidrotermais (modificado de Kendall 1992; Eugster & Hardie, 1978; Warren, 2006, 2016).

Além disso, as mineralogias lacustres salinas dependem e refletem as composições das águas de influxo. Portanto, os depósitos evaporíticos lacustres que ocorrem em regiões com composições iônicas predominantemente não-marinhas no influxo alimentador, acumulam espessas sequências de sais acamados não marinhos, dominados por trona ($\text{NaHCO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3$), glauberita ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4$) e thenardita (Na_2SO_4). Em contraste, áreas lacustrinas não marinhas com influxos talássicos (composições associadas às águas marinhas) tendem a acumular sequências mais típicas de halita, gipsita e anidrita (Warren, 2006, 2016).

3.3.2 Evaporitos plataformais

Correspondem a depósitos constituídos por camadas estratiformes, geralmente com menos de 50 m de espessura e compostas por parassequências ou ciclos evaporíticos de 1 a 5 m de espessura, com presença variável de unidades carbonáticas marinha-restritas na base dos ciclos. Nesses depósitos, as unidades evaporíticas são depositadas tipicamente como uma mistura de depósitos de *Mudflat*, nos quais os sais são acumulados como mosaicos em unidades lateralmente extensas compostas por ciclos dominados por matriz, com espessuras que variam de

1-5m; e/ou de *Saltern*, que correspondem a lagunas de infiltração marinha (abaixo do nível dos mares), lateralmente extensas (> 50-100 km de largura) e isoladas hidrograficamente, nas quais são depositadas extensas camadas de sais subaquosos rasos, com espessuras de 5-50m, ao longo de centenas de quilômetros, em porções hipersalinas marginais. Acumulações locais de sais mais solúveis, como cloretos de potássio e/ou magnésio por vezes também ocorrem nessas sucessões (Warren, 2006, 2016, 2017) (Fig 5).

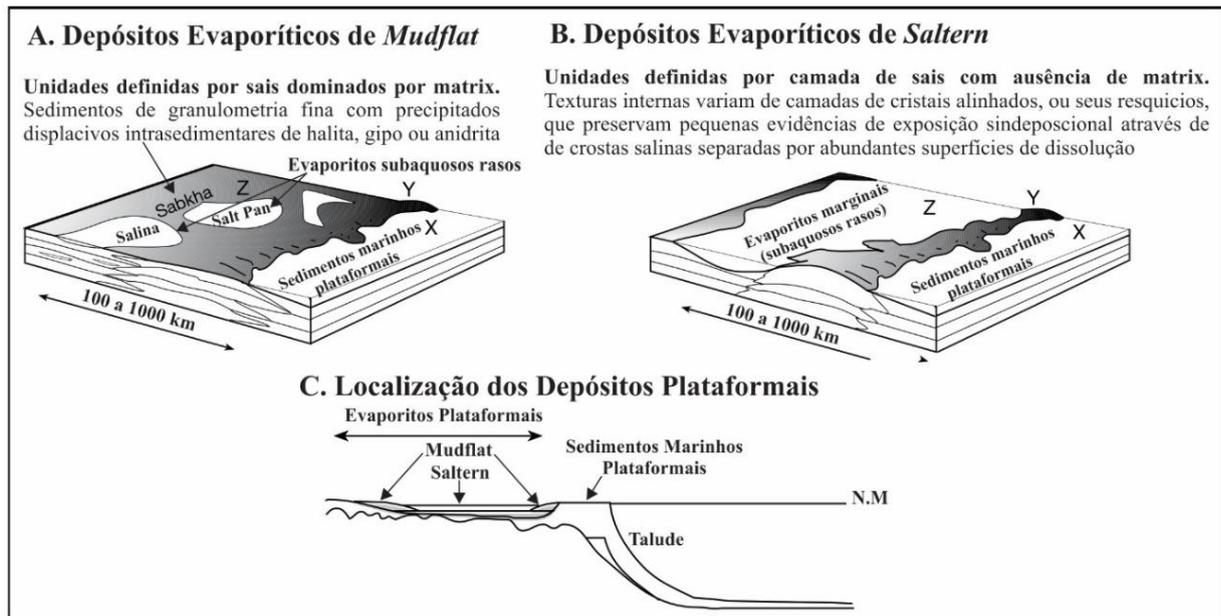


Figura 5. Geometrias deposicionais: A. Depósitos evaporíticos de *Mudflat*; e B. Depósitos Evaporíticos de *Saltern*. Ambos ocorrem em seções de rampa ou plataforma. A notação XYZ refere-se às subdivisões de rampa de Irwin (1965). C. Localização em seção desses depósitos plataformais (Modificado de Warren, 2006).

Internamente, as sucessões evaporíticas plataformais podem ser associadas a: Mares epéiricos (interiores) epicontinentais que cobrem grandes áreas do interior continental com águas marinhas rasas, e que podem evoluir para depósitos evaporíticos em bacias intracontinentais; e Mares epéiricos pericontinentais que formam amplos depósitos periplataformaes em depressões isoladas ao longo das margens continentais. Essas configurações não têm análogos modernos de escalas similares e estendem-se como amplas seções deposicionais que teriam coberto grandes porções de áreas de antigas plataformas marinhas, com águas muito rasas e hidrograficamente isoladas, que passariam para as seções de mar aberto por meio de uma barreira de infiltração subaérea (Warren, 2006, 2016, 2017) (Fig 6).

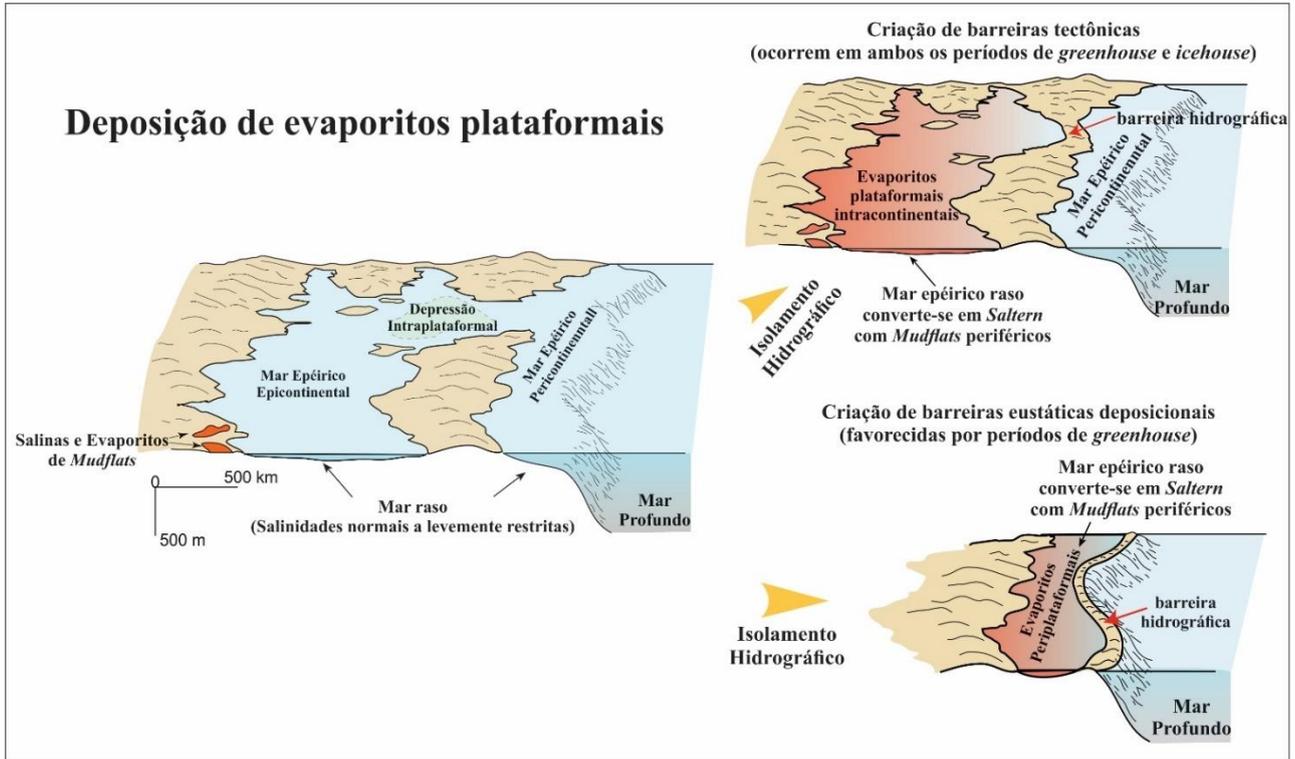


Figura 6. Mares epéiricos (epicontinentais) que teriam coberto grandes áreas do interior continental com águas marinhas rasas, são conhecidos como bacias intracratônicas; enquanto mares epéiricos formados em plataformas marginais muito amplas ao longo das margens continentais são conhecidos como mares pericontinentais. Mares pericontinentais que teriam evoluído para *Salterns* e / ou *Mudflats* evaporíticos são mais típicos dos estilos eustáticos marinho-marginais dos períodos climáticos de *greenhouse*, quando a ausência de calotas polares permanentes, especialmente associadas a taxas mais altas de espalhamento dos assoalhos oceânicos, teriam resultado em bordas continentais livres muito maiores do que as atuais (modificado de Warren, 2017).

Dessa forma, as sucessões evaporíticas plataformais permitem uma interpretação marinha eustática associada aos estágios de variação dos níveis médios dos mares. As diferentes ordens de variações dos níveis dos mares reconhecidas são baseadas nos intervalos de tempo reunidos nos ciclos eustáticos marinhos (Tab. 1).

Tabela 1. Ordens de variações dos níveis dos mares e prováveis mecanismos direcionadores (modificado de Tucker, 1993; Warren 2006, 2016).

| Ordem | Anos | Tectono-eustático | Rifteamento e subsidência termal | Eustasia global | Tensões intraplacas (<i>in plane stress</i>) | Glacio-eustático tectônico, sedimentar | Evaporitos de amplo preenchimento de bacias (<i>basinwide</i>) Tempo para depositar 1-2km de preenchimento | |
|-------|-----------------|--|----------------------------------|-----------------|--|--|---|---|
| 1º | 10 ⁸ | ↕ | | | | | SIGMOIDES SÍSMICOS ↕ PARASSEQUÊNCIAS | |
| 2º | 10 ⁷ | ↕ | ↕ | ↕ | | | | |
| 3º | 10 ⁶ | SIGMOIDES SÍSMICOS | | ↕ | ↕ | | | |
| 4º | 10 ⁵ | | | | ↕ | | | |
| 5º | 10 ⁴ | ← --- Limite típico da resolução sísmica em siliciclásticos e carbonatos --- → | | | | | | ↕ |
| 6º | 10 ³ | PARASSEQUÊNCIAS | | | | | | |

Variações de primeira e segunda ordem no nível dos mares mundiais são uma resposta às mudanças nos volumes das bacias oceânicas causadas por dispersões e colisões continentais. A causa das flutuações de terceira ordem, com durações de 1-10 milhões de anos (tipicamente com cerca de 2,5 milhões de anos), ainda são controversas, uma vez que são muito curtas para serem atribuídas à maioria dos eventos tectônicos de escala mundial que afetam o volume das bacias oceânicas, porém, também muito longas para serem relacionadas às respostas glacio-eustáticas. Outros eventos tectônicos mais locais, tais como mudanças nos estados de tensões intraplacas e tectonismo regional, parecem ter durações compatíveis com essas variações, mas também não parecem ser capazes de gerar alterações suficientes nas profundidades das águas oceânicas para serem contabilizadas nas magnitudes das escalas mundiais dos ciclos de terceira ordem. Ciclos de quarta ordem (500-200 mil anos) e quinta ordem (200-10 mil anos) são amplamente documentados em sedimentos marinhos em vários períodos do Fanerozoico, tanto em estratos marinhos rasos, como pelágicos profundos. Esses ciclos são possivelmente o resultado de mudanças climáticas globais direcionadas por variações nos parâmetros orbitais terrestres, coletivamente referenciados como Ciclos de Milankovitch (Catuneanu 2006; Warren, 2006, 2016) (Tab. 1).

Variações nos níveis dos mares de grandes amplitudes que produzem limites de sequências regionais podem ocorrer em várias escalas de tempo, dependendo da presença ou ausência de calotas polares. Nos períodos de ausência de calotas polares, denominados *Greenhouse Earth*, as variações de grande amplitude, que produzem oscilações dos níveis dos mares de várias dezenas de metros, são uma resposta a ciclos eustáticos de segunda e terceira ordens. Em contrapartida, nos períodos nos quais há a presença de calotas polares, denominados *Icehouse Earth* as variações dos níveis dos mares de grande amplitude (tipicamente maiores que 100 metros) são respostas a processos de quarta e quinta ordens. As causas dessas oscilações de grandes amplitudes e altas frequências são associadas às variações nos volumes de gelo polar impulsionadas pelos ritmos dos Ciclos de Milankovitch. Durante os períodos de *icehouse* as mesmas flutuações dos níveis dos mares de mais longos prazos de segunda e terceira ordens que dominam os estilos de *greenhouse* ainda ocorrem, mas nesses casos elas tem amplitudes mais baixas e períodos mais longos que as variações direcionadas pelas glaciações. Assim, os ciclos eustáticos glacialmente induzidos inundam esses efeitos de prazos mais longos, tal que as sequências de quarta ordem dos períodos de *icehouse* são produzidas e organizadas em conjuntos de sequências (Tucker, 1993; Warren 2006, 2016, 2017) (Fig. 7).

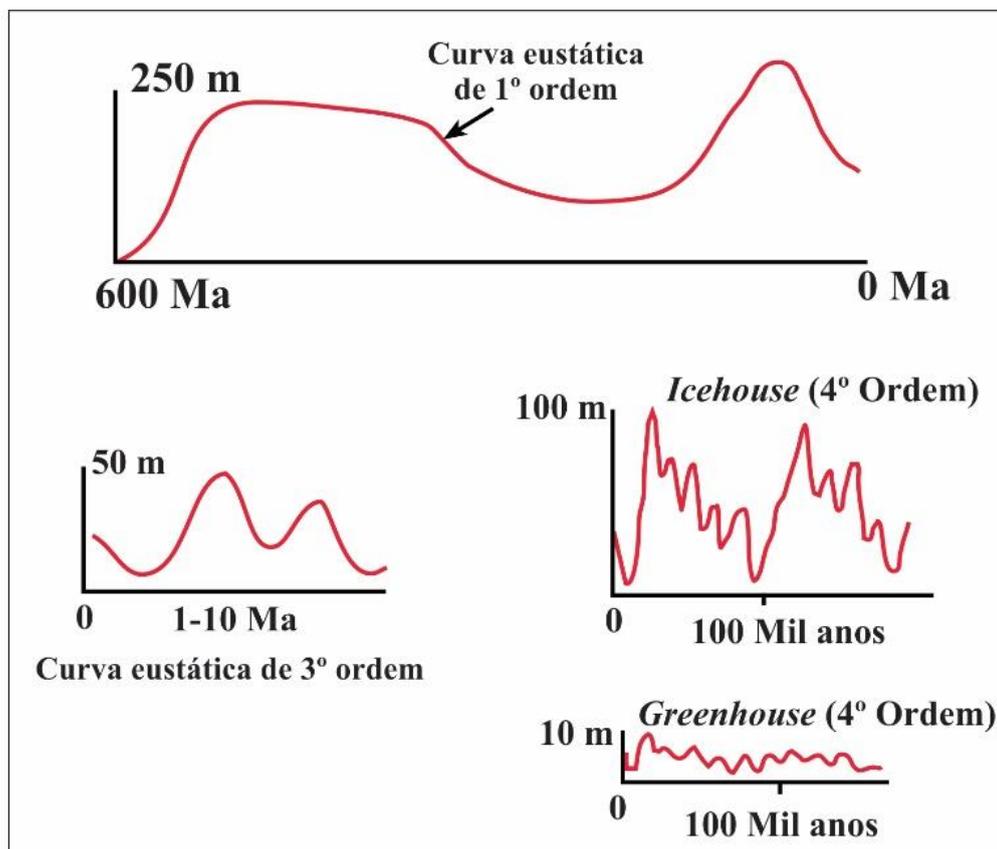


Figura 7. Curvas eustáticas dos níveis dos mares, destacando a curva de 1º ordem de Vail na parte superior. O restante do diagrama mostra as amplitudes e periodicidades típicas das curvas dos níveis dos mares de ordens mais altas. Curvas de 3º ordem tem periodicidades de 1-10 Ma. Curvas esquemáticas de 4º ordem com curvas de 5º ordem sobrepostas são mostradas para as condições de *greenhouse* e *icehouse* (modificado de Warren, 2006, 2016, 2017).

Conforme definido anteriormente, nos sistemas marinho-carbonáticos de margens continentais, plataformas amplas e planas com imensas lagoas e lagunas internas (periplataformais) são comuns (Fig. 6). Nesses sistemas, os estágios transgressivos correspondem aos períodos nos quais as maiores taxas de deposição carbonática são alcançadas. Em tais períodos as áreas plataformais de mar aberto, que possuem os maiores potenciais de crescimento, irão tipicamente agradacionar em conformidade com a elevação dos níveis dos mares e, em seguida, progradar tanto em direção ao mar aberto como para as lagoas e lagunas internas. Assim, nesses casos, o isolamento hidrográfico por meio de barreiras hidrográficas, e a deposição de espessos evaporitos plataformais, serão usualmente iniciados por leves quedas relativas nos níveis dos mares, em seguida à um período de agradação vertical, nas áreas com as maiores taxas de crescimento da plataforma; e.g. uma queda relativa de quarta ordem sobreposta à uma elevação de terceira ordem nos períodos de *greenhouse* (Warren, 2006, 2016, 2017) (Fig. 8).

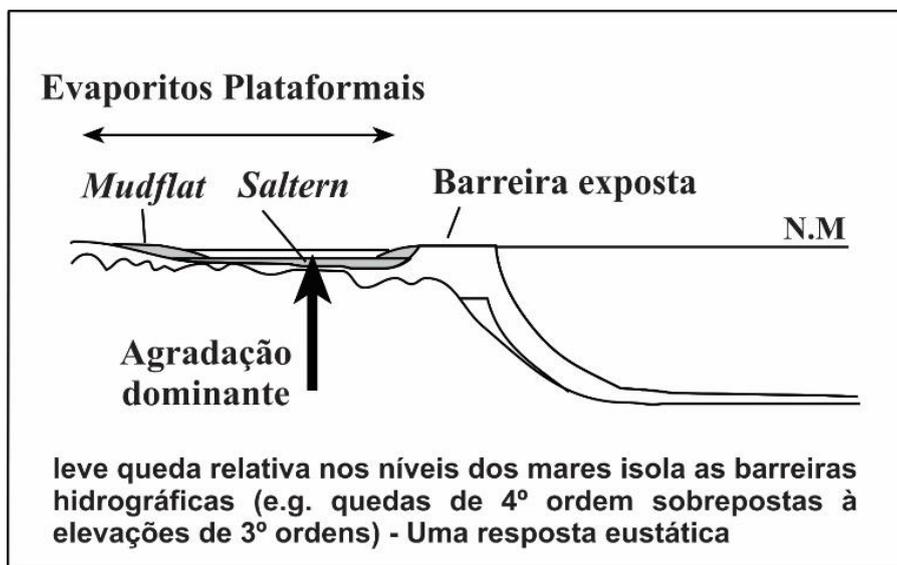


Figura 8. Exemplo de um trato de sistemas transgressivo carbonático, sujeito a queda dos níveis dos mares de ordem alta, que isola uma depressão passível de infiltração na plataforma, e que resulta na deposição de espessas sequências de evaporitos plataformais (modificado de Warren, 2006, 2016).

Dessa forma, as oscilações dos níveis dos mares de baixas amplitudes e baixas frequências, que caracterizam os ciclos de terceira ordem dos períodos de *greenhouse*, tenderiam a favorecer a formação de depressões grandes, estáveis e altamente restritas nas porções internas das plataformas, sobretudo nas seções marginais pericontinentais (Fig. 6). Nesses períodos, as barreiras carbonáticas plataformais teriam amplos potenciais de crescimento, cujo ritmo poderia ser mais do que mantido, mesmo com as flutuações de baixa amplitude dos níveis dos mares, característicos dos ciclos de quarta ordem nos estágios de *greenhouse*. Tais quedas relativas seriam marcadas por inconformidades nessas barreiras, que isolariam as áreas marinhas abertas das regiões de deposição evaporítica (Warren, 2006, 2016) (Figs. 6 e 8).

Uma vez que as lagoas e lagunas periplatformais tenham sido hidrograficamente isoladas dos oceanos abertos, as sucessões evaporíticas serão depositados ou como depósitos de *Mudflat*, ou de *Saltern* (fig. 5). O domínio de um ou outro estilo refletirá a resposta da hidrologia de rebaixamento evaporítico às mudanças relativas dos níveis dos mares na plataforma. Um mosaico evaporítico de *Mudflat* será formado quando a evaporação é intensa, as taxas de recargas por influxos marinhos são relativamente baixas, e a cobertura superficial por colunas de salmoura por longos períodos é rara. Tais condições para o domínio de preenchimento por depósitos de *Mudflat* ocorrerão, se existir pouca diferença de elevação entre o nível do mar fora da barreira exposta e o assoalho da depressão evaporítica. Por outro lado, os depósitos de *Saltern* serão mais dominantes quando a evaporação é menos intensa, e/ou existirem maiores taxas de recarga por infiltração por meio da barreira de isolamento hidrográfico. Essas situações serão

mais comuns se existirem grandes diferenças potenciométricas através da barreira de isolamento hidrográfico, entre o ambiente do nível do mar e as superfícies das águas nas depressões evaporíticas. Esses cenários irão prevalecer quando as lagoas e lagunas plataformais forem profundas nos períodos do seu isolamento (Warren, 2006, 2016).

De maneira oposta, as variações de grandes amplitudes e altas frequências dos níveis dos mares, que caracterizam os períodos de *icehouse* (Fig. 7), induzem à formação de altos topográficos locais, compostos por recifes e bancos carbonáticos nas plataformas. Assim, as fácies carbonáticas de *icehouse* tendem a apresentar consideráveis variações de espessura lateral. Tais características ocorrem devido aos relativamente rápidos episódios de inundações e exposições da plataforma, em conjunto com significativas inconformidades e generalizadas diagêneses meteóricas profundas nesses depósitos. Dessa forma, os recifes e bancos carbonáticos plataformais normalmente não desenvolvem barreiras hidrográficas lateralmente extensas e continuamente paralelas sob um cenário de *icehouse*. Nesses cenários, portanto, a conversão de grandes áreas de lagoas e lagunas periplataformais em depressões isoladas, com hidrologias de infiltração marinha adequadas para a precipitação de evaporitos, são mais improváveis de ocorrer (Warren, 2006, 2016).

As sucessões evaporíticas intracontinentais resultantes dos estágios de isolamento dos mares epéiricos epicontinentais, por outro lado, são suscetíveis de ocorrer tanto em períodos de *icehouse* como de *greenhouse* (Fig. 6). Nessas áreas, nas quais os mares epicontinentais rasos se estendem por grandes regiões ao longo dos continentes, a formação de barreiras tectônicas interiores (ou nas bordas das plataformas), seguidas por quedas no nível do mar, implicam que as seções internas da plataforma e as bacias intracratônicas de Sag no interior de grandes blocos continentais ou cratônicos estáveis, são passíveis de se tornar evaporíticas. Assim, as sucessões evaporíticas plataformais intracontinentais irão tipicamente representar os estágios salinos de algumas das grandes bacias intracratônicas antigas (Warren, 2006, 2017).

De fato, a maioria das mais espessas e extensas acumulações evaporíticas mundiais foram precipitadas em bacias intracratônicas, separadas do oceano por alguma barreira. Exemplos incluem os depósitos das bacias Zechstein, Williston-Elk Point, Michigan, Paradoxo, Delaware, Moscou e as bacias siberianas, além das sucessões evaporíticas da Bacia do Amazonas (Kendall, 1992; Tucker, 1991; Catuneanu *et al.*, 2011 Warren, 2006, 2016, 2017).

Dessa forma, devido às diferenças evolutivas das fases de restrição das depressões evaporíticas, bem como a localização desses estilos deposicionais em relação à proximidade com as seções de mar aberto, as sucessões evaporíticas plataformais diferenciam-se, entre outros fatores, pelos expressivos conteúdos de camadas de halitas nas sucessões de bacias

intracratônicas, em oposição ao típico predomínio de camadas de sulfatos de cálcio (gipso e/ou anidritas com espessuras entre 5-40 m), intercaladas com carbonatos plataformais marinho-normais, nas seções periplataformais (Warren 2006, 2016, 2017).

3.3.3 Evaporitos de amplo preenchimento de bacias (*basinwide*)

Correspondem a espessas sucessões bacinais evaporíticas (gigantes salinos com mais de 500-1000m de espessura e centenas de quilômetros de extensão), depositadas em ambos períodos de *greenhouse* e *icehouse*. Kendall (1992) utilizou o termo evaporitos de centros bacinais para descrever esse grupo de antigos depósitos evaporíticos. Warren (2006, 2016, 2017) prefere a adoção do termo *basinwide*, por destacar que nesses depósitos a sequência evaporítica pode preencher o centro bacinal e, em seguida, avançar também sobre a antiga margem da bacia. Ainda segundo esse autor, essas acumulações não seriam derivadas de flutuações nos níveis dos mares, mas pelo contrário, resultariam do isolamento tectônico de grandes partes da superfície terrestre, dos influxos diretos das águas oceânicas mundiais.

Nesses sistemas, quando a deposição dos evaporitos é iniciada, toda a hidrologia da bacia é evaporítica, e tipicamente saturada com a mesma fase mineral ao longo de grandes áreas, como ocorre atualmente em uma escala muito menor no Mar Morto. Assim, os sais depositados irão reter evidências texturais de diferentes, mas síncronas, configurações deposicionais locais, incluindo *Mudflats*, *Saltern*, depósitos de talude e de centros bacinais (Warren 2017).

Além disso, ao contrário da maioria dos evaporitos de plataforma, os depósitos de *basinwide* não requerem uma eustasia típica dos períodos de *greenhouse*, mas apenas uma associação apropriada entre um clima árido e tectônica. Assim, a tectônica atua estabelecendo a formação de profundas depressões abaixo dos níveis dos mares e hidrograficamente isoladas, porém com uma hidrologia interna que poderá recorrer a uma enorme reserva marinha de salmoura mãe do oceano nas proximidades. Por essa razão, esses gigantes salinos tendem a se formar nos períodos de proximidade continente-continente em escala de placa e, portanto, ocorrem principalmente nas configurações de margens cratônicas (Warren 2006, 2016, 2017) (Fig. 9).

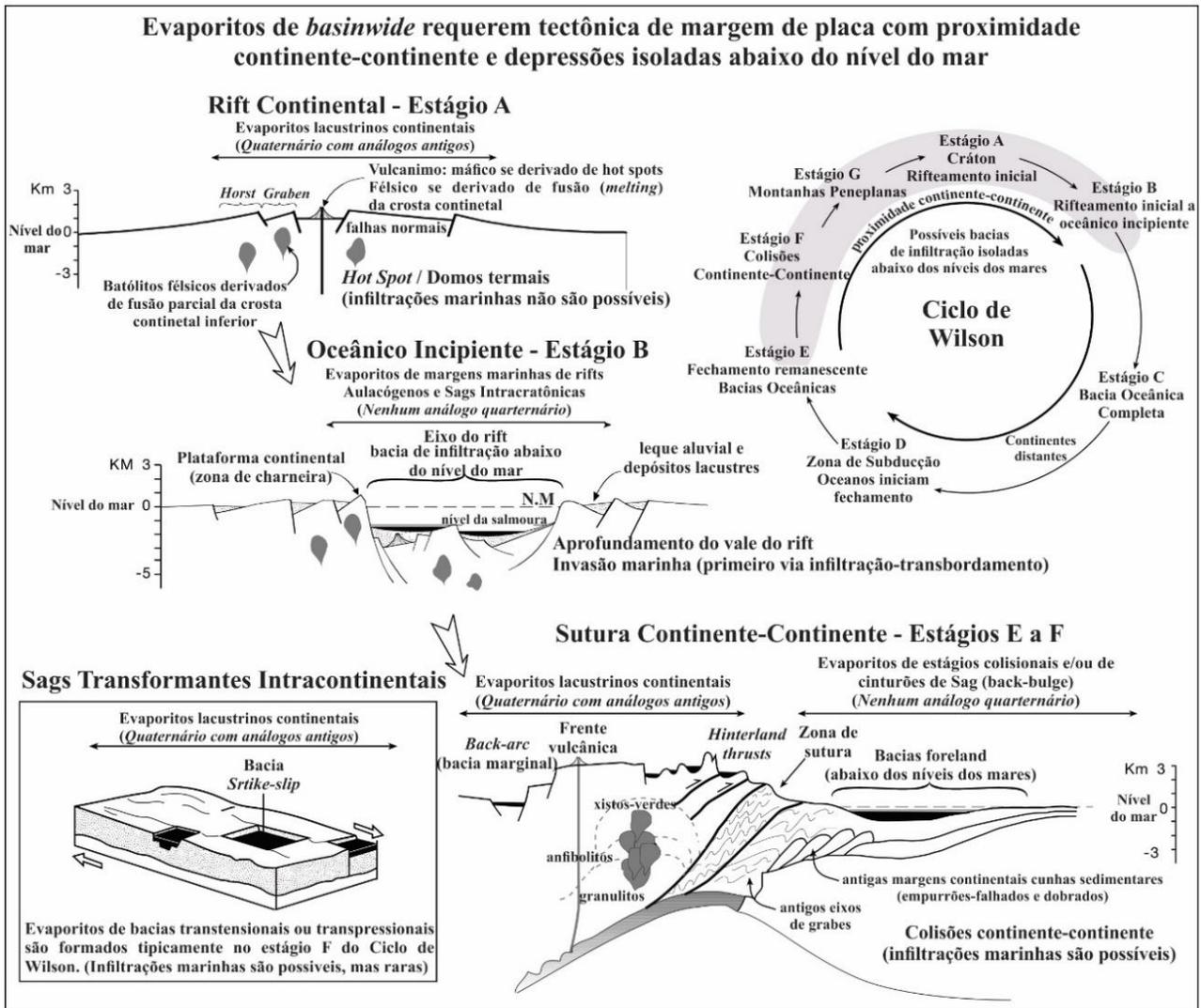


Figura 9. Situações de margens continentais tectônicas, hidrograficamente isoladas (endorréicas marinhas), nas quais os evaporitos de *basinwide* tendem a ser acumulados (as camadas de evaporitos são sombreadas de preto). As posições estão amplamente vinculadas aos períodos de proximidades continente-continente e, portanto, podem ser associadas às várias etapas do Ciclo de Wilson. Assim os depósitos de *basinwide* são relacionados à tectônica, e podem abranger tanto os períodos de *greenhouse* como os de *icehouse* (modificado de Warren, 2006, 2016, 2017).

3.4 Modelo estratigráfico de sequências de Tucker

Alguns autores, entretanto, trabalhando em sistemas evaporíticos de *basinwide* consideraram que esses gigantes salinos deveriam requerer uma reduzida conexão com os oceanos mundiais. Tucker (1991) distinguiu dois tipos principais de modelos estratigráficos de sequências associados ao grau de rebaixamento das bacias, para interpretar os relacionamentos carbonáticos evaporíticos nos depósitos de *basinwide* de gigantes salinos: Rebaixamento incompleto, associado a cunhas de gipso marginal e gipso laminado bacinal (Fig. 10); e rebaixamento completo, com dessecação da bacia e preenchimento por halita (Fig. 11).

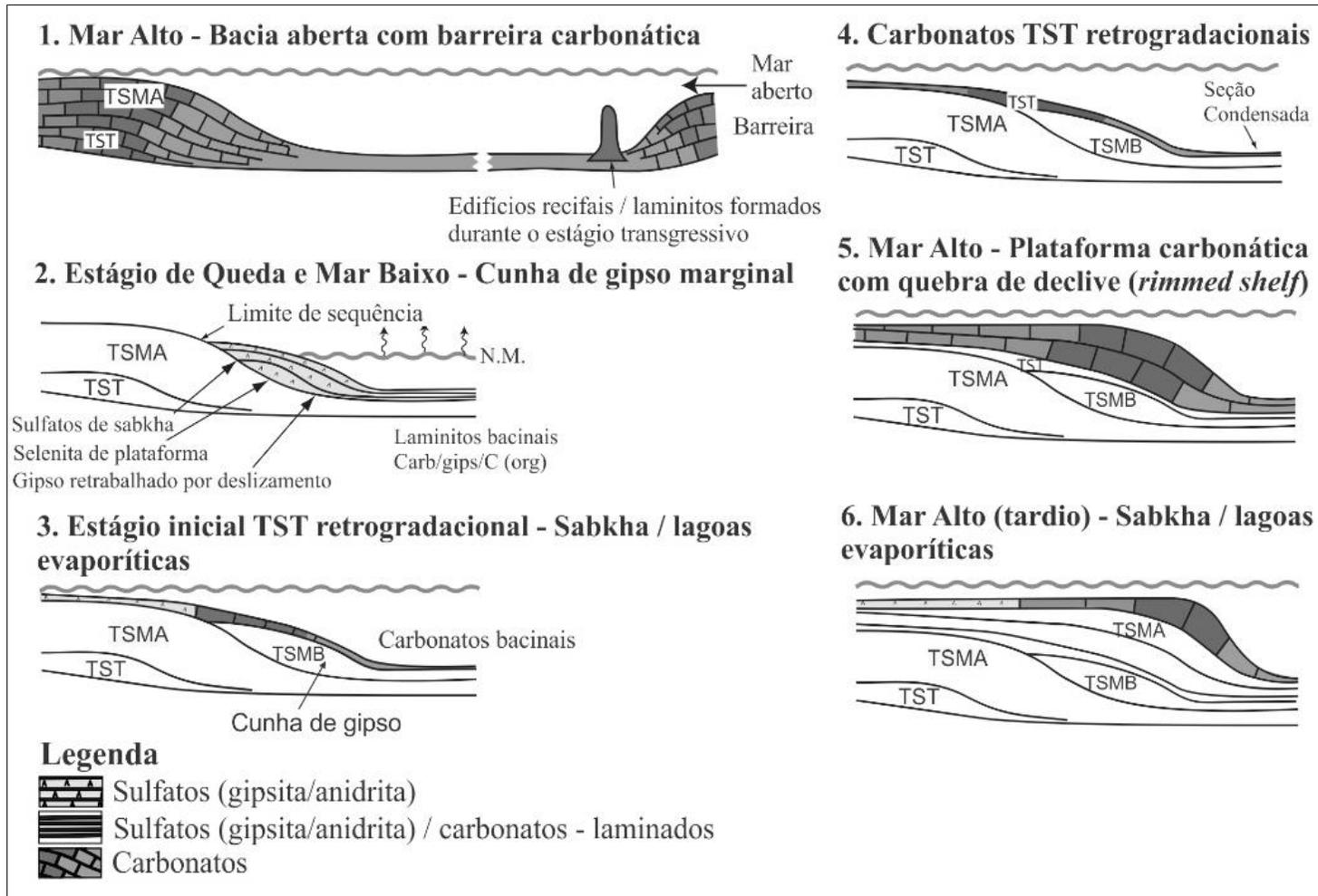


Figura 10. Bacias intracratônicas carbonáticas- evaporíticas: Modelo estratigráfico de seqüências para uma bacia submetida a rebaixamento incompleto do nível dos mares, com formação de gipso a cunhas de gipso nas margens da bacia (modificado de Tucker, 1991; Catuneanu et al., 2011).

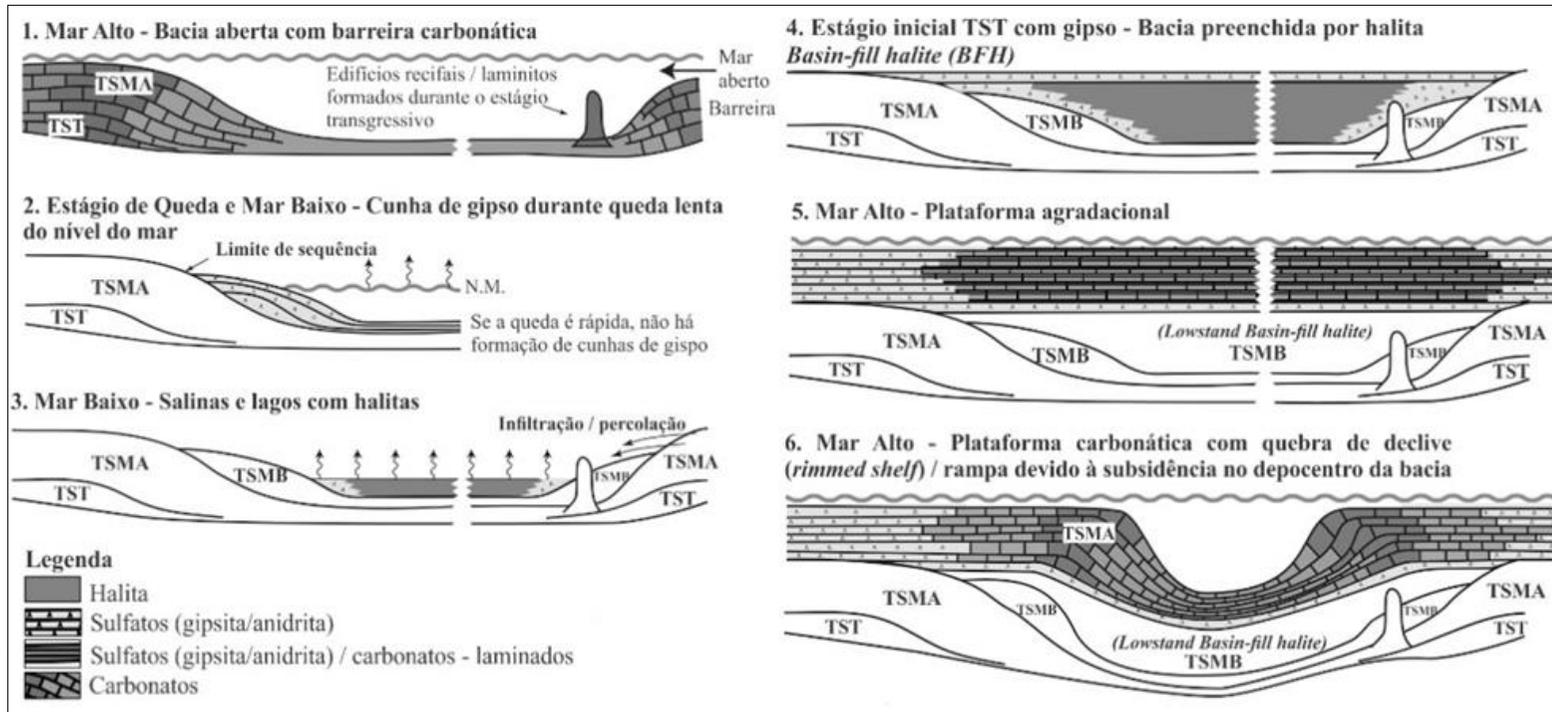


Figura 11. Bacias intracratônicas carbonáticas-evaporíticas: Modelo estratigráfico de seqüências para uma bacia submetida a rebaixamento completo do nível dos mares, com formação de halita (modificado de Tucker, 1991; Catuneanu *et al.*, 2011).

Catuneanu *et al.* (2011) fizeram revisão das associações de fácies, sistemas deposicionais e tratos de sistemas desses dois modelos. Esses autores destacaram que antes do início da deposição evaporítica, as bacias são tipicamente ligadas aos oceanos mundiais, com o nível dos mares acima da altura das barreiras internas presentes. Nesses períodos, ocorreria o amplo desenvolvimento de plataformas carbonáticas, com limitada entrada de siliciclásticos. Carbonatos retrogradacionais (Trato de Sistemas Transgressivo – TST) seguidos por carbonatos agradacionais-progradacionais de águas rasas (Trato de Sistemas de Mar Alto – TSMA) seriam desenvolvidos, além da deposição de carbonatos pelágicos e lamas hemipelágicas no centro da bacia.

3.4.1 Trato de Sistemas de Mar Baixo (TSMB)

Com uma regressão forçada (rebaixamento brusco do nível do mar, maior do que a subsidência) o nível de água dentro a bacia cairia rapidamente abaixo da quebra da plataforma carbonática. Com a evaporação as águas tornariam-se hipersalinas e cunhas de gipso seriam formadas (inicialmente com Trato de Sistemas de Regressão Forçada – TSRF, seguido por Trato de Sistemas de Mar Baixo – TSMB) (Figs. 10.2, 11.2). No assoalho da bacia, carbonatos continuariam sendo depositados nas fases iniciais do rebaixamento, até que as próprias águas da bacia tornariam-se saturadas em sulfato de cálcio. Durante a fase de queda e posterior mar baixo, as plataformas carbonáticas marginais seriam expostas e poderiam ser submetidas a erosão subaérea, carstificação e, potencialmente, acentuada dolomitização. Poderiam ocorrer também incisões fluviais e influxos siliciclásticos, se houvessem condicionantes topográficos internos, mas sob um clima árido a quantidade de terrígenos fornecida deveria ser limitada.

Na situação de rebaixamento incompleto (regressão normal), no qual a bacia sempre conteria um pouco de água por meio do isolamento parcial dos oceanos mundiais, extensas cunhas marginais de gipso iriam progradar para dentro da bacia. A precipitação de gipso poderia ocorrer na forma de gipso selenítico, a partir de águas rasas lagunares hipersalinas. Plataformas de gipso também poderiam se formar em altos topográficos locais dentro da bacia. Parasequências de escalas métricas poderiam ser desenvolvidas internas às cunhas de gipso, se houvessem variações de maior frequência no nível de base das águas dentro da bacia. Sedimentações de gipso em águas mais profundas por retrabalhamento devido a tempestades, falhamentos, fluxos de detritos e correntes de turbidez iriam gerar estratificações gradacionais, dobras (*slumps*) e brechas, e iriam contribuir para a progradação das plataformas de gipso. No centro da bacia, seriam precipitados gipso de granulometria fina, diretamente das águas superficiais sobre o assoalho da

bacia, podendo ser interlaminações com carbonato e / ou matéria orgânica, refletindo as variações sazonais na precipitação e na proliferação de plâncton. Se as condições para a precipitação de gipso subaquoso no centro da bacia fossem mantidas por um longo período de tempo, uma espessa sucessão de laminitos de sulfatos seria formada, provavelmente com leitos seleníticos.

3.4.2 Trato Transgressivo (TST)

Quando a bacia é reconectada ao oceano aberto, com a subida do nível do mar, a deposição de carbonato poderia ser reiniciada em geometrias retrogradacionais (TST) (Figs. 10.3 e 10.4). Os depósitos iniciais do estágio TST ao longo da margem da plataforma poderiam também ser evaporíticos, se águas rasas hipersalinas fossem mantidas por tempo suficiente para estabelecer *sabkhas* e salinas. Em uma bacia preenchida por halita, os depósitos iniciais de TST provavelmente ainda seriam hipersalinos (Fig. 11.4). A dissolução de sais pela entrada da água do mar manteria a hipersalinidade por um tempo. *Sabkhas* e lagoas com deposição de gipso poderiam ser estabelecidas e estender-se sobre antigas plataformas carbonáticas marginais. Quando as halitas do estágio de regressão normal de mar baixo preenchessem completamente a bacia, toda a topografia original seria removida e, na ausência de qualquer subsidência diferencial, carbonatos transgressivos seriam depositados em um extenso mar raso, e os carbonatos do estágio de mar alto poderiam mostrar uma fauna restrita e associação com evaporitos (Fig. 11.5).

3.4.3 Trato de Sistemas de Mar Alto (TSMA)

Ao final da transgressão, inicialmente ocorreria agradação, seguida por progradação com sedimentação de carbonatos marinhos rasos durante o estágio de mar alto (TSMA) (Figs. 10.5 e 11.5). A nova plataforma carbonática marginal seria localizada ao longo da borda externa (*basinward*) da cunha de gipso. Em torno das áreas internas das margens da plataforma, poderiam ser desenvolvidas *sabkhas* e lagoas hipersalinas muito extensas, porém, não necessariamente criando sucessões espessas (Figs. 10.6 e 11.5).

O limite da sequência deposicional (discordância e conformidade correlativa) iria ocorrer na superfície superior da plataforma carbonática, onde poderia ser representado por um *paleokarst*, ou resíduo evaporítico da dissolução tardia de evaporitos de *sabkhas*-lagunares da plataforma interna. A conformidade correlativa desta superfície na bacia estaria localizada na base dos

evaporitos, marcando uma variação maior de fácies, mas também o início da regressão forçada. Essa proposição segue a definição de Posamentier & Allen (1999) que destacaram que os sedimentos do estágio de regressão forçada encontram-se diretamente sobre o limite da sequência e são sobrepostos pelos sedimentos do estágio de mar baixo.

Assim, no modelo de rebaixamento incompleto do nível dos mares, a sequência deposicional consistiria de uma parte inferior evaporítica (a cunha de gipso de regressão forçada-mar baixo e os sucessores depósitos de gipso de *sabkha*-lagunas de TST inicial) passando acima e lateralmente para os carbonatos plataformais de TST e TSMA. No modelo de rebaixamento completo, os gipsos de regressão forçada seriam sucedidos por depósitos de halita de mar baixo extremamente espessos, ambos subjacentes aos evaporitos transgressivos e aos carbonatos de mar alto resultantes de novo episódio de inundação da bacia.

3.5 Modelo estratigráfico de sequências de Warren

Warren (1996), igualmente, propôs um modelo estratigráfico de sequências deposicionais para bacias carbonáticas-evaporíticas, assimilando alguns dos conceitos de Tucker (1991) e Kendall (1988). Porém, ao contrário de Tucker (1991), e com base em conceitos hidrológicos e de propriedades dos fluidos, o autor argumentou que, em uma bacia isolada, as variações internas do nível de base são amplamente independentes das flutuações de grande escala dos níveis dos mares externos. Para tanto, ele considerou que: (1) conforme descrito anteriormente, espessas bacias evaporíticas, com mais de 500-1.000 m de espessura e centenas de quilômetros de diâmetro, teriam sido acumuladas devido ao isolamento tectônico de grandes áreas deprimidas, do influxo direto das águas oceânicas mundiais; (2) as variações eustáticas poderiam promover mudanças no gradiente potenciométrico entre o nível de base externo à bacia e a superfície de salmoura livre interna na bacia, criando um gradiente de influxo mais acentuado, que induziria a infiltração mais rápida, e com um volume maior de salmoura, através das barreiras permeáveis que separam a depressão bacinal do oceano aberto; (3) os mecanismos que atuam na bacia isolada, tais como o clima, tectônica, bem como a taxa de formação e eficiência da estratificação da coluna de salmoura por variações de concentrações salinas e densidades, interagem em conjunto sobre o nível de base interno da bacia, de forma a inundar as influências externas oriundas das oscilações dos níveis dos mares. Por exemplo, o preenchimento agradacional de uma depressão tectônica por camadas de sais que criam sua própria superfície de baixa permeabilidade subjacente, tem o mesmo efeito que a mudança no nível do mar promove sobre o gradiente potenciométrico de influxo. Assim, à medida que a bacia é preenchida por sais e a

sequência agrada, o gradiente potenciométrico entre o nível de base fora e dentro da bacia diminui e, conseqüentemente, a taxa de recarga marinha será reduzida, independente das mudanças nos níveis absolutos dos mares. Além disso, Warren (2006) observou que no modelo de Tucker (1991) as restrições hidrológicas não são claramente indicadas e que a suposição hidrológica de que as cunhas de gipso marginais teriam sido formadas associadas a um nível de mar baixo externo à bacia, sem isolamento, provavelmente não estaria correta.

Warren (2006) argumentou ainda que a precipitação de halitas em águas profundas no centro da bacia concomitante à acumulação de gipso plataformal e de carbonatos nas áreas de entrada da bacia, a partir de uma única massa de água não é fisicamente possível. Em tal situação, a deposição de gipso em uma região de água rasa e de halita em uma área mais profunda a partir do mesmo corpo de salmoura requer a formação de uma haloclina (coluna de água com camadas nas quais há uma grande variação de salinidades ao longo da profundidade) inclinada. Tal sistema de fluidos não poderia permanecer estável por longos períodos em um corpo único de salmoura. Qualquer coluna de líquidos não suportaria o cisalhamento oriundo da inclinação das camadas com densidades e concentrações distintas. A haloclina inclinada requerida por este modelo iria colapsar espontaneamente a fim de recuperar seu equilíbrio gravitacional. Uma vez reestruturada para uma interface horizontal, a precipitação de sais no corpo da salmoura mais profunda cessaria até que as salinidades das camadas superior e inferior da salmoura fossem equalizadas. Em termos de estratigrafia, isso significa que a interseção de uma espessa camada de halita subaquosa em um poço corresponde a um contexto deposicional distinto de uma espessa camada de anidrita / gipso subaquoso intersectada em um poço adjacente a poucos quilômetros de distância.

Assim, o modelo proposto por Warren (2006) considera que a maioria das geometrias evaporíticas internas e de menor escala em grandes depósitos salinos seriam autocíclicas, enquanto que as geometrias maiores refletiriam interações contínuas entre a tectônica e o clima. Apenas quando e se a bacia possuir uma conexão com a superfície dos oceanos mundiais, as geometrias das unidades de carbonato refletirão um controle eustático marinho e, nesses períodos, os evaporitos não seriam acumulados (Fig 12).

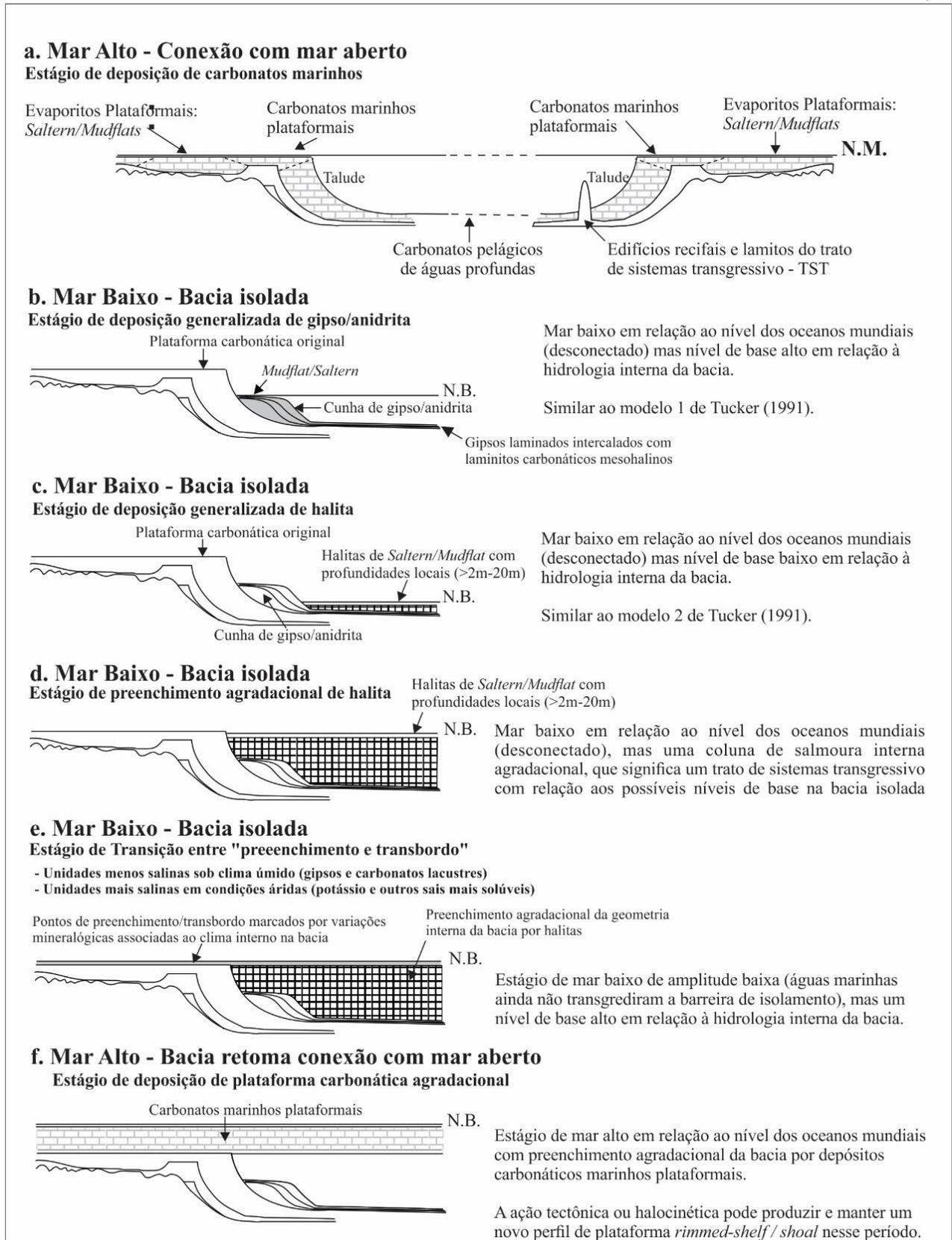


Figura 12. Modelo estratigráfico de seqüências para evaporitos de *basinwide* em uma bacia submetida a isolamento completo da superfície de conexão com os oceanos mundiais e subsequente rebaixamento (Modificado de Warren, 2006).

3.5.1 Mar Alto (Conexão com Mar Aberto) - Estágio de deposição de carbonatos marinhos

O modelo de Warren (2006) prevê que, inicialmente, a bacia teria uma conexão superficial com o oceano. Nesse estágio a resposta deposicional seria representada por carbonatos marinhos clássicos, e os únicos evaporitos precipitados seriam associados a depósitos marinhos marginais intercalados com sedimentos marinhos plataformais normais. Esses evaporitos seriam típicos de depósitos de *Saltern* ou de *Mudflat* (Fig. 5).

Edifícios recifais poderiam crescer bem como depósitos de lamitos poderiam ser acumulados no talude externo. No centro da bacia, seriam depositados carbonatos pelágicos (condensados) de águas profundas e lamitos hemipelágicos finamente laminados, que passariam lateralmente para depósitos de talude ao longo da margem da bacia (Fig. 12a).

3.5.2 Mar Baixo (Bacia solada) - Estágio de deposição generalizada de gipso/ anidrita

Uma vez que o nível dos mares caísse abaixo da altura da barreira da bacia - seja por meio de variações eustáticas ou, mais provavelmente, por influência da tectônica regional, que promoveria a separação a bacia da conexão direta com a superfície dos oceanos mundiais – o rebaixamento devido à evaporação reduziria rapidamente o nível de base da coluna de salmoura interna na bacia, até níveis bem abaixo da antiga plataforma carbonática original (Fig. 12b). Sob um clima árido, a água dentro da bacia agora isolada se tornaria rapidamente hipersalina. As águas oceânicas, juntamente com as águas meteóricas e continentais, iriam se acumular nas depressões da bacia, infiltrando-se através das antigas rochas carbonáticas de águas profundas, que agora passariam a ser subaéreas e expostas. No centro da bacia, a deposição subaquosa relativamente profunda de laminitos carbonáticos mesohalinos (carbonatos depositados a partir de águas com salinidade entre 37-140 ‰) ricos em matéria orgânica marcaria o início do isolamento da bacia. Esses depósitos continuariam sendo formados até que ocorresse o isolamento definitivo da bacia (Fig. 12b).

A partir do estágio de isolamento, as águas bacinais poderiam evoluir para uma condição de mais alta concentração. Se a coluna de salmoura resultante alcançasse a saturação do sulfato de cálcio, então poderia ocorrer o acúmulo generalizado de gipso em toda a bacia. Quando a coluna de água fosse meromictica (coluna de água com estratos de diferentes densidades e que não se misturam), camadas de gipsos com cristais grosseiros e texturas do tipo “zig-zag” ou gipsos laminados seriam formados nas margens rasas da bacia (*Saltern/Mudflats*), enquanto que os

laminitos pelágicos iriam ser acumulados nos centros bacinais. Se a subsidência da bacia não fosse muito acentuada à medida que ela se tornasse isolada, uma nova cunha de gipso (plataforma) seria formada sobre antigos carbonatos de talude e abaixo da antiga quebra da plataforma carbonática. Com relação ao nível dos mares fora da bacia isolada, este seria um Trato de Mar Baixo associado à criação de uma superfície cárstica sobre a antiga plataforma carbonática, em áreas marginais expostas. Mas, no que diz respeito ao nível de base interno da bacia, este seria um depósito de trato de sistemas de nível alto (TSNA). Se a saturação de sulfato de cálcio fosse mantida estável por longos períodos (10^5 anos ou mais), com a manutenção da condição de equilíbrio hidrológico entre as perdas e os influxos de salmoura na bacia, o preenchimento evaporítico resultante poderia ser completamente composto por gipso (Fig. 12b).

3.5.3 Mar Baixo (Bacia Isolada) - Estágio de deposição generalizada de halita

Ao contrário, se o equilíbrio hidrológico não fosse mantido na bacia e as perdas excedessem os influxos, o nível de base na bacia continuaria sendo reduzido e a salinidade da salmoura residual aumentaria progressivamente, podendo atingir a saturação da halita (Fig. 12c). Com base na maioria dos depósitos análogos do Holoceno (exceto o atual Mar Morto), as profundidades das águas bacinais no início da deposição de halita seriam inferiores a algumas dezenas de metros e depósitos de *Saltern* ou de lagos salinos seriam desenvolvidos no assoalho da bacia. Se as águas bacinais desenvolvessem uma estratificação por densidade (coluna de salmoura meromictica), então, localmente, poderiam existir regiões com águas mais profundas e concentradas, em áreas deprimidas do assoalho da bacia, que seriam preenchidas por halitas finas laminadas. Por outro lado, se a coluna de salmoura fosse holomicítica (massa de água com temperaturas e densidades uniformes, que permitem amplas misturas e um maior equilíbrio nas concentrações salinas ao longo da profundidade), então as camadas de halitas seriam formadas por cristais grosseiros, precipitados segundo orientações aleatórias. Esse estágio da sedimentação ainda seria um mar baixo com relação ao nível médio dos mares fora da bacia isolada, mas corresponderia agora a um trato de sistemas de nível de base baixo (TSNB) em relação à hidrologia interna da bacia (Fig. 12c).

3.5.4 Mar Baixo (Bacia Isolada) - Estágio de preenchimento agradacional de halita

Uma vez que espessas unidades de halita começassem a acumular ao longo do leito da bacia, o grau de perda de permeabilidade dessas camadas de sais aumentaria drasticamente, refletindo numa perda quase completa de porosidade na superfície deposicional. Tal condição passaria a constituir uma barreira hidráulica basal, que poderia suportar agora uma coluna de salmoura sobrejacente saturada em halita. Essa condição poderia ser mantida em uma posição quase permanente sobre a superfície deposicional, com episódios ocasionais de dessecação completa ou de diluição superficial das águas bacinais induzida por inundação. Assim, as camadas de halita começariam a agradacionar como uma série de parassequências autocíclicas subaquosas de espessuras métricas, com cada ciclo depositado em intervalos de tempo de 10^2 a 10^3 anos. A manutenção dessa condição hidrológica agradacional permitiria que a bacia fosse preenchida predominantemente por halitas (Fig. 12d).

Com relação ao nível dos mares fora da bacia isolada, esses depósitos ainda corresponderiam a um estágio de mar baixo, mas, em termos das geometrias intrabacinais, estariam relacionados a um trato de sistemas transgressivo (TST). Mas este seria um trato de sistemas que sem paralelo no reino marinho. Corresponderia a uma transgressão autocíclica interna na bacia que agradaria à medida que preenchesse e elevasse sua própria superfície deposicional de baixa permeabilidade e que, por sua vez, manteria a coluna de salmoura saturada sobreposta. Tucker (1991) definiu essa unidade como um preenchimento bacinal por halita no estágio de mar baixo (Fig. 11.4), enquanto que Warren (2006), em sua revisão, propôs o termo halitas de trato de sistemas transgressivo intrabacinal (Fig. 12d).

3.5.5 Mar Baixo (Bacia Isolada) - Estágio de Transição entre Preenchimento e Transbordo

À medida que o preenchimento agradacional da bacia progridesse, a superfície deposicional seria elevada a ponto de encobrir a antiga cunha de gispo e a plataforma carbonática marginal, podendo alcançar uma vasta planície cárstica. Assim, ao invés das águas bacinais permanecerem retidas, seriam agora espalhadas por uma área plataformal muito mais ampla. Warren (2006) definiu esse estágio de sedimentação e hidrologia da bacia como “preenchimento e transbordo” correspondente a um trato de sistemas de mar baixo em relação ao nível dos oceanos, mas um Trato de Sistemas de Nível de Base Alto (TSNA) com relação às geometrias intrabacinais (Fig 12e). Os horizontes de preenchimento e os pontos de transbordo são frequentemente marcados por mudanças mineralógicas e associados a depósitos de *Mudflat*, embora também possam

ocorrer depósitos de *Saltern*, que indicam variações hidrológicas e deposicionais. Mais uma vez a transição é autocíclica e dependente do clima dentro da bacia. Em um sistema semiárido, o ponto de transbordamento seria frequentemente definido por camadas de minerais menos salinos, como gipsos ou carbonatos lacustres. Nesse sistema, a precipitação e o influxo meteórico seriam parcelas cada vez mais importantes na composição do volume de água superficial. Por outro lado, se o preenchimento e o transbordamento ocorressem em um ambiente muito árido, o efeito da diluição pelas águas meteóricas seria mínimo, e as salmouras superficiais seriam mais concentradas podendo avançar para a saturação e precipitação de sais mais solúveis e/ou de potássio (Fig. 12e).

3.5.6 Mar Alto (Retomada da Conexão com Mar Aberto) - Estágio de Deposição de Plataforma carbonática agradacional

Quando a bacia fosse novamente reconectada ao oceano aberto, as áreas de plataforma anteriormente expostas seriam inundadas e um trato de sistemas de mar alto carbonático seria restabelecido. Nesse cenário, os depósitos carbonáticos marinhos plataformais e suas geometrias internas poderiam refletir novamente os controles eustáticos (Fig. 12f).

4-QUADRO TECTONO-CLIMÁTICO NO CARBONÍFERO DA BACIA DO AMAZONAS

4.1 Contexto climático na transição Pensilvaniano-Permiano

Segundo Cunha (2007), as idades para a deposição dos evaporitos da Formação Nova Olinda da Bacia do Amazonas ainda são em parte controversas. Conforme Lemos (1990) esse estágio corresponderia ao intervalo Moscoviano-Gzheliana no Pennsylvaniano, no Carbonífero Superior. Para Playford & Dino (2000) a deposição corresponderia a um intervalo um pouco mais amplo, iniciado no Moscoviano e se estendendo até o período Permiano. Dessa forma, admite-se a transição do Carbonífero Superior / Permiano, sobretudo para a deposição dos ciclos evaporíticos mais tardios da Bacia do Amazonas, nos quais se insere o Ciclo VII que hospeda as mineralizações de potássio da bacia. Conforme Warren (2006, 2016, 2017) essa transição corresponderia a um período de predomínio das condições de *icehouse* associadas às condições de salinidades mais altas dos oceanos mundiais (Fig. 13).

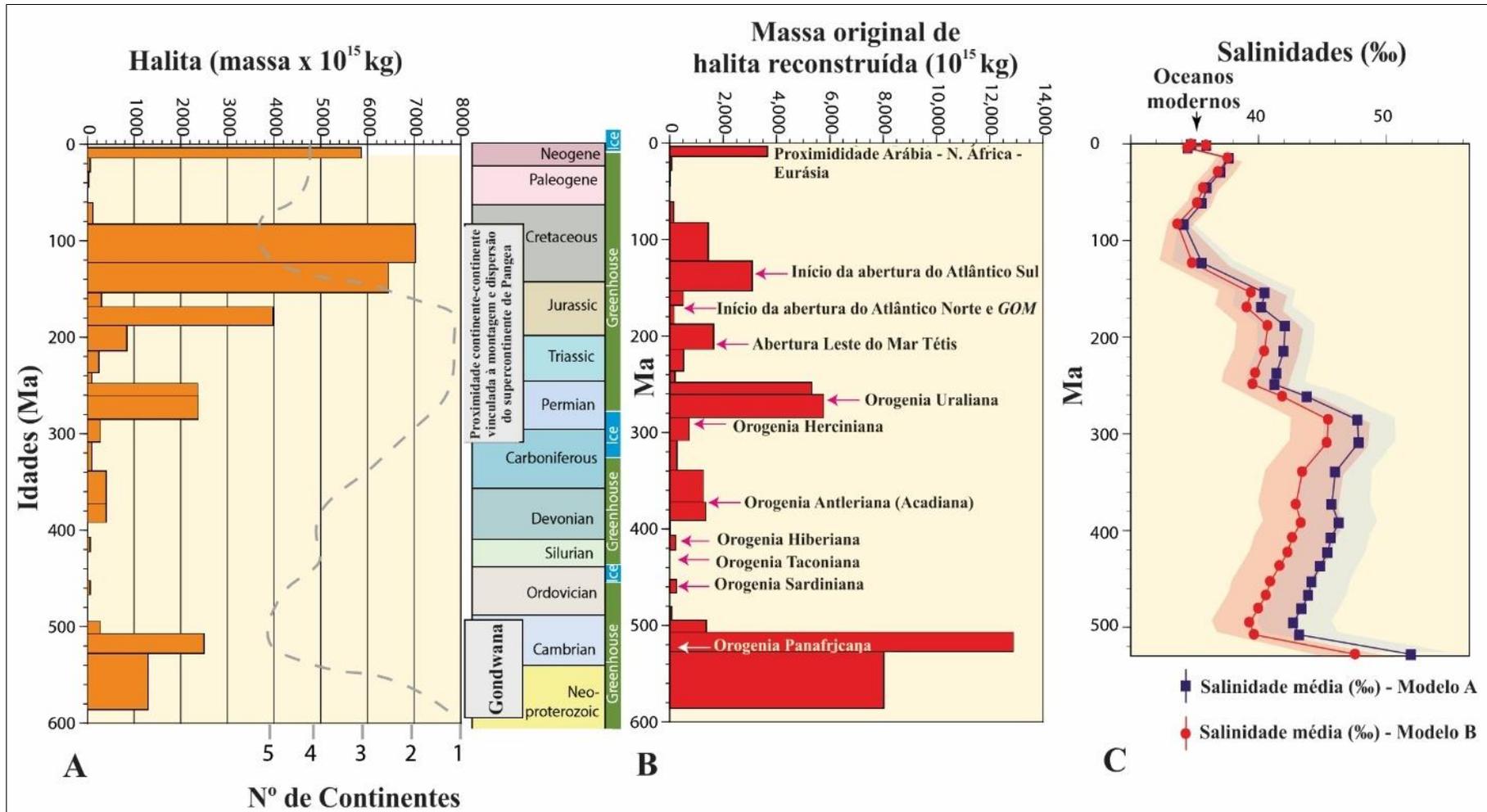


Figura 13. Evaporitos fanerozoicos ao longo tempo. A) Massa de halitas fanerozoicas atualmente residindo nas bacias evaporíticas. B) Massa reconstruída de halita fanerozoica perdida por combinação de erosão e dissolução (após Hay *et al.*, 2006). C) Alterações de salinidade oceânica nos últimos 500 Ma (após Hay *et al.*, 2006). (Modificado de Warren, 2017).

4.2 Evolução tectono-sedimentar Pensilvaniana-Permiana

Segundo Szatmari *et al.* (1975), no período compreendido entre o Carbonífero Superior (Pensilvaniano) ao Permiano, a Bacia do Amazonas teria sido marcada pelo predomínio da deposição de sedimentos químicos, num cenário de estagnação tectônica iniciada ao final do Mississipiano. Segundo esses autores, os evaporitos da bacia, inseridos nesse contexto, teriam sido inicialmente depositados diretamente sobre as sequências pré-devonianas nas áreas elevadas pela orogenia Eo-Hercinina (fig. 13). Essas elevações corresponderiam ao Alto de Purus e de Jutaí. Sobretudo o Alto de Purus teria atuado como o elemento estrutural mais importante da Bacia do Amazonas durante o Carbonífero, controlando o influxo de águas marinhas normais para as áreas mais centrais da bacia e, eventualmente, impedindo também esse influxo (Fig. 14).

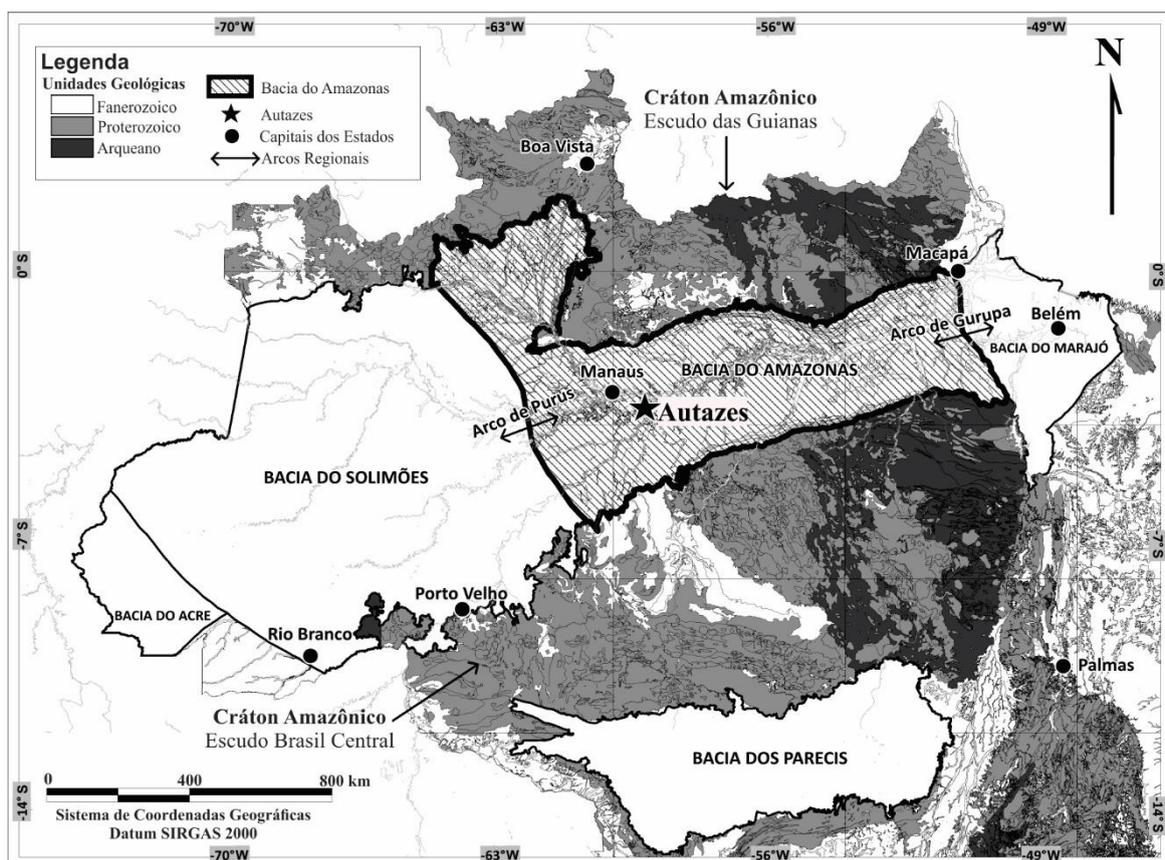


Figura 14. Mapa de localização da Bacia do Amazonas no contexto do Cráton Amazônico e localização do Arco (ou Alto) de Purus entre as Bacias do Solimões e Amazonas. A posição Depósito de Autazes é indicada no mapa como referência (modificado de Kiefer *et al.*, 2019).

Ainda segundo Szatmari *et al.* (1975), a deposição evaporítica teria avançado de oeste para leste, com os ciclos superiores dessa sequência apresentando aumentos de salinidade nesse mesmo sentido, caracterizado o afastamento em relação às regiões de mar aberto, e a substituição dos carbonatos por depósitos evaporíticos representados, principalmente, pelas fácies de anidritas e halitas. Cunha (2007) destacou ainda, que nas fases finais da deposição evaporítica, associadas à generalizada continentalização da Bacia do Amazonas, teria ocorrido o retrabalhamento das seções salíferas mais antigas, devido ao soerguimento das áreas de bordas, com a redeposição das sequências de sais nas áreas mais centrais. Segundo esse autor, esse soerguimento, e o início da continentalização da bacia, estariam associados à mudanças climáticas e à orogenia Variscana ou Tardi-herciniana (fig. 13).

Aqui cabe uma menção à proposição de Zalan (2004) que argumenta que o termo Orogenia Variscana seria um correspondente mais amplo tanto em tempo (Neo-Mississipiano a Permiano) como regionalmente, sendo usado como sinônimo da Orogenia Herciniana na Europa. Assim ele refletiria o choque gradual entre a parte setentrional do Gondwana (principalmente a parte africana) e a Laurásia. Segundo esse autor, o termo Orogenia Herciniana, juntamente com sub-orogênias específicas (Eo-, Tardi- e FiniHerciniana), têm sido freqüentemente usadas por autores na América do Sul. em referência a eventos deformacionais paleozoicos da região andina. Entretanto, tal uso perde força com os estudos mais modernos e terminologias regionalmente mais apropriadas. Em termos práticos, o continente Gondwana foi sendo anexado a terrenos durante as orogênias Caledoniana e Variscana/Herciniana, levando à formação do supercontinente Pangea entre 215-210 Ma (Brito Neves, com. oral, 2004)

Por outro lado, segundo Caputo (2014), os períodos Pensilvaniano e Permiano registrariam a deposição de ciclotemas nas bacias subandinas, bacias do norte do Brasil, Texas e Europa e outras partes do planeta, provavelmente relacionada às oscilações do nível do mar que refletiriam mudanças no volume de gelo ocorridas no Continente Gondwana. Esses ciclotemas possivelmente teriam sido produzidos por mudanças relativas no nível do mar de mais de cem metros, a cada 100.000 a 400.000 anos, independentemente de causas tectônicas.

4.3 Estilo deposicional das sucessões carbonáticas evaporíticas da Bacia do Amazonas

Dessa forma, as sucessões carbonáticas evaporíticas que hospedam a mineralização potássifera em Autazes-AM são analisadas e interpretadas a seguir, à luz dos conceitos aqui discutidos. Recorre-se, para tanto, aos modelos estratigráfico-deposicionais mais adequados para o contexto de precipitação desses sais ao final do Carbonífero na Bacia do Amazonas. Dentre os estilos deposicionais analisados, admite-se, portanto, uma evolução similar à de um mar epicontinental que teria coberto a bacia intracratônica. Esse modelo permitiria fases de conexão efetiva e/ou parcial com o oceano, bem como a transição para sistemas isolados hidrograficamente, em conformidade com as grandes oscilações dos níveis dos mares dos períodos de *icehouse*. Assim, nos intervalos de conexão efetiva com o oceano aberto, associados às etapas de elevação do nível do mar, teriam sido depositados carbonatos marinhos plataformais. Por outro lado, nos estágios de queda do nível do mar, em associação com barreiras internas na bacia, o isolamento hidrográfico teria permitido a ampla deposição das sucessões evaporíticas. Além disso, nesses intervalos de restrição, a precipitação dos sais evaporíticos teria sido controlada por variações autocíclicas intrabaciais, em associação com sistemas climáticos semiáridos a áridos, conforme o modelo proposto por Warren (2006).

5-MODELO ESTRATIGRÁFICO DE SEQUÊNCIAS PARA OS EVAPORITOS DA ÁREA DO DEPÓSITO DE AUTAZES

5.1 Considerações regionais

Szatmari *et al.* (1975) definiram diversos ciclos estratigráficos, destacando-se o Ciclo VII, hospedeiro da mineralização potássifera na bacia, que representa o máximo de saturação da salinidade paleoambiental e o período de isolamento mais eficiente da bacia evaporítica, com salmouras de alta concentração e deposição de halitas e sais de potássio e de magnésio na forma de sulfatos e cloretos. Segundo esses autores, o limite inferior entre o Ciclo VII e o subjacente Ciclo VI seria definido por um marco estratigráfico denominado Marco 20, representado por uma camada de folhelho de extensa continuidade lateral, com expressão regional na bacia. Da mesma forma, o limite superior do Ciclo VII corresponderia também a uma camada de folhelho denominado Marco 10, com distribuição semelhante à unidade do limite inferior. Para essas definições os autores consideraram o poço tipo, 9-FZ-2-AM, executado no Depósito Potássifero de Fazendinha no município de Nova Olinda do Norte, no Amazonas.

Neste trabalho, as fácies carbonáticas-evaporíticas de Autazes são aqui revistas a partir do modelo estratigráfico de sequências conforme os trabalhos de Tucker (1991) Catuneanu (2011) e Warren (2006, 2010). Para tanto, considerou-se a descrição e interpretação das diferentes fácies sedimentares identificadas nas transições entre os Ciclos VI e VII no poço 9-FZ-2-AM, pertencente ao depósito de Fazendinha (Szatmari *et al.*, 1975), e também as correlações estratigráficas com o furo PBAT-14-38, do Depósito de Autazes. A localização desses dois poços é apresentada na figura 1 desta dissertação.

5.2 Sequências deposicionais

A partir da análise de fácies desses poços, e com base na interpretação em sequências e tratos de sistemas, foram definidas duas sequências deposicionais na transição entre os Ciclos VI e VII, na região de Autazes e Fazendinha (Figs. 15 e 16).

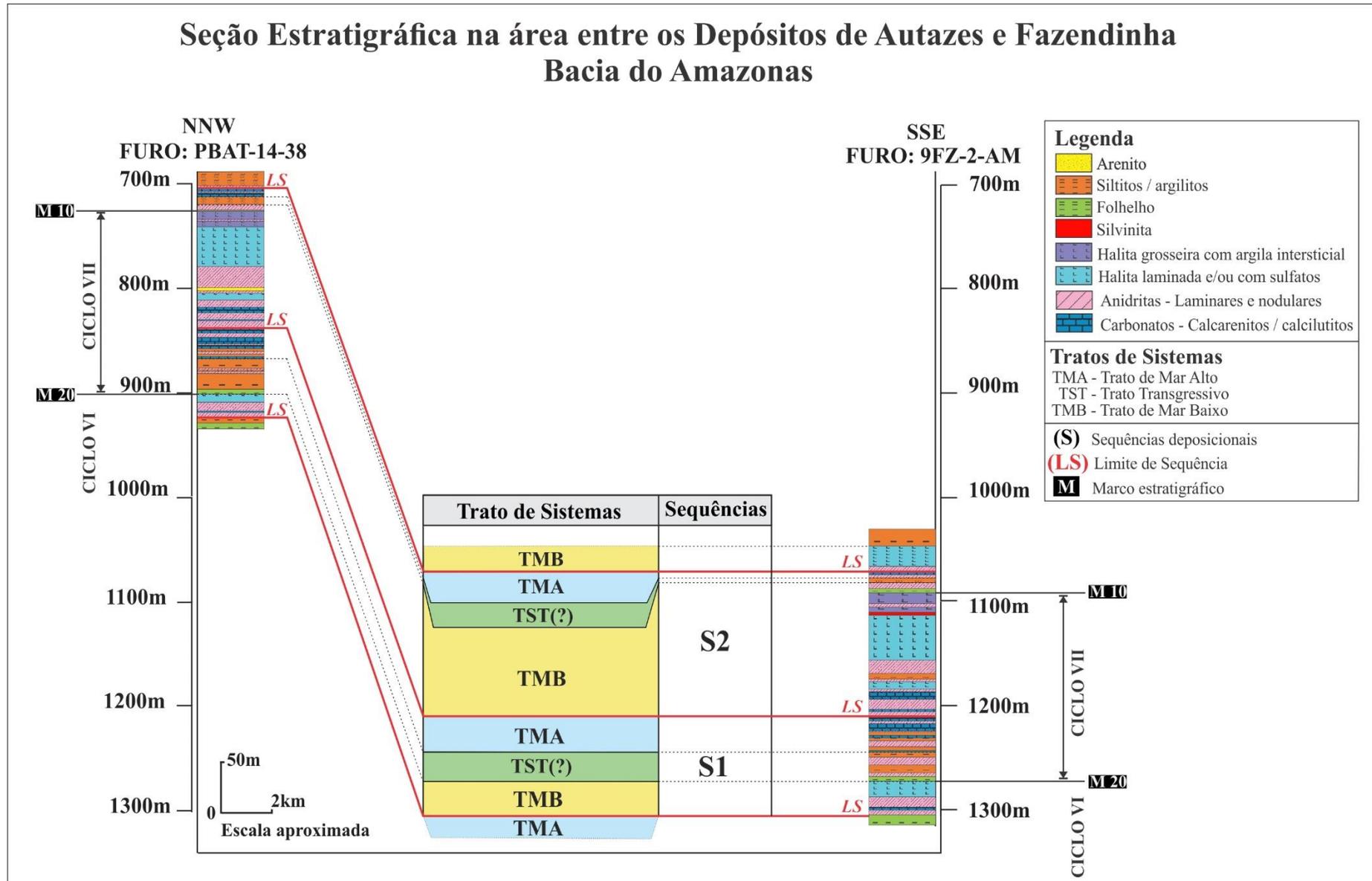


Figura 15. Correlação dos poços PBAT-14-38, no Depósito de Autazes e 9FZ-2-AM, no Depósito de Fazendinha, exemplificando os tratos de sistemas e as sequências deposicionais, nas transições entre os Ciclos VI e VII na Bacia do Amazonas. A fim de facilitar a leitura, os tratos de sistemas foram abreviados como se segue: TMA – Mar Alto; TST – Transgressivo; TMB – Mar Baixo.

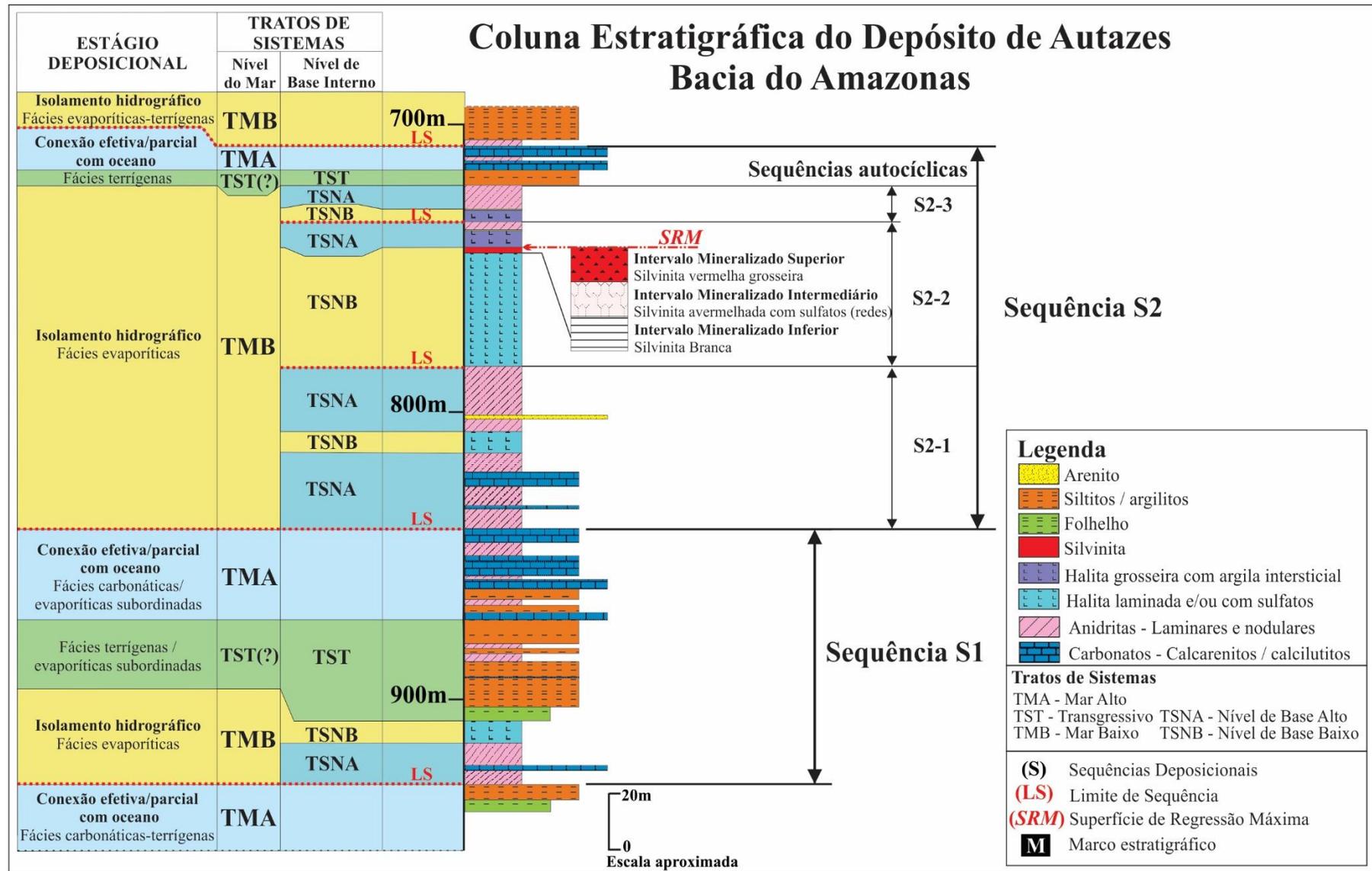


Figura 16. Coluna estratigráfica exemplificando os tratos de sistemas e as sequências deposicionais definidas nas transições entre os Ciclos VI e VII na Bacia do Amazonas, em Autazes. A fim de facilitar a leitura, os tratos de sistemas foram abreviados como se segue: TMA – Mar Alto; TST – Transgressivo; TMB – Mar Baixo. Para as geometrias intrabacinais, tem-se: TSNA: Nível de Base Alto; TSNB: Nível de Base Baixo.

5.2.1 Mar Alto – Sucessões Carbonáticas

As unidades que ocorrem subjacentes à primeira das sequências definidas, denominada Sequência S1, correspondem a folhelhos e siltitos com intercalações de carbonatos (calcarenitos). Essas fácies representam os períodos de deposição carbonática, nos quais a Bacia do Amazonas ainda teria uma conexão superficial efetiva ou parcial com o oceano. Assim, conforme Warren (2006, 2010, 2017), tais sucessões estariam relacionadas às fases anteriores ao isolamento da bacia, com unidades associadas ao Trato de Sistemas de Mar Alto e ausência de deposição evaporítica. O conteúdo de calcarenitos associados às unidades terrígenas seriam, dessa forma, indicativos de progressiva queda do nível do mar, com exposição e retrabalhamento de sucessões carbonáticas plataformais marinho-restritas, num padrão de empilhamento progradacional, no estágio de mar alto tardio (Figs. 15 e 16).

5.3 Sequência Depositional S1

5.3.1 Trato de Sistemas de Mar Baixo (TMB) - Isolamento da bacia.

Estágio de deposição de fácies evaporíticas.

5.3.1.1 Trato de Sistemas de Nível de Base Alto (TSNA) - Estágio de deposição de anidritas

Correspondem a expressivas camadas de anidritas nodulares com nódulos envoltos em matriz silto arenosa marrom, levemente carbonática, além de intercalações de carbonatos (calcarenito fino) e anidritas laminares (Figs. 16 e 17).

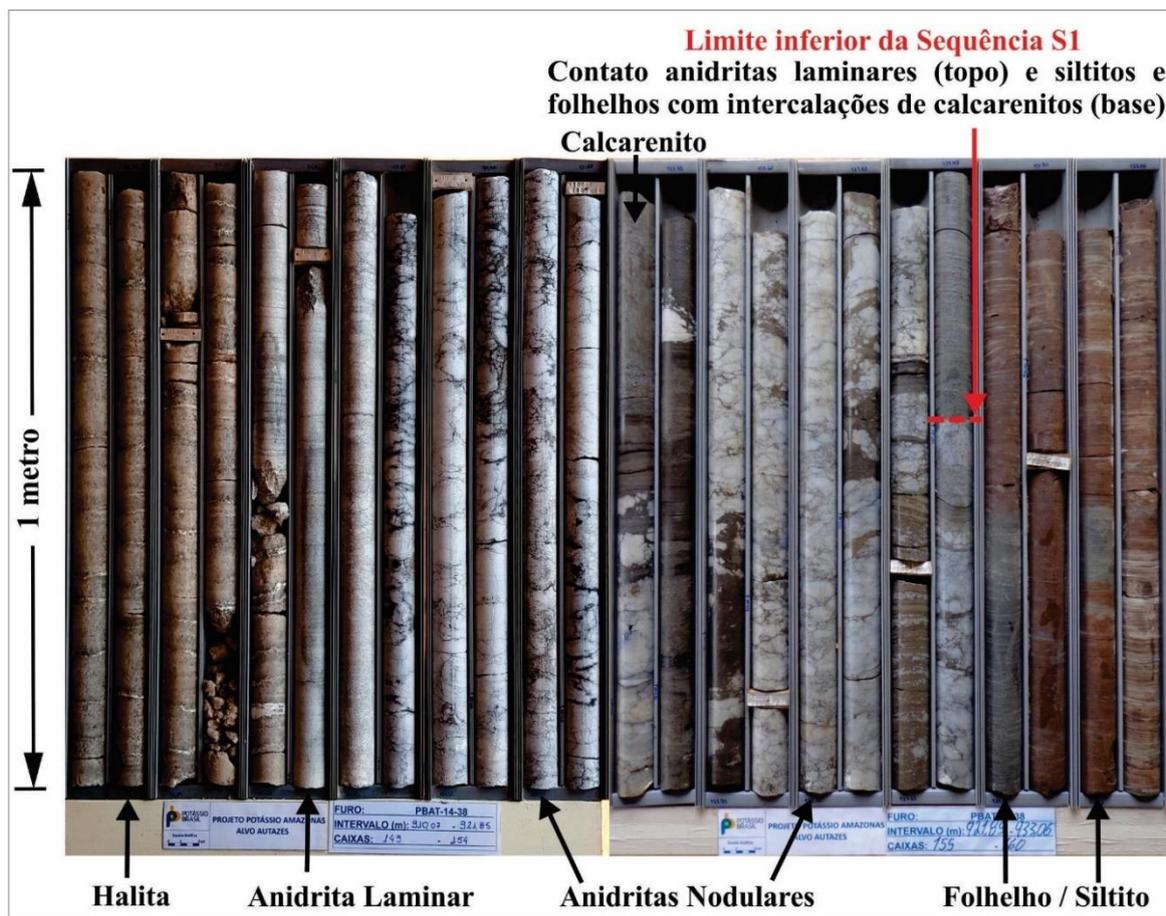


Figura 17. Limite inferior da Sequência S1 definido pela transição das fácies de siltitos e folhelhos com intercalações de calcarenitos no Trato de Sistemas de Mar Alto – TMA, para as fácies de anidritas (nodulares que gradam verticalmente para laminares) no estágio de mar baixo e isolamento da bacia, com hidrologia interna associada ao Trato de Sistemas de Nível de Base Alto (TSNA). Furo PBAT-14-38 do Depósito de Autazes. Profundidades representadas na sequência da foto: 910,07 m a 933,06 m.

Essas sucessões assemelham-se àquelas que ocorrem nas fácies superiores de um ambiente de *sabkha* costeiro, oriundas de processos deposicionais e diagenéticos, nos quais os nódulos de anidritas são desenvolvidos a partir do crescimento expansivo de cristais de sulfato sob um sedimento primário hospedeiro. Em casos extremos o sedimento hospedeiro é deslocado e confinado a meros espaços entre os nódulos de anidrita, com alteração da trama sedimentar original (Kendall, 1978, 2010).

Entretanto, atribui-se à formação dessas rochas, um progressivo aumento da salinidade das águas bacinais, associado ao isolamento da bacia em relação à conexão superficial direta com o oceano. A ocorrência de breves passagens de rochas carbonáticas em meio ao predomínio de intervalos de anidritas, indica o início do isolamento efetivo da bacia, que teria permitido às águas bacinais evoluírem para uma condição de mais alta concentração. Assim, em tal condição, a coluna de salmoura resultante teria alcançado a saturação em sulfato de cálcio e permitido inicialmente a deposição subaquosa de sulfatos laminados. De forma similar ao que ocorre nos

depósitos de *sabkha*, o sobre crescimento dos cristais de sulfato depositados teria, dessa forma, convertido a trama original das lâminas em mosaicos interligados. A generalização desse processo resultaria assim no amplo desenvolvimento dos nódulos de anidrita (Kendall, 1978, 2010). Assim, tais sucessões são representativas do Trato de Sistemas de Nível de Base Alto (TSNA) interno na bacia, com o progressivo aumento da salinidade e saturação da salmoura residual em sulfato de cálcio, que marca o início do isolamento hidrográfico da bacia e o limite inferior da Sequência Depositional S1.

5.3.1.2 Trato de Sistemas de Nível de Base Baixo (TSNB) - Estágio de deposição de halitas

Sobrepostas às anidritas ocorrem halitas com intercalações de lâminas de sulfato (Figs. 7 e 8). Essa variação de fácies representa a progressiva redução do nível de base na bacia e o aumento da salinidade da salmoura residual, atingindo agora a saturação da halita. As halitas dessa sequência possuem granulometria média a grossa e apresentam certa regularidade no espaçamento entre as intercalações de lâminas de sulfato, em um padrão de sucessão rítmica. Essas características em conjunto refletem uma deposição subaquosa a partir de águas basinais com salinidade variável em relação à saturação das halitas, em decorrência de influxos periódicos de águas insaturadas ou de variações sazonais nas taxas de evaporação (Kendall, 1978, 2010; Tucker, 1991). Tais condições são associadas a depósitos de *Saltern* ou de lagos salinos de águas rasas, nos quais os cristais grosseiros de halita são precipitados a partir de uma coluna de salmoura holomicítica, em um estágio de sedimentação correspondente ao Trato de Sistemas de Nível de Base Baixo (TSNB) em relação à hidrologia interna da bacia (Figs. 16 e 17).

5.3.2 Trato de Sistemas Marinho Transgressivo (TST)

Estágio de deposição de fácies terrígenas carbonáticas.

As halitas basais da sequência S1 são sobrepostas por uma camada de folhelho persistente correspondente ao marco estratigráfico 20 na transição dos Ciclos VI e VII, conforme definido por Szatmari *et al.* (1975). Acima do folhelho ocorrem, predominantemente, argilitos e siltitos com intercalações de carbonatos e anidritas nodulares subordinadas. Essa mudança de padrão de fácies (expressivamente evaporíticas para terrígenas) está associada à deposição de sucessões plataformais, num padrão de empilhamento retrogradacional do Trato de Sistemas Marinho Transgressivo, sugestivo de um estágio de início de retomada de conexão, ainda que parcial, com

o oceano. Nesse estágio os únicos evaporitos precipitados correspondem a limitados horizontes de *Saltern/Mudflats* marinho marginais, intercalados com sedimentos marinho plataformais a continentais (Warren 2006, 2010).

5.3.3 Trato de Sistemas de Mar Alto (TMA) - Reconexão da bacia.

Estágio de deposição de fácies carbonáticas marinhas plataformais.

Sobrepostas às unidades anteriores, ocorrem intervalos cada vez mais expressivos de carbonatos (calcilutitos a calcarenitos) intercalados com unidades terrígenas e passagens de anidritas nodulares subordinadas. Tais sucessões representam o estágio de retomada da conexão superficial da bacia com o mar aberto, com o predomínio de rochas carbonáticas associadas a depósitos plataformais marinhos normais, num padrão de empilhamento progradacional do Trato de Sistemas de Mar Alto – (TMA). Da mesma forma que no estágio transgressivo anterior, os únicos intervalos evaporíticos desse período correspondem a estreitos horizontes de anidritas marinho marginais intercalados com as unidades carbonáticas plataformais. Essas sucessões definem o limite superior da Sequência Depositional S1 (Figs. 15 e 16).

5.4 Sequência Depositional S2

5.4.1 Trato de Sistemas de Mar Baixo (TMB) - Isolamento da bacia.

Estágio de deposição de fácies evaporíticas.

A segunda sequência definida, denominada S2, corresponde a um modelo evolutivo similar a anterior S1, porém com espessuras mais expressivas em relação às unidades evaporíticas. Tais unidades também são preponderantes em relação às demais fácies carbonáticas e terrígenas da sequência, e indicam um acentuado grau de isolamento hidrográfico da bacia nesse período, associado ao Trato de Sistemas de Mar Baixo (TMB), após um novo estágio de perda de conexão com o oceano (Figs. 15 e 16).

Além disso, no espectro evaporítico da Sequência S2, há um amplo predomínio dos sais cloretados, sobretudo das fácies de halitas, além da presença subordinada de sais solúveis na forma de cloretos e sulfatos de potássio. Assim, a sequência é passível da subdivisão em três sequências de ordem mais elevada, associadas a variações autocíclicas de mais alta frequência e mais baixa amplitudes nos níveis de base e concentrações das salmouras residuais na bacia, que

teriam evoluído sem a interferência direta das águas oceânicas, a partir do isolamento hidrográfico. Essas subdivisões serão pormenorizadas nas seções a seguir, bem como o posicionamento estratigráfico da mineralização potássífera de Autazes, objetivo maior deste trabalho.

5.4.1.1 Sequências autocíclicas

Conforme descrito anteriormente, a Sequência Depositional S2 pode ser subdividida em três sequências de mais alta ordem, associadas a variações autocíclicas nos níveis de base e concentrações das salmouras na bacia. Essas sequências teriam evoluído desde depósitos de *Saltern* relacionados a sistemas semiáridos, com a deposição de sais menos solúveis e associações de terrígenos, a sistemas áridos com a deposição de sais mais solúveis em condições extremas de dessecação e de hipersalinidades paleoambientais.

5.4.1.2 Sequência autocíclica S2-1

5.4.1.2.1 Trato de Sistemas de Nível de Base Alto (TSNA) - Estágio de deposição de anidritas

A primeira das sequências autocíclicas definidas, S2-1, corresponde ao intervalo estritamente evaporítico, cujo limite inferior é definido pela transição das fácies de carbonatos, unidades terrígenas e anidritas subordinadas do Trato de Mar Alto tardio da Sequência S1, para o amplo predomínio de depósitos evaporíticos de *Saltern* intercalados com sedimentos plataformais. Esses depósitos são representados por anidritas laminares a nodulares, intercaladas com carbonatos, e correspondem à deposição sob condição de hidrologia interna associada ao Trato de Sistemas de Nível de Base Alto (TSNA), porém em queda, com progressivo aumento da salinidade das salmouras residuais, após o isolamento hidrográfico da bacia (Fig. 18).

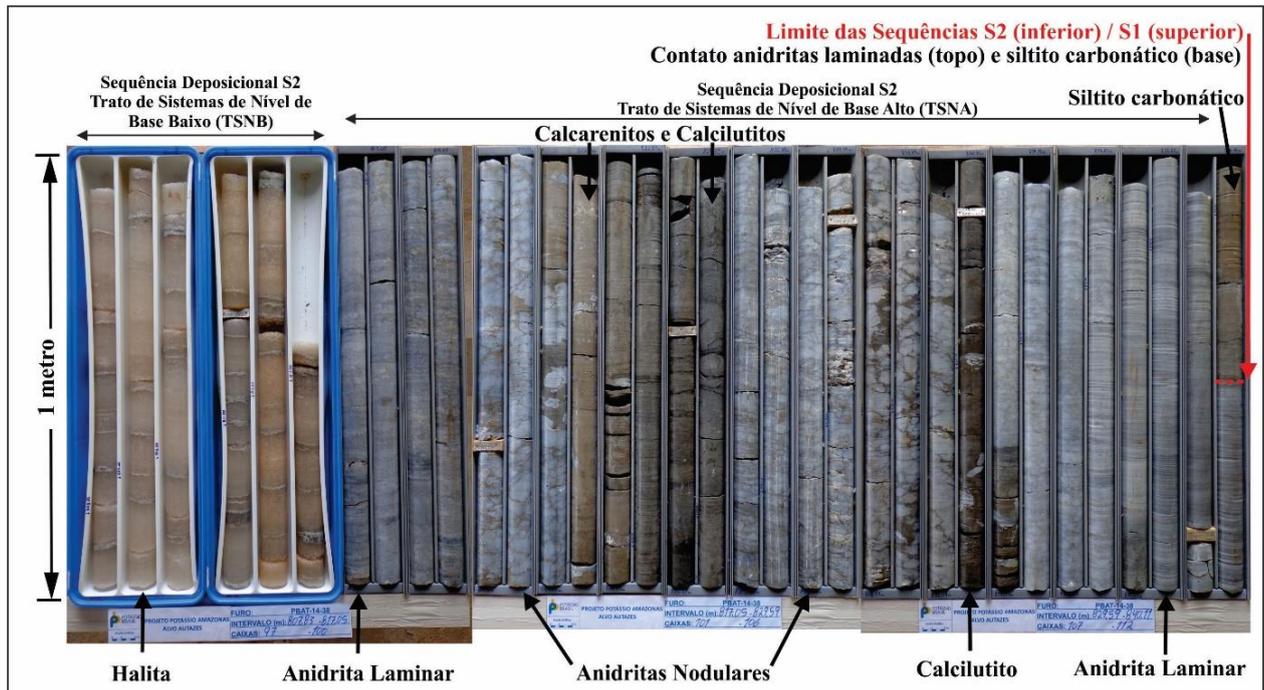


Figura 18. Limite inferior da Sequência S2 (sequência autocíclica S2-1), definido pela transição das fácies de rochas carbonáticas no Trato de Sistemas de Mar Alto – TMA tardio, para as fácies de anidritas (laminares a nodulares) no estágio de mar baixo e isolamento da bacia, com hidrologia interna associada ao Trato de Sistemas de Nível de Base Alto (TSNA). Profundidades representadas na sequência da foto: 807,83 m a 840,11 m.

5.4.1.2.2 Trato de Sistemas de Nível de Base Baixo (TSNB) – Estágio de deposição de halitas

As fácies de anidritas são sobrepostas por halitas finamente laminadas com intercalações de lâminas de sulfato (Figs. 16 e 18). Essa textura reflete uma deposição subaquosa a partir de águas bacinais altamente concentradas em relação à saturação da halita, porém de composição variável associada a influxos de águas diluídas ou a variações sazonais nas taxas de evaporação (Kendall, 1978, 2010; Tucker, 1991). Além disso, a variação de fácies representada pela ocorrência de anidritas nodulares em horizontes nos quais as anidritas laminares são espessas, ou ocorrem imediatamente abaixo das camadas de halita, sugere que a formação dos nódulos foi associada a um progressivo aumento da salinidade (Kendall, 1978, 2010). Esse incremento na concentração das salmouras residuais, e conseqüente início da deposição de halita, representa o estágio de queda do nível de base interno da bacia, associado ao Trato de Sistemas de Nível de Base Baixo (TSNB).

5.4.1.2.3 Trato de Sistemas Transgressivo intrabacinal (TSTi)

Conforme o modelo proposto por Warren (2006, 2010) o preenchimento generalizado de halita nesse estágio teria sido induzido pela redução da permeabilidade da superfície deposicional com capacidade para suportar a coluna de salmoura saturada sobrejacente. As halitas que ocorrem no topo dessa sequência são marcadas por incipiente conteúdo argiloso nos interstícios dos cristais, que agora passam a ser bem desenvolvidos, conferindo à rocha um aspecto cristalino com textura do tipo mosaico suturado (Figs. 19).

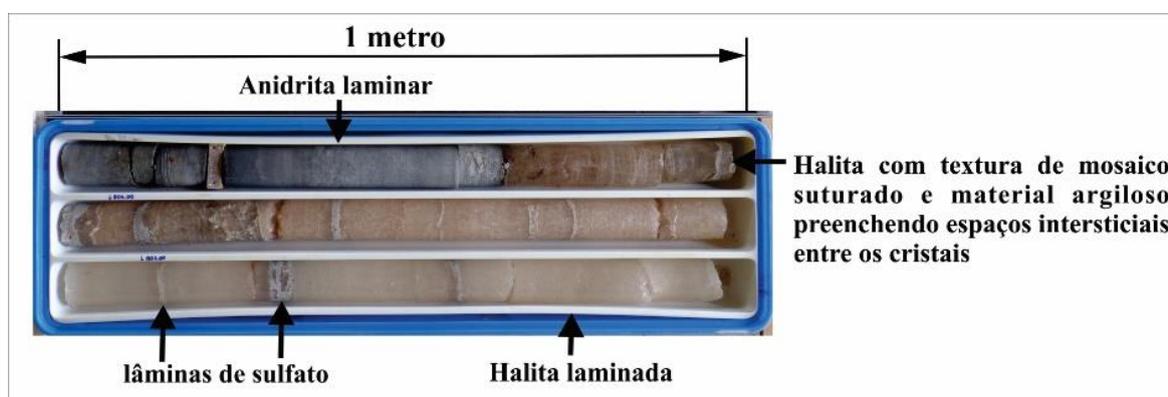


Figura 19. Contato entre halitas cristalinas com textura do tipo mosaico suturado e presença de material argiloso preenchendo os interstícios entre os cristais (base) e anidritas laminares (topo) que marca a transição do estágio de nível baixo para uma progressiva elevação do nível de base, no estágio transgressivo intrabacinal da Sequência autocíclica S2-1 (Sequência S2). Furo PBAT-14-38 do Depósito de Autazes. Profundidades representadas na sequência da foto: 805,00 m a 807,83 m.

Nesse tipo de textura os cristais individuais exibem limites curvos que tendem a convergir para uma junção tripla com ângulos de aproximadamente 120° e as impurezas intersticiais ficam concentradas ao longo dos limites entre os cristais. A textura de mosaico suturada é comparável à textura de mosaico equigranular poligonal que se forma na cristalização de metais, nos quais os grãos tendem a otimizar seu tamanho, forma e orientação (Warren, 2006). Essas características refletem uma variação na composição das águas baciais, ainda no campo de saturação da halita, porém menos concentradas que as que originaram as sucessões basais, a ponto de permitir uma deposição subaquosa mais lenta e com um maior desenvolvimento dos cristais no topo (Kendall, 1978, 2010). Além disso, a presença do conteúdo argiloso associado a esses sais, indica uma progressiva elevação do nível de base na bacia, associado ao Trato de Sistemas Transgressivo intrabacinal (TSTi).

5.4.1.2.4 Trato de Sistemas de Nível de Base Alto (TSNA) - Estágio de transição entre “preenchimento e transbordo”

Sobrepostas as halitas, ocorre uma espessa sucessão de anidritas predominantemente laminares, com laminações milimétricas e passagens arenosas. Também estão presentes vesículas piramidais preenchidas por halita, dispersas e disseminadas entre os horizontes de anidritas (Fig 20).

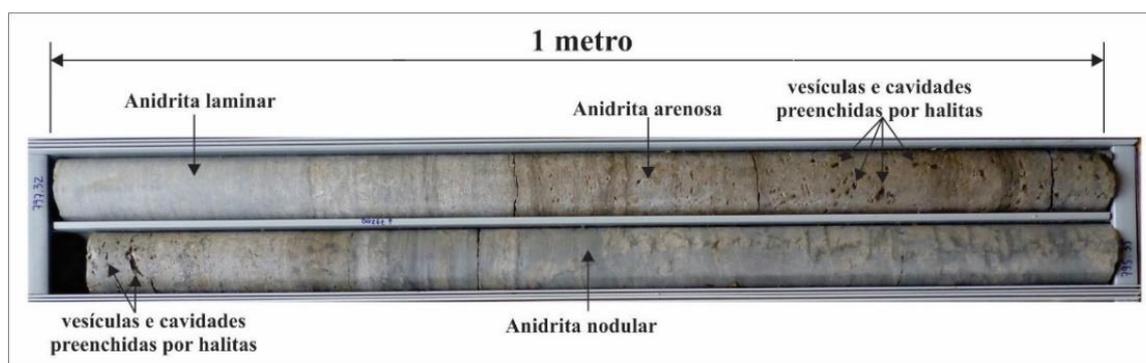


Figura 20. Anidritas nodulares a laminares, com passagens arenosas e vesículas e cavidades preenchidas por halita. Furo PBAT-14-38 do Depósito de Autazes. Profundidades representadas na sequência da foto: 795,35 m a 797,32 m.

Tucker (1991) interpretou essa feição como indicativa de textura selenítica associada a uma deposição subaquosa a partir de águas baciais hipersalinas relativamente rasas. Nesse sistema, os cristais primários seriam precipitados como gipso selenítico de crescimento basal e, posteriormente, substituídos por pseudomorfos de halita dispersos em uma matriz de anidrita de granulometria fina.

Assim, conforme o modelo de Warren (2006, 2010) as variações mineralógicas representadas pela mudança de fácies de halitas para essas sucessões de anidritas sobrepostas, marcariam o estágio de sedimentação sob um regime hidrológico de “preenchimento e transbordo” correspondente ao Trato de Sistemas de Nível de Base Alto em relação às geometrias intrabaciais. Em tais condições, a deposição subaquosa teria ocorrido a partir de águas baciais mais diluídas que evoluíram para a saturação em sulfato de cálcio em um sistema semiárido que tende a contar com parcelas cada vez mais significativas de águas meteóricas. Essas sucessões definem o limite superior da sequência autocíclica S2-1.

5.4.1.3 Sequência autocíclica S2-2

5.4.1.3.1 Trato de Sistemas de Nível de Base Baixo (TSNB) – Estágio de deposição de halitas e sais de potássio

A segunda das sequências autocíclicas definidas, S2-2, corresponde à generalização dos processos deposicionais operantes na bacia após o seu isolamento hidrográfico, agora, porém, a partir de salmouras mais concentradas que resultaram no predomínio das fácies representadas por sais cloretados, sobretudo por halitas. É também nessa sequência que estão hospedados os sais solúveis na forma de cloretos e sulfatos de potássio que definem a mineralização do Depósito de Autazes. Antecipa-se assim, que a deposição de tais sucessões salinas tenha ocorrido sob condições de dessecação das águas baciais, associadas à deposição subaquosa dos sais em depósitos de saltern, sob a influência de um sistema árido operante na bacia nesse período, que permitiu a evolução das salmouras para estágios de hipersalinidade.

Assim, a transição mineralógica das fácies de anidritas que definem o limite superior da Sequência S2-1, para as halitas sobrepostas da base da Sequência S2-2, indicam uma acentuada e progressiva queda do nível de base na bacia e aumento nas concentrações das salmouras residuais, correspondente ao Trato de Sistemas de Nível de Base Baixo (Figs. 16 e 21).

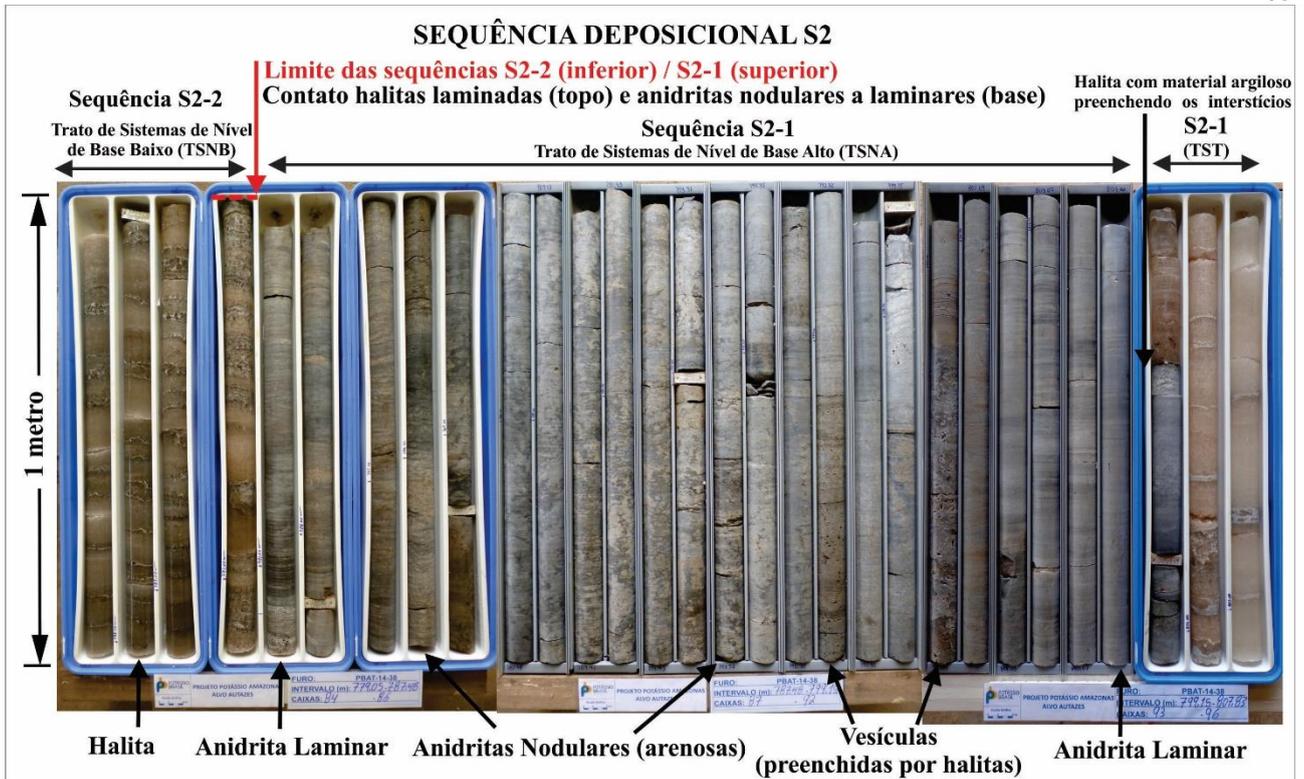


Figura 21. Limite inferior da Sequência autocíclica S2-2 (Sequência S2), definido pela transição das fácies de anidritas do topo da Sequência S2-1, para as halitas sobrepostas do Trato de Sistemas de Nível de Base Baixo (TSNB). Furo PBAT-14-38 do Depósito de Autazes. Profundidades representadas na foto: 779,05 m a 807,83 m.

As texturas das halitas na base da Sequência S2-2 com cristais de granulometria média a grossa, aleatoriamente orientados e intercalados com redes e lâminas de sulfatos, indicam que inicialmente a deposição foi marcada por condições de precipitação em uma coluna de salmoura holomíctica, com salinidades transitórias entre a saturação da halita e dos sulfatos de cálcio (Warren, 2006, 2016). Além disso, uma característica marcante das halitas no limite inferior da Sequência S2-2, amplamente presente nas halitas basais do Depósito de Autazes, é a textura *Chevron* formada pelo acúmulo de cristais prismáticos e/ou piramidais de halitas, cujos vértices são voltados para o topo da seqüência (Fig. 22).

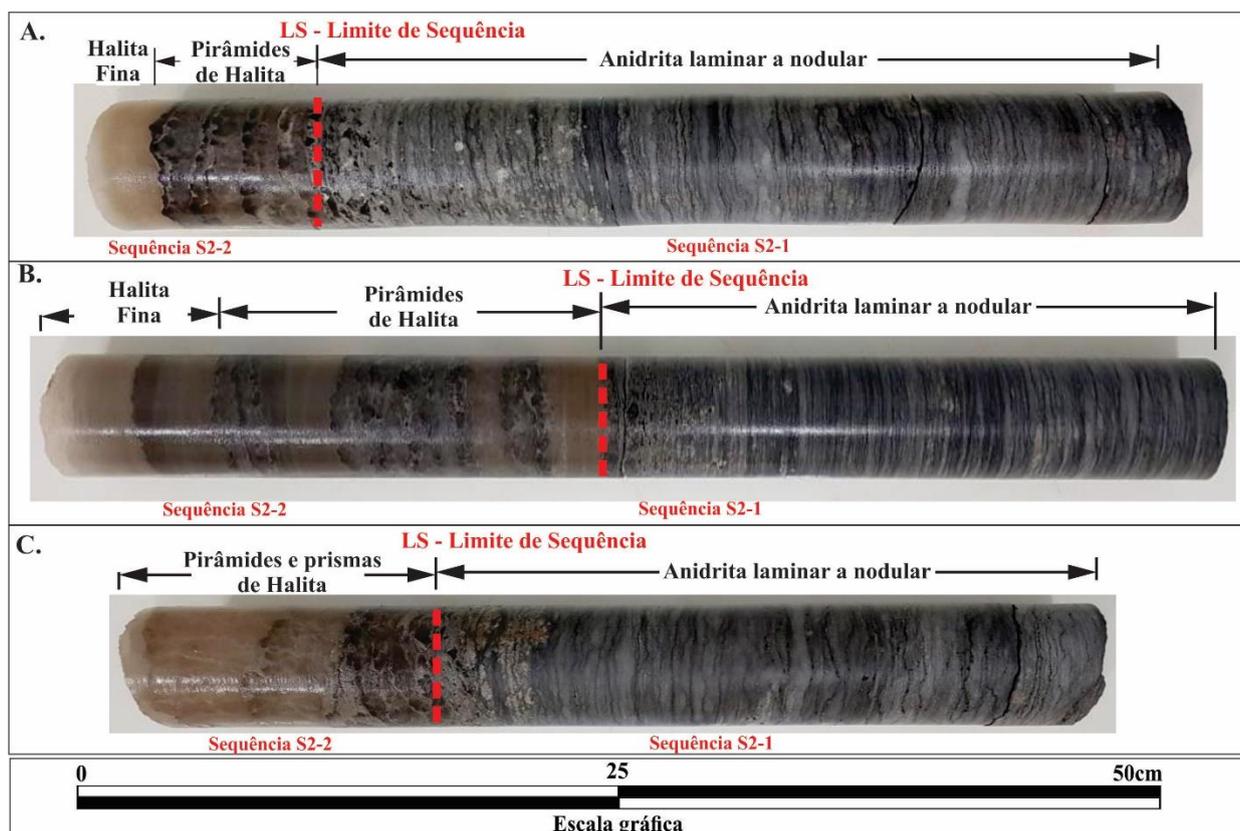


Figura 22. Amostras de testemunhos de sondagem do Depósito de Autazes com exemplos de halitas grosseiras na base da Sequência S2-2, formadas pelo acúmulo de cristais prismáticos e/ou piramidais de halitas. A. Furo PBAT-13-33 do Depósito de Autazes. Profundidades representadas na foto: 778,66 m a 779,15 m. B. Furo PBAT-12-11 do Depósito de Autazes. Profundidades representadas na foto: 868,49 m a 868,17 m. C. Furo PBAT-11-09 do Depósito de Autazes. Profundidades representadas na foto: 880,46 m a 880,87 m.

Essa textura é associada à formação de acumulados de cristais na base das sucessões salinas e precipitados a partir de colunas de salmouras rasas hipersalinas. Em tais condições, quando as salinidades das águas superficiais são adequadas e não perturbadas por ações de ventos ou ondas, os cristais podem crescer continuamente como “jangadas flutuantes” sustentadas pela tensão superficial na interface ar-salmoura. Esses cristais formados em águas calmas podem atingir dimensões de centímetros a decímetros, antes de afundarem e serem depositados na superfície deposicional. Assim, os cristais podem acumular-se como camadas sucessivas de prismas alinhados ao crescimento, ou podem formar-se como sobrecrecimentos sintaxiais em “jangadas” de halitas dispersas e outros cristais acumulados na superfície deposicional. Como em todos os cristais isotrópicos que crescem em condições de intensa aglomeração, os cubos dos cristais de halita cujos vértices apontam para cima na salmoura crescem mais rapidamente que os cristais com as faces cristalinas voltadas para cima. Assim, os cristais prismáticos com formas em "V" apontando para cima serão rapidamente dominantes e criarão uma textura *Chevron* alinhada que caracteriza muitas crostas de halita subaquosas (Warren, 2006, 2016).

As sucessões sobrepostas aos cristais grosseiros da base correspondem a halitas laminadas finas, nas quais as redes de sulfatos vão se tornando cada vez mais escassas e restritas a redes enterolíticas envolvendo os cristais de halita em direção ao topo da sequência. Outra característica marcante e ascendente é a textura dos cristais de halita que gradam de prismáticos e grosseiros na base da sequência, a microcristalinos em direção ao topo conferindo à rocha um aspecto leitoso. Essas características são perpetuadas até o início da deposição dos sais de potássio que definem a mineralização do Depósito de Autazes e que é composta por três horizontes bem definidos, que serão detalhados a seguir: intervalo inferior, caracterizado por silvinita branca leitosa; intervalo intermediário, com silvinita de granulometria fina a média e redes de sulfatos; e intervalo mineralizado superior com silvinita vermelha grosseira (Fig. 16).

Assim, devido ao aumento da perda de porosidade da superfície deposicional, com a progressiva precipitação dos cristais de halita na base da sequência, a coluna de salmoura subjacente teria suportado inicialmente uma duradoura saturação em halita sob uma condição holomíctica. Em seguida, a evolução desse processo teria resultado na drástica perda de porosidade da superfície deposicional, que, aliada ao intenso rebaixamento evaporativo do nível de base da bacia, sob influência de um sistema árido, teria permitido às salmouras atingirem condições de hipersalinidade e características meromícticas, com estratificação por densidade. Tal condição permitiu o preenchimento generalizado da bacia por halitas finas laminadas e, em último estágio, pelos sais de potássio que definem o limite superior do Trato de Sistemas de Nível de Base Baixo (TSNB).

5.4.1.3.2 Trato de Sistemas de Nível de Base Alto (TSNA) - Estágio de transição entre “preenchimento e transbordo”

Acima da mineralização, os sais assumem novamente texturas mais grosseiras, representados por um espesso intervalo de halitas impuras argilosas, com as argilas ocupando os espaços intersticiais. Essas rochas são sobrepostas por uma fina camada de folhelho que grada verticalmente para uma camada de anidrita de espessura métrica com distribuição regular ao longo do Depósito de Autazes (Kiefer *et al.*, 2019).

Assim, as variações mineralógicas representadas por essas mudanças de fácies indicam inicialmente uma progressiva elevação do nível de base na bacia associada ao Trato de Sistemas Transgressivo intrabacinal que, em seguida, teria alcançado o estágio de sedimentação sob um regime hidrológico de “preenchimento e transbordo” correspondente ao Trato de Sistemas de

Nível de Base Alto em relação às geometrias intrabacinais. Nesse estágio, as salmouras teriam evoluído para salinidades mais baixas que àquelas que propiciaram a precipitação das halitas e sais de potássio na base da sequência, possivelmente agora associadas a uma transição de um sistema árido para um semiárido, com significativos aportes de águas meteóricas diluídas e materiais terrígenos argilosos.

Dessa forma, o modelo proposto para evolução da Sequência S2-2 corresponde novamente a um depósito típico de *saltern*, no qual a coluna de salmoura inicialmente holomíctica e com nível de base em estágio de queda teria proporcionado a precipitação dos cristais grosseiros na base da sequência. O posterior predomínio das rochas com textura fina, seria por sua vez, o resultado de um progressivo aumento da salinidade das salmouras residuais, devido à queda do nível de base na bacia, com as taxas de evaporação superando os influxos em um sistema cada vez mais árido. Além disso, devido ao aumento da perda de porosidade na superfície deposicional, a coluna de salmoura teria evoluído sob uma condição meromíctica, na qual as zonas mais profundas, densas e de mais altas concentrações salinas permitiriam a deposição prolongada de sais cada vez mais solúveis. Essa condição teria permitido o preenchimento da bacia com camadas de sais de texturas finas, precipitados a partir de uma coluna de salmoura que variou da saturação das halitas até os sais mais solúveis de potássio na base da mineralização potassífera. A evolução geoquímica da salinidade das salmouras nesse estágio deposicional pode ser acompanhada pelos perfis de teores de bromo nos sais da base dessa sequência.

5.4.1.3.3 Geoquímica do Bromo – Evolução da paleosalinidade

A compreensão da gênese dos depósitos evaporíticos está ligada à avaliação dos teores de bromo, uma vez que a concentração desse elemento em rochas salinas pode ser utilizada como critério genético, possibilitando não apenas reconhecer a origem marinha, mas também indicar a paleossalinidade e as importantes variações de concentração das águas bacinais. Durante a evaporação das salmouras, há a conservação do bromo na sua forma iônica: brometo (Br^-). Com um raio iônico de $1,96 \text{ \AA}$ ($1,96 \times 10^{-10} \text{ m}$), esse íon substitui facilmente o cloro ($1,81 \text{ \AA} = 1,81 \times 10^{-10} \text{ m}$) na rede cristalina dos sais cloretados (Warren, 2006). Porém, como a solubilidade do brometo é elevada, apenas uma fração desse íon será precipitada nos retículos cristalinos dos cristais de halita ou silvita, em substituição ao cloro. Tal condição conduz ao gradual aumento da concentração de brometo na salmoura residual. Assim, conseqüentemente, haverá também um aumento gradual do teor do brometo na sequência salina depositada (Valiashko, 1956).

De fato, tal condição de aumento progressivo da salinidade das águas bacinais ao longo das halitas laminadas finas e sais de potássio da Sequência S2-2, é claramente revelado, a partir da análise dos perfis de concentrações de Bromo ao longo dos furos do Depósito de Autazes. Esses perfis foram construídos a partir dos teores de Bromo (Br) e Cloro (Cl) em amostras salinas dessa sequência, obtidos por meio de análises por ICP-MS (Espectrometria de Massa com Plasma Indutivamente Acoplado) nos laboratórios do *Saskatchewan Research Council* (SRC) em Saskatchewan, no Canadá. Os perfis indicam um progressivo aumento nos teores de bromo ao longo das halitas finas laminadas, com as máximas concentrações sendo atingidas nos intervalos correspondentes aos horizontes da mineralização potássífera (Fig. 23).

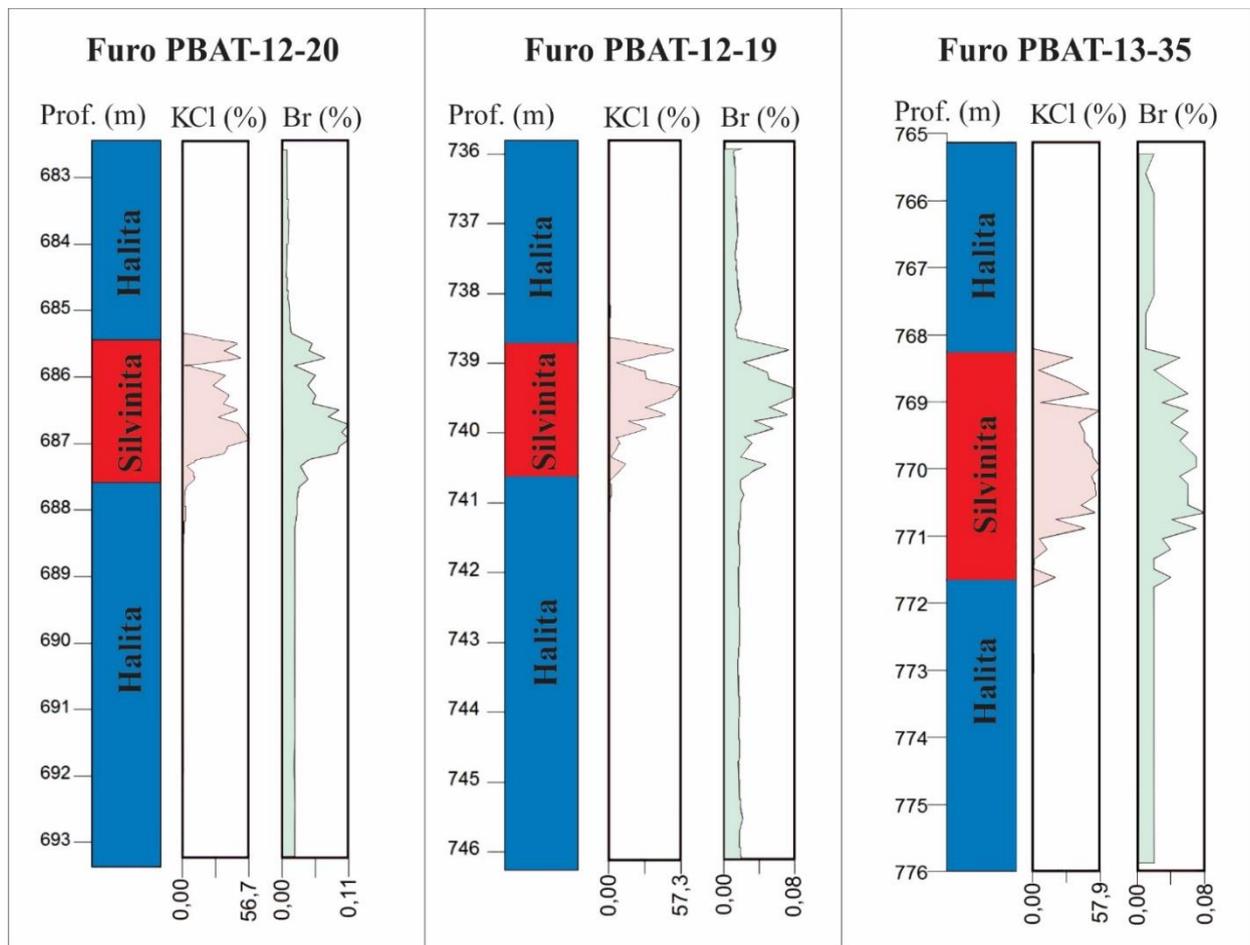


Figura 23. Perfis das concentrações de Bromo (Br %) ao longo da seção salina hospedeira da mineralização em alguns dos furos do Depósito de Autazes (modificado de Potássio do Brasil, 2014).

Além disso, as oscilações da salinidade ao longo da evolução geoquímica das salmouras residuais, são refletidas pelas assembléias mineralógicas e pelas variações texturais dos sais precipitados nas sequencias salinas (Kendall, 1992; Warren, 2006). Tais características podem ser reveladas por análises microscópicas de detalhes em amostras salinas por QEMSCAN. Essa sigla é a abreviação do termo em inglês para avaliação quantitativa de minerais por microscopia

eletrônica de varredura, uma solução automatizada integrada de mineralogia e petrografia que fornece análises quantitativas de minerais, rochas e materiais artificiais.

5.4.1.3.4 Análises por QEMSCAN

A precipitação dos sais na base da Sequência S2-2, a partir de uma coluna de salmoura meromítica, submetida à um progressivo aumento de salinidade, parece ter perdurado até a deposição do horizonte intermediário da mineralização potássífera. Tal condição é revelada por meio das análises microscópicas de detalhe por QEMSCAN efetuadas nos laboratórios da SGS Mineral Services no Canadá, em amostras de testemunhos de sondagem oriundas dessa seção da mineralização no Depósito de Autazes. Essas análises indicam que nesse horizonte a composição mineralógica é transicional entre silvinita de granulometria fina a média e redes de sulfatos associados (Fig. 24).

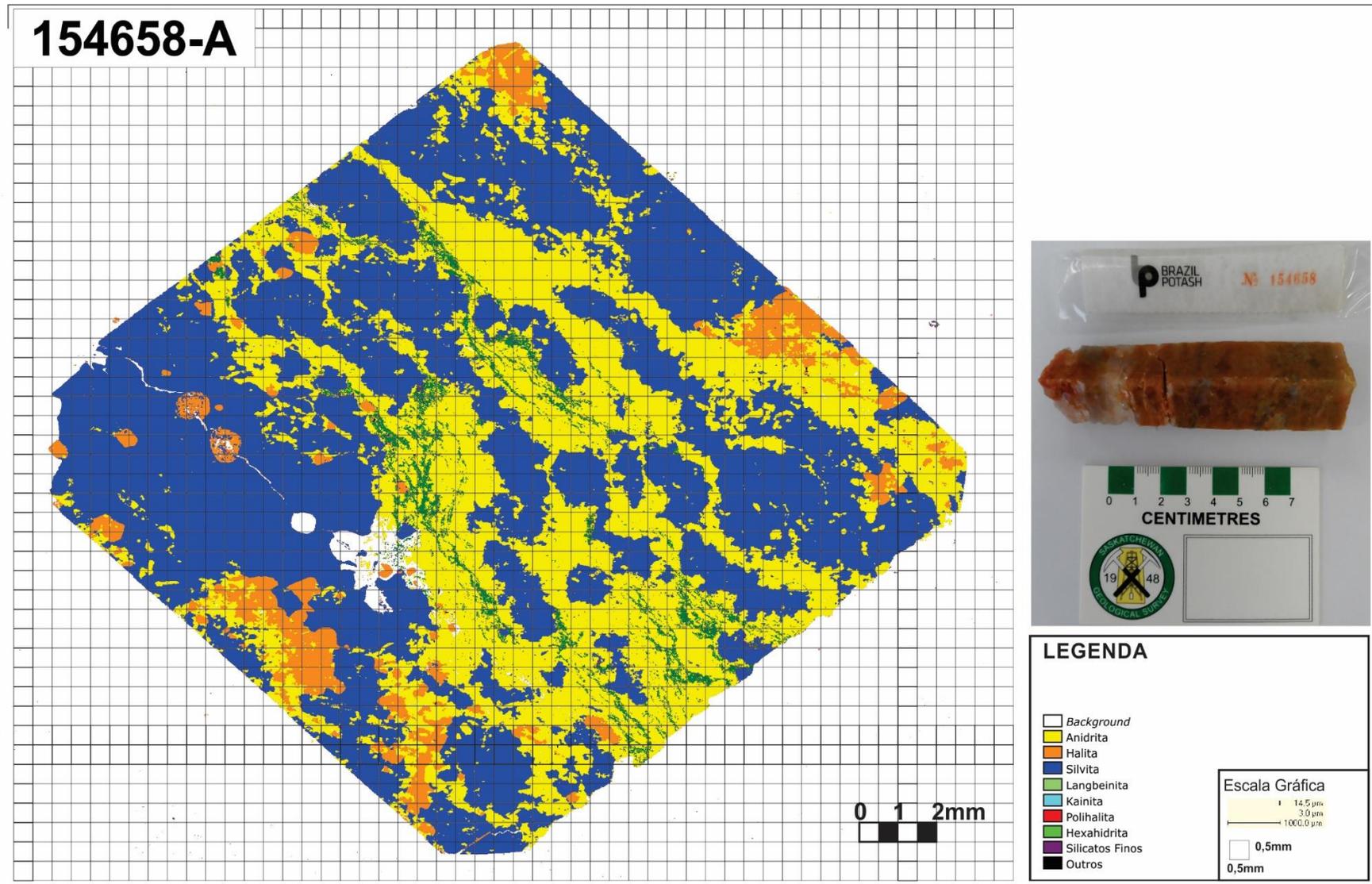


Figura 24. Principais fases minerais identificadas na análise por Qemscan. Furo PBAT-13-28 do Depósito de Autazes. Profundidades da amostra analisada: 847,89 m a 848,00 m. (modificado de SGS, 2014).

Assim, a partir da avaliação quantitativa dos minerais presentes, bem como da relação entre eles reportadas por essas análises, é possível identificar a presença cada vez mais expressiva de cristais grosseiros de anidritas em direção ao topo da mineralização. Essa condição é indicativa de que a precipitação a partir de uma coluna de salmoura meromíctica na base da Sequência S2-2 sob condição de dessecação e redução do nível de base é progressivamente substituída para uma coluna de salmoura em condições mais holomícticas, inicialmente ainda com profundidades extremamente rasas, porém com nível de base em elevação. Tal condição tem expressão máxima nas silvinitas vermelhas grosseiras do intervalo mineralizado superior, as quais também exibem indícios de cristalização diagenéticas secundárias de halitas grosseiras, além de reduções significativas dos teores de potássio em relação aos intervalos subjacentes.

Essas variações texturais e composicionais marcam também o estágio final de preenchimento da bacia por depósitos hipersalinos de *Saltern* em sistemas áridos, para um estágio seguinte de preenchimento por halitas com cristais prismáticos grosseiros com significativas concentrações de argilas nos espaços intersticiais. Esses depósitos sobrejacentes estariam associados a sistemas semiáridos que contariam agora com maiores volumes de águas meteóricas e aportes terrígenos na composição das salmouras bacinais. Essa condição tem expressão máxima na deposição de uma fina camada de folhelho sobreposta às halitas argilosas, que grada em seguida para uma camada de anidrita de espessura métrica, correspondentes ao Trato de Sistemas de Nível de Base Alto e ao limite superior da Sequência S2-2 (Fig. 16).

5.4.1.4 Sequência autocíclica S2-3

A terceira Sequência autocíclica definida, S2-3, corresponde à continuidade do processo de deposição em depósitos de *Saltern* associados a sistemas semiáridos, com as águas meteóricas representando significativas parcelas na formação das águas bacinais. Assim, as fácies basais dessa sequência correspondem a halitas grosseiras com materiais argilosos intersticiais, depositadas inicialmente a partir de um novo estágio de redução evaporativa do nível de base na bacia, numa coluna de salmoura holomíctica que teria permitido misturas de águas de diferentes densidades e concentrações ao longo da profundidade. Essas halitas são caracterizadas pela presença expressiva de cristais prismáticos distribuídos aleatoriamente e frequentemente associados com intercalações de anidritas, que representam as flutuações de saturação da salmoura ao longo do preenchimento da bacia no Trato de Sistemas de Nível de Base Baixo (TSNB).

Em seguida, novamente tal condição de preenchimento generalizado por halitas na base da sequência teria resultado na redução da permeabilidade da superfície deposicional. Esse processo, juntamente com aportes de águas meteóricas diluídas, teria permitido uma progressiva elevação do nível de base na bacia, inicialmente associado ao Trato de Sistemas Transgressivo intrabacinal. Assim as halitas basais da Sequência S2-3 são sucedidas por uma camada de folhelho persistente correspondente ao marco estratigráfico 10 que marca o topo do Ciclo VII, conforme definido por Szatmari *et al.* (1975). Sobreposta ao folhelho ocorre uma camada de anidrita, que em conjunto representam as fácies do estágio de sedimentação sob um regime hidrológico de “preenchimento e transbordo” correspondente ao Trato de Sistemas de Nível de Base Alto, no limite superior da sequência S3-2 (Fig. 16).

5.4.2 Trato de Sistemas de Mar Alto (TMA) - Reconexão da bacia.

Estágio de deposição de fácies carbonáticas marinhas plataformais.

Acima das unidades evaporíticas do Trato de de Mar Baixo (TMB) ocorre uma nova sucessão de rochas carbonáticas (calcarenitos) associadas a passagens de anidritas que representam o último estágio de retomada da conexão superficial da bacia com o mar aberto e estabelecimento do Trato de Sistemas de Mar Alto carbonático (TMA). Essas sucessões carbonáticas plataformais definem o limite superior da Sequência Depositional S2 (Fig. 16).

Sobreposta a esses horizontes, uma nova sequência deposicional parece ter sido iniciada, com depósitos de halitas grosseiras identificadas no Depósito de Fazendinha. Essa sequência foi definida por Szatmari *et al.* (1975), como o Ciclo VII A, conforme a metodologia cicloestratigráfica adotada por esses autores. Entretanto, essas unidades correspondem à uma limitada distribuição espacial, sobretudo no Depósito de Autazes, com escassas ocorrências identificadas em alguns furos de sondagem, que gradam, na maior parte das vezes, a variações laterais de fácies, representadas por uma expressiva camada de siltitos carbonáticos, que estariam associados ao assoreamento final da bacia evaporítica (Fig. 16).

6-MODELO EVOLUTIVO PARA AS SEQUÊNCIAS DEPOSICIONAIS DEFINIDAS NA ÁREA DO DEPÓSITO DE AUTAZES

A figura 25 a seguir resume as características do modelo deposicional proposto para as duas sequências identificadas na área do Depósito de Autazes. Esse modelo corresponde à evolução de um sistema marinho epicontinental que teria coberto grandes extensões do interior continental com águas rasas, nos estágios de desenvolvimento das sucessões carbonáticas plataformais do Trato de Mar Alto, para os estágios de deposição evaporítica associados ao isolamento hidrográfico da bacia com o desenvolvimento de depósitos de *saltern*, do Trato de Mar Baixo.

Assim, nesse processo, os depósitos evaporíticos teriam sido desenvolvidos sem a influência direta das águas oceânicas, com as suas geometrias maiores refletindo interações contínuas com o clima operante na bacia e as geometrias internas, e de menor escala, refletindo as variações autocíclicas nos níveis de base da bacia, a partir das precipitações das fácies salinas.

Além disso, duas variações nesse modelo são também identificadas: (i) depósitos evaporíticos de *Saltern* desenvolvidos sob a influência de sistemas semiáridos, com deposição de fácies de halitas, por vezes associadas a terrígenos e sais menos solúveis representados por anidritas; (ii) depósitos evaporíticos de *Saltern* desenvolvidos sob a influência de sistemas áridos, com a associação de fácies de halitas e de sais solúveis subordinados na forma de cloretos e sulfatos de potássio, depositados em condições de hipersalinidade. O primeiro caso é característico da Sequência S1 e das Sequências autocíclicas S2-1 e S2-3, da Sequência S2. O segundo caso representa o modelo que teria operado na bacia durante a deposição da Sequência autocíclica S2-2 e que hospeda a mineralização potássífera do Depósito de Autazes (Fig 25).

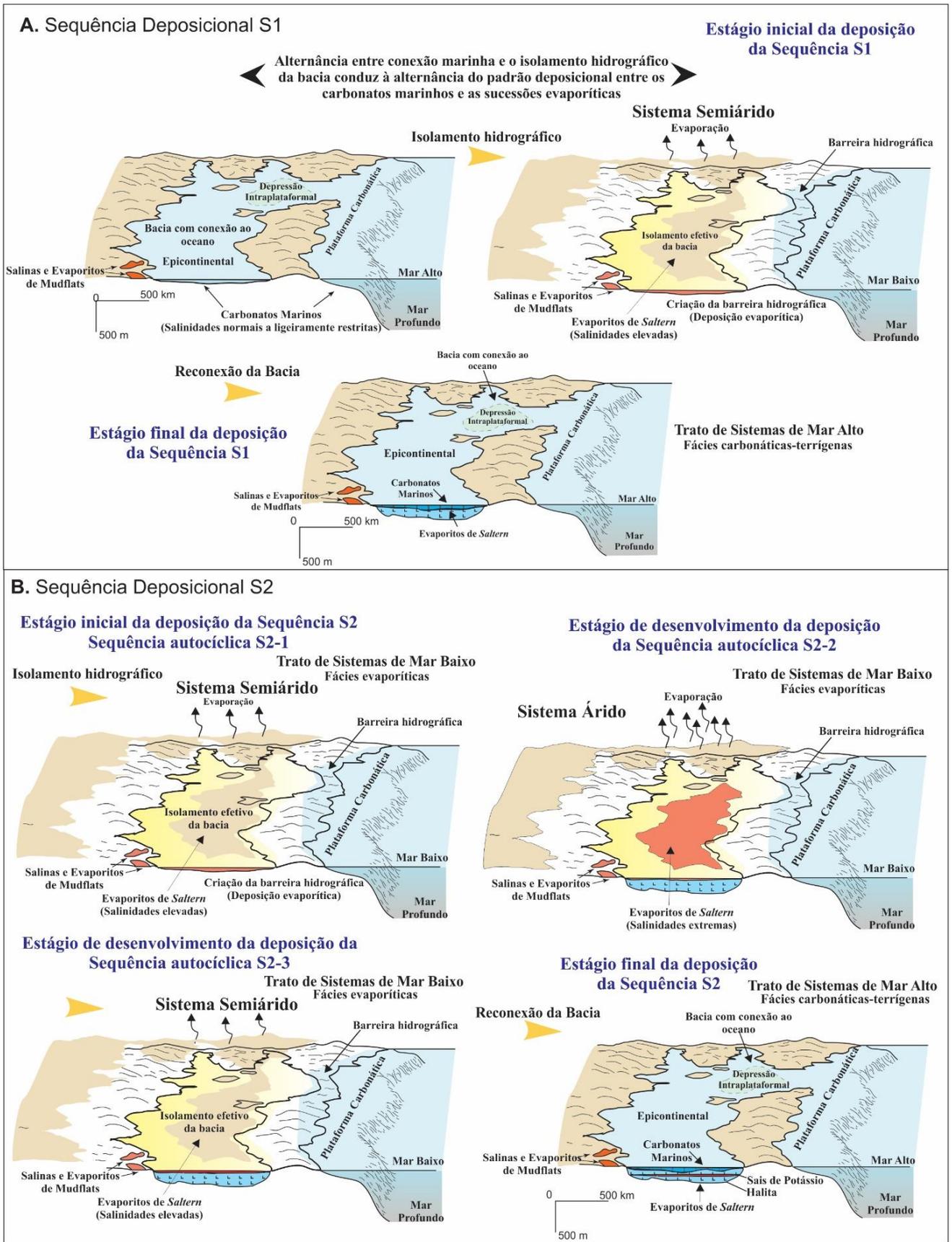


Figura 25. Modelo proposto para a deposição das sucessões carbonáticas evaporíticas a Bacia do Amazonas em Autazes (Adaptado de Warren, 2017). **A.** Sequência Depositional S1, com estágios de conexão e isolamento da bacia sobre influência de um sistema semiárido. **B.** Sequência Depositional S2, com estágios e

conexão e isolamento da bacia, sobre influência de sistemas semiárido a árido.

7-MINERALIZAÇÃO POTÁSSIFERA DE AUTAZES PRINCIPAIS TEXTURAS DOS CRISTAIS EVAPORÍTICOS

A mineralização potássífera do Depósito de Autazes compreende um horizonte subhorizontal de minerais evaporíticos passível de subdivisão em em três horizontes ou intervalos, denominados, da base para o topo: 1) Intervalo Mineralizado Inferior, com predomínio de silvinitas brancas, finas e laminadas; 2) Intervalo Mineralizado Intermediário, que apresenta principalmente silvinita castanha e sulfatos disseminados; 3) Intervalo Mineralizado Superior, constituído por silvinitas avermelhadas, com granulação grosseira (Fig. 26).

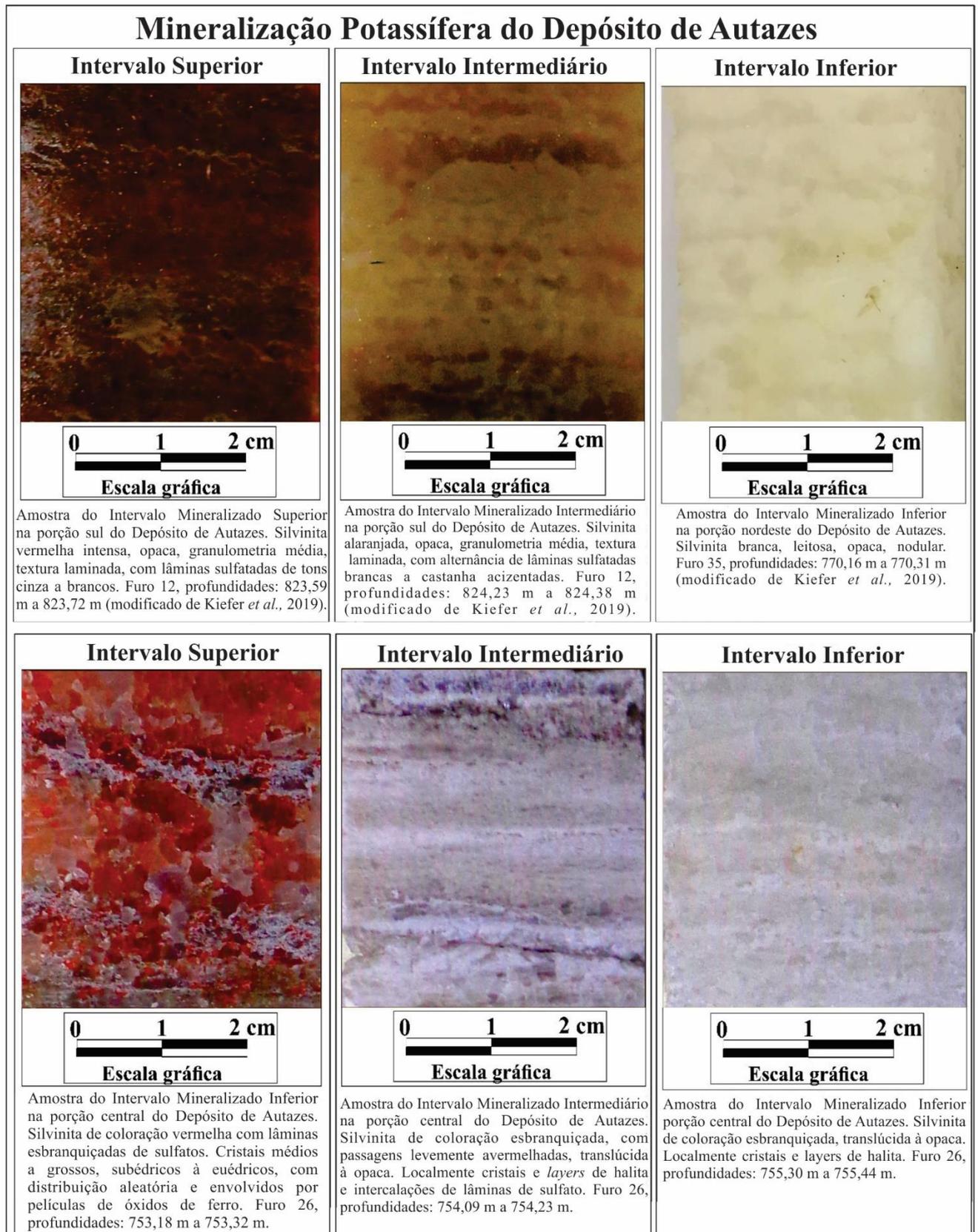


Figura 26. Exemplos das principais variações texturais dos cristais evaporíticos dos horizontes da

mineralização potássífera do Depósito de Autazes.

A textura dos sais evaporíticos do intervalo inferior, com cristais de granulometria fina (microcristalinos), por vezes laminados e que conferem às rochas um aspecto opaco a translúcido, indica um caráter deposicional subaquoso associado a depósitos de *saltern*, a partir de colunas de salmouras meromícticas altamente concentradas e relativamente rasas, sob condição de dessecação (Kendall, 1992; Warren, 2006, 2010). Assim, dentre os três intervalos, esse parece ser o que melhor conserva as feições primárias da mineralização do Depósito de Autazes.

Nos horizontes sobrepostos, intermediário e superior, as texturas variam para cristais mais grosseiros, associadas a um progressivo incremento no conteúdo de sulfatos. Esse atributo é bem observado, sobretudo, no horizonte mineralizado intermediário. No intervalo superior, por sua vez, os cristais assumem definitivamente texturas mais grosseiras, por vezes associadas a cristais de halitas, além de incipiente, porém progressivo, conteúdo argiloso. Essas características, em conjunto, são indicativas de uma deposição a partir de uma coluna de salmoura sob condição transitória entre meromíctica e holomíctica, ainda com profundidades extremamente rasas, nos estágios finais de dessecação e redução do nível de base interno bacia (Kendall, 1992; Warren, 2006, 2010).

Além disso, no intervalo superior, os cristais também parecem ter sido submetidos à exposição subárea e oxidação, dada a feição extremamente avermelhada associada a películas de óxidos de ferro envolvendo os cristais, além de diluição e cristalização de halitas sobrecrescidas aos cristais de silvita, que teriam obliterado as feições primárias da mineralização e lixiviado seletivamente parte do conteúdo em sais de potássio do intervalo. Essa condição corresponde ao início da elevação do nível de base na bacia, no estágio seguinte de preenchimento por halitas com cristais prismáticos grosseiros, com significativas concentrações de argilas nos espaços intersticiais, associados a sistemas semiáridos, que contariam agora com maiores volumes de águas meteóricas e aportes terrígenos na composição das salmouras bacinais.

Dessa forma, o topo e da mineralização corresponde à uma superfície com ampla expressão e distribuição regional ao longo do Depósito de Autazes, no limite superior do Trato de Sistemas de Nível de Base Baixo (TSNB), da Sequência S2-2. Tais condições são passíveis de definí-la como uma Superfície de Regressão Máxima – SRM (Catuneanu, 2006), (Fig. 16, Fig. 27 e Fig. 28).

Superfície do Topo da Mineralização Potássífera - Depósito de Autazes

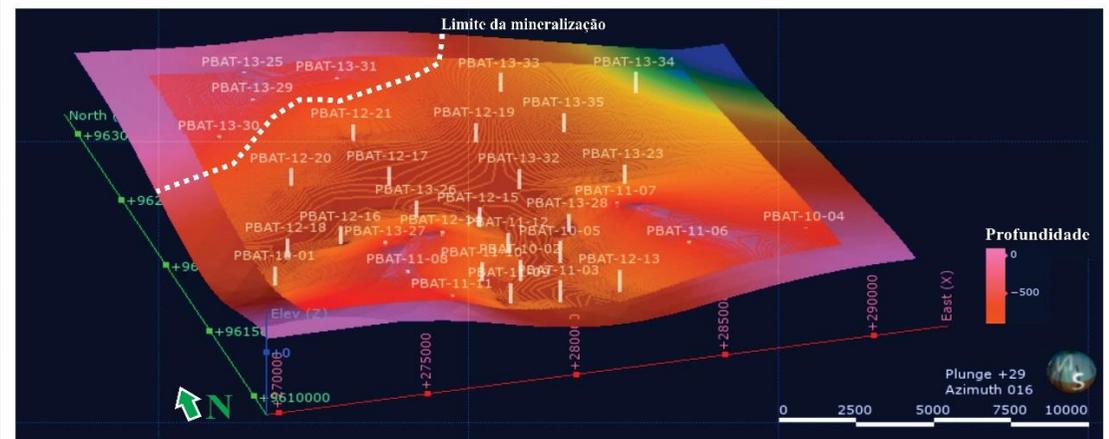
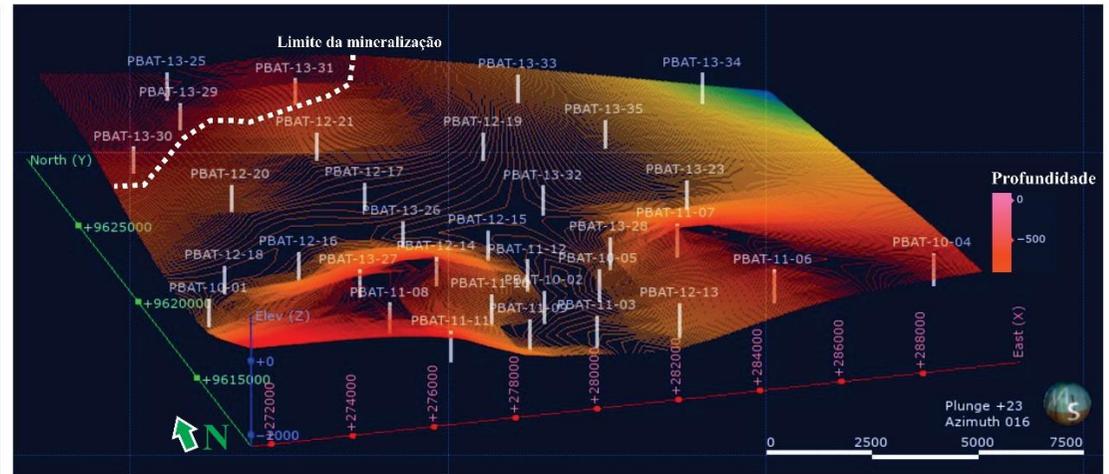
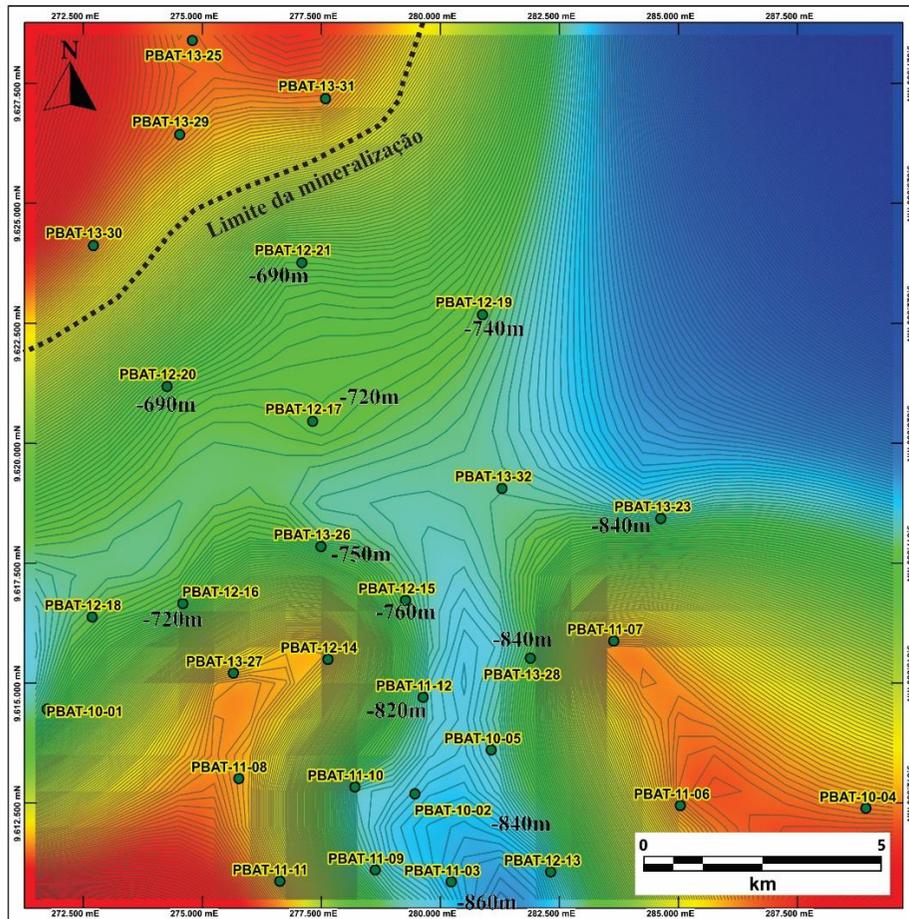


Figura 27. Superfície do topo da mineralização potássífera, com ampla expressão e distribuição regional ao longo do Depósito de Autazes. Em sentido horário: Visualização em planta, e em perspectiva do modelo digital 3D da superfície. A superfície é correspondente à Superfície de Regressão Máxima - SRM da Sequência Depositional S2-2. Interpolações efetuadas nos *softwares*: *Mapinfo*® Versão 17.0 (64-bit) Release Build 71 e *Leapfrog Geo*® Versão 4.5.

Superfície do Topo da Mineralização Potássifera - Depósito de Autazes

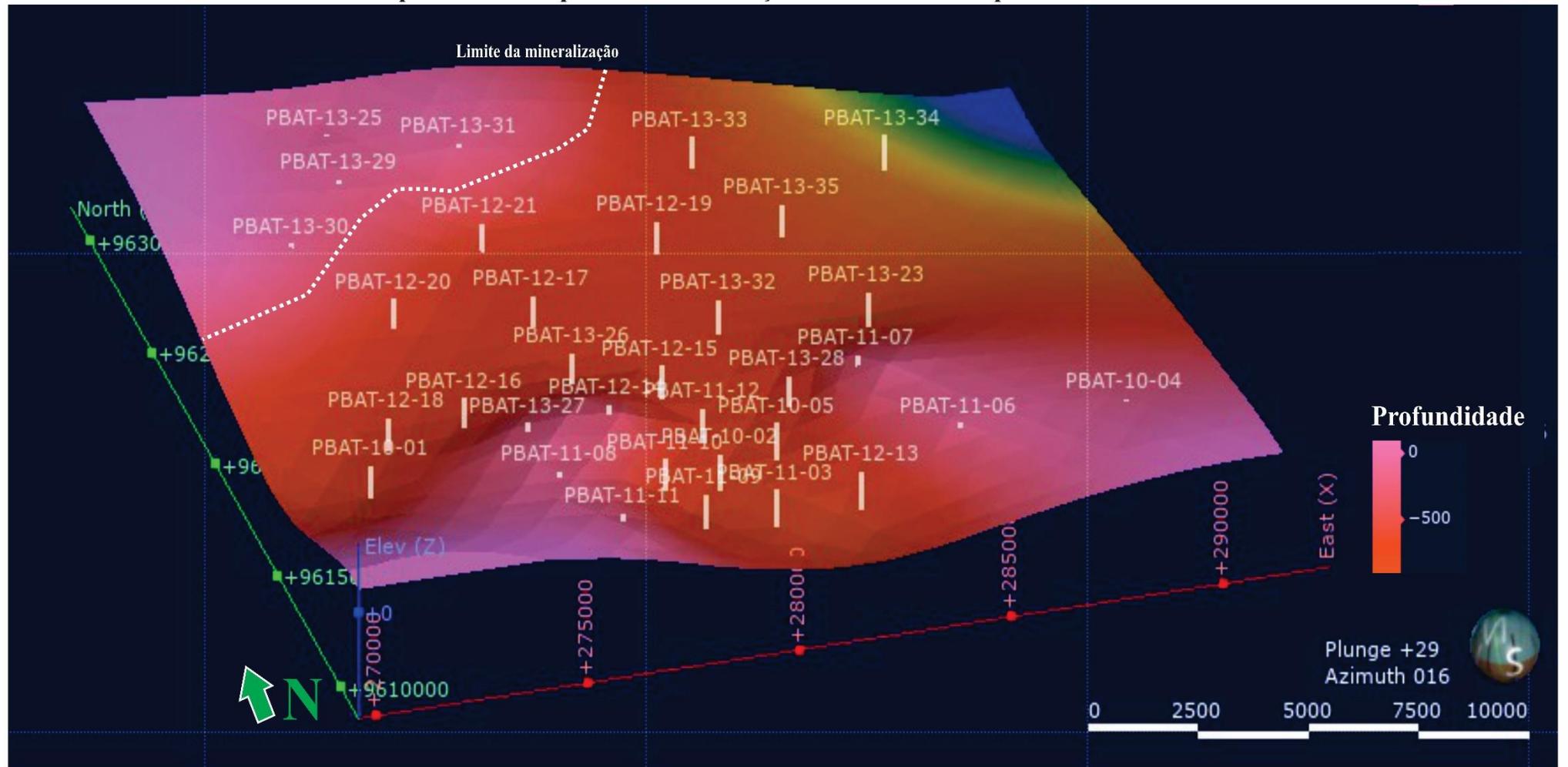


Figura 28. Superfície do topo da mineralização potássifera, com ampla expressão e distribuição regional ao longo do Depósito de Autazes. Visualização em detalhe e perspectiva do modelo digital 3D da superfície. A superfície é correspondente à Superfície de Regressão Máxima - SRM da Sequência Depositional S2-2. Interpolações efetuadas no *software: Leapfrog Geo*[®] Versão 4.5.

8-CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir das metodologias de análises propostas, foi possível atingir o objetivo de elaborar um modelo estratigráfico de sequências, adequado às perspectivas deposicionais dos ambientes de sedimentação, propícios ao desenvolvimento das fácies carbonáticas-evaporíticas, intersectadas na área do Depósito de Autazes. Várias questões referentes ao posicionamento estratigráfico dessas sucessões em relação ao contexto evolutivo da bacia, bem como suas condicionantes e controles paleomabientais, foram avaliadas e discutidas ao longo desta dissertação. Esses novos dados almejam um entendimento mais amplo da evolução paleozoica das acumulações sedimentares na região ocidental da Bacia do Amazonas, bem como de toda a sua extensão.

Foi possível interpretar o contexto tectono-sedimentar e propor uma nova organização estratigráfica de sequências para essas rochas, a partir de análises faciológicas, interpretações dos ambientes de sedimentação e associações de trato de sistemas, com base nas variáveis de controle operantes internamente e externamente à bacia.

Tais associações foram possíveis a partir da definição do estilo deposicional que teria permitido o amplo desenvolvimento dessas fácies, com a contextualização de um mar epicontinental que teria coberto a bacia intracratônica. Nesse sistema haveriam fases de conexão efetiva e/ou parcial com o oceano, bem como a transição para períodos de isolamento hidrográfico efetivo da bacia, em conformidade com as grandes oscilações dos níveis dos mares dos períodos de *icehouse*, atuantes no final do Carbonífero. Nesse processo, os depósitos evaporíticos teriam sido desenvolvidos sem a influência direta das variações dos níveis das águas oceânicas, com as suas geometrias maiores refletindo interações contínuas com o clima operante na bacia, e as geometrias internas, e de menor escala, refletindo as variações autocíclicas nos seus níveis de base internos.

O modelo estratigráfico de sequências proposto para as sucessões carbonáticas evaporíticas da área de Autazes, considera, portanto a divisão em duas grandes sequências maiores, denominadas S1 e S2. Nessas sequências as subdivisões internas correspondem às fases de desenvolvimento das sucessões carbonáticas plataformais dos Tratos de Mar Alto, as fácies predominantemente terrígenas relacionadas aos Tratos Transgressivos, bem como as fácies evaporíticas associadas a ambientes de *Saltern* do Trato de Mar Baixo, correspondentes aos períodos de isolamento hidrográfico da bacia.

Para as sucessões evaporíticas dos Tratos de Mar Baixo, foram também consideradas duas variantes para os ambientes deposicionais: (i) depósitos evaporíticos de *Saltern* desenvolvidos sob a influência de sistemas semiáridos, com deposição de fácies de halitas, por vezes associadas a terrígenos e anidritas; (ii) depósitos evaporíticos de *Saltern* desenvolvidos sob a influência de sistemas áridos, com a associação de fácies de halitas e de sais solúveis subordinados na forma de cloretos e sulfatos de potássio, depositados em condições de hipersalinidade.

Assim, na Sequência S2, foram ainda propostas três sequências intrabaciais de ordem mais elevada: S2-1, S2-2 e S2-3, que teriam evoluído a partir dessas duas vertentes deposicionais, relacionadas a variações autocíclicas nos níveis de base e concentrações das salmouras na bacia. A Sequência autocíclica S2-2, corresponderia, portanto, à sucessão hospedeira da mineralização potássifera de Autazes, com desenvolvimento associado ao segundo caso. O topo da mineralização, por sua vez, com ampla expressão e distribuição regional ao longo do Depósito de Autazes, corresponderia à Superfície de Regressão Máxima – SRM, no limite superior do Trato de Sistemas de Nível de Base Baixo (TSNB) da Sequência S2-2.

Foram ainda propostos e discutidos padrões evolutivos para os horizontes da mineralização em Autazes. Nessas considerações foram avaliadas as influências das variações geoquímicas das salmouras mãe que teriam permitido a precipitação desses sais. Essas avaliações consideraram as análises de perfis de concentração de bromo, variações mineralógicas, composicionais e texturais, para interpretações do controle da paleosalinidade ambiental sob as características faciológicas da mineralização.

Assim, as questões referentes à problemática proposta para o estudo da Área do Depósito Potássifero de Autazes, e que motivaram a realização da presente dissertação, foram em grande parte resolvidas com os resultados e discussões ora aqui apresentadas.

Como contribuições principais deste trabalho, e sugestões para trabalhos futuros nessa região, o autor destaca, entre outros: (1) revisões estratigráficas de detalhe, a partir de análises inéditas nas seções sedimentares evaporíticas que abrigam as mineralizações de potássio na Bacia do Amazonas; (2) aplicação dos conceitos e modelos aqui apresentados e desenvolvidos para o Depósito de Potássio de Autazes, para interpretações regionais posteriores, que culminem no desenvolvimento de modelos evolutivos, para as demais ocorrências de mineralização potássifera descobertas na Bacias do Amazonas; (3) Possibilidade de refinamento estratigráfico das fácies evaporíticas analisadas em Autazes, com subdivisões de sequências ainda mais detalhadas; (4) Análises tectono-estratigráficas e sismoestratigráficas regionais na Bacia do Amazonas, associadas a reconstruções paleoclimáticas de detalhe, para validações dos modelos evolutivos propostos para a bacia, na transição entre os períodos Carbonífero e Permiano; (5) Aplicação e discussões de conceitos atualizados de estratigrafia de sequências, para seções evaporíticas-carbonáticas em bacias intracratônicas fanerozoicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F. F. M. & HASUI, Y. O Pré-Cambriano do Brasil. São Paulo: Blücher, 378p. 1984.

AIRES, J.R. Estudo do vulcanismo básico da Bacia Amazônica. Rio de Janeiro: Petrobras-Cenpes, 61p. (Rel. 478). 1983.

AGAPITO ASSOCIATES, INC. Technical Report Concerning Mineral and Resource Estimates, Fazendinha and Ararí Deposits, Amazonas, Brazil. Grand Junction: Agapito, 57p. 2008.

BIZZI, L.A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTI, R.M.; GONÇALVES, J.H. (Eds.), Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil. Brasília: CPRM, Serviço Geológico do Brasil, 643 p. 2004.

CAMPOS, J. N. P. & TEIXEIRA, L. B. Estilos tectônicos da Bacia do Amazonas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35, 1988, Belém. Anais. São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, v. 5, p. 2161-2172. 1988.

CAPUTO, M. V.; RODRIGUES, R.; VASCONCELOS, D. N. N. Nomenclatura estratigráfica da Bacia do Amazonas: histórico e atualização. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 26, Belém. Anais. São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1972. v. 3, p. 35-46. 1972.

CAPUTO, M. V. Bacia do Amazonas: Estratigrafia, Tectônica e Magmatismo. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/311193310_BACIA_DO_AMAZONAS_ESTRATIGRAFIA_TECTONICA_E_MAGMATISMO. Acessado em: 17dez2018.

CATUNEANU, O.. Principles of Sequence Stratigraphy. Elsevier Sci. 386 p. 2006.

CATUNEANU, O.; GALLOWAY, W.E.; KENDALL, C. G. St. C.; MIAL, A. D.; POSAMENTIER, H.W.; STRASSER, A.; TUCKER, M. E. Mixed carbonate-evaporite settings. In: Sequence Stratigraphy: Methodology and nomenclature Stratigraphy. Stuttgart: Newsletters on Stratigraphy, v. 44/3, p. 220-225. 2011.

COSTA, M. G. F. Fácies deposicionais e ambientes de sedimentação da Formação Monte Alegre (neocarbonífero) na área de Autás Mirim e adjacências, Bacia do Médio Amazonas. Recife, 90p. il. Tese (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. 1984.

COSTA, A.R.A. & WANDERLEY FILHO, J.R. Osevaporitos e halocinesena Amazônia. In: MOHRIAK, W.; SZATMARI, P.; ANJOS, S.M.C. (Org.), Sal: Geologia e Tectônica. São Paulo: Ed. Beca, p. 210-221. 2009.

CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo. Escala 1:1.000.000. Sistema de Informações Geográficas. Programa Geologia do Brasil. Brasília: CPRM. CD-ROM. 2004.

CUNHA, P.R.C.; GONZAGA, F.G.; COUTINHO, L.F.C.; FEIJÓ, F.J. Bacia do Amazonas. B. Geoci. Petrobras, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 47-55. 1994.

CUNHA, P.R.C. Análise estratigráfica dos sedimentos Eo/Mesodevonianos da porção ocidental da Bacia do Amazonas sob a ótica da estratigrafia de sequências no interior cratônico. Porto Alegre, 248p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2000.

CUNHA, P.R.C.; MELO, J.H.G.; SILVA, O.B. Bacia do Amazonas. B. Geoci. Petrobras, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 227-251. 2007.

DARDENNE, M.A. & SCHOBENHAUS, C. Metalogênese do Brasil. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 392p. 2001.

DARDENNE, M.A. & SCHOBENHAUS, C. Depósitos de potássio de Fazendinha e Arari no Médio Amazonas. In: DARDENNE, M.A. & SCHOBENHAUS, C. Metalogênese do Brasil. Brasília: Editora Universidade de Brasília. p. 264-266. 2001.

DIAS, V.P. & FERNANDES, E. Fertilizantes: Uma visão global sintética. In: BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, v. 24, p. 97-138. 2006.

KENDALL. A. C. FaciesModels 11: Continental andsupratidal (Sabkha) evaporites.Geosci. Canada, v.5. 3, 78p. 1978.

KENDALL. A. C. FaciesModels 12: Subaqueousevaporites.Geosci. Canada, v.5. 3, 139p. 1978.

KENDALL. A. C. Aspects of evaporite basin stratigraphy, in B. C. Schreiber, eds., Evaporites and hydrocarbons: New York, Columbia University Press, p. 11-65. 1988.

KENDALL. A. C. Evaporites, in R. G. Walker, and N. P. James, eds., Facies Models: Responses to sea level change, Geological Association of Canada, p. 375-409. 1992.

KENDALL. A. C. Marine evaporites, in James, N. P., and Dalrymple, R. W., eds., Facies Models 4: St. Johnhs, Newfoundland, and Labrador, Canada, Geological Association of Canada, p. 505-539. 2010.

KIEFER, G. L. S.; UHLEIN, A.; FANTON, J. J. O Depósito Potassífero de Autazes no contexto estratigráfico da Bacia do Amazonas. *Geociências: Rio Claro*. v. 38, n. 2, p. 349 – 365. 2019.

KULAIIF, Y. & GÓES, A.M. Potássio no Brasil. In: MELFI, A.J.; MISI, A.; CAMPOS, D.A.; CORDANI, U.G. (Org.), *Recursos Minerais no Brasil: problemas e desafios*. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências. p. 84-95. 2016.

LEMOS, V. B. Assembléias de conodontes do carbonífero da Bacia do Amazonas. Porto Alegre, 259p. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1990.

MARINI, O. Potencial Mineral do Brasil. In: MELFI, A.J.; MISI, A.; CAMPOS, D.A.; CORDANI, U.G. (Org.), *Recursos Minerais no Brasil: problemas e desafios*. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências. p. 18-31. 2016.

NEVES, C.A.O. Prospectos potenciais e áreas prioritárias para exploração na bacia do Amazonas. *Bol. Geociências da Petrobras*, 4 (1): 95-103. 1990.

NEVES, C.A.O.; CAMPOS, J.N.P.; ARANA, J.; TEIXEIRA, L.B.; RODRIGUES, R.; TRIGÜIS, J.A. Integração Geológica e Exploratória da Bacia do Amazonas. Manaus: Petrobras/Depex, Relatório Interno, 113p. 1989.

PLAYFORD, G. & DINO, R. Palynostratigraphy of upper Palaeozoic strata (Tapajós Group), Amazonas Basin, Brazil. *Palaeontographica. Abt. B. Palaeophytologie*, Stuttgart, n. 255, p. 1-46, 2000.

POTÁSSIO DO BRASIL. Relatório Final Positivo Único de Pesquisa, Sais de Potássio, Municípios de Autazes e Itacoatiara, Amazonas. Belo Horizonte: Potássio do Brasil, 286p. 2014.

SAD, A.R.; CAMPOLINA, A.; COSTA, A. M.; LIMA, F.R.T.; CARVALHO, R.S. Depósito de Potássio de Fazendinha, Nova Olinda do Norte, Amazonas. In: SCHOBENHAUS C.; QUEIROZ, E.T.; COELHO, C.E.S. (Coords.), *Principais Depósitos Minerais do Brasil*. Brasília: DNPM-CPRM, v. IV-C, p. 257-276, 1997.

SAD, A.R.; LIMA, F.R.T.; WOLF, F.; SOARES, J.A.M.; CARVALHO, R.S. Depósito Potassífero da Fazendinha - Bacia do Médio Amazonas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 32, Salvador. Anais. São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1982. v. 3, p. 1086-1099. 1982.

SANTOS, J.O.S. Geotectônica dos escudos das Guianas e Brasil Central. In: BIZZI, L.A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTI, R.M.; GONÇALVES, J.H. (Eds.), *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*. Brasília: CPRM, Serviço Geológico do Brasil. p. 169-226. 2003.

SZATMARI, P; SIMÕES, I.A.; CARVALHO, R.S. Evaporitos da Bacia do Amazonas. Rio de Janeiro: Petrobras, Relatório Interno, 128 p. 1975.

SZATMARI, P; TIBANA, P; SIMÕES, I.A.; CARVALHO; R.S.; LEITE, D.C. Atlas Petrográfico dos Evaporitos. In: MOHRIAK, W.; SZATMARI, P.; ANJOS, S.M.C. (Org.), *Sal: Geologia e Tectônica*. São Paulo: Ed. Beca, p. 42-63. 2008.

SGS LAKEFIELD RESEARCH LIMITED. An investigation by high definition Mineralogy into the mineralogical characteristics of potash core, crushed ore and flotation samples from Brazil. Ontario: SGS Lakefield Research limited, 222p. 2014.

TASSINARI, C.C.G. & MACAMBIRA, M.J.B. A evolução do Cráton Amazônico. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; BRITO-NEVES, B.B. (Eds.), *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Ed. Beca, p. 471-485. 2004.

THOMAZ FILHO, A.; CORDANI, U.G.; MARINO, O. Idades K-Ar de rochas basálticas da Bacia Amazônica e sua significação tectônica regional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28, 1974, Porto Alegre. Anais. São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, v. 6, p. 273-278. 1974.

TUCKER, M. E. Sequence stratigraphy of carbonateevaporite basins, models and application to the UpperPermian (Zechstein of northeast England and adjoiningNorth Sea. *Journal of the Geological Society*. v. 148,p. 1019-1036. 1991.

UHLEIN, A.; PAIM, P.S.G.; TASSINARI, C.C.G.; PEDREIRA, A.J. Análise Estratigráfica de Bacias Rife Pale-Mesoproterozoicas dos Crátoms Amazônico e São Francisco, Brasil. *Geonomos*, Belo Horizonte, v.23, n.2, p. 1-13. 2015.

VALYASHKO, M.G. Geochemistry of bromine in the processes of salt deposition and the use of the bromine content as a genetic and prospecting criterion. *Geochemistry*, v. 6, p.570-589, 1956.

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

WARREN, J. K. Evaporites through time: Tectonic, climatic and eustatic controls in marine and nonmarine deposits: *Earth-Science Reviews*, v. 98, p. 217-268. 2010.

WARREN, J. K. *Evaporites: A compendium* (ISBN 9783-319-13511-3): Berlin, Springer, 1854 p. 2016

WARREN, J. K. *Evaporites and climate: Evaporites and climate: Part 1 of 2 - Are modern deserts the key?.* Salty Matters. Disponível em: [http:// www.saltconsultants.com](http://www.saltconsultants.com). Acessado em: 17dez2018.

WARREN, J. K. *Evaporites and climate: Part 2 of 2 - Ancient evaporites and paleolatitudes.* Salty Matters. Disponível em: [http:// www.saltconsultants.com](http://www.saltconsultants.com). Acessado em: 17dez2018.

YAMAMOTO, J.K. 2001. *Avaliação e classificação de reservas minerais*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 232p. 2001.

ZALÁN, P. V. *Evolução fanerozoica das bacias sedimentares brasileiras*. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; BRITO-NEVES, B.B. (Eds.), *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Ed. Beca, p. 595-612. 2004.