



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA

**FÁCIES, PETROGRAFIA E GEOQUÍMICA DA
FORMAÇÃO CODÓ, NEO-APTIANO, BACIA DE SÃO
LUÍS-GRAJAÚ**

TESE APRESENTADA POR

JACKSON DOUGLAS SILVA DA PAZ

Como requisito parcial à obtenção do Grau de Doutor em Ciências
na área de GEOLOGIA

DATA DA APROVAÇÃO:
COMITÊ DE TESE:

DILCE DE FÁTIMA ROSSETTI
(ORIENTADORA)

MOACIR JOSÉ BUENANO MACAMBIRA
(CO-ORIENTADOR)

ALCIDES NÓBREGA SIAL

ANA MARIA GÓES

VIRGÍNIO NEUMANN

WERNER TRUCKENBRODT

Belém - 2005

RESUMO

A Formação Codó, objeto deste estudo, corresponde a uma unidade geológica neoprotiana bem conhecida por ser o único registro exposto de rochas desta idade na margem equatorial brasileira. Esta formação, constituída de folhelhos betuminosos, calcários e evaporitos, é particularmente bem exposta nas bordas sul e leste da Bacia de São Luís-Grajaú, MA, áreas aqui investigadas com o intuito: 1. de aprimorar o entendimento do sistema deposicional, discutindo-se a hipótese de formação em ambientes lacustres; e 2. reconstituir as condições paleohidrológicas com base na integração de dados faciológicos, estratigráficos, petrográficos e isotópicos (C, O, Sr e S). Os dados de campo confirmaram sistema lacustre para a área de Codó, onde se desenvolveram lagos salinos, estáveis, bem estratificados, e com períodos de fechamento, quando prevaleceram condições anóxicas acompanhadas pela precipitação de sais em subambientes de lago central. Na região de Grajaú, por outro lado, prevaleceram condições mais efêmeras, com desenvolvimento de complexo de *sabkha/saline pan*, e precipitação de evaporitos principalmente nas margens do sistema, sob condições de salinas marginais e de planícies lamosas.

Os estudos faciológico e estratigráfico mostraram, também, que a Formação Codó em ambas as áreas estudadas está organizada em ciclos de arrasamento ascendente, que registram a progradação de depósitos de lago marginal sobre os de lago central. Três categorias de ciclos foram distinguidos, designados aqui de inferior, intermediário, e superior. Os ciclos de ordem inferior, de espessuras variando entre milímetros a poucos centímetros, são formados por depósitos com acamamentos constituídos de um dos seguintes arranjos litológicos: a) folhelho negro betuminoso e evaporito; b) folhelho negro betuminoso e *calcimudstone*; c) folhelho negro betuminoso e *packstone-wackestone* peloidal; d) folhelho cinza-esverdeado e *calcimudstone*; e) folhelho cinza-esverdeado e *packstone-wackestone* peloidal; f) folhelho cinza-esverdeado e *packstone-wackestone* ostracodal; ou g) *grainstone-wackestone* ostracodal e/ou *calcimudstone* com tapetes criptomicrobiais e *packstone* ooidal-pisoidal. Estes ciclos são atribuídos a depósitos sazonais, tendo em vista as suas espessuras regulares na escala milimétrica, típicas de depósitos climaticamente controlados.

Os ciclos de ordem intermediária têm, em média, 1,7 m de espessura e são subdivididos por ciclos completos e incompletos. Ciclos completos são compostos de

depósitos de lago central, que gradam para cima a depósitos de lago intermediário e marginal, sendo representados por dois tipos: ciclos com depósitos de lago central, constituídos por folhelhos e evaporitos (C1); e ciclos com depósitos de lago central, constituídos por folhelho cinza esverdeado (C2). Ciclos incompletos são formados por sucessões faciológicas onde pelo menos uma das associações de fácies está ausente. São também de dois tipos: ciclos com depósitos de lago central e intermediário (I1); e ciclos com depósitos de fácies de lago intermediário e central (I2).

Os ciclos de ordem superior medem, em média, 5,2 m de espessura e consistem em quatro unidades deposicionais, limitadas por superfícies de descontinuidade, sendo internamente constituídas por ciclos intermediários, tanto completos quanto incompletos, e de distribuição variável em direção ao topo das seções. A unidade 1, mais inferior, está apenas parcialmente exposta, com 2,7 m de espessura em média, sendo formada por um intervalo constituído por ciclos I1 delgados. A unidade 2 tem, em média, 5,2 m de espessura e contém todos os tipos de ciclos, principalmente ciclos completos. A unidade 3, com 2,6 m de espessura em média, é constituída por quase 80% de ciclos I2. A unidade 4 apresenta 2,2 m de espessura média, inclui exclusivamente ciclos incompletos, embora a maior parte desta unidade tenha sido destruída pela formação do limite da seqüência aptiana.

A caracterização sedimentar detalhada e o padrão de empilhamento dos ciclos de ordens intermediária e superior suportam gênese ligada à atividade tectônica sin-sedimentar. Isto é particularmente sugerido pela alta variabilidade de fácies, pela extensão lateral limitada, e por mudanças aleatórias na espessura e freqüência dos ciclos de ordem intermediária. Além disto, os quatro ciclos de ordem superior são correlacionáveis com zonas estratigráficas apresentando diferentes estilos de estruturas de deformação sin-sedimentar, atribuídos em trabalhos anteriores a atividades sísmicas sin-deposicionais. Portanto, os vários episódios de arrasamento do lago, registrados na Formação Codó pelos ciclos de ordem intermediária e superior, são atribuídos a flutuações no nível de água do lago promovidas por pulsos sísmicos contemporâneos à sedimentação.

A análise petrográfica dos evaporitos da Formação Codó permitiu que se definissem melhor as histórias tanto deposicional do sistema lago-*sabkha-saline pan*, quanto pós-deposicional. Sete morfologias de evaporitos foram reconhecidas: 1. gipso *en chevron*; 2. gipso/anidrita nodular/lenticular; 3. gipso acicular; 4. gipso em mosaico; 5. gipso

brechóide/gipsarenito; 6. gipso/anidrita pseudo-nodular; e 7. gipso em roseta. Apesar desta ampla variedade de fases, a abundância de gipso *en chevron*, gipso/anidrita nodular/lenticular e gipso brechóide/gipsarenito, registra a boa preservação de formas primárias. Esta interpretação é suportada pela associação destas morfologias de gipso com depósitos mostrando acamamento horizontal de natureza cíclica, que são atribuídos a flutuações do nível de base do lago, eventualmente culminadas com períodos de exposição subaérea. Mesmo o gipso acicular e o gipso em mosaico, interpretados como produtos de substituição do gipso *en chevron* e do gipso brechóide/gipsarenito, mostram características de formação autigênia ainda sob influência do ambiente deposicional. Fases de formação de gipso sob condições diagenéticas mais profundas são registradas somente no gipso/anidrita pseudo-nodular, atribuídos a mobilizações durante halocinese. Além disto, gipso em rosetas, que interceptam todas as outras fases evaporíticas, têm também origem diagenética ligada a processos tardios por interação com água subterrânea e/ou intemperismo superficial.

A constatação de forte influência deposicional registrada em, pelo menos, grande parte das morfologias dos evaporitos da Formação Codó (i.e., gipso primário ou eodiagenético), além da constatação de microfácies carbonáticas com poucas modificações diagenéticas, motivaram a aplicação de métodos isotópicos com propósitos de reconstituição paleoambiental. Os resultados obtidos mostram que ciclos de expansão/contração do sistema deposicional em ambas as áreas estudadas são acompanhadas por variações significativas nos valores isotópicos. A ampla dispersão de valores dos isótopos de Sr e S dentro de cada ciclo deposicional reforça a interpretação petrográfica de que a diagênese não modificou a assinatura geoquímica deposicional dos evaporitos, confirmando seu valor como ferramenta paleoambiental. Além disto, origem não marinha para os evaporitos é sugerida pelas razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, que variaram de 0,70782 a 0,70928, consideradas mais altas do que aquelas esperadas para evaporitos oriundos da água do mar no Neo-Aptiano (entre 0,70720 e 0,70735). O $\delta^{34}\text{S}$ variou nas amostras estudadas de 16.12‰ to 17.89 ‰ (V-CDT) na região de Codó, mostrando-se também em total desarmonia com valores marinhos do Neo-Aptiano (i.e., entre 13‰ e 16‰ (V-CDT)). Tanto Sr quanto S foram influenciados pelas características das fácies deposicionais, de tal forma que, durante a expansão do sistema deposicional, os valores de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ decresceram devido à inibição do ^{87}Sr liberado a partir de argilominerais pela

drenagem interna de planícies lamosas. Nos picos de expansão, os valores de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ eram os mais baixos, o que é relacionado à submergência de planícies lamosas e introdução de águas depletadas em ^{87}Sr oriundo do intemperismo de calcários e evaporitos marinhos permianos a neocomianos, tanto quanto basaltos triássicos a neocomianos.

Enquanto o estudo dos isótopos de Sr e S observou o comportamento destes nos evaporitos da Formação Codó, análises de isótopos de C e O foram realizadas nos carbonatos e também revelaram uma ampla distribuição isotópica, com valores exclusivamente baixos de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$, ou seja, entre -5.69‰ e -13.02‰ (PDB) e -2.71‰ e -10.80‰ (PDB), respectivamente. Adicionalmente, estas razões variam de acordo com ciclos de arrasamento considerados neste trabalho como de origem tectônica e que, em geral, mostram razões de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ mais leves na base, onde predominam depósitos de lago central, e progressivamente mais pesados em direção ao topo, onde depósitos de lago marginal são mais expressivos. Também confirmando a assinatura deposicional, este comportamento leva a propor um modelo isotópico controlado por eventos de sismicidade sin-sedimentar. Assim, razões isotópicas com valores mais leves parecem estar relacionados com eventos de inundação promovidos por subsidência, que resultou no desenvolvimento de um sistema de lago perene. Razões isotópicas com valores mais pesados estariam relacionados a fases de lago efêmero e seriam favorecidas pelo soerguimento e/ou aumento da estabilidade tectônica. Além disso, os resultados mostram que sistemas de lagos fechados predominaram em pelo menos parte do tempo de evolução desses depósitos, o que é indicado pela boa covariância positiva (i.e., +0,42 e +0,43) entre o carbono e o oxigênio, embora fases de lago aberto também sejam registradas pelos valores de covariância negativa (i.e., -0,36).

ABSTRACT

The Codó Formation is an important geological unit in Brazil, representing the only record of Neoproterozoic rocks exposed along the Brazilian equatorial margin. This unit consists of bituminous black shales, limestones and evaporites, which are particularly well represented in the south and east margins of the São Luís-Grajaú Basin, around the towns of Codó and Grajaú, State of Maranhão. These areas were investigated in order to: 1. improve the depositional system, discussing the hypothesis that the Codó Formation was produced in a lacustrine setting; and 2. reconstruct the paleohydrological conditions with basis on the integration of facies, stratigraphy, petrography and isotope (C, O, Sr and S) data. Hence, the field data presented herein confirmed a lacustrine system for the Codó area, where prevailed stable, well-stratified, saline lakes characterized by periods of closure, anoxia and salt precipitation in the central saline lakes. On the other hand, ephemeral conditions with development of a *sabkha*/saline pan complex prevailed in the Grajaú area, where salts precipitated mostly in the marginal portions of the system (i.e., marginal saline pans and mudflats).

Studies focusing facies and stratigraphy also revealed that in both areas the Codó Formation is arranged into several shallowing-upward cycles formed by progradation of marginal into central lake deposits. Three types of cycles were distinguished, referred to here as lower, intermediate and higher rank cycles. The lower rank cycles correspond to millimetric interbeddings of: a) bituminous black shale and evaporite; b) bituminous black shale and calcimudstone; c) bituminous black shale and peloidal wackestone-packstone; d) grey/green shale and calcimudstone; e) grey/green shale and peloidal wackestone-packstone; f) grey/green shale and ostracodal wackestone/grainstone; h) ostracodal wackestone/grainstone and/or calcimudstone with cryptomicrobial mats and ooidal/pisoidal packstone. These are attributed to seasonal deposition with basis on their regular nature forming very thin cycles resembling varves.

The intermediate rank cycles average 1.7 m thick and are formed by complete and incomplete cycles. Complete cycles show an upward transition from central to intermediate and then marginal facies associations, and include two types: C1 cycles with central lake deposits consisting of evaporites and black shales; and C2 cycles with central lake deposits

formed by gray/green shale. Incomplete cycles are those formed by successions lacking at least one of the facies associations, consisting of either central and intermediate lake deposits (cycles I1) or intermediate and marginal lake deposits (cycles I2).

The higher rank cycles average 5.2 m thick and consist of four depositional units, which display shallowing-upward successions formed by both complete and incomplete, intermediate rank cycles that vary their distribution upward in the section, and are bounded by sharp surfaces. Unit 1, the lowermost one, averages 2.7 m in thickness, being entirely composed by thin I1 cycles. Unit 2 averages 5.2 m thick, and displays all of the aforementioned intermediate cycles, especially complete ones. Unit 3, averaging 2.6 m thick, consists of 80% of cycles I2. Finally, unit 4, which averages 2.2 m in thickness, displays only incomplete cycles, though its uppermost part was not preserved due to erosion during the development of the Aptian sequence boundary.

The detailed sedimentological characterization and the stratal stacking patterns of the intermediate and higher rank cycles support a genesis linked to syn-sedimentary tectonic activity, particularly suggested by high facies variability, limited lateral extension, as well as frequent and random thickness changes of the intermediate-rank cycles. Additionally, the matching between the four higher rank cycles with four stratigraphic zones having different styles of soft-sediment deformation structures previously described in the literature as resulting from seismic activities, is a further argument to corroborate this interpretation. Therefore, the several episodes of lake shallowing recorded in the intermediate and higher rank cycles of the Codó Formation are attributed to fluctuations in the lake water level, triggered by seismic pulses alternating with sediment deposition.

The petrographic analysis of the evaporites from the Codó Formation allowed to better defining both the lake-*sabkha-saline pan* depositional system and the post-depositional histories. Seven evaporite morphologies were recognized: 1. chevron (selenite) gypsum; 2. nodular/lensoidal gypsum/anhydrite; 3. acicular gypsum; 4. mosaic gypsum; 5. brecciated gypsum/gypsarenite; 6. pseudo-nodular anhydrite/gypsum; and 7. rosettes of gypsum. Despite of this large variety of evaporite phases, the chevron gypsum, the nodular/lensoidal gypsum/anhydrite and the brecciated gypsum/gypsarenite record the preservation of primary features. The association of these morphologies with deposits displaying cyclic horizontal bedding, attributed to lake level fluctuations eventually culminated with subaerial exposure,

reinforces this interpretation. Even acicular gypsum and mosaic gypsum, which replaced the chevron and brecciated gypsum/gypsarenite, respectively, formed under the influence of the depositional surface. Burial phases of gypsum are only recorded in the pseudo-nodular anhydrite/gypsum, attributed to salt mobilization induced by halokinesis. In addition, rosettes of gypsum, which crosscut the other evaporite morphologies, diagenetic in origin, have probably formed as the latest evaporite phase of the study area, under the influence groundwater and/or surface weathering.

In the present research, isotope studies aiming paleoenvironmental purposes were motivated by both confirmation of strong depositional influence for at least great part of the evaporites from the Codó Formation (i.e., primary and eodiagenetic gypsum), and the low diagenetic modification recorded for the limestones. Results of these approaches show that expansion/contraction cycles in both studied areas were accompanied by significant changes in isotope values. The wide dispersion of Sr and S isotope data within individual depositional cycles reinforces the lack of significant diagenetic modification as suggested by the petrographic analysis, and confirms the utility of these isotopes as environmental tools. Additionally, a non-marine brine source is suggested by $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios ranging from 0.707824 to 0.709280, which are higher than those from late Aptian seawater (i.e., between 0.70720 and 0.70735). The $\delta^{34}\text{S}$ varies from 16.12 to 17.89 ‰(V-CDT) in the Codó area, which is also in disagreement with late Aptian marine values (ranging from 13 to 16 ‰(V-CDT)). Both geochemical tracers were influenced by facies characteristics, and thus a model is provided where expansion of saline pan/lake systems led to decreasing $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values due to the inhibition of the ^{87}Sr from clay minerals originated during the internal draining of mudflats. During expansion peaks, the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values were lower due to submergence of mud flats and introduction of external ^{87}Sr -depleted waters related to weathering of Permian to Neocomian marine limestones and evaporites, as well as Triassic to Neocomian basaltic rocks. Furthermore, the sulphur isotope values decrease in the southern margin of the basin from 14.79 to 15.60 ‰(V-CDT) probably due to increased evaporation in shallower water settings.

While the studies of Sr and S isotopes emphasized the evaporites of the Codó Formation, the analysis of C and O isotopes were carried out on the carbonates. The data revealed a wide distribution of dominantly low $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values, ranging from -5.69‰ to

–13.02‰ and from –2.71‰ to –10.80‰, respectively. It was also observed that these ratios vary according to seismically-induced shallowing-upward cycles, in general becoming lighter in their bases, where central lake deposits dominate, and progressively heavier upward, where marginal lake deposits are more widespread. In addition to confirm a depositional signature for the analysed samples, this behavior led to introduce a seismic-induced isotope model. Hence, lighter isotope ratios appear to be related with flooding events promoted by subsidence, which resulted in the development of a perennial lake system, while heavier isotope values are related to ephemeral lake phases favored through uplift and/or increased stability. Furthermore, the results show that a closed lake system dominated, as indicated by the overall good positive covariance (i.e., +0.42 to +0.43) between the carbon and oxygen isotopes, though open phases are also recorded by negative covariance values of –0.36.