Delimitação de superfícies estratigráficas e sequências deposicionais em sistemas marinhos epicontinentais a partir de dados geofísicos e geoquímicos (carbono e nitrogênio) do Devoniano da Bacia do Parnaíba

Jorge Nadir[1,2,3]; Francisco Romério Abrantes Júnior[1,2,3]; Pedro Muriel Torres Raietparvar[1]; Lívio Reily de Oliveira Gonçalves[1,2]; Byanca Cardoso[1]; Rut Amelia Díaz Ramos[4]; Victor Salgado Campos[1,2,3]; Cleverson Guizan Silva[1,2]; Wagner Moreira Lupinacci[1,2,3]; Antônio Fernando Menezes Freire[1,2,3]

[1]Grupo de Interpretação Exploratória e Caracterização de Reservatórios, Universidade Federal Fluminense (GIECAR–UFF)
[2]Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra (DOT–UFF)
[3]Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Geofísica do Petróleo (INCT–GP/CNPQ)
[4]Sulfur Geochemistry Laboratory, Universidade Federal Fluminense (LaGEn - UFF)

Copyright 2024, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no IX Simpósio Brasileiro de Geofísica, Salvador, 08 a 10 de outubro de 2024. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do X SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Resumo

A demarcação das superfícies estratigráficas revelou-se crucial para compreender as variações dos *trends* deposicionais em sucessões sedimentares antigas. Essas superfícies fornecem informações valiosas sobre episódios de inundação, regressão e limites deposicionais. Foram estudados depósitos devonianos da Bacia do Parnaíba, representados pelas formações Pimenteiras e Cabeças, representativas de um sistema transicional marinho raso-deltaico. A partir da integração de dados de GR, $\delta^{15}N$ e $\delta^{13}C_{org}$, a sucessão foi dividida em três sequências deposicionais delimitadas por discordâncias subaéreas denominadas, da base para o topo, sequência 1 (S1), sequência 2 (S2) e sequência 3 (S3). Estes dados permitiram a definição de diferentes superfícies limitantes e as tendências transgressivas-regressivas do sistema, mostrando a predominância de um ambiente marinho raso com forte influência deltaica na S1, transicionando gradualmente para um ambiente transicional em S2 e marinho mais distal com grandes concentrações de MO em uma máxima inundação na S3.

Introdução

A estratigrafia de sequências estuda o arcabouço estratigráfico-temporal de rochas geneticamente relacionadas, reconhecendo e correlacionando superfícies estratigráficas que representam mudanças nas tendências (*trends*) deposicionais originadas por modificações nos padrões de sedimentação, erosão e variação do nível de base (Posamentier et al., 1988; Galloway, 1989; Embry, 2001). A utilidade da estratigrafia de sequências reside na capacidade de identificar e correlacionar padrões recorrentes, conhecidos como sequências, que refletem os processos de formação e deposição de sedimentos. Essas sequências podem ser utilizadas para reconstruir eventos paleoambientais, entender a evolução das bacias sedimentares e fornecer um quadro mais abrangente da história geológica de uma determinada região (Catuneanu et al, 2010). Na América do Sul, depósitos devonianos de mares epicontinentais rasos influenciados por ondas e sistemas deltaicos transicionais, ocorrem na Formação Pimenteiras (bacias do Parnaíba (Vaz et al., 2007). Para delimitação das principais superfícies estratigráficas durante o Devoniano na região da Bacia do Parnaíba, foram integrados dados geofísicos e geoquímicos nos folhelhos da Formação Pimenteiras, sendo está formada predominante folhelhos cinzas a pretos com pequenas intercalações de siltitos e arenitos de granulometria fina, que usualmente apresentam estrutura hummocky (Góes e Feijó, 1994; Loboziak et al. 2000; Vaz et al., 2007).

A base da Formação Pimenteiras (Mesodevoniano), é constituída por arenitos, mas tendem a desaparecer em direção ao topo, onde ocorre a maior concentração de folhelhos. Essa configuração reflete características de mares mais profundos que eram comuns na bacia durante o Fransniano - Devoniano superior (Rodrigues et al., 1995). Andrade et al. (2020) explica que a Formação Pimenteira foi depositada durante as idades Eifeliano até o Frasniano e representa um dos mais importantes momentos de transgressão marinha da Bacia do Parnaíba.

A área de estudo está localizada no Parque dos Gaviões, centro-norte da Bacia do Parnaíba. O poço estudado foi o 1-OGX-93-MA (Figura 1) estando localizado a profundidade de 1791m.

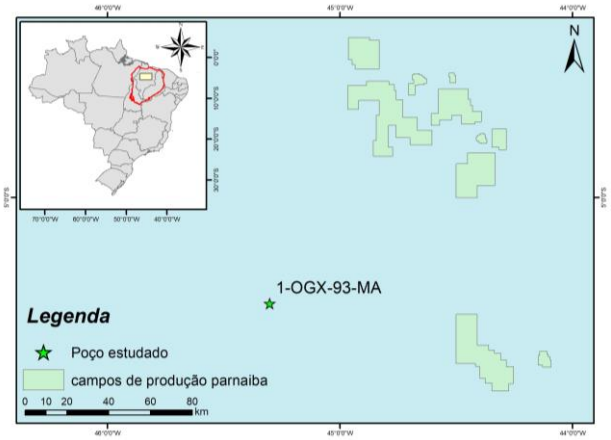

Figura 1 – Mapa de localização simplificado da área de estudo.

Metodologia

O *software* APPy foi utilizado para processar e interpretar o perfil de GR do poço. O software está sendo desenvolvido pela Universidade Federal Fluminense (UFF) através do Grupo de Interpretação Exploratória e Caracterização de Reservatórios (GIECAR).

As amostras de calhas foram separadas e lavadas em uma peneira de 0,62 mm para remover os resíduos de lama de perfuração das amostras para a descrição e análises químicas. Após a lavagem, as amostras foram secas em uma estufa aquecida a 40°C e organizadas dentro de uma capela e descarbonatadas em ácido clorídrico diluído para remoção de carbonatos (HCl 10%). Durante o processo de descarbonatação, as amostras foram colocadas em uma chapa metálica aquecida para remoção de $CaCO_3$ e o $MgCO_3$. Esse processo foi mantido por aproximadamente 24 horas. Posteriormente, as amostras foram retiradas, lavadas com água destilada para remover os restos de ácido e os sais gerados pela reação (este processo foi repetido três vezes). Após a lavagem, as amostras foram secas durante 24 horas à temperatura ambiente e 24 horas dentro de uma estufa aquecida a 40ºC para uma secagem homogênea. Após a secagem, foram separadas e pesadas duas porções de amostras: (i) uma com 5 mg para análises de $\delta^{13}C_{org}$; e outra (ii) com 50 mg para análise de $\delta^{15}N$. As diferentes frações foram armazenadas em cápsulas de estanho e analisadas utilizando um Thermo Finnigan Flash-EA, associado a um espectrômetro de massas Delta Plus no laboratório da Universidade Federal do Rio Grande (FURG).

Resultados

Gamma Ray

A Formação Pimenteiras no poço 1-OGX-93-MA tem uma espessura de aproximadamente 768 m, incluindo soleiras de diabásio e rochas metassedimentares (*intertraps*) que correspondem a 305 m de espessura total. A unidade é composta basicamente por folhelhos com intercalações de arenitos, utilizados como critério para dividir a sucessão em cinco intervalos principais de folhelhos, denominados, da base para o topo (Figuras 2, 3 e 4): Intervalo A; Intervalo B; Intervalo C; Intervalo D; e Intervalo E. Todos esses intervalos ocorrem no poço 1-OGX-93-MA (Figura 2), nas profundidades 2475 a 2508m (Intervalo A), 2235 a 2277m (Intervalo B), 2130 a 2157m (Intervalo C), 1995 a 2109m (Intervalo D) e 1791 a 1800m (Intervalo E). No Intervalo A o gamma ray (GR) permanece elevado, variando de 160 gAPI a 90 gAPI, com os valores mais elevados na base deste e os valores mais baixos no topo (Figura 2). No Intervalo B o GR é extremamente elevado na base do intervalo, ultrapassando valores de 300 gAPI, tendendo a diminuir em direção ao topo da sucessão, atingindo valores de 120 gAPI (Figura 2). Na profundidade de 2269m, apresenta o valor mais elevado de GR neste intervalo. No Intervalo C o GR tende a permanecer alto na base, com valores de 135 gAPI a 195 gAPI, mas na profundidade 2144m há um aumento significativo, chegando a 270 gAPI (Figura 2). No Intervalo o GR tem valores entre 120 gAPI e 180 gAPI no intervalo 2059/2055m, e acima deste intervalo os valores diminuem e variam de 60 gAPI a 150 gAPI entre 2055 m até o topo do intervalo (120 gAPI a 180 gAPI) (Figuras 10 e 11). No Intervalo E o GR oscila com valores de 70 gAPI a 120 gAPI.

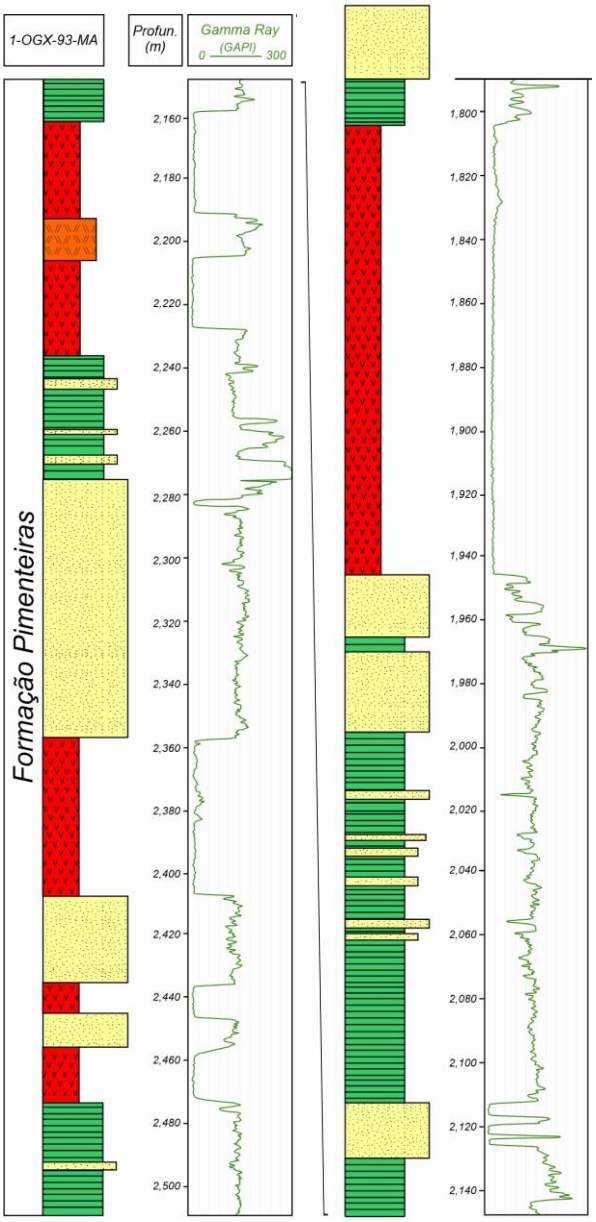

Figura 2 - Perfil composto da Formação Pimenteiras no poço 1-OGX-93-MA. Track 1: Perfil litoestratigráfico; Track 2: Profundidade; Track 3: Raios gama (GR - Gamma ray).

Razão isotópica de nitrogênio

A base do intervalo A apresenta valores de $\delta^{15}N$ em torno de 2,10‰ e valores mais empobrecidos (-6,87‰ e -2,45‰) no topo (Figura 2). No intervalo B os valores de

$\delta^{15}N$ apresentam duas grandes tendências de variação: (i) no intervalo 2259/2277m, com os folhelhos tendendo a empobrecer em $\delta^{15}N$ para valores de -6,83 ‰; e (ii) no intervalo 2271/2259m, com enriquecimento em $\delta^{15}N$ dos folhelhos para valores de 1,55‰ (Figura 2). No Intervalo C os valores de $\delta^{15}N$ apresentam uma tendência de enriquecimento semelhante em direção ao topo da sucessão, com pequenas oscilações, atingindo valores mínimos de -4,7‰ na profundidade 2151m e valores máximos de -0,99‰ na profundidade 2130 m. No Intervalo D o $\delta^{15}N$ segue uma tendência de enriquecimento desde a base do intervalo D até a profundidade de 2085 m, variando entre -2,60‰ e 0,43 ‰. Entre 2085 m e 2013 m de profundidade, os valores de $\delta^{15}N$ diminuem a taxa de enriquecimento, mas mantendo valores elevados até 2013m. A partir desta profundidade até o topo do intervalo D, os valores de $\delta^{15}N$ começam a empobrecer, atingindo -5,56 ‰ (Figura 2). No Intervalo E o $\delta^{15}N$ apresentam ligeira tendência de empobrecimento da base para o topo do intervalo, com valores que variam entre -6,80‰ (1797 m) e - 9,04‰ (1794 m) (Figura 2).

Razão isotópica de carbono

No Intervalo A, o $\delta^{13}C_{org}$ têm uma tendência de enriquecimento na base e porção intermediária do intervalo, com valor máximo de -27,30‰, diminuindo em direção ao topo até -28,40‰ (Figura 2). No Intervalo B o $\delta^{13}C_{org}$ apresenta valores mais empobrecidos na base do intervalo (em torno de -29,60‰) e enriquecidos para o topo (variando -28,78 a -27,91). No Intervalo C o $\delta^{13}C_{org}$ mostram uma tendência de depleção desde a base do intervalo até o topo, com valores variando de -28,66‰ a -29.19‰ (Figura 2). No intervalo D o $\delta^{13}C_{org}$ mostra muita oscilação ao longo do intervalo. Desde a base do intervalo (2109m), o $\delta^{13}C_{org}$ apresenta intervalos de enriquecimento nas profundidades 2097m e 2091m, com valores de -28,63‰ e -28,28‰, respetivamente, e de depleção nas profundidades 2100m, 2094m e 2082m, com valores de -28,53‰, -28,65‰ e -28,29 ‰. Após a profundidade 2082m, o $\delta^{13}C_{org}$ apresenta uma forte tendência de enriquecimento até a profundidade de 2052m, atingindo valor de - 26,37 (Figura 2). Para o topo, o $\delta^{13}C_{org}$ apresenta uma forte tendência de depleção, apresentando alguns pontos de enriquecimento nas profundidades 2049m, 2040m, 2016m e 2007m, com valores de -27,84‰, -27,96‰, -28,04‰ e -27,99‰, respetivamente (Figura 2). No Intervalo E o $\delta^{13}C_{org}$ mantém-se praticamente constante com um valor médio de -28,12‰ (Figura 2).

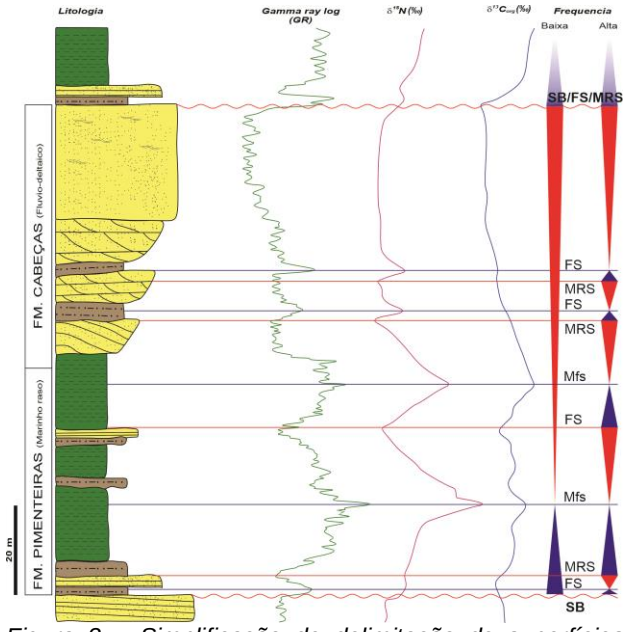

Figura 3 – Simplificação de delimitação de superfícies estratigráficas a partir de GR e razões isotópicas de nitrogênio e carbono. SB – Sequence Boundary; Mfs – Maximum Flooding Surface; FS – Flooding Surface; MRS – Maximum Regressive Surface.

Discussão e Conclusões

A sucessão foi dividida em três sequências deposicionais delimitadas por possíveis discordâncias subaéreas (Sequence boundary - SB) denominadas, da base para o topo, sequência 1 (S1), sequência 2 (S2) e sequência 3 (S3). As discordâncias foram limitadas no topo das sucessões mais espessas dos arenitos deltaicos da Formação Cabeças (Góes e Feijó, 1994; Barbosa et al., 2015), marcados por quebras significativas nos valores de GR, conforme sugerido por Embry e Catuneanu (2001) (Figura 3).

A partir da integração dos dados geoquímicos de $\delta^{13}C_{org}$, $\delta^{15}N$ e gamma ray (GR), foi possível definir algumas superfícies estratigráficas relacionadas a sequências T-R(baixa a média frequência), como: (i) superfície de inundação máxima (Maximum flooding surface - Mfs), representada por valores mais altos de GR e enriquecimento de $\delta^{15}N$, geralmente com excursões positivas de $\delta^{13}C_{org}$; (ii) superfície de inundação (Flooding surface - FS), representada por aumento brusco nos valores de GR, e depleção de $\delta^{15}N$, geralmente com excursões negativas de $\delta^{13}C_{org}$; e (iii) superfície de máxima regressão (Maximum regressive surface - MRS), que coincide com a FS que marca passagem de sucessões arenosas espessas para folhelhos.

A S1 corresponde a base da sucessão estudada, sendo representada pelo intervalo A de folhelho da Formação Pimenteiras e aproximadamente 127 m de arenitos da Formação Cabeças (Figura 4). É delimitada na base e no topo por discordâncias subaéreas, sendo a inferior um contato discordante com a Formação Itaim e a superior com os folhelhos da base de S2. A base do intervalo de folhelho A é marcada por um trend retrogradacional até

uma Mfs na profundidade de 2499 m, seguido de um trend progradacional marcado pela brusca excursão negativa de $\delta^{15}N$, gradual excursão negativa de $\delta^{13}C_{org}$. A S2 é marcada por três sequências T-R completas, representada pela alternância de trends progradacionais e retrogradacionais (Figura 4). Esta sequência é dominada por folhelhos (Intervalos B e C), com arenitos mais delgados que as demais sequências. Na base da S2 ocorrem os folhelhos do intervalo B, que apresentam uma acentuada excursão negativa de $\delta^{15}N$. Essa superfície corresponde a um importante marcador para os teores de $\delta^{13}C_{org}$ no intervalo B, tendo valores mais depletados abaixo e enriquecidos acima (Figura 4). O intervalo de folhelho C é delimitado na base por um FS que provavelmente coincide com uma MRS, devido sobrepor uma sucessão mais arenosa e marcar mudanças dos padrões de $\delta^{13}C_{org}$ e $\delta^{15}N$ do intervalo B (Figura 4). Na porção intermediária do intervalo C ocorre uma Mfs bem-marcada por um pico de aumento do GR, sucinto enriquecimento de $\delta^{15}N$ e excursão negativa de $\delta^{13}C_{org}$, seguida de um trend progradacional com arenitos sobrepostos (Figura 4).

A S3 é a sequência mais espessa da sucessão estudada (Figura 4). É representada pelos intervalos de folhelhos D e E, bem como pelos arenitos glacio-deltaicos do topo da Formação Cabeças. Devido os valores dominantemente enriquecidos de $\delta^{15}N$, não foi possível definir muitas superfícies estratigráficas neste intervalo (Figura 4). No entanto, constatou-se uma Mfs e uma FS. Na profundidade de aproximadamente 2020 m, ocorre a Mfs que limita um espesso trend retrogradacional e o início da progradação do sistema Cabeças, corroborado pelos dados de GR e $\delta^{15}N$ (Figura 4). Para a definição das superfícies do intervalo E, foram utilizados os valores de GR, $\delta^{15}N$ para a definição de uma Mfs.

Agradecimentos

Agradecimentos à ENEVA por fornecer as amostras de calha; à PETROBRAS pelo apoio financeiro; à ANP por fornecer perfis de poços; ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Geofísica de Petróleo (INCT-GP/CNPQ); ao PPGDOT/UFF pelo suporte e ensinamentos; e a CAPES pela bolsa de pesquisa.

Referências

Andrade, C.L.N., Cardoso, T.R.M., Santos, R.R., Dino, R., Machado, A.J., 2020. Organic facies and palynology from the Middle to late Devonian of the Pimenteiras formation, Parnaíba Basin, Brazil. J. S. Am. Earth Sci. 99, 102481 https://doi.org/ 10.1016/j.jsames.2019.102481.

Catuneanu, O., Bhattacharya, J. P., Blum, M. D., Dalrymple, *et al.*, 2010. Thematic Set: Sequence stratigraphy: Common ground after three decades of development. First break, 28(1).

Embry, A. F., Catuneanu, O., 2001. Practical Sequence Stratigraphy: Concepts and Applications. Can. Soc. Petrol. Geol. short course notes 167 167 pp.

Galloway, W. E., 1989. Genetic stratigraphic sequences in basin analysis I: architecture and genesis of flooding-surface bounded depositional units. AAPG bulletin, 73(2), 125-142.

Góes, A. M., Feijó, F. J., 1994. Parnaiba Basin; Bacia do Parnaiba. Boletim de Geociências da PETROBRAS, 8.

Loboziak, S., Caputo, M. V., Melo, J. H. G., 2000. Middle Devonian-Tournaisianmiospore biostratigraphy in the southwestern outcrop belt of the Parnaíba Basin, north-central Brazil. Revue de Micropaléontologie, 43(4), 301-318.

Posamentier, H. W., Jervey, M. T., Vail, P. R., 1988. Eustatic controls on clastic deposition I—conceptual framework.

Rodrigues, R., 1995. A Geoquímica Orgânica da Bacia do Parnaíba. 225p. Tese (Doutorado em Geociências). Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Vaz P.T., Rezende N.G.A.M., Filho J.R.W., Travassos W.A.S., 2007. Bacia do Parnaíba. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, Brazil, 15(2):253-263.

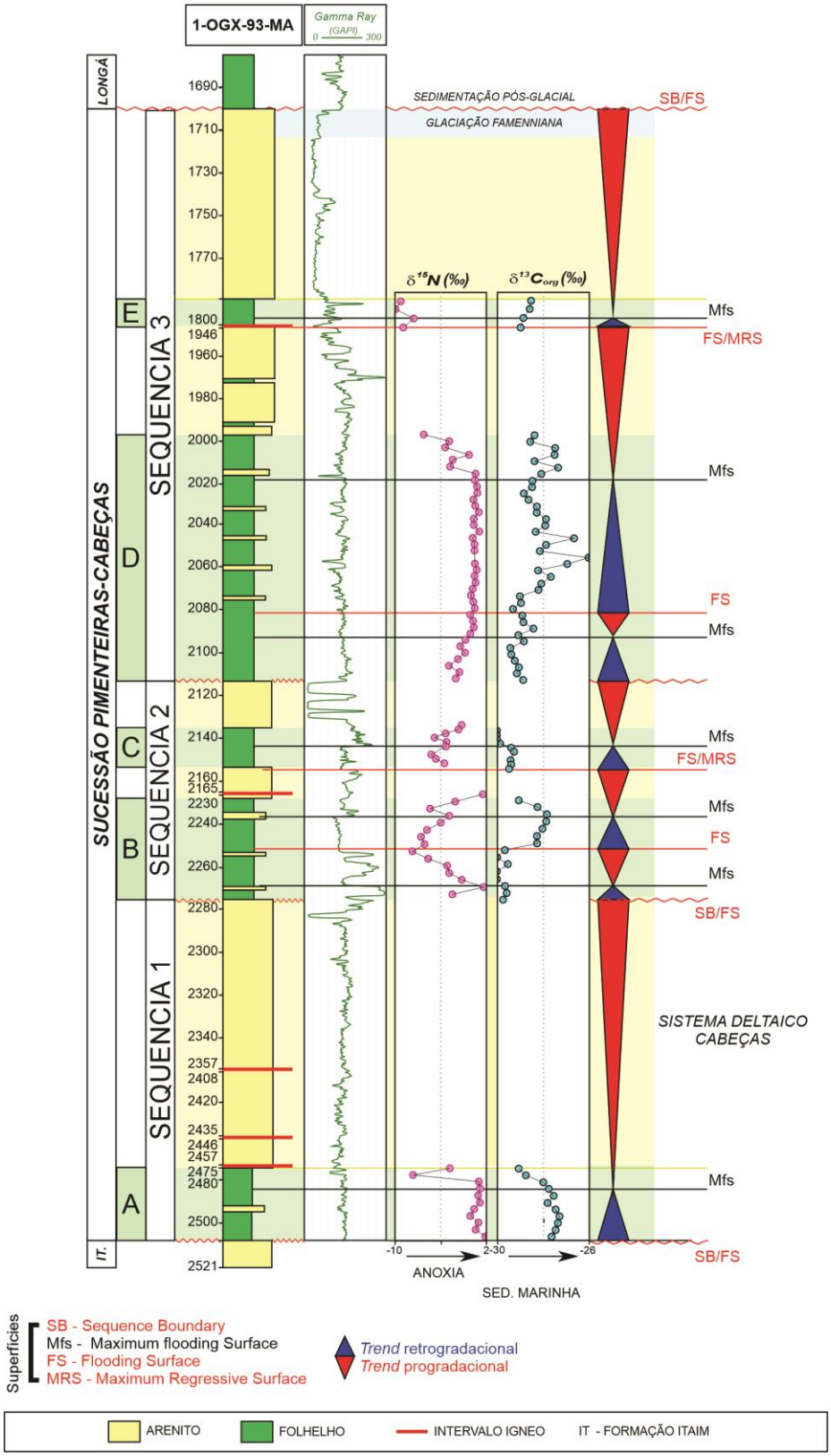

Figura 4 – Estratigrafia do poço estudado com indicação das principais sequências deposicionais e superfícies estratigráficas.