



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA

RICARDO DE MELO PEREIRA

**INTERPRETAÇÃO PALEODEPOSICIONAL DA FORMAÇÃO CABEÇAS A
PARTIR DE DADOS GAMAESPECTRAIS DE POÇOS DA ÁREA DO
PARQUE DOS GAVIÕES, BACIA DO PARNAÍBA**

Niterói-RJ

2020

RICARDO DE MELO PEREIRA

**INTERPRETAÇÃO PALEODEPOSICIONAL DA FORMAÇÃO CABEÇAS A
PARTIR DE DADOS GAMAESPECTRAIS DE POÇOS DA ÁREA DO
PARQUE DOS GAVIÕES, BACIA DO PARNAÍBA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e Terra, da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Dinâmica dos Oceanos e da Terra, com ênfase em Geologia e Geofísica.

ORIENTADOR: PROF. Dr. ANTONIO FERNANDO MENEZES FREIRE

COORIENTADOR: Dr. ROBERTO SALVADOR FRANCISCO D'ÁVILA

Niterói-RJ

2020

P436i Pereira, Ricardo de Melo

Interpretação paleodeposicional da Formação Cabeças a partir de dados gamaespectrais de poços da área do Parque dos Gaviões, Bacia do Parnaíba / Ricardo de Melo Pereira ; Antonio Fernando Menezes Freire, orientador ; Roberto Salvador Francisco D'Avila, coorientador. Niterói, 2020.
122 f. : il.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2020.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGDOT.2020.m.02809449422>

1. Espectrometria de raios gama. 2. Amostras de calha. 3. Reconstituição Paleoambiental. 4. Bacia do Parnaíba. 5. Produção intelectual. I. Freire, Antonio Fernando Menezes, orientador. II. D'Avila, Roberto Salvador Francisco, coorientador. III. Universidade Federal Fluminense. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDD -

RICARDO DE MELO PEREIRA

**INTERPRETAÇÃO PALEODEPOSICIONAL DA FORMAÇÃO CABEÇAS A
PARTIR DE DADOS GAMAESPECTRAIS DE POÇOS DA ÁREA DO
PARQUE DOS GAVIÕES, BACIA DO PARNAÍBA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e Terra, da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Dinâmica dos Oceanos e da Terra, com ênfase em Geologia e Geofísica.

Aprovada em 18 de setembro de 2020.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Antonio Fernando Menezes Freire, Dr.(Orientador) Deptº de
Geologia/LAGEMAR-UFF

Roberto Salvador Francisco D'Ávila Dr. (Coorientador) Petrobras

Prof. Cleverson Guizan Silva, Dr. Deptº de Geologia/LAGEMAR-UFF

Prof. Marcus Vinicius Berao Ade, Dr. UERJ

Niterói-RJ

2020

Agradecimentos

Agradeço a minha esposa Joilce que, junto comigo, aceitou este desafio e a Maria Luísa que chegou durante a realização.

À Petrobras que me liberou parcialmente para realizar este trabalho e cedeu software de interpretação SIGEO3, que muito ajudou.

Agradeço ao Prof. Dr. Antonio Fernando Menezes Freire e ao Geólogo Roberto Salvador Francisco D'Ávila pelo incentivo, paciência e discussões sobre o tema.

Ao Geólogo Felipe Medeiros Simbras e os colegas de interpretação de Bacias Terrestres da Petrobras, pelas discussões e orientações.

À Geofísica Jeniffer Alves Nobre e aos colegas do Projeto Parnaíba da DOT/UFF, pela colaboração no trabalho.

Agradeço à Agência de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) pela liberação de dados técnicos públicos, sem os quais não seria possível realizar este trabalho.

Resumo

A utilização de perfis de gamaespectrais auxilia na interpretação dos ambientes deposicionais e na reconstituição paleoambiental. Para obter os dados gamaespectrais em poços onde as curvas de U, Th e K não foram originalmente adquiridas, foi desenvolvida uma metodologia barata de aquisição de dados de raios gama espectrais (SGR) utilizando amostras de calha, nas quais foi medida a radiação natural emitida. Para este estudo, utilizou-se um gamaespectrômetro portátil, amostras de calha de quatro poços e dados de perfis de onze poços, obtidos em poços de petróleo que atravessaram a Formação Cabeças, de idade devoniana, na Bacia do Parnaíba, na área do Parque dos Gaviões, sete destes já possuem os perfis de SGR adquiridos em perfilagem a poço aberto. Nestas amostras de calha foram efetuadas medidas gamaespectrais. A utilização das razões Th/U, Th/K e U/K permitiu uma melhor correlação entre as curvas de laboratório e as adquiridas nas operações de perfilagem a poço aberto. Interpretou-se os intervalos, onde a razão $Th/U > 7$ como os aportes sedimentares resultantes de inundações catastróficas, condição oxidante, típica do ambiente continental, solos intemperizados e ambiente marinho raso. Com base nas frequências desses aportes dividiu-se a Fm. Cabeças em três intervalos, o intervalo intermediário apresenta maior frequência dessas inundações, foi interpretado como tendo sido depositado em ambiente mais proximal. Os outros intervalos, inferior e superior, em geral, apresentam poucas incursões com razão $Th/U > 7$, foram interpretados como ambiente mais distal. Esta metodologia de trabalho abre uma grande perspectiva para estudos geocientíficos, bem como para a redução de custos para empresas de petróleo, mineração ou de água que necessitem obter estas curvas de K, Th e U, uma vez que estas medidas, de baixo custo operacional, podem ser realizadas em amostras de calha de qualquer poço, de qualquer bacia, conferindo maior robustez e refinamento aos estudos estratigráficos, otimizando a exploração e a produção de petróleo.

Palavras-chave: Raios gamas total e espectral, Perfilagem de poços, Amostras de Calha, Bacia do Parnaíba; Reconstituição paleoambiental.

Abstract

The use of spectral gamma ray logs helps in the interpretation of depositional environments and paleoenvironmental reconstitution. In order to obtain the spectrometry range in wells where these U, Th and K curves were not originally acquired, an inexpensive methodology for acquiring spectral gamma ray (SGR) data was developed using cutting samples, in which the emitted natural radiation was measured. For this study, a portable spectrometer range, cutting samples from four wells and logs data obtained from oil wells, which cross the Cabeças Formation, Devonian of Parnaíba Basin, *Parque dos Gaviões* region were used. Seven of these already have the SGR log acquired through wireline logging. Spectral gamma ray measurements were acquired from these cutting samples. The use of the Th / U, Th / K and U / K ratios allowed for a better correlation between the laboratory curves and those acquired in wireline campaigns. The intervals were interpreted, where the Th / U > 7 ratio as the sedimentary inputs characteristic of catastrophic floods, oxidizing condition, typical of the continental environment, weathered soils and shallow marine environment. Based on the frequency of these contributions the Cabeças Formation was divided in three intervals, the intermediate interval has a higher frequency of these floods, was interpreted as having been deposited in the most proximal environment. The other intervals, lower and upper, in general, show incursions with a ratio Th / U > 7, were interpreted as a more distal environment. This work methodology opens a great perspective for geoscientific studies, as well as for cost reduction for oil, mining or water companies that need to obtain these K, Th and U curves, since these measures, of low operational cost, they can be performed on cutting samples from any well, from any basin, providing greater strength and refinement to stratigraphic studies, optimizing oil exploration and production.

Keywords: Total and spectral gamma-ray, wireline logging, cutting samples, Parnaíba Basin; Paleoenvironmental Reconstitution.

Sumário

Agradecimentos	5
Resumo	6
Abstract	7
Sumário	8
Lista de Figuras	10
Lista de Tabelas	15
1. Introdução	16
2. Objetivos	18
3. Fundamentação Teórica	19
3.1 O Princípio do equipamento:	19
3.2 A Radiação Gama:	20
3.3 Radioatividade natural das rochas:	25
3.4 Comportamento Geoquímico e transporte do Potássio, Urânio e Tório: 29	
Potássio (K):	29
Tório (Th):	31
Urânio (U):	32
4. Geologia Regional	35
4.1 Generalidades	35
4.2 Embasamento da Bacia do Parnaíba	35
4.3 Estratigrafia da Bacia do Parnaíba	40
Sequência Siluriana	40
Sequência Mesodevônica – Eocarbonífera	43
Sequência Neocarbonífera- Eotriássica	47
Sequência Jurássica	48
Sequência Cretácea	49
Rochas Magmáticas	50
5. Área de Estudo:	55
5.1 Generalidades:	55

5.2	Sistemas Petrolíferos	55
6.	Materiais e Métodos.....	61
6.1	Materiais	61
6.2	Métodos	63
	Testes iniciais:	64
	Aquisição de dados:.....	72
	Correlação de Poços:.....	73
7.	Resultados:	78
8.	Discussões:	81
9.	Conclusões:	92
10.	Bibliografia.....	94
ANEXO 1	100
ANEXO 2	111

Lista de Figuras

- Figura 1 Detector de cintilação com seu fotomultiplicador associado. O cátodo responde a um *flash* de luz no cristal liberando elétrons. A liberação de elétrons é amplificada pelo restante da estrutura do fotomultiplicador em um pulso elétrico (Modificado de Nobre, 2019)..... 20
- Figura 2 Séries de decaimento do Tório, Potássio e Urânio, (Serra, 1980)..... 21
- Figura 3 Nível energético em que os elementos K, Th e U liberam radiação gama ao sofrerem decaimento radioativo. O potássio com um único pico de energia enquanto o urânio e tório apresenta diferentes níveis de energia (Serra, 1984). 23
- Figura 4 Raios Gama Espectral e seus picos, ^{40}K (1,46 MeV), ^{238}U (várias linhas até 1,76 MeV para ^{214}Bi) e ^{232}Th (várias linhas até 2,62 MeV para ^{208}Tl), (Xu et al, 2015). 24
- Figura 5 Número de janelas no espectro observado e as janelas conhecidas de potássio (W3), urânio (W4) e tório (W5), assim como totalGR (W1 e W2) (Ellis & Singer, 2007). 25
- Figura 6 Gráfico *crossplot* comparando o comportamento dos minerais em relação à razão tório e potássio, de acordo com o método de interpretação de dados da Schlumberger, (2013). 27
- Figura 7 Intervalo da Formação Pimenteiras, em cota, onde ocorrem folhelhos do provável principal intervalo gerador da Bacia do Parnaíba, setas pretas, areias de ingressões terrígenas, setas amarelas e depósitos marinhos rasos, setas azuis, conforme demonstrado por Klaja e Dudek, 2016. Perceber as grandes baixas da razão Th/U e grandes altas da razão U/K nos intervalos destacados pelas setas pretas..... 29
- Figura 8: Os 3 principais lineamentos do embasamento da Bacia do Parnaíba: Lineamento Tocantins-Araguaia Lineamento Picos-Santa Inês Lineamento Transbrasiliano, Os arcos de Tocantins, Ferrer - Urbano Santos e de São Francisco, os Limites e principais estruturas na bacia do Parnaíba (Modificado de Fernandes, 2011, Milani e Zalan, 1998, *apud* Ferreira, 2018, Fortes, 1978 *apud* Santos e Carvalho, 2009) 37
- Figura 9 Mapa tectono-estrutural interpretado da Bacia do Parnaíba (Castro et al, 2014) Apresenta o Lineamento Transbrasiliano (TB) associado ao principal depocentro sedimentar do Paleozoico da Bacia do Parnaíba (Cordani et al. 2013)..... 39
- Figura 10 Carta estratigráfica Bacia do Parnaíba (Vaz et al., 2007)..... 42
- Figura 11 Figura Seção sísmica 2D regional e interpretação geológica com as principais formações encontradas em toda a bacia. Soleiras de diabásio (em vermelho) ocorrem em vários níveis estratigráficos (modificado de Miranda et al, 2018)..... 52

Figura 12 Seção geológica esquemática interpretada, do Parque dos Gaviões, com base em poços, na direção SW-NE, mostrando as Supersequências Siluriana Neocarbonífera-Eotriássica, Jurássica-Cretácea e as intrusões de rochas magmáticas, detalhando a Supersequencia Mesodevoniana-Eocarbonífera nas Formações Itaim, Pimenteiras, Cabeças, Longá e Poti.	53
Figura 13 Seção geológica esquemática interpretada, do Parque dos Gaviões, com base em poços, na direção NW-SE, mostrando as supersequências Siluriana Neocarbonífera-Eotriássica, Jurássica-Cretácea e as intrusões de rochas magmáticas, detalhando a Supersequencia Mesodevoniana- Eocarbonífera nas Formações Itaim, Pimenteiras, Cabeças, Longá e Poti.	54
Figura 14 Localização do Parque dos Gaviões e dos campos de produção e desenvolvimento (Ferreira, 2018).	55
Figura 15 Modelo esquemático de Play tipo “chapéu de coco”, arenitos devonianos da Formação Cabeças e arenitos carboníferos da Formação Poti trapeados e selados por intrusões ígneas (modificado de Abelha, 2018).	57
Figura 16 Seção geológica esquemática representando arenitos plataformais devonianos da Formação Cabeças, trapeados em estrutura dômica regional da Formação Longá, desenvolvida por falha de empurrão (Araújo e Ferreira, 2017).	57
Figura 17 Seção Geológica na área do Parque dos Gaviões onde ocorrem as acumulações do tipo “chapéu de coco”, soleiras em vermelho, e domos regionais na Formação Longá, em verde (Cunha et al., 2012 apud Ferreira, 2018).	58
Figura 18 Carta de eventos dos sistemas petrolíferos Pimenteira-Cabeças(!), Pimenteiras-Poti(!) e Pimenteiras-Piauí(!) com base na carta cronoestratigráfica v2019/05 da <i>International Commission on stratigraphy</i>	60
Figura 19 Mapa de localização dos campos de produção, poços e seção arbitrária utilizados neste estudo, na região do Parque dos Gaviões, Bacia do Parnaíba, Brasil.	62
Figura 20 1 e 2) Aquisição de dados de raios gama total e espectral, a partir de amostra de calha, em saco de tecido <i>tnt</i> , com o gamaespectrômetro portátil RS-230, sobre a malha de chumbo, no laboratório da UFF. 3) Detalhe da tela do equipamento.	65
Figura 21 Curvas de raios gama totais. Em verde a curva adquirida no poço na campanha de perfilagem, em API; em vermelho, azul e preto as curvas medidas em laboratório em nGy/h, de 90, 60 e 30 segundos de exposição ao gamaespectrômetro RS-230 respectivamente (Nobre, 2019).	66
Figura 22 Amostra padrão, cilindro plástico com 8,5 cm de diâmetro, contendo areia monazítica coberta por resina (Nobre, 2019).	68
Figura 23 Gráfico de dispersão das medições de Gama total da amostra teste e do <i>background</i> . Em vermelho, amostra teste, fora da malha, em azul amostra teste dentro	

da malha e, em verde, o *background* dentro da malha. No eixo X apresenta-se o número de medidas e no eixo y os valores de totalGR em nGy/h. 68

Figura 24 Gráfico de dispersão das medições de Potássio da amostra teste e do *background*. Em vermelho, amostra teste, fora da malha, em azul amostra teste dentro da malha e, em verde, o *background* dentro da malha. No eixo X apresenta-se o número de medidas e no eixo y os valores de K (%). 69

Figura 25 Gráfico de dispersão das medições de Urânio da amostra teste e do *background*. Em vermelho, amostra teste, fora da malha, em azul amostra teste dentro da malha e, em verde, o *background* dentro da malha. No eixo X apresenta-se o número de medidas e no eixo y os valores de U (ppm). 69

Figura 26 Gráfico de dispersão das medições de Tório da amostra teste e do *background*. Em vermelho, amostra teste, fora da malha, em azul amostra teste dentro da malha e, em verde, o *background* dentro da malha. No eixo X apresenta-se o número de medidas e no eixo y os valores de Th (ppm). 70

Figura 27 Gráfico histograma da mediana dos valores de Potássio (%) (vermelho), Urânio (ppm) (preto) e Tório (ppm) (azul) na Formação Cabeças. Observa-se grandes variações nos valores dos três elementos, quando comparados os poços onde a gamaespectrometria foi adquirida no laboratório (1-OGX-93-MA, 1-OGX-101-MA, 4-OGX-49-MA e 1-OGX-110-MA) em relação aos adquiridos em perfilagem a cabo (1-OGX-77-MA, 3-GX-38-MA, 1-OGX-16-MA, 2-CP-1-MA, 3-OGX-46D-MA, 1-OGX-34-MA e 1-PGN-1-MA), O poço 1-PGN-1-MA apresenta uma escala diferente dos outros poços. 71

Figura 28 Gráfico histograma da mediana dos valores das razões Th/U (azul), Th/K (10^{-4}) (preto), U/K (10^{-4}) (vermelho) na Formação Cabeças. Observa-se que as razões apresentam valores medianos semelhantes. Apenas o poço 2-CP-1-MA apresentou a escala diferente para a razão Th/U, e U/K mas foram corrigidas para visualização em perfil, utilizando o dobro e metade, respectivamente, das escalas de perfil utilizada para plotar os outros poços. Os valores da razão Th/K, que teve o dado desprezado por se apresentar incoerente. 72

Figura 29 Legenda de litologias com ocorrência neste trabalho. 74

Figura 30 Unidades litoestratigráficas e intervalos interpretados nos poços deste trabalho. 75

Figura 31 Poço 1-OGX-101-MA com elevação em cota, com todos os dados de perfil, de laboratório e perfis elétricos, utilizados para realizar a correlação de poços, GR (raios gama), CALIPER (calibre), as razões calculadas Th/U, Th/K e U/K, além dos perfis de laboratório U, Th e K, o crossover U e Th, Litologia interpretada, Resistividade, o *crossover* NPHI (nêutrons) e densidade, Sônico compressional e PEF (Efeito fotoelétrico). 76

Figura 32 Poço 1-OGX-101-MA com elevação em cota, com os perfis elétricos GR (raios gama), CALIPER (calibre), NPHI (nêutrons) e densidade e de laboratório U e Th,

além das razões calculadas Th/U e U/K. Divisão da Formação Cabeças, o intervalo intermediário, entre as linhas laranja e verde, apresenta a razão Th/U mais elevado que nos intervalos inferior e superior. Perceba que a densidade de amostragem nos perfis de laboratório e suas razões calculadas são bem menores que dos perfis elétricos. 77

Figura 33 Poço 3-OGX-38-MA com elevação em cota, com os perfis elétricos GR (raios gama), CALIPER (calibre), U e Th, além das razões calculadas Th/U e U/K, NPHI (nêutrons) e densidade. Divisão da Formação Cabeças, o intervalo intermediário, entre os marcadores intermediário topo (linha laranja) e inferior topo (linha verde), apresenta a razão Th/U mais elevado que nos intervalos inferior e superior. Este intervalo com maiores valores da razão Th/U é destacado em amarelo no cruzamento com o perfil da razão U/K. 79

Figura 34 Gráfico *crossplot* dos valores de tório, em ppm versus potássio em percentual, comparando o comportamento dos pontos de acordo com o método de interpretação de dados da Schlumberger, (2013), para todo o intervalo da Fm. Cabeças dos poços 1-OGX-34-MA (azul), 3-OGX-38-MA (laranja), 1-OGX-16-MA (vermelho), 1-OGX-77-MA (preto) e 3-OGX-46D-MA (verde) adquiridos em perfilagens a poço aberto. 80

Figura 35 Gráfico *crossplot* dos valores de tório, em ppm versus potássio em percentual, comparando o comportamento dos pontos de acordo com o método de interpretação de dados da Schlumberger (2013), para todo o intervalo da Fm. Cabeças dos poços 1-OGX-101-MA (laranja), 1-OGX-110-MA (azul), 1-OGX-93-MA (verde) e 4-OGX-49-MA (vermelho) adquiridos em laboratório. 81

Figura 36 Gráfico de histograma da Mediana dos valores de totalGR por intervalo. Onde o intervalo inferior apresenta valores mais elevados que o intervalo intermediário. 83

Figura 37 Gráfico de histograma da mediana da Razão Th/U por intervalo. Onde o intervalo intermediário em geral apresenta valores mais elevados que os intervalos inferior e superior, o que denota um maior influxos de sedimentos continentais. 84

Figura 38 Poço 1-OGX-93-MA em cota, com os três intervalos identificados na Formação Cabeças. Observar que no intervalo superior a razão Th/U cai enquanto a razão U/K aumenta, devido à queda nos valores de tório e aumento de urânio. Nos intervalos destacados em amarelo observamos aumento na razão Th/U e redução na U/K, interpretando, assim, aportes continentais possivelmente devido ao derretimento de camadas de gelo. Este poço teve a gamaespectrometria levantada no laboratório.

85

Figura 39 Poço 1-OGX-77-MA em cota, com os três intervalos identificados na Formação Cabeças. Observar que no intervalo superior a razão Th/U cai enquanto a razão U/K aumenta, devido à queda nos valores de tório e aumento de urânio. Nos intervalos destacados em amarelo observamos aumento na razão Th/U e redução na U/K, interpretando, assim, aportes continentais, possivelmente devido ao derretimento

de camadas de gelo. Este poço teve a gamaespectrometria levantada na campanha de perfilagem..... 86

Figura 40 A) Os pontos vermelhos (poço 1-OGX-16-MA) com valores de tório superiores a 25 ppm, identificados pelo retângulo vermelho, são provenientes dos intervalos Inferior e Superior (B), e das litologias siltito, metassiltito e poucos pontos de arenito (C), minerais pesados, onde concentra-se o tório, ocorrem em fração de areia e silte. Observe que estes siltitos e metassiltitos com grandes quantidades de minerais pesados não ocorrem como anomalias de densidade na rocha..... 89

Figura 41 A) Os pontos vermelhos (poço 1-OGX-16-MA) com valores de tório superiores a 25 ppm, identificados pelo retângulo vermelho, são provenientes dos intervalos Inferior e Superior (B), e das litologias siltito, metassiltito e poucos pontos de arenito (C), minerais pesados, onde concentra-se o tório, ocorrem em fração de areia e silte. Observa-se que os prováveis minerais pesados com mais de 25 ppm de tório não são os que apresentam a razão Th/U maior que sete. 90

Figura 42 Comparação dos gráficos de Th x K. À esquerda, poços cuja gamaespectrometria foi adquirida em laboratório, à direita adquirida em perfilagem a poço aberto. O retângulo vermelho identifica a área onde as amostras de laboratório foram plotadas, no gráfico à esquerda, e compara a mesma área no gráfico das amostras adquiridas em perfis de poço aberto, à direita. Algumas amostras adquiridas em poço aberto também possuem valores similares às de laboratório, no entanto a grande maioria apresenta valores menores. 91

Figura 43 Seção geológica de poços em cota, datum topo da Fm. Cabeças. Toda a Fm. Cabeças. Influxos continentais interpretados em amarelo. 111

Figura 44 Seção geológica de poços em cota, datum topo da Fm. Cabeças. Intervalos Intermediário e Superior da Fm. Cabeças. Influxos continentais interpretados em amarelo..... 112

Figura 45 Perfil do poço 1-OGX-93-MA elevação em cota, marcos: Topo da Fm. Pimenteiras em verde escuro, topo do intervalo inferior em verde claro, topo do intervalo intermediário em laranja e topo da Formação Cabeças em marrom..... 113

Figura 46 Perfil do poço 1-OGX-77-MA elevação em cota, marcos: Topo da Fm. Pimenteiras em verde escuro, topo do intervalo inferior em verde claro, topo do intervalo intermediário em laranja e topo da Formação Cabeças em marrom..... 114

Figura 47 Perfil do poço 1-OGX-101-MA elevação em cota, marcos: Topo da Fm. Pimenteiras em verde escuro, topo do intervalo inferior em verde claro, topo do intervalo intermediário em laranja e topo da Formação Cabeças em marrom..... 115

Figura 48 Perfil Perfil do poço 3-OGX-38-MA elevação em cota, marcos: Topo da Fm. Pimenteiras em verde escuro, topo do intervalo inferior em verde claro, topo do intervalo intermediário em laranja e topo da Formação Cabeças em marrom..... 116

Figura 49 Perfil do poço 4-OGX-49-MA elevação em cota, marcos: Topo da Fm. Pimenteiras em verde escuro, topo do intervalo inferior em verde claro, topo do intervalo intermediário em laranja e topo da Formação Cabeças em marrom..... 117

Figura 50 Perfil dos poços 1-OGX-16-MA e 2-CP1-MA, elevação em cota, datum topo da Formação Cabeças, marcos: Topo da Fm. Pimenteiras em verde escuro, topo do intervalo inferior em verde claro, topo do intervalo intermediário em laranja e topo da Formação Cabeças em marrom. A distância entre os poços é de aproximadamente 1km..... 118

Figura 51 Perfil do poço Perfil do poço 3-OGX-46D-MA elevação em cota, marcos: Topo do intervalo inferior em verde claro, topo do intervalo intermediário em laranja e topo da Formação Cabeças em marrom..... 119

Figura 52 Perfil do poço 1-OGX-34-MA elevação em cota, marcos: Topo da Fm. Pimenteiras em verde escuro, topo do intervalo inferior em verde claro, topo do intervalo intermediário em laranja e topo da Formação Cabeças em marrom..... 120

Figura 53 Perfil do poço 1-OGX-110-MA elevação em cota, marcos: Topo da Fm. Pimenteiras em verde escuro, topo do intervalo inferior em verde claro, topo do intervalo intermediário em laranja e topo da Formação Cabeças em marrom..... 121

Figura 54 Perfil do poço 1-PGN-1-MA elevação em cota, marcos: Topo da Fm. Pimenteiras em verde escuro, topo do intervalo inferior em verde claro, topo do intervalo intermediário em laranja e topo da Formação Cabeças em marrom..... 122

Lista de Tabelas

Tabela 1 Radioelemento, isótopo e energia de raios gama utilizada em pesquisas gama. Os emissores de raios gama, bismuto (Bi) e tálio (Tl), são utilizados para estimativa das concentrações equivalentes de urânio e tório (IAEA, 2010). 22

Tabela 2 Importância geológica das razões espectrais (adaptado de Fertl, (1979)).... 28

Tabela 3 Características, associações e ocorrência dos elementos K, Th e U, adaptado de Klaja e Dudek (2016)..... 34

Tabela 4 Poços utilizados neste trabalho, em vermelho, os poços foram realizadas medidas de raios gama total e espectral para constituição de perfis de; em azul, poços onde dados de raios gama espectrais foram adquiridos durante as operações de perfilagem a poço aberto; em preto poços utilizados para auxiliar o empilhamento estratigráfico. 62

1. Introdução

A primeira ferramenta de perfilagem de poço para detectar a radioatividade de ocorrência natural em formações geológicas foi utilizada no final da década de 1930. Avanços tecnológicos subsequentes permitiram determinar as energias dos raios gama, bem como o número total de raios gama produzidos por radioisótopos naturais dentro de uma formação. Na década de 1970 um gamaespectrômetro foi instalado em uma ferramenta de perfilagem e utilizado nos reservatórios Jurássicos do Mar do Norte, para detecção de mica e posterior cálculo dos volumes de argila (Marett *et al.*, 1976). Desde então, a Ferramenta de Espectrometria de Raios Gama Natural foi empregada em todo o mundo. A ferramenta também foi utilizada para fornecer informações relevantes para a determinação da mineralogia da argila, e volumes precisos de argila foram calculados em reservatórios de arenito e carbonato contendo argilas simples e complexas. Assim, permitiu a análise precisa de rochas reservatórios, auxiliando na identificação mineral e no cálculo de volumes precisos de argila (Serra *et al.* 1980).

A utilização de perfis gamaespectrais (SGR) auxilia na interpretação dos ambientes deposicionais. No entanto, este tipo de investigação, durante as campanhas de perfilagem, não são realizadas sistematicamente em todos os poços perfurados. Para este estudo, utilizou-se dados de sete poços onde foram corridas as ferramentas de SGR a poço aberto e em outros cinco poços foram levantados os dados de SGR a partir de suas amostras de calha, possibilitando assim a construção de perfis de laboratório, para a comparação das assinaturas entre os poços e a validação dos resultados obtidos. Infelizmente em nenhum poço onde foram realizadas medidas gamaespectrais foi corrido o SGR a poço aberto, pois o confronto destas medidas seria ideal para uma calibração mais precisa.

A Ferramenta de Espectrometria de Raios Gama Natural detecta raios gama que ocorrem naturalmente de várias energias emitidas pelos minerais que compõem a rocha. Quantidades e tipos de elementos presentes são determinados pela origem dos sedimentos e o que aconteceu com a rocha desde a deposição. Tório, urânio e o potássio (^{232}Th , ^{238}U e ^{40}K) são os

principais responsáveis pelos espectros de energia observados pela ferramenta. As contribuições individuais dos três elementos em relação aos raios gama total da formação rochosa são calculadas a partir dos espectros de energia. As concentrações elementares, assim calculadas, mostraram correlação com ambiente deposicional, processos geomórficos e diagenéticos, tipo e volume de argila (Serra *et al.* 1980).

O gamaespectrômetro mede raios gama com energias que variam de abaixo de 0,5 meV a bem acima de 2,5 meV, apresentando os espectros individuais para as três séries de decaimento responsáveis pela maior parte da radiação natural. As várias séries são devidas aos elementos pai ^{232}Th , ^{238}U e ^{40}K . O tório está associado apenas a sedimentos detríticos, nunca a sedimentos puramente químicos, enquanto o urânio está associado a sedimentos detríticos e químicos, o potássio está principalmente associado à formação das argilas. (Serra *et al.* 1980).

A empresa OGX iniciou em 2010 uma série de notificações de descoberta de gás na Bacia do Parnaíba, posteriormente colocando em produção os campos Gavião Real, Gavião Vermelho, Gavião Branco, Gavião Caboclo e Gavião Azul, conhecidos como Parque dos Gaviões, tendo sido perfurados cerca de 140 poços (ENEVA, 2020). Entretanto, a maioria só dispõe de uma suíte básica de perfis, o que não contribui o suficiente para o entendimento dos ambientes deposicionais da bacia.

Atualmente a Bacia do Parnaíba possui 24,1 bilhões de metros cúbicos de reservas remanescentes certificadas, sendo esse gás produzido o responsável pela geração de 1,4 GW, 11% da energia térmica a gás do Brasil. Estão em operação quatro usinas termoelétricas que utilizam o gás dos campos próximos. Toda energia gerada é enviada para o Sistema Interligado Nacional (ENEVA, 2020). Desta forma, técnicas que possam otimizar a produção, com redução de custos, são necessárias para um melhor aproveitamento desse gás.

A utilização dos perfis gamaespectrais adquiridos com a perfilagem a poço aberto, associados aos dados medidos nas amostras de calha em laboratório,

assim como os perfis de raios gama total, auxiliam na correlação de poços e no mapeamento de aportes sedimentares na bacia.

Neste trabalho utilizou-se perfis elétricos de doze poços inclusive os perfis de raios gamaespectrais corridos a poço aberto e perfis de raios gamaespectrais construídos em laboratório, realizando correlações estratigráficas. Analisando as tendências das curvas da razão Th/U, U/K e de raios gama total, a Formação Cabeças pôde ser dividida em três estágios deposicionais. No estágio inferior a razão Th/U é baixa, e os raios gama total os mais altos dos três intervalos. No intervalo intermediário a relação Th/U é mais alta, e os valores de raios gama total são os mais baixos desta Formação. Já o intervalo, superior, apresenta baixa razão Th/U, e o perfil de raios gama total mostra aumento para o topo.

2. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é realizar uma Interpretação paleodeposicional na Formação Cabeças, na área do Parque dos Gaviões, Bacia do Parnaíba.

O objetivo específico é adquirir dados gamaespectrais a partir de amostras de calha, entender a variação das concentrações de tório, urânio e potássio presentes nas amostras e em perfis gamaespectrais, realizados a poço aberto, integrando com dados de rocha e demais perfis elétricos, entendendo o padrão de empilhamento estratigráfico, realizar correlação de poços e fazer interpretação do conjunto de dados.

3. Fundamentação Teórica

3.1 O Princípio do equipamento:

O gamaespectrômetro portátil RS-230 Super-SPEC Handheld Gamma-Ray Spectrometer, que foi utilizado neste trabalho, é equipado com um detector de radiação à cintilação do tipo BGO. (RS-125/230 User Manual, 2015). Ele possui um material cintilador inorgânico associado a uma válvula fotomultiplicadora, que transforma os sinais luminosos produzidos pela radiação, no material cintilador, em sinais elétricos com intensidade conveniente para serem processados em um sistema de contagem ou de espectroscopia (Tauhata *et al*, 2013).

Configurado no modo ASSAY, ele fornece a cada medida, além do valor de dose de radiação, denominado TotalGR, em nGy/h, os valores de Potássio (K) em (%) e partes por milhão (ppm) para Urânio e Tório (U e Th) (RS-125/230 *User Manual*, 2015).

O detector BGO, germanato de bismuto ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$), é um cintilador inorgânico puro, isto é, não necessita de um ativador para promover o processo de cintilação. Isso ocorre porque a luminescência está associada à transição ótica do Bi^{3+} . Comparado ao iodeto de sódio, tem, além disso, boas propriedades mecânicas e de resistência à umidade. A principal vantagem do BGO é sua alta densidade ($7,3 \text{ g/cm}^3$) e o elevado número atômico do bismuto, o que faz dele o detector com maior probabilidade de interação por volume entre os mais comumente utilizados (Tauhata *et al*, 2013).

Segundo o fabricante, o detector do tipo BGO apresenta uma performance três vezes maior que um detector de iodeto de sódio (NaI).

O funcionamento desse tipo de detector cintilador ocorre quando a energia emitida na forma de fótons de um volume de formação que contém radiação gama natural constituído pelos radioisótopos K, U e Th, atingem a estrutura cristalina do detector. Esses transmitem sua energia a uma cascata de elétrons que ficam presos enquanto uma luz visível ou quase visível é emitida. Os *flashes* de luz são então detectados por um tubo fotomultiplicador acoplado

opticamente ao cristal e transformados em um pulso elétrico (Figura 1). A altura do pulso de saída pode estar relacionada à energia total depositada no cristal pelo elétron energético inicial, com a grande vantagem para a gamaespectrometria pela possibilidade de identificar e separar a energia característica de cada radionuclídeo (Ellis & Singer, 2007).

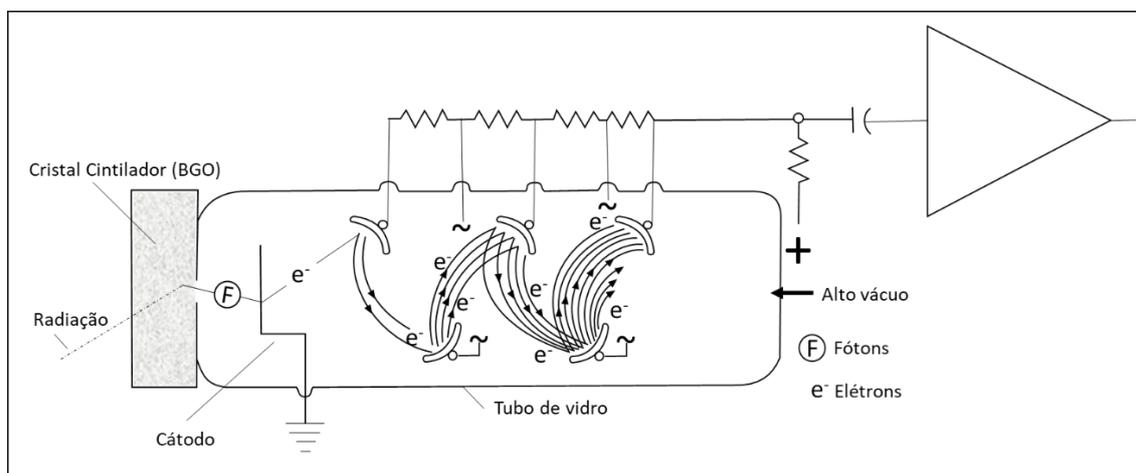


Figura 1 Detector de cintilação com seu fotomultiplicador associado. O cátodo responde a uma *flash* de luz no cristal liberando elétrons. A liberação de elétrons é amplificada pelo restante da estrutura do fotomultiplicador em um pulso elétrico (Modificado de Nobre, 2019).

3.2 A Radiação Gama:

Radiação nuclear é o nome dado às partículas ou ondas eletromagnéticas emitidas pelo núcleo durante o processo de reestruturação interna, para atingir a estabilidade, são indicadores do resultado das transformações do núcleo instável, na busca de estados de maior estabilidade. A desintegração de elementos radioativos libera energia através da emissão de partículas alfa (α), beta (β) e da radiação gama (γ) (Tauhata *et al*, 2013).

Potássio, Urânio e Tório são os únicos elementos de ocorrência natural com radioisótopos que são facilmente detectáveis usando os detectores de NaI, ou BGO, comumente usados em pesquisas de campo. O potássio é medido pelas emissões gama de ^{40}K , o único isótopo radioativo de potássio, ocorrência natural de 0,012%. Já ^{238}U e o ^{232}Th são instáveis e dão origem a séries de decaimento (Figura 2), que terminam em isótopos estáveis. Registram-se emissões gama de elementos filhos destas séries de decaimento, para estimar indiretamente as concentrações de Urânio e Tório na amostra (IAEA, 2010).

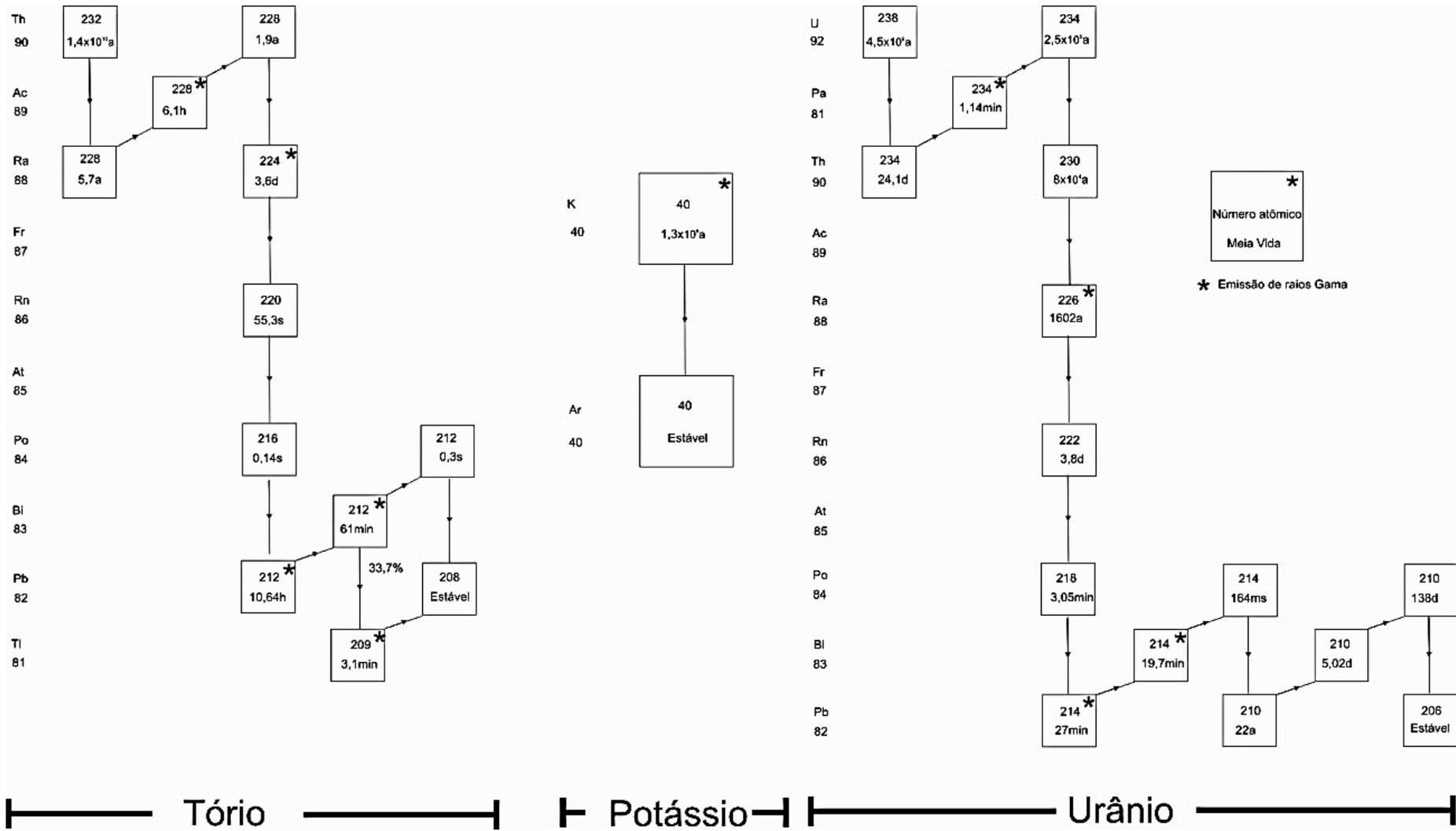


Figura 2 Séries de decaimento do Tório, Potássio e Urânio, (Serra, 1980).

Quando um núcleo decai por emissão de radiação alfa ou beta, geralmente o núcleo residual tem seus nucleons fora da configuração de equilíbrio, ou seja, estão alocados em estados excitados. Assim para atingir o estado fundamental, emitem a energia excedente sob a forma de radiação eletromagnética, denominada radiação gama (γ) (Tauhata *et al*, 2013).

A maioria dos erros na espectrometria gama vem da natureza estatística do decaimento radioativo. Cada decaimento radioativo é um evento aleatório. Uma propriedade especial dessa distribuição é que a variação é igual à média. Conseqüentemente, se duas medições forem realizadas sobre a mesma fonte, a soma das duas medições terá um erro fracionário menor que o das medições individuais. O tempo de integração da amostra (intervalo amostral) depende do objetivo da pesquisa - quanto maior o intervalo amostral, maior a precisão da medição (IAEA, 2010).

Os raios gama são ondas eletromagnéticas, entre 10^9 e 10^{21} Hz, e têm energias associadas que são medidas em elétron-volts (eV) ($1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Joule}$) (Tauhata *et al*, 2013). O princípio da gamaespectrometria se baseia nos picos de energia dos radioisótopos presentes nas rochas (Tabela 1), ^{40}K (1,46 MeV), ^{238}U (várias linhas até 1,76 MeV para ^{214}Bi) e ^{232}Th (várias linhas até 2,62 MeV para ^{208}Tl), (Figura 3 e Figura 4) (Xu *et al*, 2015).

Tabela 1 Radioelemento, isótopo e energia de raios gama utilizada em pesquisas gama. Os emissores de raios gama, bismuto (Bi) e tálio (Tl), são utilizados para estimativa das concentrações equivalentes de urânio e tório (IAEA, 2010).

Radioelemento	Isótopo emissor de raios gama	Energia
Potássio-40	^{40}K	1,46 MeV
Urânio-238	^{214}Bi	1,76 MeV
Tório-232	^{208}Tl	2,62 MeV

Os raios gama emitidos pelas três séries de decaimento possuem números de energias diferentes. Na Figura 3 são mostrados os três espectros de emissão de raios gama correspondentes, cada espectro caracteriza uma série de decaimento, cada série possui uma "assinatura" espectral que permite discernir sua presença (Serra, 1984).

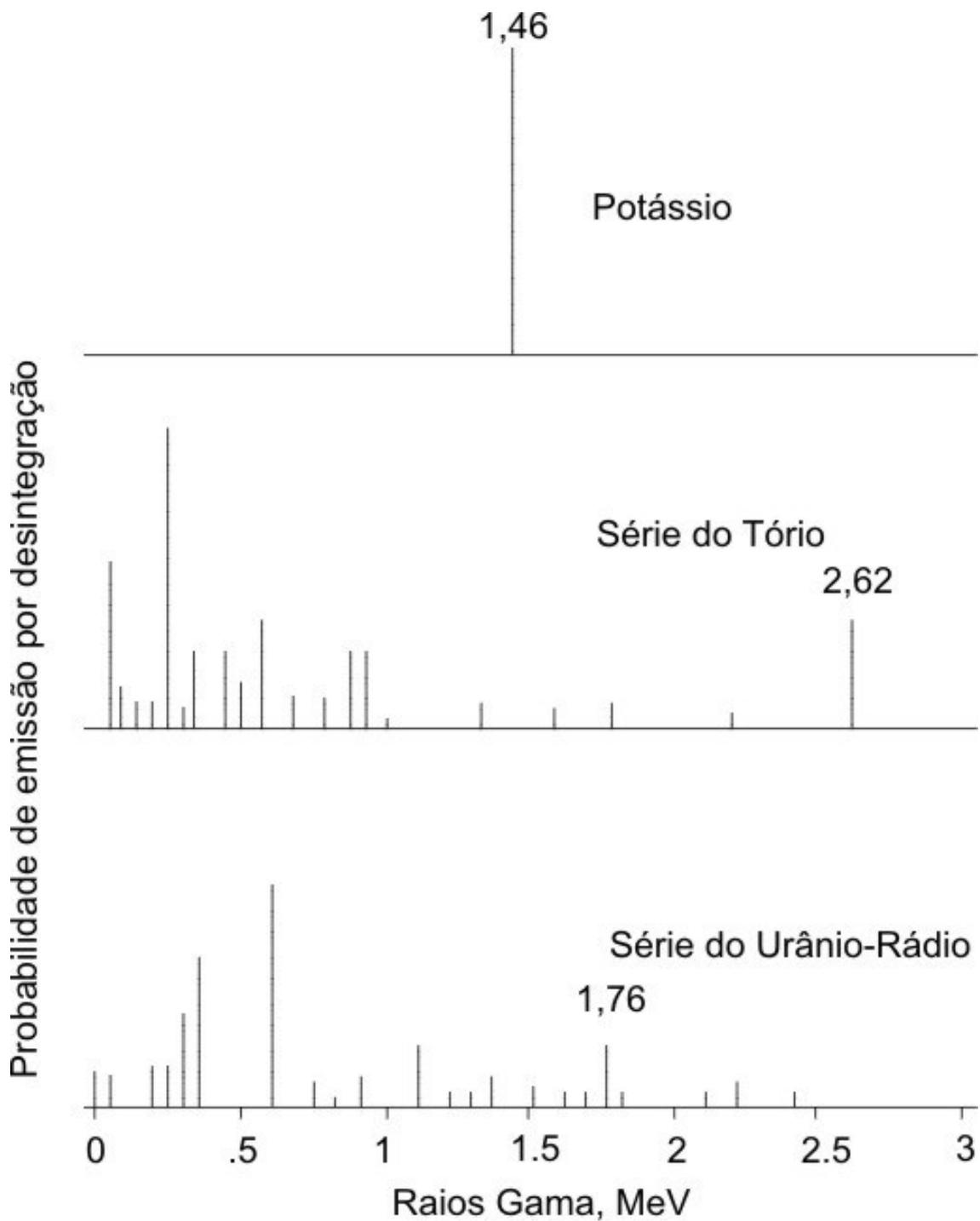


Figura 3 Nível energético em que os elementos K, Th e U liberam radiação gama ao sofrerem decaimento radioativo. O potássio com um único pico de energia enquanto o urânio e tório apresenta diferentes níveis de energia (Serra, 1984).

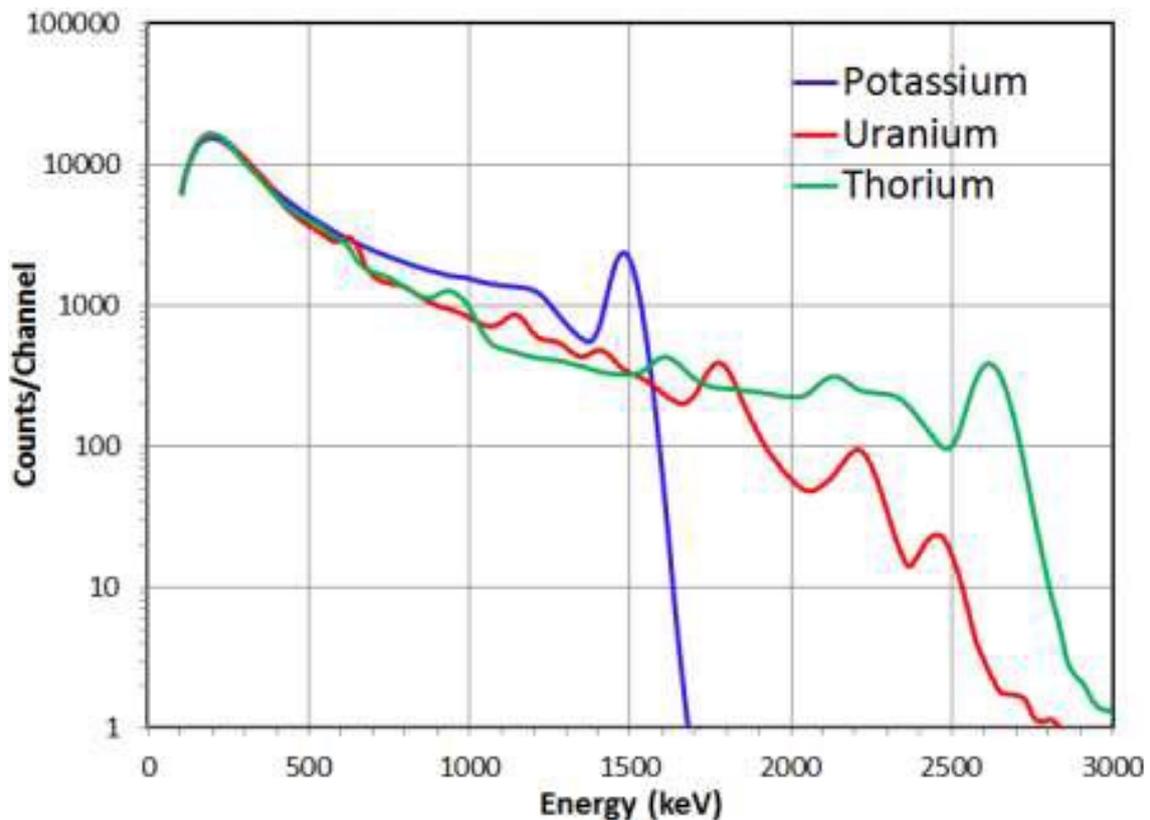


Figura 4 Raios Gama Espectral e seus picos, ^{40}K (1,46 MeV), ^{238}U (várias linhas até 1,76 MeV para ^{214}Bi) e ^{232}Th (várias linhas até 2,62 MeV para ^{208}Tl), (Xu et al, 2015).

Uma técnica de redução de dados divide o espectro observado em várias janelas. Na ilustração da Figura 5, o número de janelas é cinco. Por uma série de medições em formações especialmente construídas que contêm concentrações conhecidas dos três isótopos radioativos, é possível construir uma resposta matriz. Essa matriz relaciona as taxas de contagem (W_1, W_2, \dots, W_5) nas cinco janelas para as concentrações de urânio, tório e potássio. (Ellis & Singer, 2007).

O tório se localiza na extremidade de alta energia do espectro de raios gama, é dimensionado e registrado diretamente. Os raios gama difundidos do tório são removidos dos canais de urânio, enquanto os raios gama dispersos do urânio e tório são removidos dos canais de potássio (Fertl, 1979).

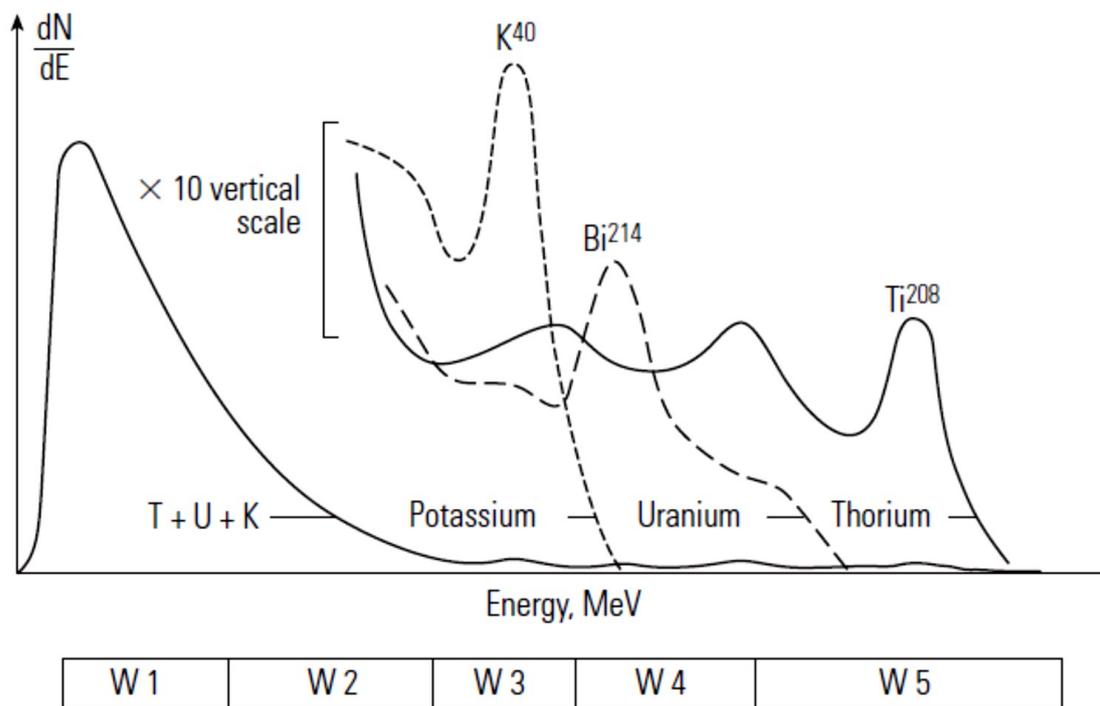


Figura 5 Número de janelas no espectro observado e as janelas conhecidas de potássio (W3), urânio (W4) e tório (W5), assim como totalGR (W1 e W2) (Ellis & Singer, 2007).

3.3 Radioatividade natural das rochas:

O registro de raios gama em poços foi introduzido no final da década de 1930, e imediatamente foi incorporada pela facilidade em distinguir formações argilosas de areias limpas (Ellis & Singer, 2007).

Isótopos radioativos são oriundos principalmente de rochas ígneas, sendo transportados e depois acumulados em sedimentos predominantemente finos. Normalmente, a alta resposta de raios gama indica a presença destes depósitos, folhelhos, argilas e folhelhos, por outro lado medidas baixas indicam presença de arenitos grossos e carbonatos. A principal característica dos medidores de raios gama espectral (SGR) é a capacidade de distinguir emissões gama de potássio, urânio e tório (Klaja e Dudek, 2016). No entanto, a leitura de raios gama não é necessariamente a resposta ao tamanho dos grãos, mas da mineralogia. Por exemplo, a leitura de raios gama de um arenito fino limpo (sem argila) é bem semelhante a um arenito grosso da mesma mineralogia. De fato, um arenito limpo constituído por feldspatos de potássio,

micas, glauconita, monazita ou minerais de urânio pode dar uma alta resposta aos raios gama (Myers & Bristow, 1989; *apud* Davies & Elliott, 1996).

O reconhecimento de minerais radioativos, especialmente os minerais argilosos presentes nas rochas, e o entendimento das condições redox do ambiente de deposição através da medição de urânio (meios oxidantes são isentos de Urânio, meios redutores são ricos), permitem uma melhor determinação dos aspectos mineralógicos. A distribuição vertical dos tamanhos dos grãos auxilia uma reconstrução mais precisa do ambiente deposicional (Hassan *et al.*, 1976).

Minerais argilosos são formados em ambientes continentais e marinhos, o que influencia sua variabilidade em relação à composição química, apesar de manter inúmeras características estruturais comuns. Cada mineral de argila está fortemente ligado ao conteúdo variável de isótopos radioativos, principalmente potássio e tório. A razão Th/K depende também da estrutura cristalina do mineral, de suas dimensões, da concentração de íons radioativos durante a formação do mineral e dos processos de intemperismo e diagenética que ocorrem a partir do momento da formação do mineral (Hassan *et al.*, 1976).

O aumento do soterramento causa elevação de temperatura, pressão litostática e aumento da concentração iônica nas água de formação e nos fluidos intersticiais, estas alterações contribuem para a transformação de alguns minerais de argila como os do grupo da montmorilonita, que são transformados em ilita (Dunoyer de Segonzac, 1969; *apud* Hassan *et al.*, 1976), através da perda de água e enriquecimento em potássio. O tório não sofre nenhuma alteração, porém o potássio aumenta progressivamente devido a proporções crescentes da camada de ilita, assim a proporção Th/K diminui sistematicamente com a profundidade (Perry e Hower, 1970).

Os perfis de poços Th e K auxiliam na inferência dos tipos de minerais argilosos dominantes na amostra e dos paleoambientes. Estes podem ser determinados de acordo com a área onde são plotados seus pontos em um gráfico de *crossplot* de potássio e tório, de acordo com o método de interpretação de dados da Schlumberger (2013), apresentado na Figura 6.

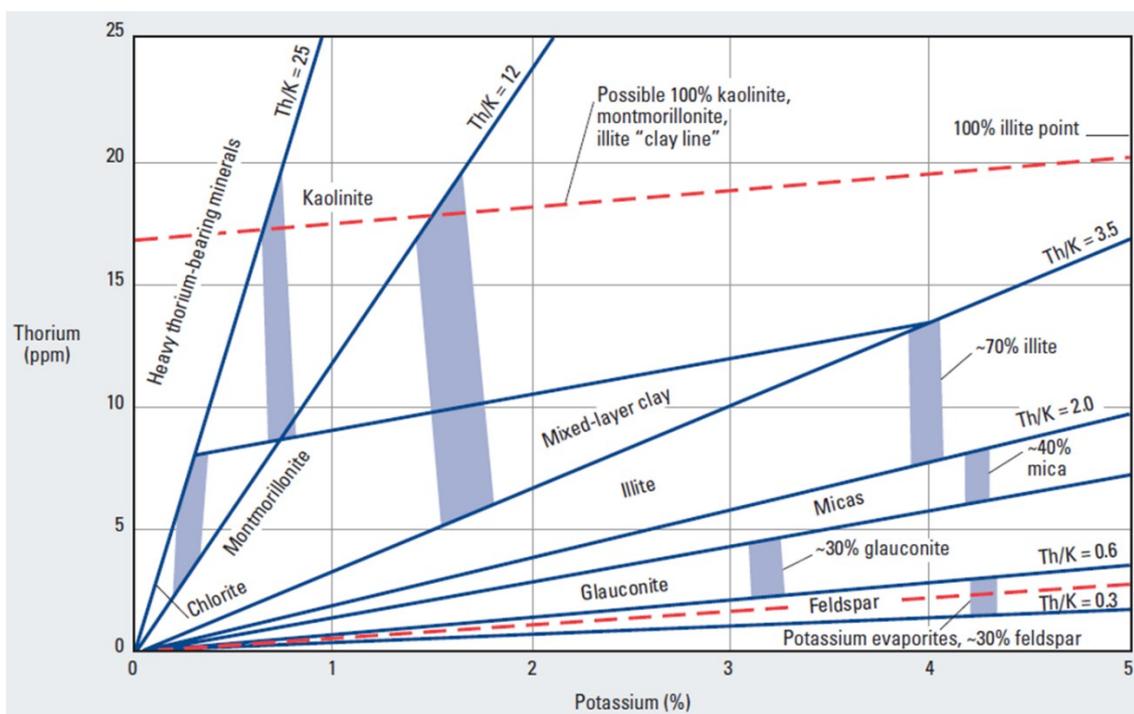


Figura 6 Gráfico *crossplot* comparando o comportamento dos minerais em relação à razão tório e potássio, de acordo com o método de interpretação de dados da Schlumberger, (2013).

Fertl, (1979) e Klaja e Dudek (2016), demonstraram que, quando a razão tório urânio for maior que sete ($Th/U > 7$) a condição é oxidante, típica do ambiente continental, solos intemperizados e marinho raso, já quando for menor que sete ($Th/U < 7$) indicaria uma condição ambiental mais típica de depósitos marinhos, folhelho verdes e cinzas. Já quando a razão é menor que dois ($Th/U < 2$), existe uma alta probabilidade de que o depósito tenha ocorrido em condições redutoras, folhelhos negros e fosfatos. A Figura 7 apresenta um intervalo da Formação Pimenteiras onde ocorrem folhelhos radioativos do provável intervalo gerador da Bacia do Parnaíba, principal gerador da bacia, areias de ingressões terrígenas e folhelhos de depósitos marinhos (Tabela 2).

A razão urânio/potássio (U/K) é utilizada na avaliação do teor de matéria orgânica em sedimentos argilosos, em correlações estratigráficas, e na detecção de alterações diagenéticas em sedimentos de argila e carbonatos (Tabela 2) Fertl, (1979).

Tabela 2 Importância geológica das razões espectrais (adaptado de Fertl, (1979)).

Razões	Observações
Th/K	<ul style="list-style-type: none"> • Identificação de minerais principalmente argilas. • Interpretação paleogeográfica, paleoclimática, paleoambiental e vatição de linha de costa. • Variações diagenéticas de argilas.
Th/U	<ul style="list-style-type: none"> • Varia com o ambiente deposicional. Variações do nível de base e linha de costa. • (Th/U > 7) Condição oxidante, típica do ambiente continental, solos intemperizados e marinho raso. • (Th/U < 7) Depósitos marinhos. • (Th/U < 2) Condições redutoras, folhelhos negros e fosfatos. • Correlação de poços, transgressões x regressões. • Estimativa de sedimentos argilosos e potencial rocha geradora. • Em rochas ígneas alto Th/U indicativo de oxidação do magma antes da cristalização e / ou lixiviação pós-cristalização.
U/K	<ul style="list-style-type: none"> • Avaliação de teor de matéria orgânica em sedimentos argilosos. • Correlação de poços. • Estimativa de sedimentos argilosos e potencial rocha geradora.

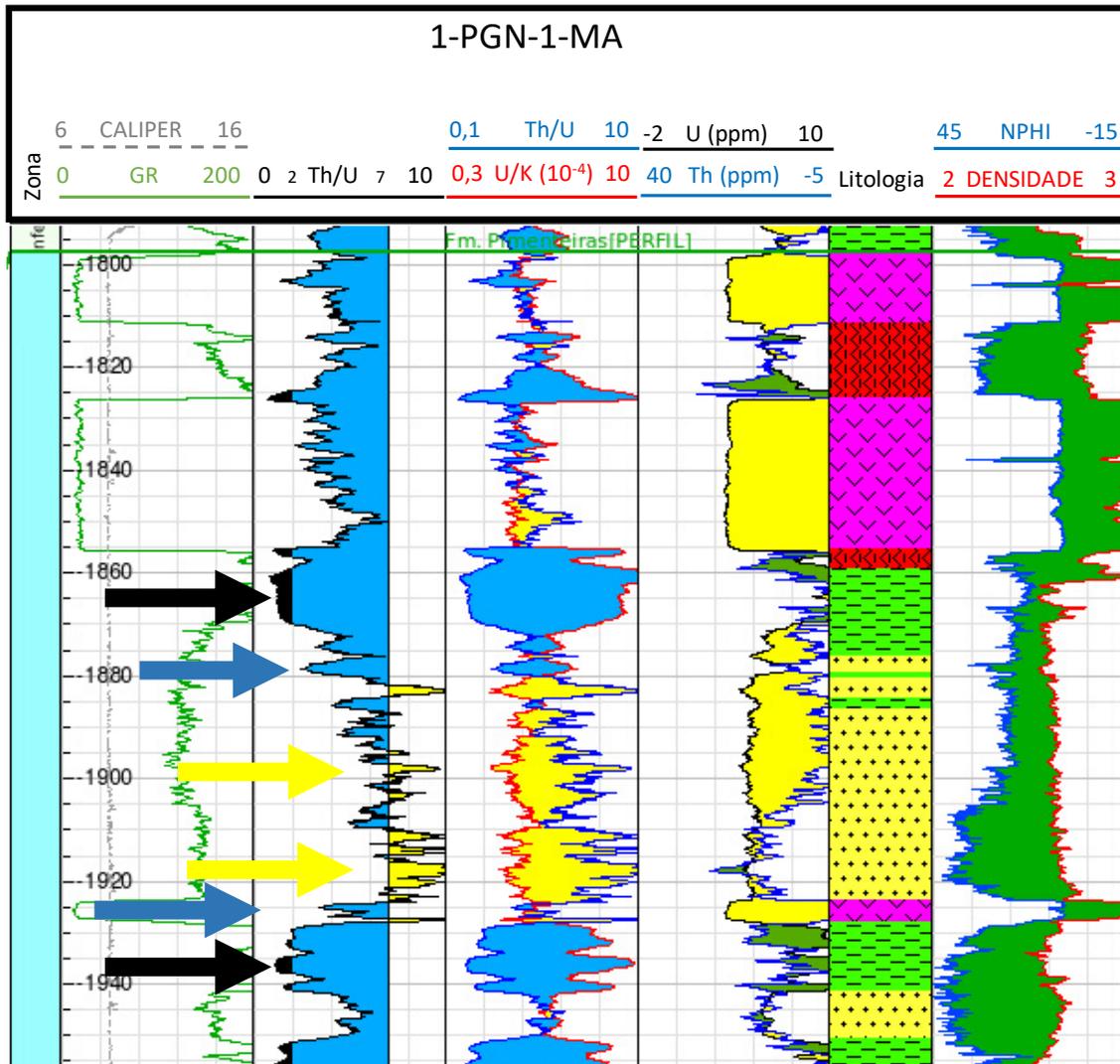


Figura 7 Intervalo da Formação Pimenteiras, em cota, onde ocorrem folhelhos do provável principal intervalo gerador da Bacia do Parnaíba, setas pretas, areias de ingressões terrígenas, setas amarelas e depósitos marinhos rasos, setas azuis, conforme demonstrado por Klaja e Dudek, 2016. Perceber as grandes baixas da razão Th/U e grandes altas da razão U/K nos intervalos destacados pelas setas pretas.

3.4 Comportamento Geoquímico e transporte do Potássio, Urânio e Tório:

Potássio (K):

O potássio consiste em três isótopos naturais, ³⁹K, ⁴⁰K e ⁴¹K, com abundâncias de 93,08%, 0,0119% e 6,9% respectivamente. O único isótopo instável de potássio é o nuclídeo ⁴⁰K, o principal contribuinte, que emite um único raio gama facilmente identificável a 1,46 MeV (Fertl, 1979). A concentração de potássio na crosta terrestre é de 2,59%. Sua fonte são rochas ígneas (granito, granodiorito, sienito, riolito) em que está presente em minerais como o

feldspato de potássio (ortoclásio, microclina), micas (moscovita, biotita) e vários outros minerais (Serra *et al.* 1980).

Durante o processo de alteração, feldspatos e micas são facilmente destruídos, dependendo do grau de intemperismo, gerando minerais argilosos: illita, interstratificado illita/esmectita, illita, montmorilonita, clorita e caulinita. Uma pequena parte da concentração total de potássio entra na formação de alguns desses minerais, mas a maior parte é dissolvida e transportada pela água. Em regiões áridas grande parte do potássio tende a permanecer com os produtos da alteração (resíduo). Em outras regiões é transportado por rios para o mar (Serra *et al.* 1980).

O íon potássio (K^+) tem um potencial iônico muito fraco e pode permanecer em solução por uma grande faixa de pH. É preferencialmente absorvido por partículas sedimentares finas, principalmente em argilominerais micáceos, pois satisfaz as condições necessárias à sua estabilidade cristalocômica e, por isso, desempenha um papel importante na agradação e transformação cristalográfica desses minerais (Hassan *et al.* 1976). Geralmente durante o transporte a maior parte do potássio é absorvida por argilas e extraída da água pelos vegetais. Assim, apenas uma pequena parte do potássio original chega ao mar, que tem uma concentração média de 380 ppm de K. Uma fração do potássio dissolvido na água do mar é extraído por organismos como algas, outra parte reage com minerais argilosos (por exemplo, com a caulinita, originando a illita). Vários minerais de potássio acumulam-se em evaporitos, onde encontra-se as maiores concentrações deste elemento nas rochas, sendo formados a partir da precipitação direta da salmoura da água do mar (Serra *et al.* 1980). Os minerais carnalita e polialita são de distribuição ampla, já silvita, langbeinita ocupam apenas pequenas porções nos depósitos evaporíticos (Hassan *et al.* 1976).

O potássio está associado à formação das argilas, tendo sua maior acumulação em ambiente de baixa energia deposicional, também está associado aos conglomerados arcóseos, e grauvacas, que são rochas compostas por sedimentos terrestres com baixa maturidade mineralógica (e química). Estes sedimentos apresentam uma quantidade incomum de grãos

quimicamente instáveis, como feldspatos e micas de potássio, e produtos de sua alteração, como caulinita, sericita e clorita. Derivam de áreas tectonicamente ativas que sofrem erosão rápida, onde os sedimentos são transportados apenas por curtas distâncias antes de depositarem em bacias que afundam rapidamente ou grábens (Serra *et al.* 1980) (Tabela 3).

Tório (Th):

Existe apenas um isótopo de tório de longa meia vida, o ^{232}Th , os outros isótopos, ^{234}Th e ^{230}Th são encontrados na natureza como pertencentes à série de decaimento do ^{238}U , tendo uma meia vida relativamente curta e, portanto, muito raros. A concentração média de tório na crosta terrestre é de cerca de 12 ppm. As suas fontes são rochas ígneas silícicas (granito, granodiorito, sienito, riolito), nas quais o tório existe em alguns minerais. Sua concentração média em rochas ígneas é de 3,5 até 4 vezes a do urânio, e a relação Th/U é bastante constante (Serra *et al.* 1980).

O tório existe apenas como Th^{4+} . Possui um grau de oxidação muito estável. Todos os seus compostos são insolúveis. Durante a alteração ou o intemperismo é facilmente hidrolisado e, portanto, possui mobilidade limitada, sendo quase totalmente transportado em suspensão e tende a concentrar-se em minerais residuais, como minerais de bauxita e argila, na fração silte de folhelhos como minerais de tório, ou como minerais acessórios contendo tório, principalmente Alanita, Monazita e Zircão (Hassan *et al.* 1976).

O tório está associado apenas a sedimentos detríticos, nunca a sedimentos puramente químicos, sendo encontrado em minerais de argila nos quais foi adsorvido e associado com os minerais pesados (Serra *et al.* 1980). Pode ser concentrado em minerais pesados na fração de areia e silte, como os grupos monazita e zircão, ou na fração mais fina, em associação com minerais argilosos selecionados (Herron & Matteson 1993, *apud* Davies & Elliott, 1996). É relativamente abundante em sedimentos residuais como bauxita, caulinita e bentonita, e formado pela alteração *in situ* de cinzas vulcânicas. Ocorre também em conglomerados, diversos tipos de arenitos e grauvacas, associados a fragmentos de rochas ígneas e tufos (Serra *et al.* 1980). A principal associação de tório com alumínio e titânio se deve ao fato de que o

elemento é quase totalmente restrito a minerais de alumino-silicato. O tório não ocorre em calcita e dolomita puras sua presença em carbonatos está diretamente relacionada à fração mineral de argila. Carbonatos no sedimento são considerados como diluentes da concentração de tório na rocha total (Hassan *et al.* 1976) (Tabela 3).

Urânio (U):

Existem três isótopos naturais de urânio e todos são radioativos: ^{234}U , ^{235}U e ^{238}U . Deles as proporções respectivas na Terra são 0,0057%, 0,72% e 99,27%. Na água do mar a concentração de ^{234}U é maior porque os íons contendo ^{238}U são seletivamente fixados em CaCO_3 . As meias-vidas dos isótopos de urânio são: $2,5 \times 10^5$ anos para ^{234}U , $7,1 \times 10^8$ anos para ^{235}U e $4,4 \times 10^9$ anos para ^{238}U . A concentração média de urânio na crosta terrestre é de cerca de 3 ppm. As suas fontes também são as rochas ígneas silícicas (granito, granodiorito, sienito, riolito) nas quais o urânio ocorre presente nos minerais acessórios Becquerelita, Carnotita, Gumita, Autunita, entre outros (Serra *et al.* 1980).

O urânio pode existir em vários estados de valência, sendo os mais importantes na natureza o U^{4+} e U^{6+} . Em solução, o urânio forma principalmente o íon uranil $(\text{UO}_2)^{2+}$, que é relativamente estável sob baixos valores de pH. Um aumento do pH pode induzir a hidrólise do íon uranil e a formação de vários complexos iônicos do tipo $(\text{UO}_2(\text{OH})_2\text{UO}_3)$. Sob condições neutras, o íon uranil forma vários complexos iônicos com carbonatos, como $(\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2)^{-2}$ e $(\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2)^{-4}$ que, em grande quantidade, contribuem para sua dispersão. Em condições redutoras, o íon $(\text{UO}_2)^{2+}$ forma numerosos complexos com compostos orgânicos, como ácidos húmicos, que facilitam sua fixação por matéria orgânica e mineral. (Hassan *et al.* 1976).

O íon uranil é muito solúvel, e, portanto, é muito móvel e facilmente transportado em solução (Hassan *et al.* 1976). Algum urânio também é transportado em suspensão, como em pequenas partículas de minerais pesados contendo urânio, ou como fosfatos, choepita ou uraninita, dependendo das condições de Eh e pH. Também é transportado e fixado por absorção em

argilas ou transportado com a matéria orgânica em complexos estáveis (Serra *et al.* 1980).

O urânio está associado a sedimentos detríticos e químicos, sendo encontrado em folhelhos, absorvido (como o tório) por minerais argilosos, associado à matéria orgânica (de origem sapropélica, algal ou húmica: por exemplo, folhelhos betuminosos) ou em minerais pesados (Serra *et al.* 1980). A maior presença do urânio está relacionada com a concentração de matéria orgânica, originada por acúmulo de organismos comuns em ambientes marinhos devido sua propriedade de ser fundamentalmente concentrado em ambiente redutor podendo ser absorvido por sílica amorfa, alúmen, alumínio, silico-aluminatos, carvão e linhito. (Hassan *et al.* 1976). Também ocorre em conglomerados, arcóseos e demais arenitos, grauvacas, associados a fragmentos de rocha. Também ocorre em tufos e arenitos tufáceos, fosfatos e carbonatos de meios confinados, depositados sob condições redutoras, especialmente se são ricos em matéria orgânica (calcários betuminosos) ou em estiólitos (Serra *et al.* 1980). Pode ocorrer precipitado, concentrado-se em fraturas e ao longo de planos de falhas geológicas, ou em outros ambientes permeáveis (Fertl, 1979) (Tabela 3).

Tabela 3 Características, associações e ocorrência dos elementos K, Th e U, adaptado de Klaja e Dudek (2016)

Elemento	Características	Associação	Ocorrência
Potássio (⁴⁰ K)	<ul style="list-style-type: none"> • Um dos componentes básicos dos folhelhos. • Indicador de presença em feldspatos e micas • Ocorre principalmente na forma de K₂O. • Estabiliza minerais de argila como KCl. 	<ul style="list-style-type: none"> • Formação das argilas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ambiente de baixa energia • Sedimentos terrestres com baixa maturidade química. • Folhelhos, argilas e evaporitos.
Tório (²³² Th)	<ul style="list-style-type: none"> • Insolúvel em água. • Normalmente combinado com folhelhos, pode fornecer informações sobre o teor de argila. • Combinado com minerais pesados em rochas ígneas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sedimentos detríticos. • Nunca a sedimentos puramente químicos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Minerais pesados fração areia e silte • Sedimentos residuais como bauxita, caulinita e bentonita
Urânio (²³⁸ U)	<ul style="list-style-type: none"> • Normalmente não está ligada à contaminação de rochas por argila. • Dependente do teor de matéria orgânica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sedimentos detríticos e químicos. • Matéria orgânica. • Folhelhos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Adsorvido por minerais argilosos, associado à matéria orgânica. • Concentração de matéria orgânica, originada por acúmulo de organismos, comuns em ambientes marinhos. • Minerais pesados. • Precipitados em fraturas e ambientes permeáveis.

4. Geologia Regional

4.1 Generalidades

A Bacia do Parnaíba, que já foi identificada pelos nomes Bacia do Maranhão ou Bacia do Piauí-Maranhão, ocupa uma área de cerca de 600 mil km² da porção Noroeste do Nordeste brasileiro, recobrando os estados do Piauí, Maranhão, Tocantins, Pará, Ceará e Bahia. No depocentro, a espessura total de suas rochas atinge cerca de 3.500 m (Vaz *et al.* 2007). Limita-se a Norte com as Bacias de São Luís e Barreirinhas, separada destas pelo Arco Ferrer-Urbano Santos, a Nordeste com o Rift Mesozóico do Marajó, separada pelo Arco de Tocantins e a Sul, pelo Arco do São Francisco (Vetorazzi, 2012).

4.2 Embasamento da Bacia do Parnaíba

A Bacia do Parnaíba desenvolveu-se sobre um embasamento constituído de rochas metamórficas, ígneas e sedimentares, cujas idades abrangem um longo intervalo – do Arqueano ao Ordoviciano, por correlação com os litotipos existentes nas faixas de dobramentos, maciços medianos e outras entidades complexas, situadas nas suas bordas ou proximidades. Porém, possivelmente predominem rochas do embasamento formadas entre o final do Proterozoico e o início do Paleozoico, que corresponde ao tempo de consolidação dessa plataforma (Vaz *et al.* 2007).

Uma grande sinéclise Paleozoica e os elevados níveis de base do mar, neste período, com suas flutuações, foram importantes causas das grandes transgressões na bacia. É certo também que as orogêneses realizadas na margem ativa meridional do Gondwana, resultantes das colisões com a litosfera oceânica e menores blocos siálicos refletiam-se no interior do continente, causando movimentos epirogênicos que influíram nas regressões do mar e deram origem a hiatos na sedimentação decorrentes da exposição à erosão das camadas preexistentes. Além disso, estas subsidiam devido ao estiramento litosférico, à sobrecarga representada pelos depósitos que nelas

se acumulavam. As ascensões eustáticas só em parte respondem pelas sucessivas inundações do mar no Brasil durante o Fanerozoico (Almeida e Carneiro, 2004).

O Embasamento da Bacia do Parnaíba foi dividido por Vaz *et al.* (2007) em duas unidades sedimentares:

A Formação Riachão, do Neoproterozoico (Kegel, 1953, *apud* Góes e Feijó, 1994), conforme amostras de poços, é composta de grauvacas, arcósios, siltitos, folhelhos vermelhos e ignimbritos. Esses depósitos imaturos são considerados de idade proterozoica média ou superior, por correlação com coberturas plataformais dos Crátons Amazônico e do São Francisco (Vaz *et al.*, 2007).

O Grupo Jaibaras (Cambriano), localizado no rifte de mesmo nome, na borda Nordeste da Borborema, é formado por depósitos fluviais, aluviais e lacustres, aflorante no nordeste da bacia. Representa a mais importante, proeminente e extensa exposição de sequências sedimentares do início do Fanerozoico (Oliveira e Mohriak, 2003).

A Formação Mirador (Rodrigues, 1967, *apud* Góes e Feijó, 1994) (Cambro-Ordoviciano), não relacionada no trabalho de Vaz *et al.*, (2007), foi amostrada em apenas um poço, sendo caracterizada por arenito, siltito e folhelho esverdeado, na parte superior da unidade (Góes e Feijó, 1994).

O embasamento da bacia é cortado por três grandes lineamentos, Transbrasiliano, Picos–Santa Inês e Tocantins–Araguaia (Ferraz, 2015) (Figura 8).

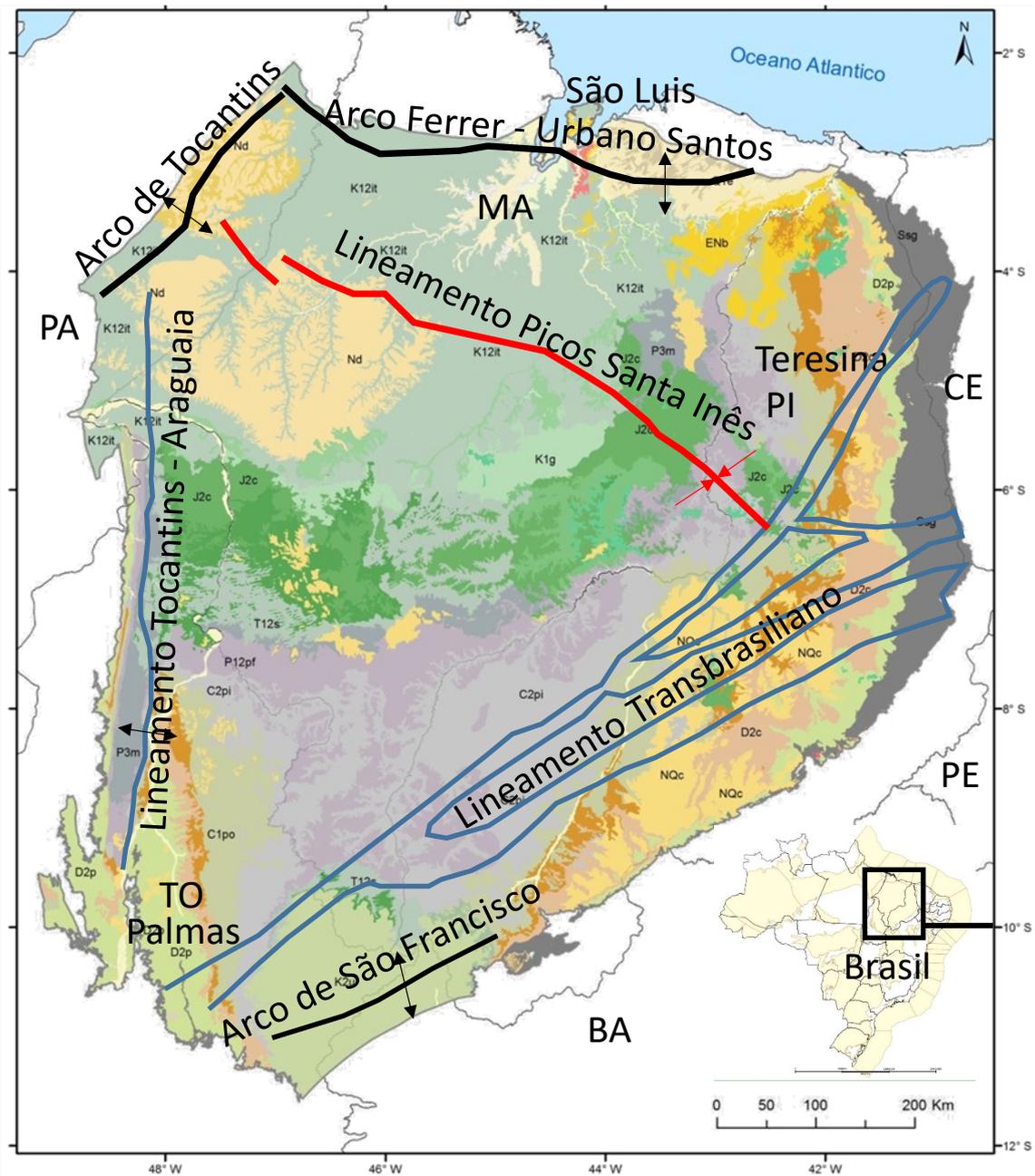


Figura 8: Os 3 principais lineamentos do embasamento da Bacia do Parnaíba: Lineamento Tocantins-Araguaia Lineamento Picos-Santa Inês Lineamento Transbrasiliano, Os arcos de Tocantins, Ferrer - Urbano Santos e de São Francisco, os Limites e principais estruturas na bacia do Parnaíba (Modificado de Fernandes, 2011, Milani e Zalan, 1998, *apud* Ferreira, 2018, Fortes, 1978 *apud* Santos e Carvalho, 2009)

O Lineamento Transbrasiliano (LTB) é um sistema *strike-slip* situado entre o Cráton Amazônico e a porção Leste da Plataforma Sul-Americana, sendo composto por vários segmentos de falhas transcorrentes, com alguns setores levemente curvilíneos (Praxedes, 2015). Segundo alguns autores, representa a reativação da mega-sutura que atuou na formação do supercontinente

Gondwana, entre o final do Proterozoica e o início do Paleozoico (Marini *et al.*, 1984; Cordani e Sato, 1999; Cordani *et al.*, 2000; Almeida *et al.*, 2000; Brito Neves e Fuck, 2013, 2014, *apud* Praxedes, 2015). O LTB foi definido como uma faixa cataclasada com cerca de 2700 km de extensão que cruza o Brasil passando desde o Ceará até o Mato Grosso do Sul, chegando ao Paraguai e Argentina (Schobbenhaus *et al.*, 1975, *apud* Goulart, 2019). É formado por uma série de zonas de cisalhamento dúcteis, que ocorrem ao longo de áreas muito grandes. Provavelmente atinge o fundo da litosfera, e o movimento da zona de cisalhamento deve ter começado logo após o fechamento do Oceano Goiano-Faruiano, aproveitando as várias zonas litosféricas fracas formadas durante colisões continentais anteriores. Todas as suturas colisionais relacionadas às faixas Brasileiro-Pan Africanas são acomodadas em algumas centenas de quilômetros do lineamento. O lineamento é claramente visível no centro e nordeste do Brasil, formando uma série de anomalias magnéticas de baixa amplitude, que podem ser rastreadas em todo o país de NE a SW. Na bacia do Parnaíba, está associado ao principal depocentro de sedimentos do Paleozoico (Cordani *et al.* 2013) (Figura 9).

As reativações do LTB ocorreram no Cambriano (540 Ma), no Mesozoico (250 Ma), e depois no início do Cenozoico, há 65 milhões de anos (Chamani, 2015, *apud* Goulart, 2019). Ocorrem reativações até o recente, quando se observa uma série de abalos sísmicos associados ao LTB, principalmente na área do pantanal Mato-grossense (Farias, 2016, *apud* Goulart, 2019)

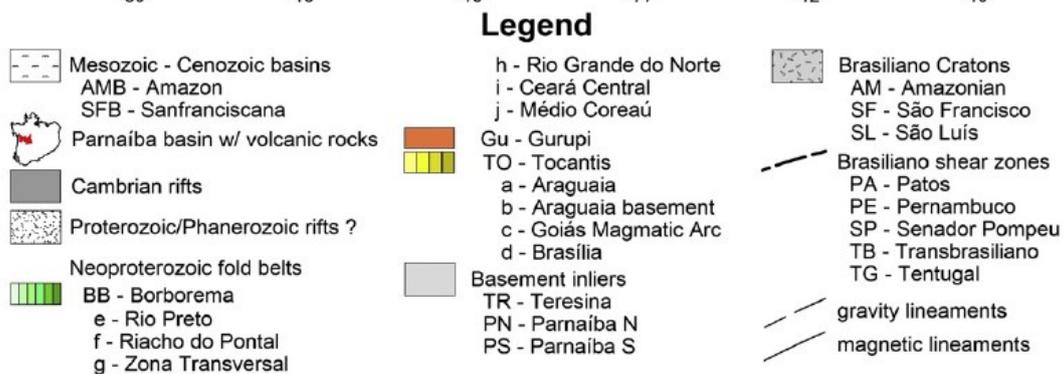
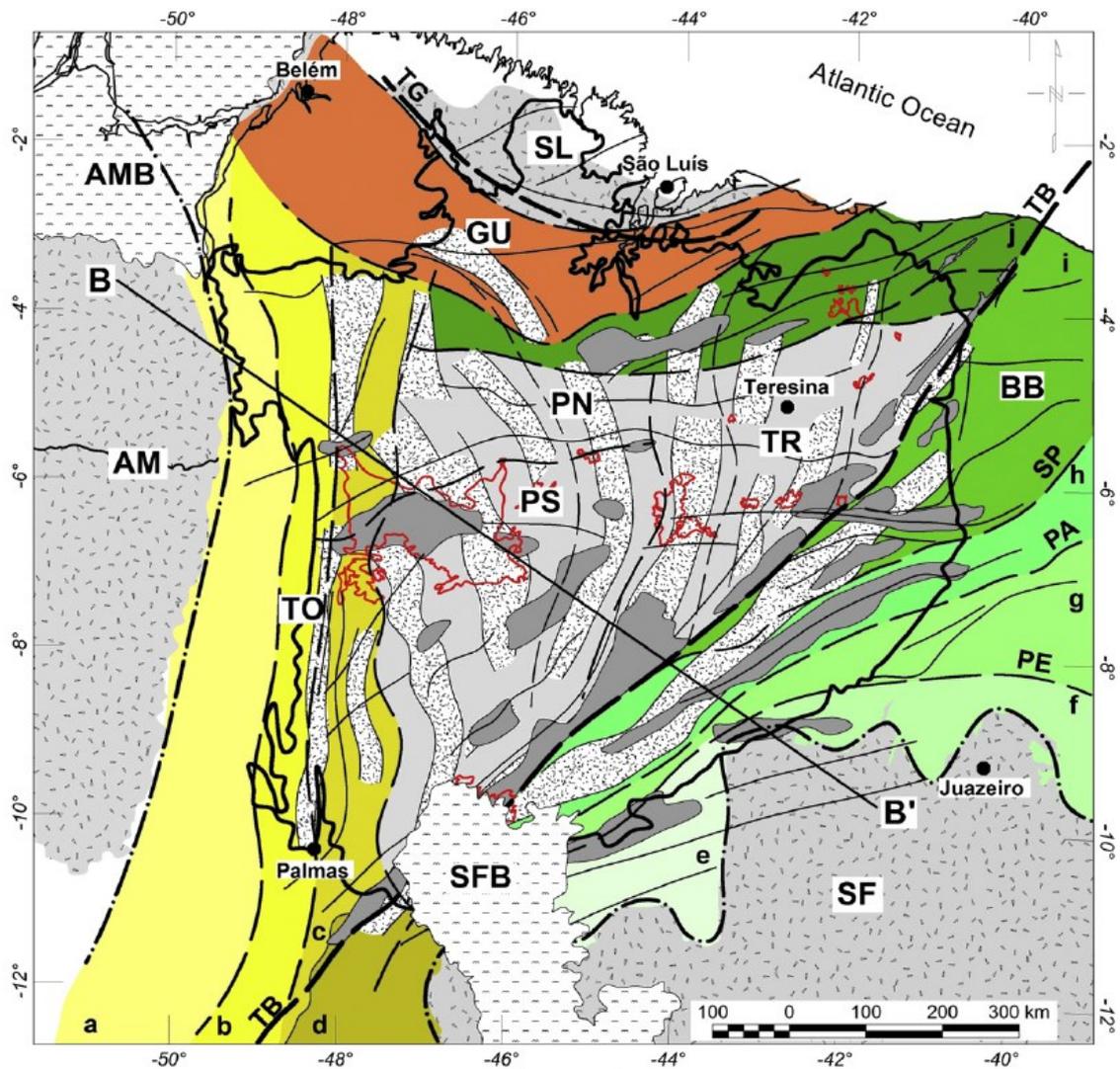


Figura 9 Mapa tectono-estrutural interpretado da Bacia do Parnaíba (Castro *et al.*, 2014) Apresenta o Lineamento Transbrasiliano (TB) associado ao principal depocentro sedimentar do Paleozoico da Bacia do Parnaíba (Cordani *et al.*, 2013).

O Lineamento Picos-Santa Inês é uma faixa cataclasada disposta no sentido NW-SE disposta transversalmente em relação ao lineamento Transbrasiliano, apresentando 160km de extensão e 200 a 300m de rejeito. Esta faixa reflete na

morfologia contemporânea de uma série de alinhamentos orientados para NW (Vetorazzi, 2012). Os Lineamentos Transbrasiliano e Picos-Santa Inês constituem fraturas e falhas herdadas do embasamento, com relevante importância desde a fase inicial da bacia e por toda a sua evolução, pois controlaram as direções dos eixos deposicionais até o Eocarbonífero (Vaz *et al.*, 2007) (Figura 8).

Segundo Santos e Carvalho, (2009) O Lineamento Tocantins–Araguaia, foi formado no Permiano, pela Antéclise Tocantins-Araguaia e o Arco Tocantins que se elevaram, encerrando, assim, as comunicações entre as Bacias Amazonas e Parnaíba. Na continuidade até o Triássico, a área deposicional foi deslocada para o centro da bacia finalizando o ciclo continental com as Formações Motuca e Sambaíba.

Outra estrutura importante na evolução desta bacia é o Arco Ferrer-Urbano Santos, que delimita o Alto do Rio Parnaíba e as pequenas bacias marginais associadas à abertura do Oceano Atlântico Sul Equatorial, e que bloqueou a conexão até então existente entre esta sinéclise e as bacias análogas que hoje encontram-se no Noroeste da África (Milani & Thomaz Filho, 2000, *apud* Oliveira e Mohriak, 2003) (Aguiar, 1969; Rezende & Pamplona, 1970; Hasui *et al.*, 1991, Góes, 1995 *apud* Santos e Carvalho, 2009) (Figura 8).

4.3 Estratigrafia da Bacia do Parnaíba

A Bacia do Parnaíba é formada por uma sucessão de rochas sedimentares e ígneas disposta em cinco supersequências: Siluriana, Mesodevoniana-Eocarbonífera, Neocarbonífera-Eotriássica, Jurássica e Cretácea, que são delimitadas por discordâncias que se estendem por toda a bacia ou abrangem regiões extensas (Vaz *et al.*, 2007) (Figura 10).

Sequência Siluriana

Litoestratigraficamente corresponde ao Grupo Serra Grande, que foi proposto por Small (1914; *apud* Caputo, 1984). Caputo (1984) propôs a subdivisão do Grupo Serra Grande em três formações (Ipú, Tianguá e Jaicós), como é atualmente aceito.

A unidade mais antiga, a Formação Ipu, unidade mais basal com até 350m de espessura (Campbell, 1949, *apud* Góes e Feijó, 1994) (Neo-Ordoviciano), designa arenitos seixosos, conglomerados com matriz areno-argilosa contendo matacões de quartzo e arenitos finos a grossos (Góes e Feijó, 1994). Os arenitos seixosos são maciços e com estratificação cruzada, de cor branca a creme, friável a bem cimentada e contém seixos de quartzo espalhados e arredondados de tamanho variável até 5 cm de diâmetro. As camadas de conglomerados são compostas principalmente por quartzo branco a cinza claro e blocos de quartzito com uma matriz arenosa e argilosa. As camadas de arenito são de granulação fina a grossa, maciços a fortemente estratificados cruzados, mal selecionados, argilosos e micáceos, brancos a cinza claro. As rochas dessa unidade foram depositadas numa grande variedade de ambientes, de glacial proximal e glacio-fluvial, a leques ou frentes deltaicas (Caputo, 1984).

A Formação Tianguá, com espessura máxima de 250m (Rodrigues, 1967, *apud* Góes e Feijó, 1994) (Liandoveriano) é composta de folhelhos cinza escuro bioturbados, sideríticos e carbonáticos; de arenitos cinza claros, finos a médios, feldspáticos; de intercalações de siltitos e folhelhos cinza escuros, bioturbados e micáceos, depositados num ambiente de plataforma rasa (Góes e Feijó, 1994). Caputo, (1984), considera que esta formação foi depositada durante a máxima transgressão mundial, que ocorreu após o derretimento da maior parte das calotas polares do Siluriano.

A Formação Jaicós, com espessura máxima de 280m (Plummer, 1946, *apud* Góes e Feijó, 1994) (Liandoveriano -Eo-Devoniano) é constituída por camadas de arenitos cinza com tonalidades claras e marrom, grossos com seixos angulares a subangulares dispersos, mal selecionados, friáveis, maciços, com estratificação cruzada lenticular (Caputo, 1984). Caputo (1984), interpretou esta formação como tendo sido resultado de deposições aluviais de delta e frente deltaica. Góes e Feijó (1994), interpretaram como depositados por sistemas fluviais entrelaçados.

Sequência Mesodevoniana – Eocarbonífera

É representada litoestratigraficamente pelo Grupo Canindé (Rodrigues, 1967, *apud* Góes e Feijó, 1994), que se subdivide, de acordo com Caputo (1984) em quatro formações: Itaim, Pimenteiras, Cabeças e Longá.

A Formação Itaim, que não ultrapassa 250m de espessura (Kegel, 1953, *apud* Góes e Feijó, 1994) (Emsiano) designa arenitos finos a médios com grãos subarredondados, bem selecionados e com alta esfericidade. Na base dessa unidade observa-se um maior número de intercalações de folhelhos bioturbados na porção basal da unidade (Vaz *et al.* 2007). Caputo (1984) descreveu em subsuperfície os litotipos presentes na unidade como camadas de arenito e folhelhos bioturbados, siltitos com intercalações de arenitos de granulação fina a média, sendo comum também a ocorrência de folhelhos sideríticos com camadas contendo siderita oolítica, hematita e clorita. Góes e Feijó (1994) interpretaram como indicadoras de deposição em sistemas deltaicos e plataformais, dominados por correntes induzidas por processos de marés e de tempestade.

A Formação Pimenteiras com espessura de até 320m, foi definida por Small (1914, *apud* Góes e Feijó, 1994) (Eifeliano-Fransiano) É constituída por camadas de siltito e folhelhos variegados, mas principalmente cinza-escuros a pretos, esverdeados, em parte bioturbados, radioativos e ricos em matéria orgânica, ocorrendo também intercalações de arenitos. Em subsuperfície ocorrem folhelhos pretos, cinza-escuros e esverdeados, micáceos e geralmente sideríticos, folhelhos siltosos e camadas de siltito, podendo ocorrer também delgadas camadas de arenito fino, às vezes com fragmentos de folhelhos. Vários horizontes de folhelhos e siltitos são bioturbados e ricos em siderita. Onde essas camas são expostas, adquirem cores de oxidação vermelhas e roxas (Caputo, 1984). Vaz *et al.* (2007) atribuíram a esta unidade o ambiente de plataforma rasa dominada por tempestade. Caputo (1984) interpretou esta formação como um registro de uma transgressão do Devoniano Tardio mundial, com oscilações do nível do mar, onde camadas de folhelhos laminado com alto nível de radioatividade indicam a máxima elevação do nível do mar no Frasniano.

Segundo Rodrigues, 1995, o topo do trato de sistemas transgressivos corresponde aos folhelhos radioativos do Frasniano, facilmente identificados em toda a bacia e que representam a superfície de inundação máxima da Sequência Devoniana. Constitui a unidade estratigráfica do Paleozoico que engloba os níveis com maior concentração de matéria orgânica, como sejam: os folhelhos radioativos A, cuja base corresponde à superfície transgressiva; os folhelhos radioativos B, que representam o primeiro nível importante de afogamento após a superfície transgressiva; e os folhelhos radioativos C, que incluem a superfície de inundação máxima da Sequência Devoniana.

A Formação Cabeças, definida por Plummer (1948, *apud* Ponciano, 2009), (Eifeliano-Fameliano), foi dividida em Camadas Passagem (arenitos estratificados), Camadas Oeiras (arenitos maciços ou mal e irregularmente estratificados) e Camadas Ipiranga (arenitos bem estratificados), mas segundo Beurlen (1965, *apud* Caputo 1984) a parte inferior do Membro Passagem inferior possui mais afinidades com a Formação Pimenteira e sua parte superior possui as mesmas características do Membro Oeiras médio. O Membro Ipiranga superior foi incluído na Formação Longá sobrejacente por Aguiar (1971, *apud* Caputo 1984).

Esta formação apresenta espessura variando de 100 a 400 m, consiste em camadas de arenito médio a grosso, com estratificação cruzada e maciço, cinza claro a branco, com algumas intercalações de conglomerados e de arenitos seixosos (Caputo, 1984). Diamictitos ocorrem eventualmente principalmente na parte superior. A fácies predominante é a estratificação cruzada tabular ou sigmoidal. Feições de origem glacial ocorrem na parte superior da formação. Tempestitos ocorrem na transição para a Formação Pimenteirias (Della Fávera, 1990).

Para Caputo (1984), a Formação Cabeças representa uma progradação regressiva e rápida retrogradação dos sistemas de leque aluvial, delta e frente deltaica e lobos glaciais. Na base da unidade, na área de afloramento oriental, ela apresenta camadas de arenito com traços fósseis (*skolithos*) característicos de ambiente marinho muito raso, enquanto nas áreas ocidentais, a bacia provavelmente estava coberta por camadas de gelo. Acima, na área oriental, a

formação é composta por camadas de arenito maciço e com estratificação cruzadas, muito grossos a conglomeráticos, com seixos e fragmentos de quartzito. Esta formação foi depositada em uma plataforma marinha sob a ação predominante de marés. A presença de pavimentos e seixos estriados além da presença de diamictitos e paraconglomerados denotam um ambiente glacial ou periglacial, na sua parte superior. Góes e Feijó (1994) interpretaram esta unidade como um sistema nerítico plataformal influenciado por processos de maré, podendo também ocorrer fácies fluvio-estuarinas. Para Della Fávera (2001), a Formação Cabeças representaria a região de frente deltaica de um sistema flúvio-deltaico dominado por inundações catastróficas, cujo prodelta seria a Formação Pimenteira.

Conforme divisão utilizada por Caputo (1984), a Formação Cabeças é dividida nos Membros Passagem e Oeiras. No Membro Passagem são descritos frequentemente intercalações de lobos sigmoidais com arenitos com estratificação cruzada *hummocky*. Os macrofósseis ocorrem na parte inferior deste membro, em arenitos médios, micáceos, esbranquiçados, com siltitos intercalados e conglomerados. Na parte superior do Membro Passagem a litologia é mais similar ao Membro Oeiras, arenitos maciços médios e menos micáceos. O Membro Oeiras apresenta aparência mais maciça, embora também apresente alguns níveis conglomeráticos, estratificação cruzada de baixo ângulo, coloração mais acinzentada com pouca mica, ausência de macrofósseis. Estruturas de fluidização e escorregamentos são comuns (Ponciano, 2009).

A Formação Longá com até 220m de espessura (Albuquerque e Dequech, 1946, *apud* Góes e Feijó, 1994) (Fameniano-Tournasiano) Caputo (1984) subdividiu em três partes, A unidade inferior compreende um folhelho cinza esverdeado, micáceo, siderítico, bem laminado e bioturbado. Também ocorre folhelho cinza escuro, micáceo, em parte siderítico, com camadas de siltitos interlaminados com lentes de conglomerado e camadas de arenito conglomerático. A unidade intermediária consiste em camadas de arenito de granulação muito fina a média, ferruginosas brancas ou amarelas, parcialmente sideríticas, micáceas, argilosas, com laminação cruzada e estratificação cruzada. Também estão presentes camadas de arenito de granulação grossa a

conglomerática. A unidade superior consiste em folhelho esverdeado, escuro, betuminoso, siderítico, pirítico, micáceo, físsil, paralelo e com laminação cruzada. Em alguns pontos, ocorre folhelho bioturbado, folhelho siltoso e leitões de siltito. Algumas camadas finas de carbonato argiloso e arenoso estão presentes na parte superior da unidade. Na parte superior da seção, um leito de conglomerado de 30 cm de espessura pode estar presente composto de clastos de quartzo de até 15 cm de diâmetro com uma matriz arenosa. Algumas camadas intermediárias de arenito fino, razoavelmente grosso, estão presentes em toda a formação. Góes e Feijó (1994) interpretaram como um ambiente nerítico plataformal dominado por tempestades. Para Caputo (1984) A unidade inferior representa uma transgressão rápida, talvez resultante do derretimento do gelo, onde a face de costa e depósitos basinais estão presentes acima dos sedimentos fluviais da Formação Cabeças. A unidade intermediária sugere depósitos de arenitos de frente deltaica e marinho raso. A unidade superior indica uma nova deposição de folhelhos transgressivos com circulação mais restrita do que a que ocorre na unidade inferior. A presença de algumas camadas finas de calcário argiloso e arenoso podem indicar um ligeiro aumento de temperatura durante a deposição da unidade superior, e o clima pode ter sido subártico.

A Formação Poti (Paiva, 1937, *apud* Góes e Feijó, 1994) (Viseano). Para Caputo (1984) a Formação Poti refere-se a uma sucessão de estratos que podem ser divididos em quatro porções: a unidade inferior é composta por arenito em parte maciço ou com estratificação cruzada de baixo ângulo, de cor rosa, friável, caulínico de granulação fina a média, ocorrendo seixos compostos de siltito, quartzo, arenito, gnaiss e pegmatito até 30 cm de diâmetro. Em alguns horizontes, conglomerados polimíticos ocorrem com clastos sub-circulares a arredondados. As interseções de siltitos são comuns perto de seu limite inferior. A segunda unidade é composta de siltito ou folhelho siltoso, rosado, micáceo, macio e ferruginoso com laminação paralela. A terceira unidade consiste em camadas de arenito maciço, de granulação fina a média, rosado, com quartzito disperso e não orientado, quartzo, argila, gnaiss, granito e clastos de arenito de até 60 cm de diâmetro. A unidade superior é composta por camadas de siltito micáceo cinza claro variegado, principalmente cinza

claro esverdeado, que interagem com diamictito maciço roxo rosado com fragmentos de rocha dispersos na fração areia e seixo, dentro de uma matriz maciça argilosa. O diamictito mostra uma peculiar alteração ferruginosa negra. Algumas camadas de grainstone muito finas com restos de plantas também estão presentes. A parte superior dessa unidade é composta por algumas camadas de grainstone intercalados de siltito e folhelho, com restos de plantas e camadas de carvão muito finos (1 mm a alguns centímetros de espessura). Góes e Feijó (1994) interpretaram como depósitos deltaicos e planícies de maré influenciadas ocasionalmente por tempestades.

Sequência Neocarbonífera- Eotriássica

É representada pelo Grupo Balsas (Góes *et al.* 1989,1992, *apud* Góes e Feijó, 1994), composto pelas formações Piauí, Pedra de Fogo, Motuca e Sambaíba.

A Formação Piauí, com espessura de até 350m (Small, 1914, *apud* Góes e Feijó, 1994) Lima e Leite (1978, *apud* Vaz *et al.* 2007) (Moscoviano-Gzheliano) dividiram a Formação Piauí em duas sucessões: a inferior, composta de arenitos cor-de-rosa, médios, maciços ou com estratificação cruzada de grande porte e intercalações de folhelho vermelho, e a superior, formada de arenitos vermelhos, amarelos, finos a médios, contendo intercalações de folhelhos vermelhos, calcários e finas camadas de sílex. Interpretaram um ambiente fluvial com contribuição eólica e breves incursões marinhas, num clima semi-árido a desértico.

A Formação Pedra de Fogo, com espessura de até 250m (Plummer, 1948, *apud* Góes e Feijó, 1994) é caracterizada pela presença de sílex, calcário oolítico e pisolítico creme a branco, eventualmente estromatolítico, intercalado com arenito fino a médio, amarelado, folhelho cinzento, siltito, anidrita e, eventualmente, dolomito. São característicos desta formação os grandes troncos fósseis. Depositados num ambiente marinho raso a litorâneo com planícies de *sabkha*, sob ocasional influência de tempestades (Góes e Feijó, 1994).

A Formação Motuca, com espessura máxima de 280m (Plummer, 1948, *apud* Góes e Feijó, 1994) (Permiano terminal ao início do Eotriássico) denomina siltito vermelho e marrom, arenito branco fino e médio, subordinadamente folhelho, anidrita e raros calcários. Os pelitos ocorrem sob forma de lentes delgadas segundo Lima e Leite (1978, *apud* Vaz *et al.* 2007). Foram depositados num ambiente continental desértico controlado por sistemas lacustres (Vaz *et al.* 2007).

A Formação Sambaíba, definida por Plummer (1948, *apud* Caputo, 1984) (Triássico Médio-Superior) atinge 440m de espessura e é formada por arenitos róseos e amarelos, médios a finos, bem selecionados, bimodais, com estratificação cruzada de grande porte, depositados por sistemas eólicos em ambientes desérticos (Góes e Feijó, 1994). Segundo Caputo (1984), esta formação foi depositada em condições eólicas e fluviais. É caracterizada pela repetição de estratos cruzados em grande porte e depósitos horizontais finos que representam ambientes de dunas e interdunas. Os depósitos de wadi (rios) consistem em camadas de arenito de granulação média que se interpõem aos depósitos eólicos. O clima era seco, quente e desértico e provavelmente localizado na zona de cinturão de ventos alísios de alta evaporação.

Sequência Jurássica

Vaz *et al.* (2007) definiu para a Sequência Jurássica a Formação Pastos Bons (Lisboa, 1914, *apud* Caputo, 1984) (Jurássico Médio) tem sua litologia dividida em três partes: na base predomina arenito branco ou com tonalidades esverdeadas, amareladas, fino a médio, grãos subarredondados e, geralmente, apresentam estratificação paralela e raras lentes de calcário. Na parte média da seção ocorrem siltito, folhelho/argilito cinza a verdes, comumente intercalados com arenito. A porção mais superior é constituída por arenito vermelho/cor-de-rosa, fino, gradando para siltito, contendo níveis de folhelho (Caputo, 1984). Vaz *et al.* (2007) interpretou que esta Formação foi depositada em paleodepressões continentais, lacustrinas, com alguma contribuição fluvial, em clima semi-árido a árido.

Sequência Cretácea

É constituída pelas seguintes Formações: Corda, Grajaú, Codó e Itapecuru.

A Formação Corda refere-se, essencialmente, a arenitos vermelhos, castanho-avermelhados, muito finos/finos e médios, seleção regular a boa, semifriáveis a semicoesos, ricos em óxidos de ferro e zeólitas. Quando ocorrem sobrepostos a basaltos, é abundante a presença de fragmentos dessa rocha como arcabouço. Estratificações cruzadas de grande porte, *climbings* transladantes e *ripples*, fluxos de grãos e outras estruturas típicas de dunas eólicas são comuns nessa unidade. Estruturas cruzadas de baixo ângulo e cruzadas acanaladas também ocorrem. Desse conjunto de informações deduz-se que essa unidade foi depositada num sistema eólico desértico (Vaz *et al.* 2007).

A Formação Grajaú (Lisboa, 1914, *apud* Góes e Feijó, 1994) (Neo-aptiano-Eo-albiano) apresenta arenitos creme-claro/esbranquiçado, creme-amarelado ou variegados, médios/grossos, subangulosos/angulosos, mal selecionados. Sendo comum a presença de seixos e de níveis conglomeráticos. Eventualmente observam-se camadas de arenitos finos/muito finos e de pelitos. Estruturas cruzadas acanaladas e marcas de carga são abundantes. Eventualmente encontra-se clastos de basaltos em arenitos (Vaz *et al.* 2007). Para Caputo (1984), esta formação representa ambientes de leque, delta e *fan-delta* desenvolvidos ao redor de lagoas e lagos. As condições climáticas são as mesmas da Formação Codó.

A Formação Codó (Lisboa, 1914, *apud* Góes e Feijó, 1994) (Neo-aptiano-Eo-albiano) é composta por folhelhos pretos e betuminosos, com intercalações de carbonatos, anidritas e arenitos brancos e esverdeados (Bagni, 2010). Mesner & Wooldridge (1962 *apud* Bagni, 2010) dividem a Formação Codó em três membros (Inferior, Médio e Superior) rastreáveis regionalmente por quase toda a área das bacias do Parnaíba e São Luís. O Membro Inferior constitui-se de folhelhos cinzas a negros, pirobotuminosos; calcário ostracoidal gipsífero, asfáltico; dolomito castanho escuro betuminoso; marga folheada betuminosa; e arenito fino, esverdeado, com restos vegetais, muitas vezes impregnado de óleo. O Membro Médio é predominantemente arenoso. Constitui-se de arenitos verdes acinzentados, quartzosos, finos a muito grossos, com grânulos e seixos

de até 2 cm, mal selecionados e normalmente friáveis. Intercalam-se subordinadamente nesta unidade siltitos e folhelhos escuros com ostracodes. O Membro Superior é constituído por folhelhos cinza com ostracodes, estherias e turrítelas. Ocorrem também siltitos cinzas e esverdeados e calcários ostracoidais subordinados. Mendes (2007, *apud* Bagni, 2010) interpreta que a Formação Codó se depositou em ambiente lacustre fechado e evoluiu para um ambiente lacustre aberto com influência marinha no topo, acima de um nível correlacionável de gipsitas.

A Formação Itapecuru (Campbell, 1949, *apud* Góes e Feijó, 1994) (Mesoalbio-Neocretáceo) é formada por arenitos variegados, finos, friáveis, com estruturas diversas, como, por exemplo, estratificações cruzadas *swaley*, *hummocky*, acanalada, tabular, *mud couplets* e escorregamento de massa. Pelitos e arenitos conglomeráticos ocorrem, mas subordinadamente (Anaisse Junior *et al.* 2001, *apud* Vaz *et al.* 2007). Seus depósitos correspondem a seis ciclos deposicionais transgressivos, atribuídos a vales incisos estuarinos e um sistema estuarino-lagunar episodicamente atingido por ondas de grande escala, no qual foram observados os seguintes sistemas: canal fluvial, laguna, canal de maré e litorâneo (Rossetti *et al.* 2001, *apud* Vaz *et al.* 2007).

Rochas Magmáticas

Segundo Vaz *et al.* (2007), na Bacia do Parnaíba ocorrem as ígneas intrusivas (diques e soleiras) e extrusivas, de composição básica, as quais do ponto de vista estratigráfico foram divididas em duas unidades: Formação Mosquito e Formação Sardinha. Em subsuperfície, os diques e soleiras estão presentes em maior quantidade na Sequência Mesodevoniana-Eocarbonífera, ocorrem também na Sequência Siluriana e são muito raros na Neocarbonífera-Eotriássica.

A Formação Mosquito (Aguiar, 1971, *apud* Vaz *et al.* 2007) (Eojurássico) é composta por derrames basálticos com intercalações de arenitos. Para Trostdorf *et al.* (2018) a Formação Mosquito está relacionada ao grande evento da Província Magmática do Atlântico Central (CAMP) perto da fronteira Triássico-Jurássico, datado de 200 Ma.

Formação Sardinha (Aguiar, 1971, *apud* Vaz *et al.* 2007) (Eocretáceo) caracteriza-se por corpos de basalto, preto a roxo. Em afloramento a espessura média é de 20 m. Marzoli *et al.* (2000) interpretou o enxame de diques Sardinha, como magmatismo basáltico Circum-Atlântico Equatorial (EQA), evento datado em 132 Ma.

O exame de seções sísmicas regionais 2D (ver Figura 11) e sua interpretação geológica, permite reconhecer a presença das soleiras de diabásio, que ocorrem em vários níveis estratigráficos.

As Figura 12 Figura 13 mostram duas seções geológicas esquemáticas interpretadas, com base em poços, na região do Parque dos Gaviões, uma na direção Sudoeste – Nordeste, com os poços 1-OGX-93-MA, 1-OGX-77-MA, 3-OGX-38-MA e 1-OGX-16-MA e outra na direção Noroeste-Sudeste, com os poços 1-PGN-1-MA, 1-OGX-59-MA, 1-OGX-117-MA, 3-PGN-5-MA, 1-OGX-34-MA, 1-OGX-16-MA, e 1-OGX-101-MA. Estas seções mostram as Supersequências Siluriana Neocarbonífera-Eotriássica, Jurássica-Cretácea e as intrusões de rochas magmáticas, formações Mosquito e Sardinha, detalhando a Supersequência Mesodevoniana-Eocarbonífera nas Formações Itaim, Pimenteiras, Cabeças, Longá e Poti.

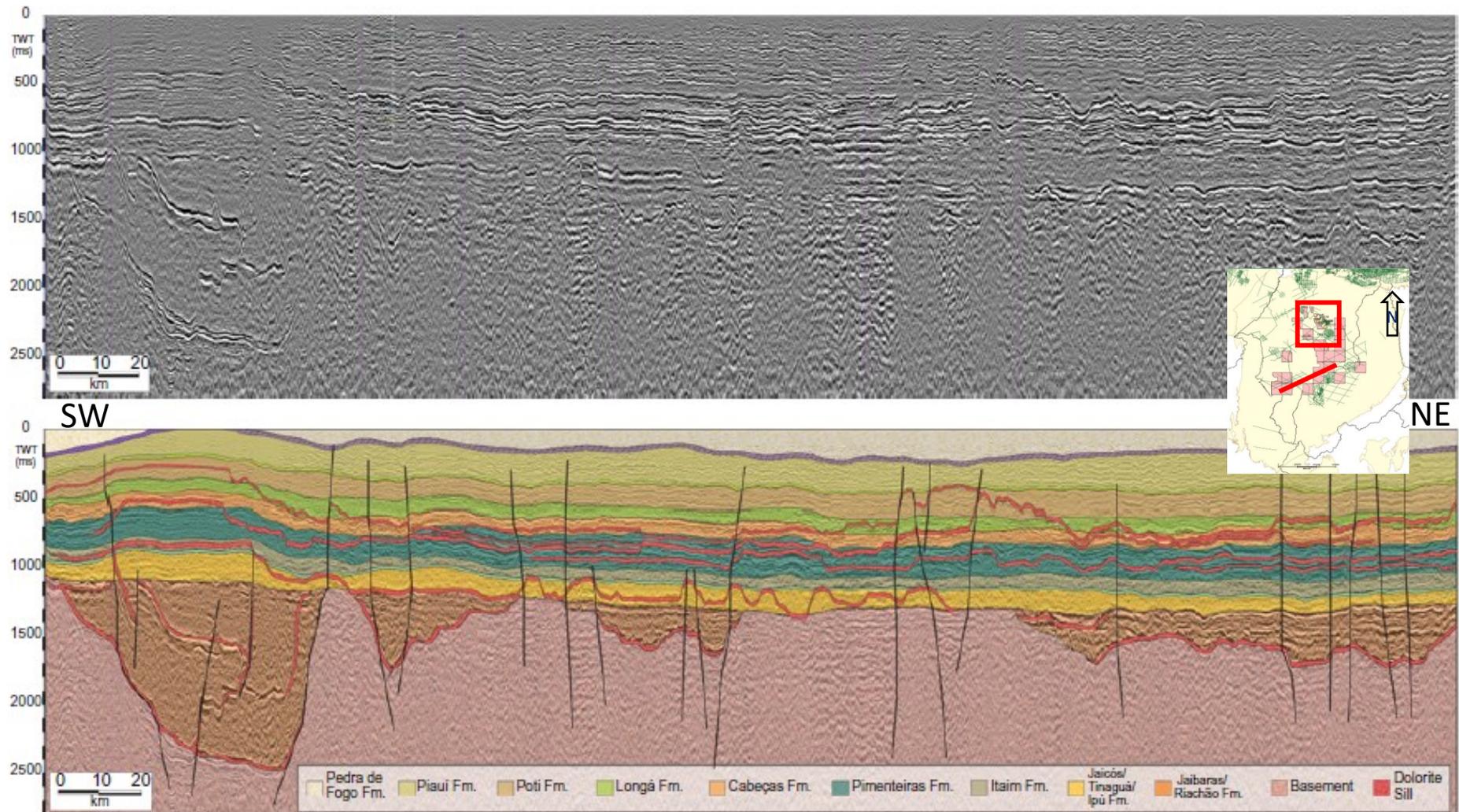


Figura 11 Figura Seção sísmica 2D regional e interpretação geológica com as principais formações encontradas em toda a bacia. Soleiras de diabásio (em vermelho) ocorrem em vários níveis estratigráficos (modificado de Miranda et al, 2018).

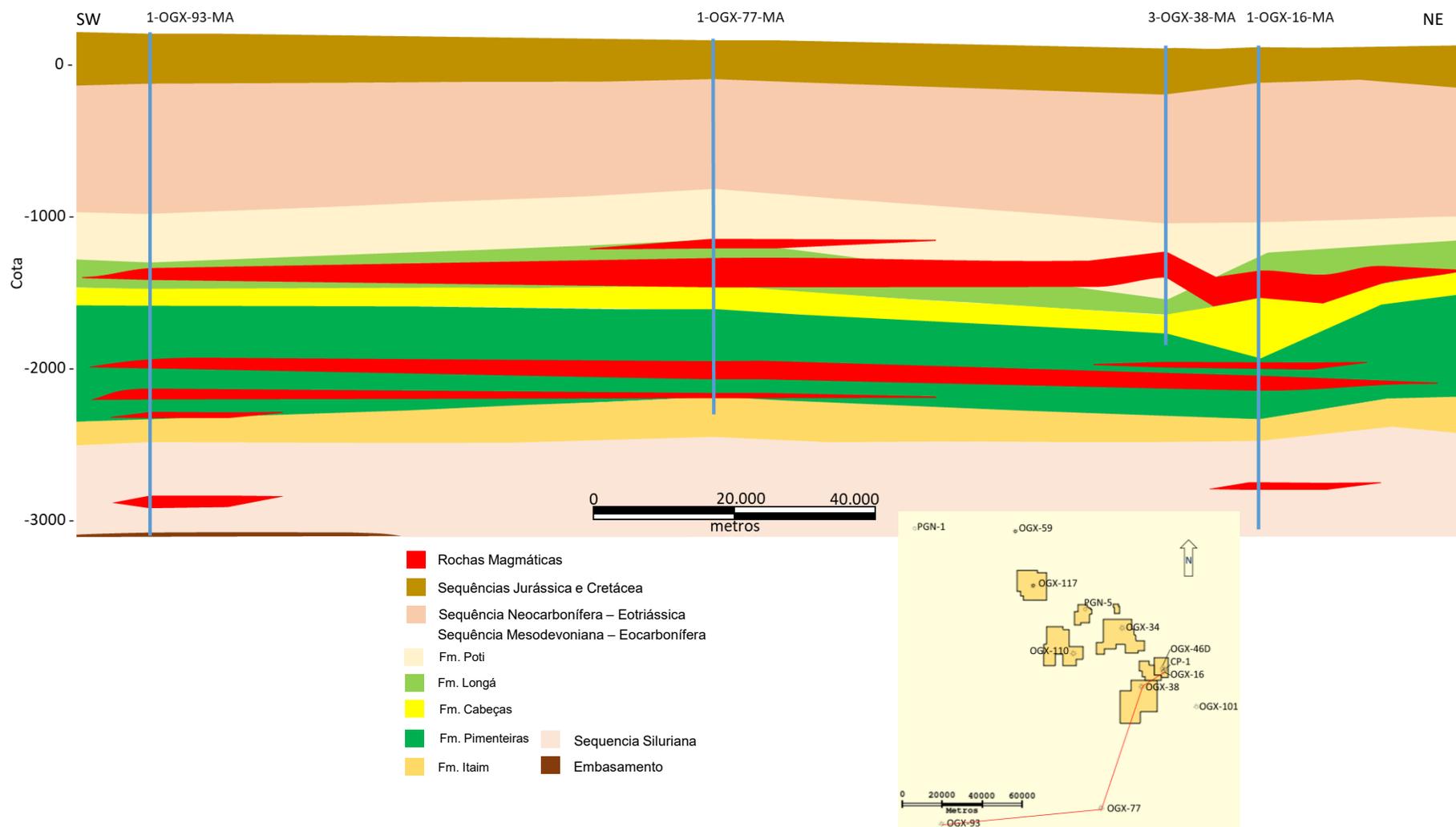


Figura 12 Seção geológica esquemática interpretada, do Parque dos Gaviões, com base em poços, na direção SW-NE, mostrando as Superseqüências Siluriana Neocarbonífera-Eotriássica, Jurássica-Cretácea e as intrusões de rochas magmáticas, detalhando a Supersequencia Mesodevoniana-Eocarbonífera nas Formações Itaim, Pimenteiras, Cabeças, Longá e Poti.

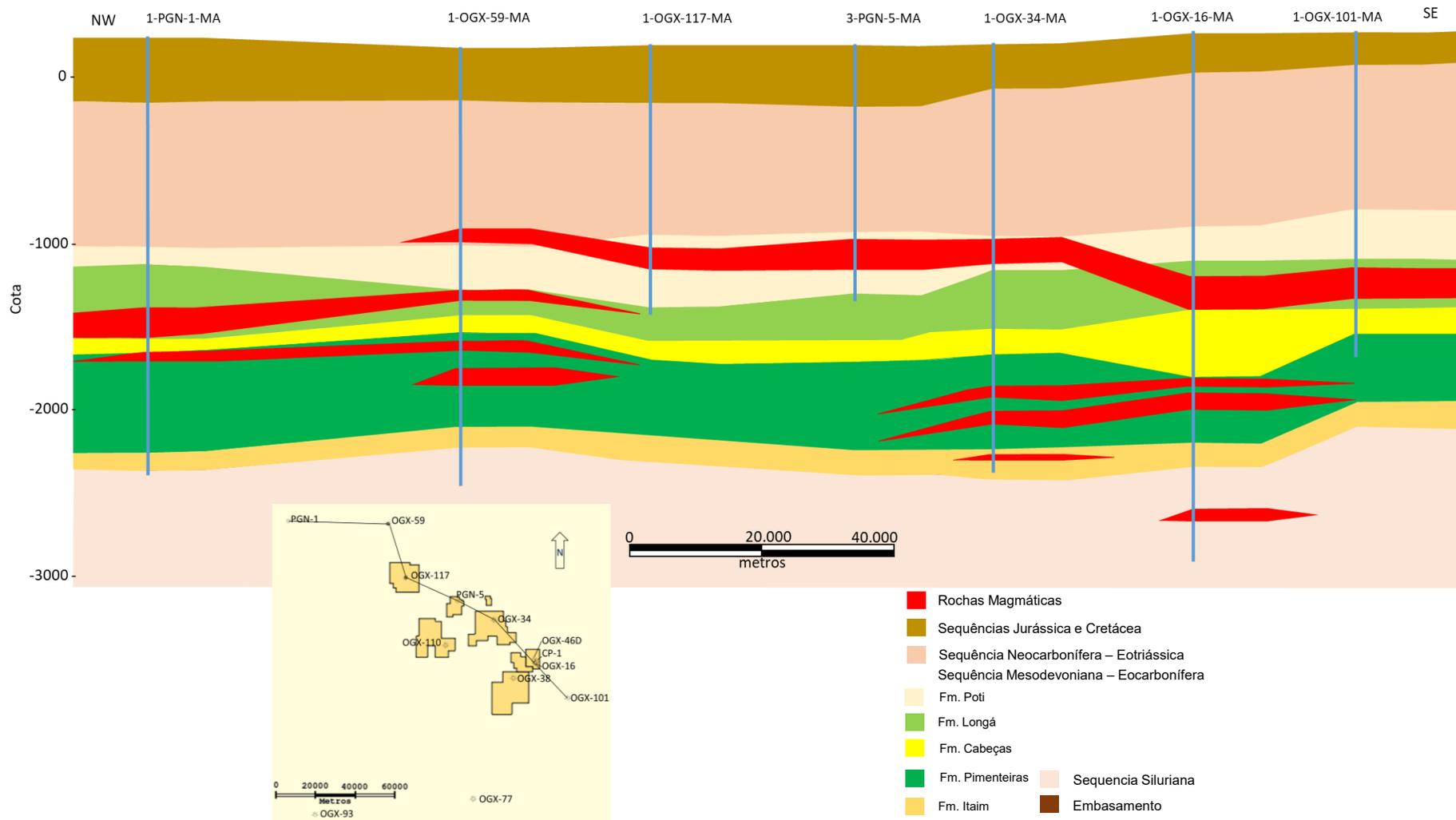


Figura 13 Seção geológica esquemática interpretada, do Parque dos Gaviões, com base em poços, na direção NW-SE, mostrando as supersequências Siluriana Neocarbonífera-Eotriássica, Jurássica-Cretácea e as intrusões de rochas magmáticas, detalhando a Supersequencia Mesodevoniana- Eocarbonífera nas Formações Itaim, Pimenteiras, Cabeças, Longá e Poti.

5. Área de Estudo:

5.1 Generalidades:

O interesse econômico na área de estudo se deve ao chamado “Parque dos Gaviões”, na região centro norte da Bacia do Parnaíba, que abarca diversas descobertas de gás, pela Empresa OGX, a partir de 2010 (Miranda *et al*, 2018). Na ocasião, a OGX declarou comercialidade de oito campos, colocando cinco deles em produção (Gavião Real, Gavião Vermelho, Gavião Branco, Gavião Caboclo e Gavião Azul) e três em desenvolvimento (Gavião Preto, Gavião Branco Norte e Gavião Tesoura). Posteriormente estes campos, além de áreas com plano de avaliação de descoberta (PADs) e cerca de 140 poços perfurados, passaram a ser operados pela ENEVA SA. (ENEVA, 2020) (Figura 14).

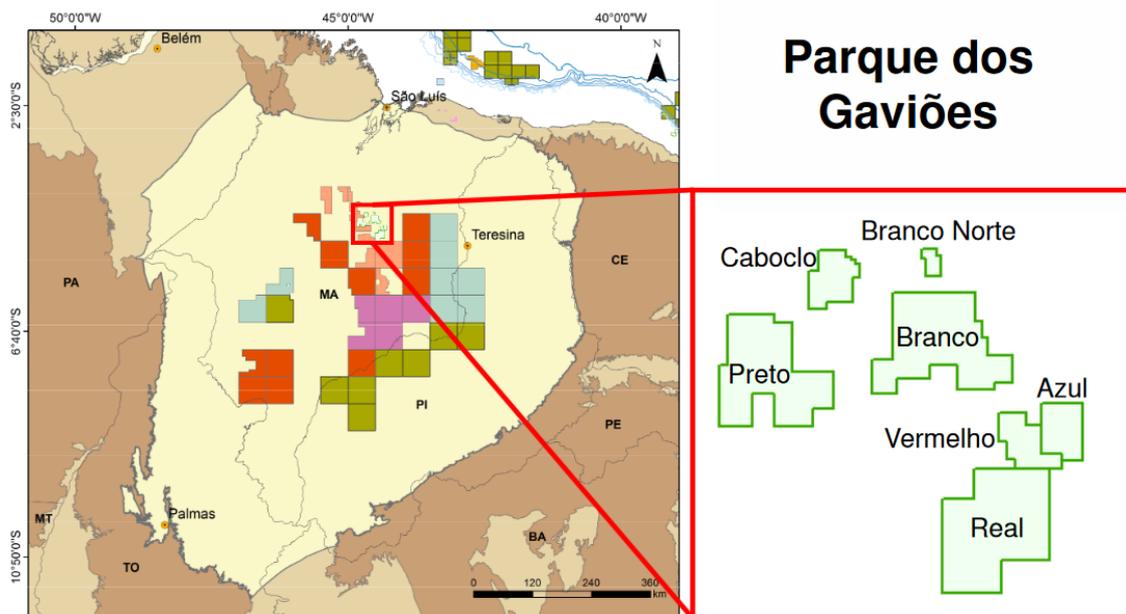


Figura 14 Localização do Parque dos Gaviões e dos campos de produção e desenvolvimento (Ferreira, 2018).

5.2 Sistemas Petrolíferos

Magoon & Dow (1994) classificam sistemas petrolíferos através do nível de incerteza e separam em conhecido, hipotético ou especulativo. Em um sistema petrolífero conhecido existe uma boa correlação geoquímica entre a rocha geradora e as acumulações de óleo ou gás. Em um sistema petrolífero

hipotético, a rocha geradora é identificada, mas não existe correspondência geoquímica com o hidrocarboneto da acumulação. Em um sistema especulativo, a existência de uma rocha geradora ou de hidrocarbonetos é postulada com base em evidências geológicas ou geofísicas. No final do nome do sistema, o nível de incerteza é indicado por (!) para conhecido, (.) para hipotético e (?) para especulativo. A nomenclatura do sistema petrolífero consiste no nome da rocha geradora, seguido pelo nome da rocha reservatório e do nível de incerteza.

Na Bacia do Parnaíba são observados os sistemas Pimenteiras-Cabeças (!) cuja rocha geradora é constituída pelos folhelhos marinhos radioativos da Formação Pimenteiras, Devoniano, (com COT variando de 2% a 4% e com picos de 6%) e o reservatório pelos arenitos deltaicos da Formação Cabeças, Devoniano. Além desta configuração, ocorre o sistema Pimenteiras-Poti (!), no qual os reservatórios são formados por arenitos parálicos Mesocarboníferos, ou, secundariamente, o sistema Pimenteiras-Piauí (!), cujo reservatório compreende sedimentos Neocarboníferos continentais a costeiros (Araújo e Ferreira, 2017).

O selo mais eficiente nesta bacia é formado por intrusões de diabásio que podem selar qualquer reservatório, independentemente de sua posição estratigráfica. A Formação Longá também se apresenta como selo para um dos principais reservatórios que é a formação Cabeças (Araújo e Ferreira, 2017).

As trapas que ocorrem na área são do tipo estrutural. As relacionadas às intrusões ígneas de diabásio, estruturas do tipo “chapéu de coco”, que também são responsáveis pela maturação da rocha geradora, são as que têm apresentado melhores resultados na bacia (Figura 15). Estruturas dômicas regionais, de origem orogênica, na Formação Longá, ocorrem selando os arenitos da Formação Cabeças (Figura 16) (Araújo e Ferreira, 2017).

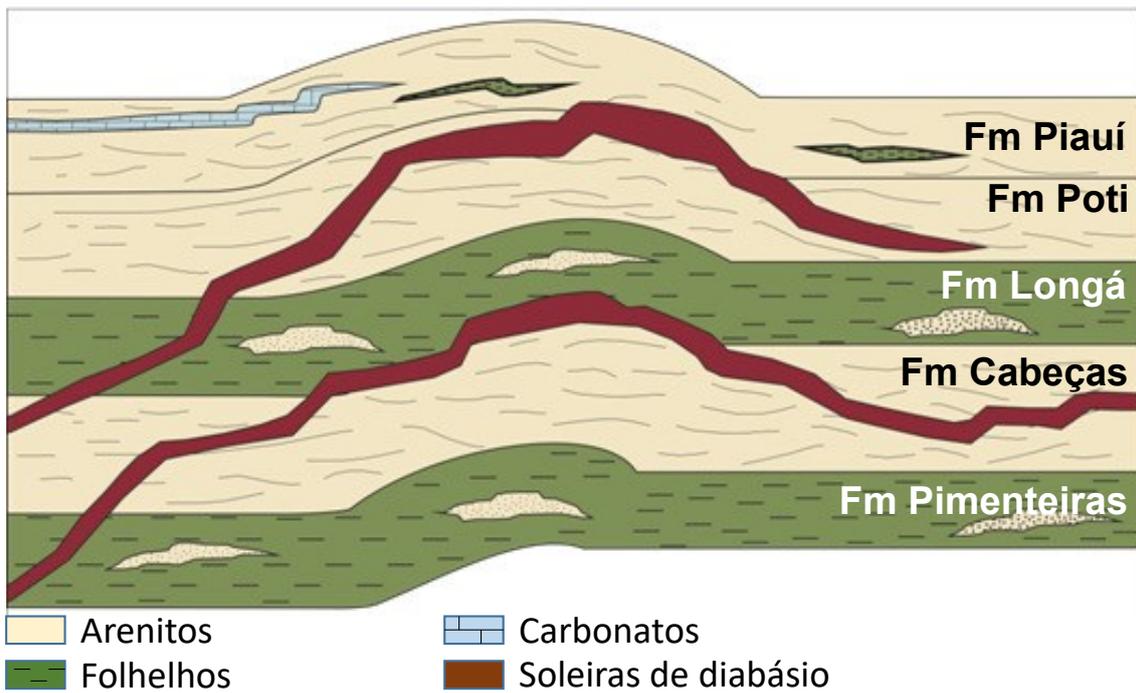


Figura 15 Modelo esquemático de Play tipo “chapéu de coco”, arenitos devonianos da Formação Cabeças e arenitos carboníferos da Formação Poti trapeados e selados por intrusões ígneas (modificado de Abelha, 2018).

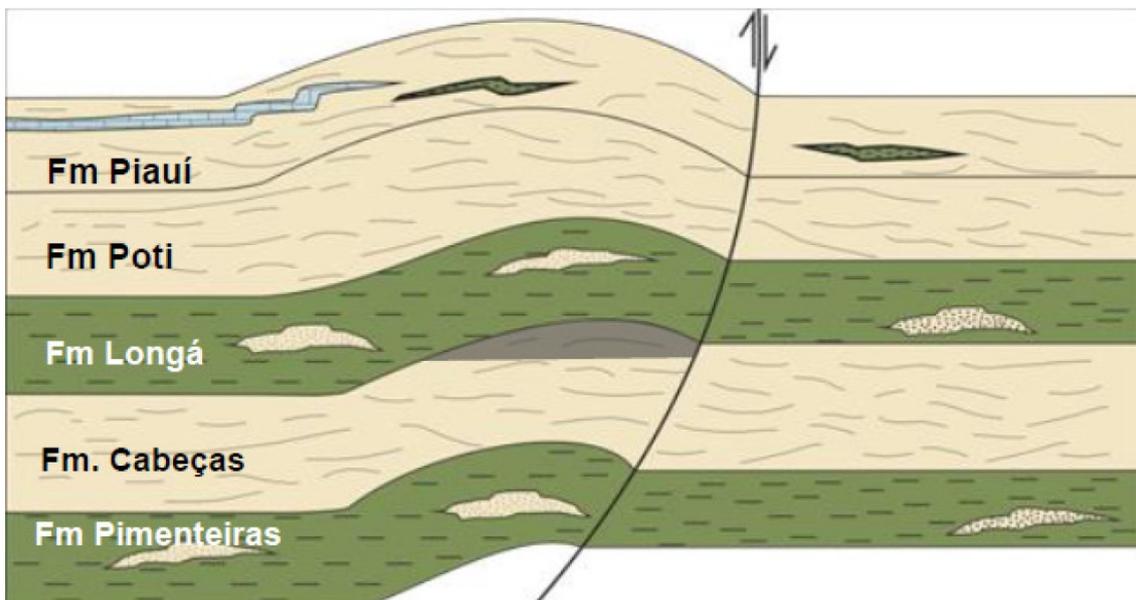


Figura 16 Seção geológica esquemática representando arenitos platformais devonianos da Formação Cabeças, trapeados em estrutura dômica regional da Formação Longá, desenvolvida por falha de empurrão (Araújo e Ferreira, 2017).

A Figura 17 apresenta uma seção geológica na área do Parque dos Gaviões, onde ocorrem as acumulações do tipo “chapéu de coco”, em produção nos campos Gavião Real (GVR), Gavião Azul (GVA) e Gavião Branco (GVB), além de domos regionais na Formação Longá.

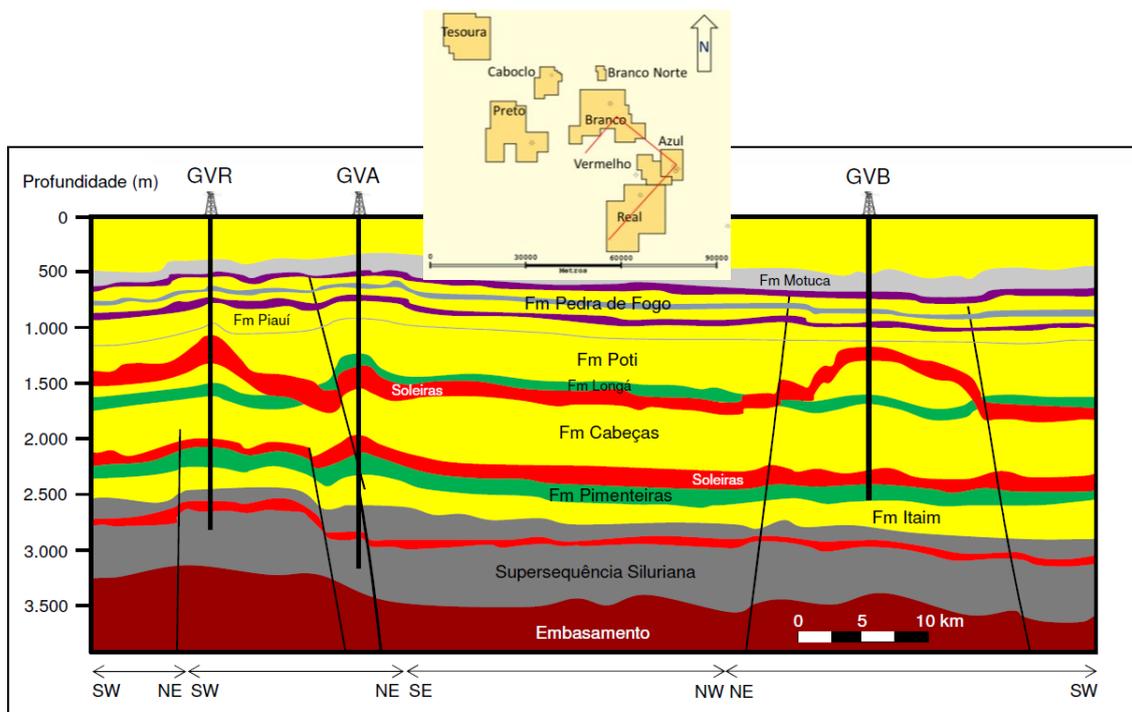


Figura 17 Seção Geológica na área do Parque dos Gaviões onde ocorrem as acumulações do tipo “chapéu de coco”, soleiras em vermelho, e domos regionais na Formação Longá, em verde (Cunha et al., 2012 *apud* Ferreira, 2018).

Os principais *plays* exploratórios na área do Parque dos Gaviões são os arenitos plataformais devonianos da Formação Cabeças e os arenitos parálicos carboníferos da Formação Poti selados pelas intrusões ígneas (Figura 15), e os arenitos devonianos da Formação Cabeças em trapas estruturais selados pela Formação Longá em estruturas dômicas regionais (Figura 16 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**) (Araújo e Ferreira, 2017).

Na carta de eventos do sistema petrolífero da Bacia do Parnaíba (Figura 18) são apresentados os sistemas petrolíferos Pimenteiras-Cabeças (!) Devoniano, Pimenteiras-Poti (!), Devoniano - Mesocarbonífero, e Pimenteiras-Piauí (!), Devoniano – Neocarbonífero. Estes sistemas apresentam-se selados pela Formação Longá e/ou pelos eventos magmáticos do EoJurássico e Eocretáceo.

Apresentam-se soterrados pelos sedimentos depositados na Bacia desde o Mississipiano até o Triássico e pelos eventos magmáticos do Eojurássico e Eocretáceo. Sua formação de trapas é devida às estruturações ocorridas na Bacia após a deposição da Formação Longá, sendo mais antigo dentre os sistemas petrolíferos reconhecidos. A geração iniciou com as intrusões magmáticas Eojurássicas da Formação Mosquito, onde ocorre o seu momento crítico.

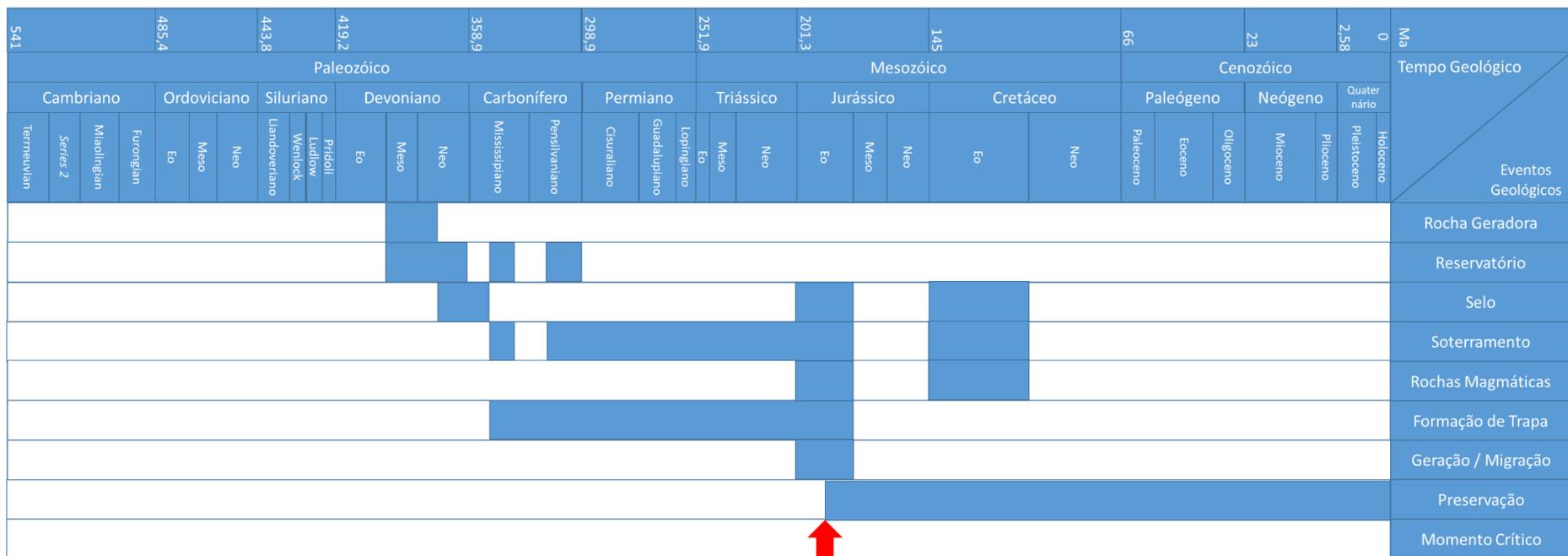


Figura 18 Carta de eventos dos sistemas petrolíferos Pimenteira-Cabeças(!), Pimenteiras-Poti(!) e Pimenteiras-Piauí(!) com base na carta cronoestratigráfica v2019/05 da *International Commission on stratigraphy*.

6. Materiais e Métodos

6.1 Materiais

Neste trabalho foram levantados dados de perfil na região Centro Norte da Bacia do Parnaíba, onde foram perfurados poços para desenvolvimento de campos produtores de gás natural, na região do Parque dos Gaviões (Miranda *et al*, 2018) (Figura 19). Os poços utilizados foram: 2-CP-1-MA, 1-OGX-16-MA, 1-OGX-34-MA, 3-OGX-38-MA, 3-OGX-46D-MA, 1-OGX-59-MA, 1-OGX-77-MA, 1-OGX-93-MA, 1-OGX-101-MA, 1-OGX-110-MA, 1-OGX-117-MA, 1-PGN-1-MA e 3-PGN-5-MA, Os perfis utilizados foram: raios gama, calibre, resistividade, densidade, nêutrons e sônico.

Para complementar os dados foram utilizadas amostras de calha dos poços, 4-OGX-49-MA, 1-OGX-101-MA, 1-OGX-110-MA, 1-OGX-93-MA e 3-PGN-5-MA onde foram realizadas medidas de raios gama total e espectral para constituição de perfis de laboratório, da Formação Poti até o fundo dos poços, exceto o poço 3-PGN-5-MA que o levantamento de raios gama total e espectral foi realizado desde a Fm. Itapecuru. Nestes poços não foram adquiridos dados de raios gama espectral durante as campanhas de perfilagem. Além desses quatro poços, foram utilizados dados de raios gama espectrais dos poços 2-CP-1-MA, 1-OGX-16-MA, 1-OGX-34-MA, 3-OGX-38-MA, 3-OGX-46D-MA, 1-OGX-77-MA e 1-PGN-1-MA, adquiridos durante as operações de perfilagem a poço aberto.

Tabela 4 Poços utilizados neste trabalho, em vermelho, os poços foram realizadas medidas de raios gama total e espectral para constituição de perfis de; em azul, poços onde dados de raios gama espectrais foram adquiridos durante as operações de perfilagem a poço aberto; em preto poços utilizados para auxiliar o empilhamento estratigráfico.

Poço	Perfil Raios Gamaespectral a poço aberto	Perfil Raios Gamaespectral de Amostra de Calha	Empilhamento Estratigráfico
1-OGX-93-MA		1185 a 3318 m	x
1-OGX-77-MA	1595,05 a 2345,93 m		x
1-OGX-101-MA		897 a 1950 m	x
3-OGX-38-MA	740,03 a 1948,26 m		x
4-OGX-49-MA		1530 a 1899 m	x
1-OGX-16-MA	1653,99 a 3134,56 m		x
2-CP-1-MA	1348,28 a 3416,66 m		x
3-OGX-46D-MA	2055,04 a 2204,24 m		x
1-OGX-34-MA	950,13 a 2568 m		x
1-OGX-110-MA		1053 a 1907 m	x
3-PGN-5-MA		18 a 1494 m	x
1-OGX-117-MA			x
1-OGX-59-MA			x
1-PGN-1-MA	1593,19 a 2517,19 m		x

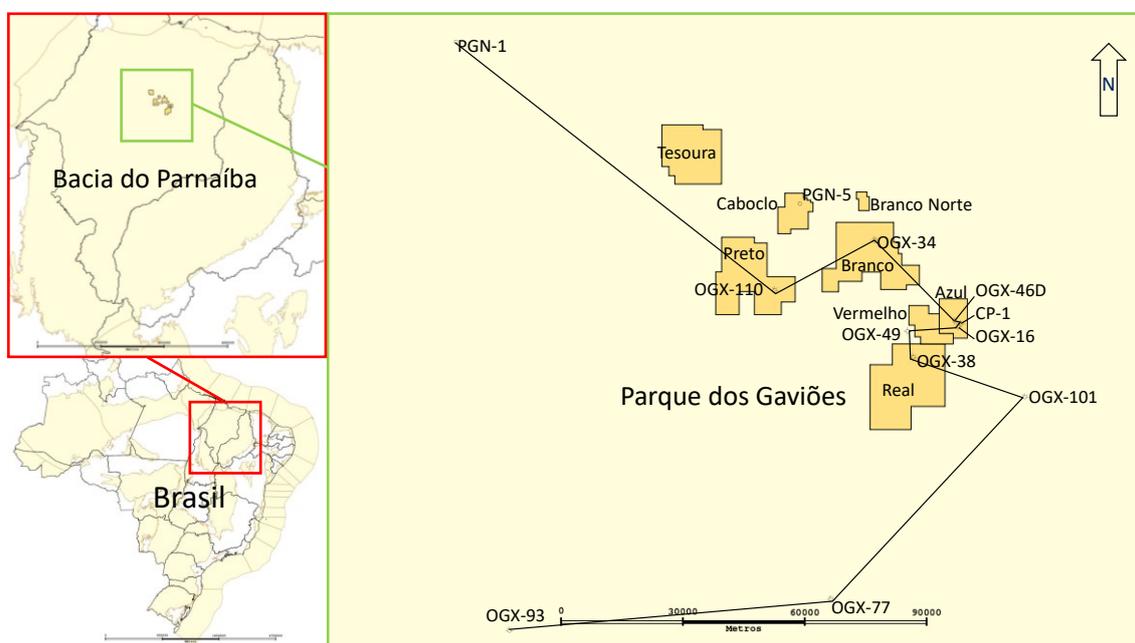


Figura 19 Mapa de localização dos campos de produção, poços e seção arbitrária utilizados neste estudo, na região do Parque dos Gaviões, Bacia do Parnaíba, Brasil.

As amostras de calha utilizadas neste trabalho foram coletadas durante a perfuração destes poços, com espaçamento de 3 em 3 metros nas zonas de maior interesse, sendo armazenadas em sacos de tecido tnt. Essas amostras foram cedidas à Universidade Federal Fluminense (UFF) pela antiga Parnaíba Gás Natural, atual ENEVA S.A.

Os dados de gamaespectrometria, além das outras curvas que foram adquiridas nos poços, tem um intervalo de amostragem de 0,15 m. Estes dados foram cedidos à UFF em arquivos digitais, tipo LAS, pelo BDEP/ANP.

Para aquisição de dados no laboratório foi utilizado um gamaespectrômetro portátil, da marca Radiation Solutions Inc. modelo RS-230 BGO Super-SPEC Handheld Gamma-Ray Spectrometer e uma malha de chumbo com 2 mm de espessura, 1 m de comprimento e paredes de 10 cm de altura (Figura 20).

Para interpretação geológica e de perfis utilizou-se o *software* de interpretação geológica SIGEO3, de propriedade da Petrobras.

6.2 Métodos

As amostras de calha são coletadas durante a perfuração de poços num espaçamento a ser definido de acordo com a necessidade do estudo. Para a descrição litológica da zona de interesse do poço, geralmente se usa o espaçamento de 3 em 3 metros, que foi o utilizado neste trabalho. O material cortado pela broca de perfuração é separado em peneiras e coletado em sacos com uma quantidade de rocha triturada, que representa o intervalo amostrado.

Durante a perfuração dos poços as amostras de calha podem ser influenciadas por alguns fatores, tais como: (a) desabamentos de material dentro do poço, rochas superiores que durante as manobras na coluna de perfuração podem cair até o fundo do poço, (b) erro no cálculo do tempo de retorno das amostras, ocasionado principalmente por variações no diâmetro do poço, alargamentos e expansão das argilas, ou mesmo pela grande profundidade do poço, (c) perdas ou contaminação com material desabado nas peneiras de lama.

As aquisições de dados de perfis nos poços, inclusive gamaespectrais, são realizadas nas campanhas de perfilagem a cabo nos poços de petróleo, água, ou demais jazidas minerais. Após a perfuração das fases de interesse, ferramentas tubulares contendo diferentes sensores são introduzidas no poço ainda sem revestimento, descem até a base do intervalo que se objetiva perfilar, e então são puxadas por um cabo elétrico, perfilando o intervalo durante a subida. No caso da gamaespectrometria a ferramenta é um medidor de radiação à cintilação. À medida que a ferramenta sobe pelo poço os dados de profundidade, calibre, raios gama, gamaespectrometria, resistividade, sônico, densidade, nêutrons entre outros, são registrados na superfície, na unidade de perfilagem. Estes dados podem ser disponibilizados digitalmente em arquivos no formato LAS.

Testes iniciais:

Antes de iniciar o levantamento de dados no laboratório, uma série de testes foram realizados a fim de determinar as condições ideais para aquisição e compreender os dados medidos. Selecionou-se uma caixa contendo 35 amostras de calha do poço 3-PGN-5-MA, com espaçamento de 3 x 3 m, coletadas no intervalo 1044/1146m de profundidade. Realizou-se então as medidas com diferentes tempos de leitura (30, 60 e 90 segundos) nas unidades nano Gray por hora (nGy/h) para os raios gama total, % para o potássio e ppm para urânio e tório. Os dados foram lidos no *display* do equipamento e registrados manualmente em planilhas (Figura 20).



Figura 20 1 e 2) Aquisição de dados de raios gama total e espectral, a partir de amostra de calha, em saco de tecido *tnt*, com o gamaespectrômetro portátil RS-230, sobre a malha de chumbo, no laboratório da UFF. 3) Detalhe da tela do equipamento.

Para determinar qual a melhor duração de medição para ser compatível com o trabalho, foram plotadas as curvas de raios gama total (TotalGR), medidas no laboratório, em nGy/h, sobre as curvas de raios gama do poço fornecidas pela BDEP/ANP, em gAPI, unidade internacional para medidas de raios gama em poços. Para este trabalho foi utilizado o *software Trace K2* (Figura 21). Esta comparação permitiu a identificação da curva de melhor ajuste, considerando como padrão a curva adquirida pela ferramenta geofísica no poço.

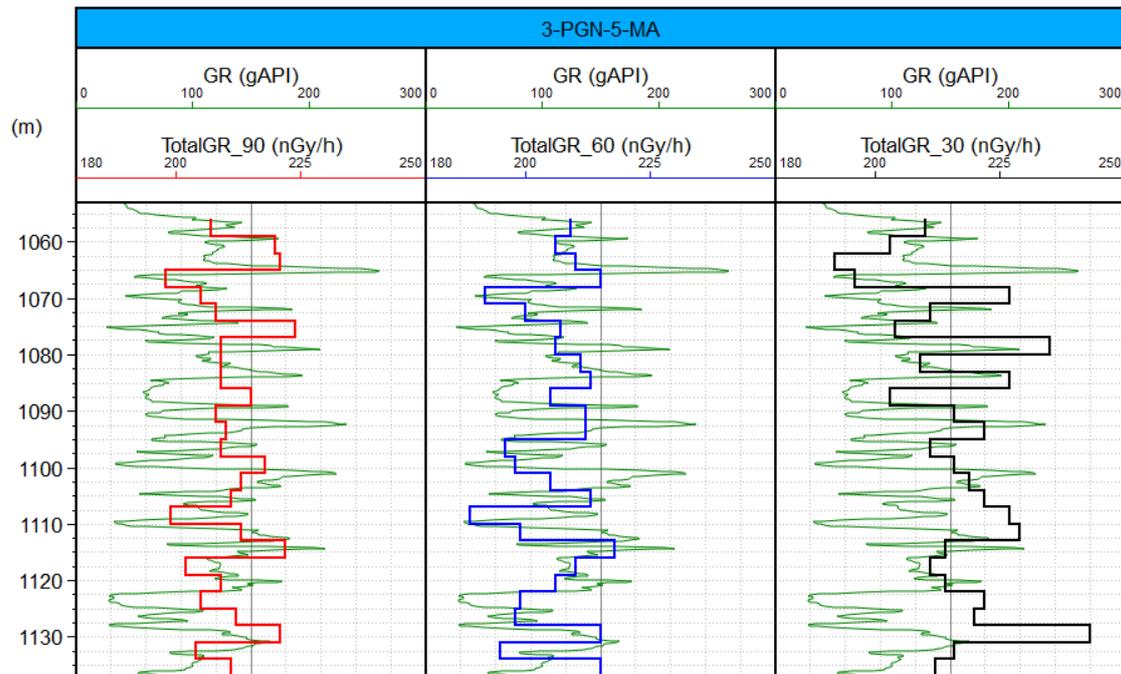


Figura 21 Curvas de raios gama totais. Em verde a curva adquirida no poço na campanha de perfilagem, em API; em vermelho, azul e preto as curvas medidas em laboratório em nGy/h, de 90, 60 e 30 segundos de exposição ao gamaespectrômetro RS-230 respectivamente (Nobre, 2019).

A partir da avaliação das curvas, concluiu-se que a exposição ao gamaespectrômetro pelo tempo de 60 segundos foi suficiente para obter uma leitura de boa qualidade e compatível com aquela obtida na perfilagem do poço. A curva adquirida no laboratório apresentou um comportamento semelhante à adquirida no poço, observando-se inclusive ciclos crescentes e decrescentes de radiação. Em alguns intervalos a correlação não se apresenta tão boa, sendo que causas podem ser atribuídas à falha no cálculo do tempo de retorno das amostras, que podem deslocar a curva em relação a original, assim como pela amostragem representar um grande intervalo de rocha cortada. Por isso, a comparação entre os métodos de aquisição deve ser feita de maneira qualitativa, visto que a aquisição em laboratório se refere a média de um intervalo de 3m, enquanto a aquisição em poço possui resolução muito maior e refere-se a um ponto a cada 0,15m.

Considerou-se que as curvas de K (%), U (ppm) e Th (ppm) se comportam da mesma forma, pois não foi possível realizar esta comparação porque o *dataset* disponível na UFF não possui amostras de calha de poços onde a ferramenta de raios gama espectral foi corrida.

As primeiras análises do comportamento das curvas de tório, urânio e potássio assim como a razão Th/U se mostraram bastante promissoras para correlação entre poços e interpretação paleoambiental.

Para observar a qualidade das medidas laboratoriais foi criada uma amostra padrão, um aparato cilíndrico com 8,5 cm de diâmetro contendo areia monazítica (rica em tório), coberta por resina (Figura 22). Esta amostra foi medida repetidas vezes nas mesmas condições das amostras de calha, para monitorar a dispersão dos dados. Com o intuito de reduzir a influência ambiental (*background*) nas medidas foi necessário isolar estas amostras de outras fontes radioativas (amostras de rocha e outras amostras de calha), fazendo uso de uma malha de chumbo com 2 mm de espessura e 1 metro de comprimento. Em testes observou-se que, com o uso desta malha de chumbo, houve uma redução expressiva das influências ambientais, principalmente nas medidas de urânio, tório e de radiação total. Gráficos de dispersão com o resultado destes testes são apresentados nas Figura 23, Figura 24, Figura 25 e Figura 26, onde foram plotados valores das medidas realizadas na amostra teste, dentro e fora da malha de chumbo, e do *background* dentro da malha de chumbo.



Figura 22 Amostra padrão, cilindro plástico com 8,5 cm de diâmetro, contendo areia monazítica coberta por resina (Nobre, 2019).

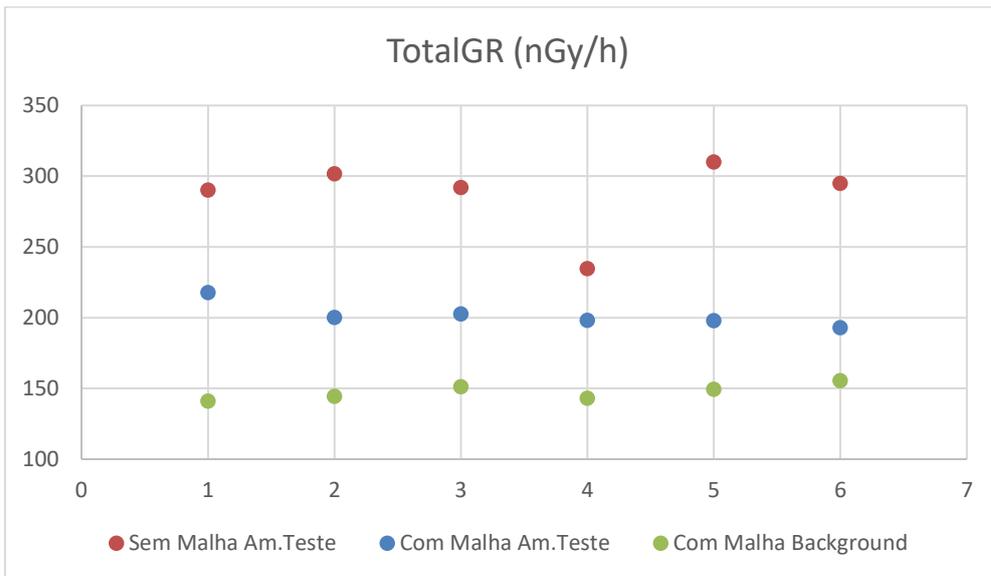


Figura 23 Gráfico de dispersão das medições de Gama total da amostra teste e do *background*. Em vermelho, amostra teste, fora da malha, em azul amostra teste dentro da malha e, em verde, o *background* dentro da malha. No eixo X apresenta-se o número de medidas e no eixo y os valores de totalGR em nGy/h.

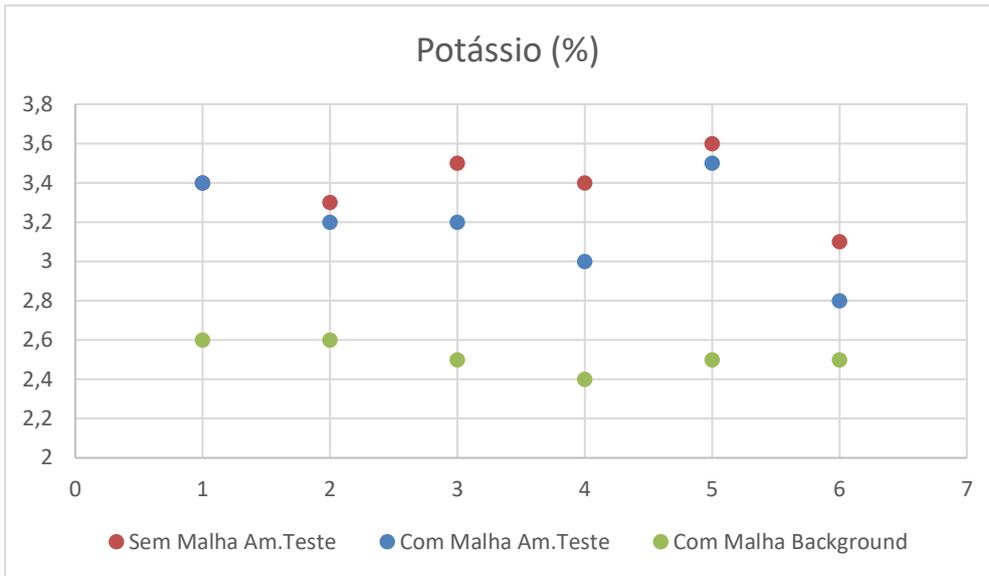


Figura 24 Gráfico de dispersão das medições de Potássio da amostra teste e do *background*. Em vermelho, amostra teste, fora da malha, em azul amostra teste dentro da malha e, em verde, o *background* dentro da malha. No eixo X apresenta-se o número de medidas e no eixo y os valores de K (%).

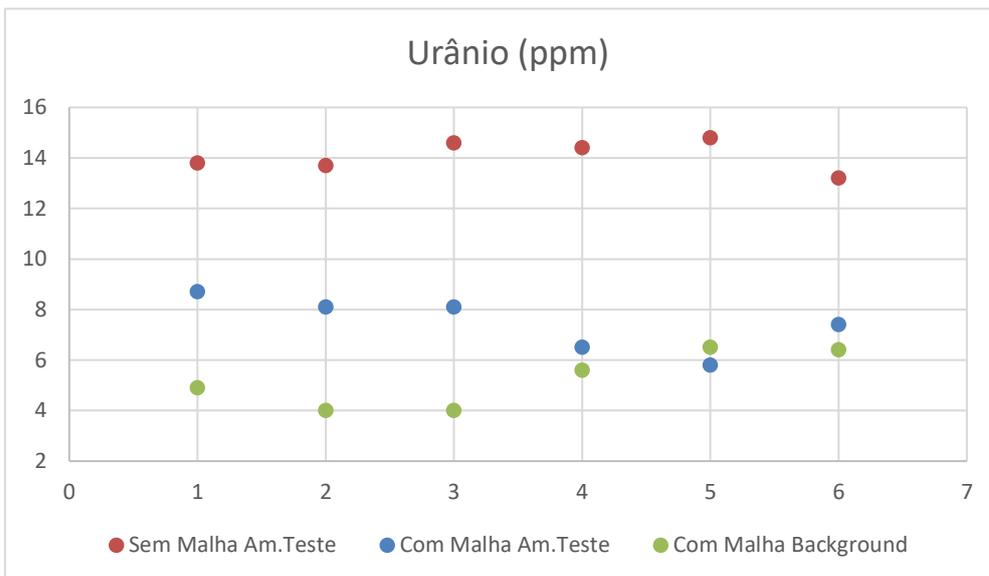


Figura 25 Gráfico de dispersão das medições de Urânio da amostra teste e do *background*. Em vermelho, amostra teste, fora da malha, em azul amostra teste dentro da malha e, em verde, o *background* dentro da malha. No eixo X apresenta-se o número de medidas e no eixo y os valores de U (ppm).

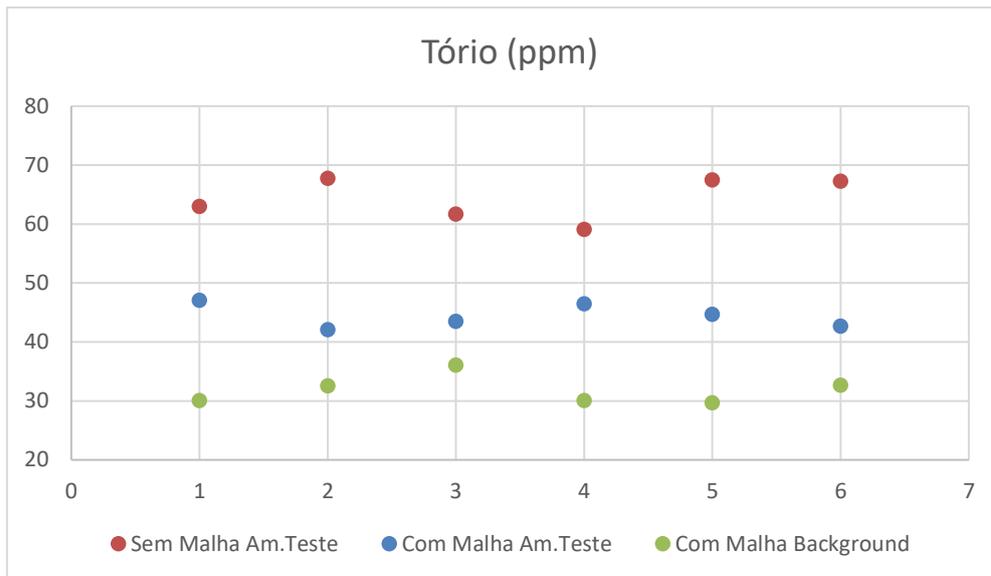


Figura 26 Gráfico de dispersão das medições de Tório da amostra teste e do *background*. Em vermelho, amostra teste, fora da malha, em azul amostra teste dentro da malha e, em verde, o *background* dentro da malha. No eixo X apresenta-se o número de medidas e no eixo y os valores de Th (ppm).

Neste trabalho a utilização de curvas de relação entre Th/U, Th/K e U/K permitiram, uma melhor correlação entre as curvas de laboratório e as adquiridas nas operações de perfilagem a poço aberto, pois a relação entre curvas elimina diferenças nas escalas de leitura, assim como a interferência por radiações do *background*. A Figura 27 apresenta um gráfico histograma da mediana dos valores de Potássio (%), Urânio (ppm) e Tório (ppm) na Formação Cabeças. Nele se observam grandes variações nos valores dos três elementos, quando comparados os poços onde a gamaespectrometria foi adquirida no laboratório (1-OGX-93-MA, 1-OGX-101-MA, 4-OGX-49-MA e 1-OGX-110-MA) em relação aos adquiridos em perfilagem a cabo (1-OGX-77-MA, 3-GX-38-MA, 1-OGX-16-MA, 2-CP-1-MA, 3-OGX-46D-MA, 1-OGX-34-MA e 1-PGN-1-MA), O poço 1-PGN-1-MA apresenta uma escala diferente dos outros poços. Já a Figura 28 apresenta um gráfico histograma da mediana dos valores das razões Th/U, Th/K (10^{-4}), U/K (10^{-4}) também na Formação Cabeças. Nele se as razões apresentam valores medianos semelhantes. Apenas o poço 2-CP-1-MA apresentou a escala diferente para a razão Th/U, e U/K mas foram corrigidas para visualização em perfil, utilizando o dobro e metade, respectivamente, das

escalas de perfil utilizada para plotar os outros poços. Os valores da razão Th/K, que teve o dado desprezado por se apresentar incoerente.

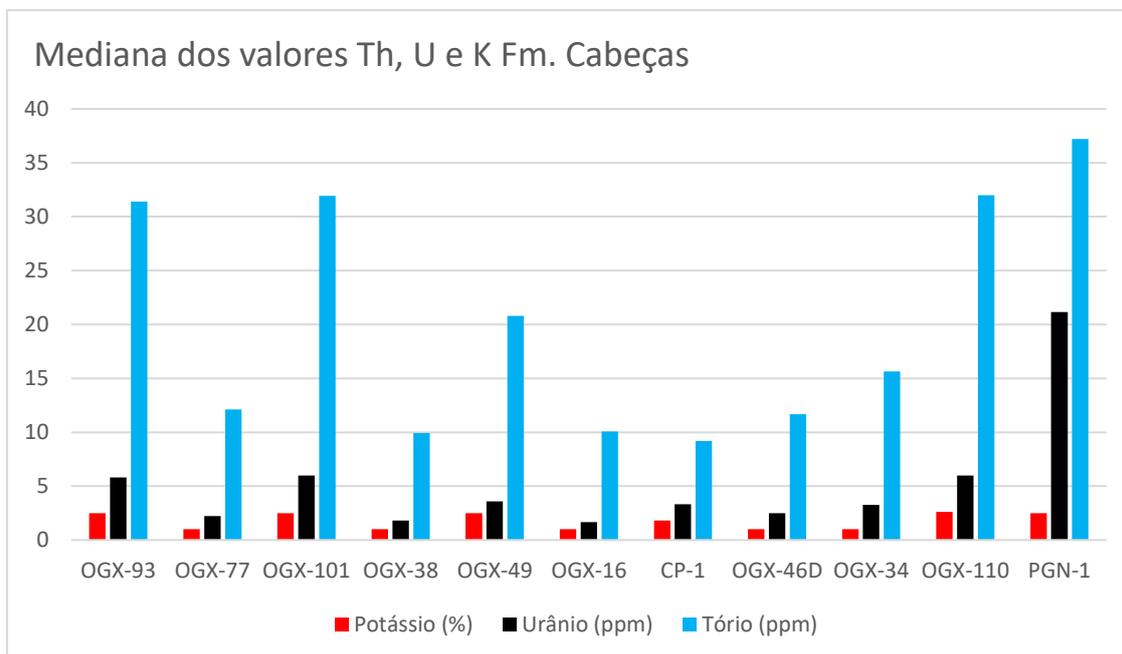


Figura 27 Gráfico histograma da mediana dos valores de Potássio (%) (vermelho), Urânio (ppm) (preto) e Tório (ppm) (azul) na Formação Cabeças. Observa-se grandes variações nos valores dos três elementos, quando comparados os poços onde a gamaespectrometria foi adquirida no laboratório (1-OGX-93-MA, 1-OGX-101-MA, 4-OGX-49-MA e 1-OGX-110-MA) em relação aos adquiridos em perfilagem a cabo (1-OGX-77-MA, 3-GX-38-MA, 1-OGX-16-MA, 2-CP-1-MA, 3-OGX-46D-MA, 1-OGX-34-MA e 1-PGN-1-MA), O poço 1-PGN-1-MA apresenta uma escala diferente dos outros poços.

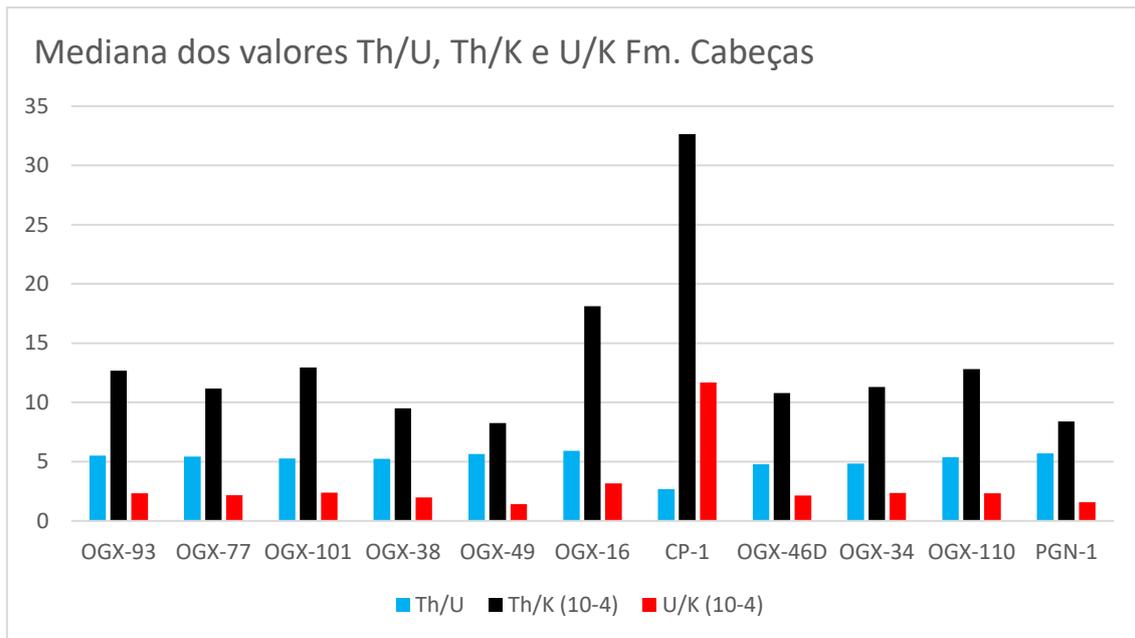


Figura 28 Gráfico histograma da mediana dos valores das razões Th/U (azul), Th/K (10⁻⁴) (preto), U/K (10⁻⁴) (vermelho) na Formação Cabeças. Observa-se que as razões apresentam valores medianos semelhantes. Apenas o poço 2-CP-1-MA apresentou a escala diferente para a razão Th/U, e U/K mas foram corrigidas para visualização em perfil, utilizando o dobro e metade, respectivamente, das escalas de perfil utilizada para plotar os outros poços. Os valores da razão Th/K, que teve o dado desprezado por se apresentar incoerente.

Na Formação Cabeças, por não haver condições redutoras, não foram encontrados pontos onde a razão Th/U é inferior a 2, condição de rochas enriquecidas em matéria orgânica, como na Formação Pimenteiras. Foram encontradas condições oxidantes, típica do ambiente continental, solos intemperizados e marinho raso, com razão tório urânio for maior que sete (Th/U > 7) e condição ambiental mais típica de depósitos marinhos, com Th/U < 7, conforme demonstrado por Fertl, (1979) e Klaja e Dudek (2016).

Aquisição de dados:

Para a aquisição de dados de gamaespectrometria das amostras de calha no laboratório da UFF foi utilizada a malha de chumbo para isolar estas amostras de outras fontes radioativas e da radiação de *background*. As medidas foram feitas sempre no mesmo local do laboratório onde os sacos de tecido tnt contendo as amostras foram dispostos individualmente sobre o centro da malha de chumbo e expostos ao gamaespectrômetro RS-230 por 60 segundos no modo Assay (Figura 20).

Os valores de raios gama Total (nGy/h), K (%), U (ppm) e Th (ppm) medidos no gamaespectrômetro RS-230 foram anotados manualmente em planilhas Excel

e convertidos para arquivos do tipo CSV (Arquivos de valores separados por vírgulas do Microsoft Excel), sendo posteriormente importados para o *software* SIGEO3, onde foram criadas curvas de perfil de laboratório (Figura 31).

Correlação de Poços:

No *software* SIGEO3 foram utilizados diversos perfis para a correlação de poços. Foram usados os perfis de GR (raios gama), CALIPER (calibre), Resistividade, NPHI (nêutrons) e densidade em *crossover*, Sônico compressional, PEF (Efeito fotoelétrico), as razões calculadas Th/U, Th/K e U/K, além dos perfis de poço ou de laboratório U, Th e K, um *crossover* entre U e Th e a litologia interpretada (Figura 29). No entanto, para a melhor visualização, foi necessário preparar um leiaute de trilhas específico, contendo sete trilhas.

A primeira trilha apresenta as zonas definidas para o trabalho. A segunda trilha apresenta a elevação em cota, os perfis de raios gama total (GR) variando de 0 a 200 API e calibre (*caliper*) variando de 6 a 16 polegadas.

Com base na relação apresentada por Fertl, (1979) e Klaja e Dudek, (2016) plotou-se o perfil da relação Th/U (adimensional) variando de 0 a 10 na terceira trilha, com linhas de *cutoff* em Th/U < 2, preenchido em preto (indicando ambientes anóxicos) e Th/U > 7, preenchido em amarelo (indicação de ambientes oxidantes, com maiores aportes continentais). Para o intervalo com Th/U entre 2 e 7, indicativo de ambiente transicional, o preenchimento foi em azul (Figura 7 e Figura 32).

Klaja e Dudek (2016) também sugeriram o agrupamento das curvas U/K e Th/U em um único *track*, pois essas curvas são inversamente proporcionais e a alteração associada ao conteúdo de urânio causa às curvas variações em direções opostas, ou seja, quando ocorre aumento dos valores da curva U/K, com diminuição simultânea nos valores Th/U, a causa é o aumento do urânio, o inverso é causado pelo aumento de tório. Este cruzamento de perfis foi plotado na quarta trilha, com o Th/U variando de 0,1 a 10 e o U/K (adimensional x 10⁻⁴) variando de 0,3 a 10, com preenchimento à esquerda do perfil de U/K em azul e à direita em amarelo (Figura 32).

Na quinta trilha foram plotados, com escalas inversas, perfis dos valores de urânio e tório, para identificar possíveis intervalos com arenitos, quando ocorre maior presença de tório, e argilas, quando ocorre maior presença de urânio. Os valores de urânio variando de -2 a 10 ppm, e os de tório variando de 40 a 5 ppm nos poços onde os dados foram adquiridos nas campanhas de perfilagem e de 43 a 26 ppm nos poços onde os dados foram adquiridos em laboratório. Esta diferença de escala foi necessária pela pequena variação nos valores adquiridos em laboratório. Esta trilha foi preenchida à esquerda da do perfil de urânio em verde e à direita em amarelo (Figura 7 e Figura 32).

A sexta trilha apresenta a litologia interpretada dos poços com legenda apresentada na Figura 29. A sétima e última trilha apresenta os perfis em escala inversa de densidade (DENS), variando de 2 a 3 g/cm³ e neutrão (NPHI) variando de 45 a -15 vol/vol, preenchidos à esquerda do perfil de densidade em verde e à direita em amarelo (Figura 32).

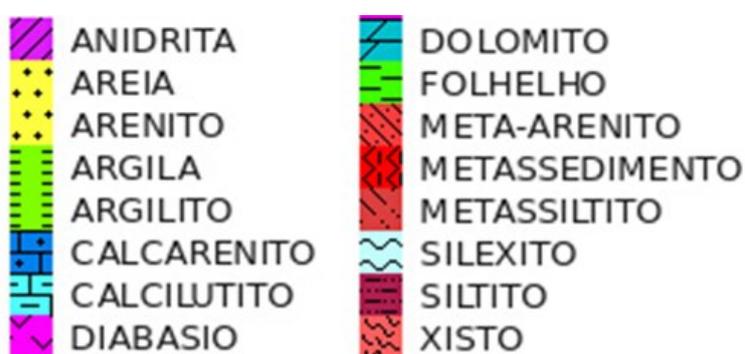


Figura 29 Legenda de litologias com ocorrência neste trabalho.

Os poços 2-CP-1-MA, 1-OGX-16-MA, 1-OGX-34-MA, 3-OGX-38-MA, 3-OGX-46D-MA, 4-OGX-49-MA, 1-OGX-77-MA, 1-OGX-93-MA, 1-OGX-101-MA, 1-OGX-110-MA e 1-PGN-1-MA foram dispostos lado a lado seguindo uma seção arbitrária de acordo o critério de proximidade (Figura 19 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Separou-se inicialmente as unidades litoestratigráficas e discordâncias intraformacionais definidas por Vaz *et al.* (2007) (Figura 30). Em seguida foram separados intervalos, utilizando os ciclos de aumento e redução dos valores de gama total, assim como as variações na

relação Th/U, os cruzamentos de Th/U e U/K e U e Th (Figura 32). O poço 3-PGN-5-MA não foi utilizado na correlação por não atingir a Formação Cabeças.



Figura 30 Unidades litoestratigráficas e intervalos interpretados nos poços deste trabalho.

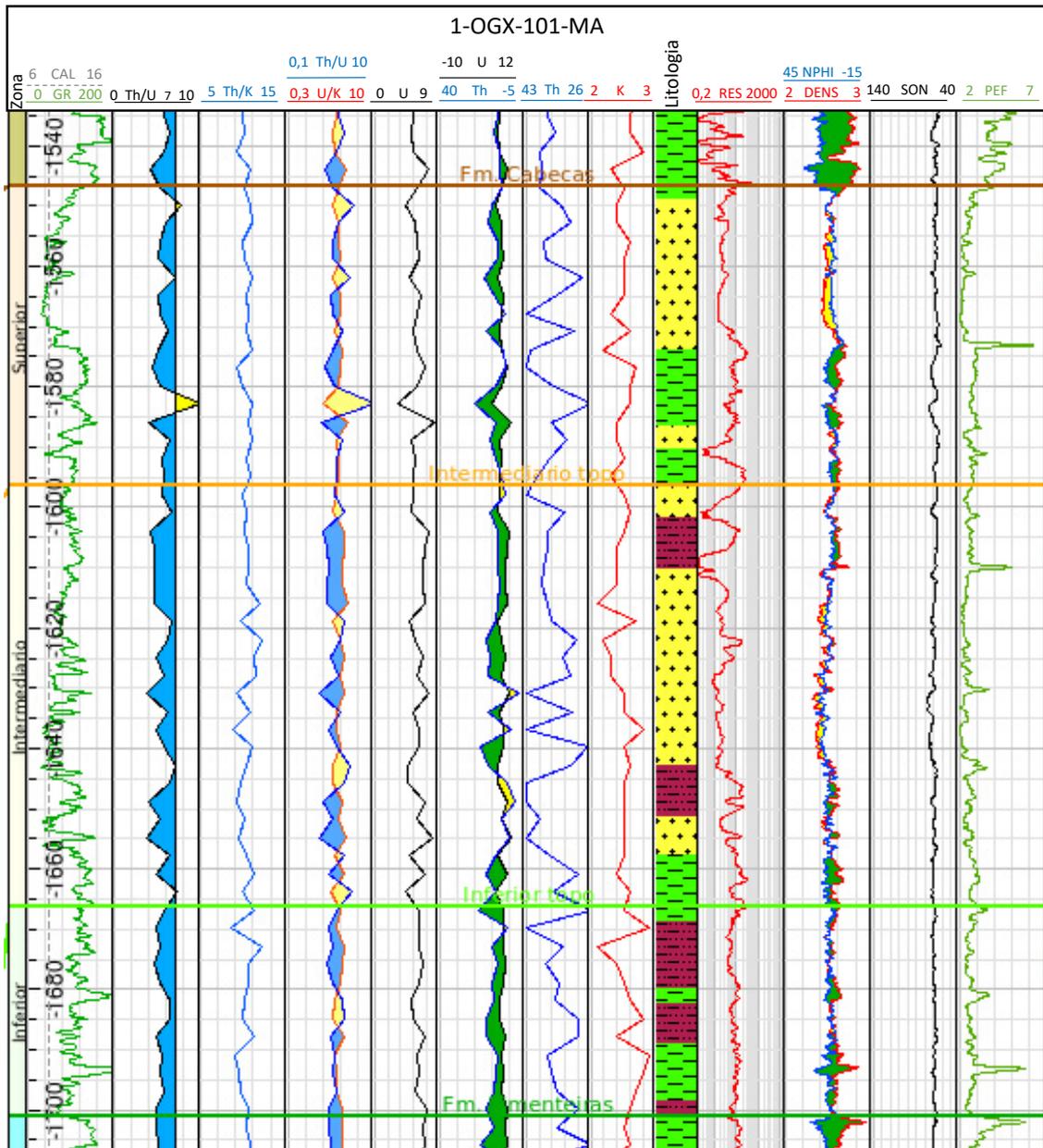


Figura 31 Poço 1-OGX-101-MA com elevação em cota, com todos os dados de perfil, de laboratório e perfis elétricos, utilizados para realizar a correlação de poços, GR (raios gama), CALIPER (calibre), as razões calculadas Th/U, Th/K e U/K, além dos perfis de laboratório U, Th e K, o crossover U e Th, Litologia interpretada, Resistividade, o crossover NPHI (nêutrons) e densidade, Sônico compressional e PEF (Efeito fotoelétrico).

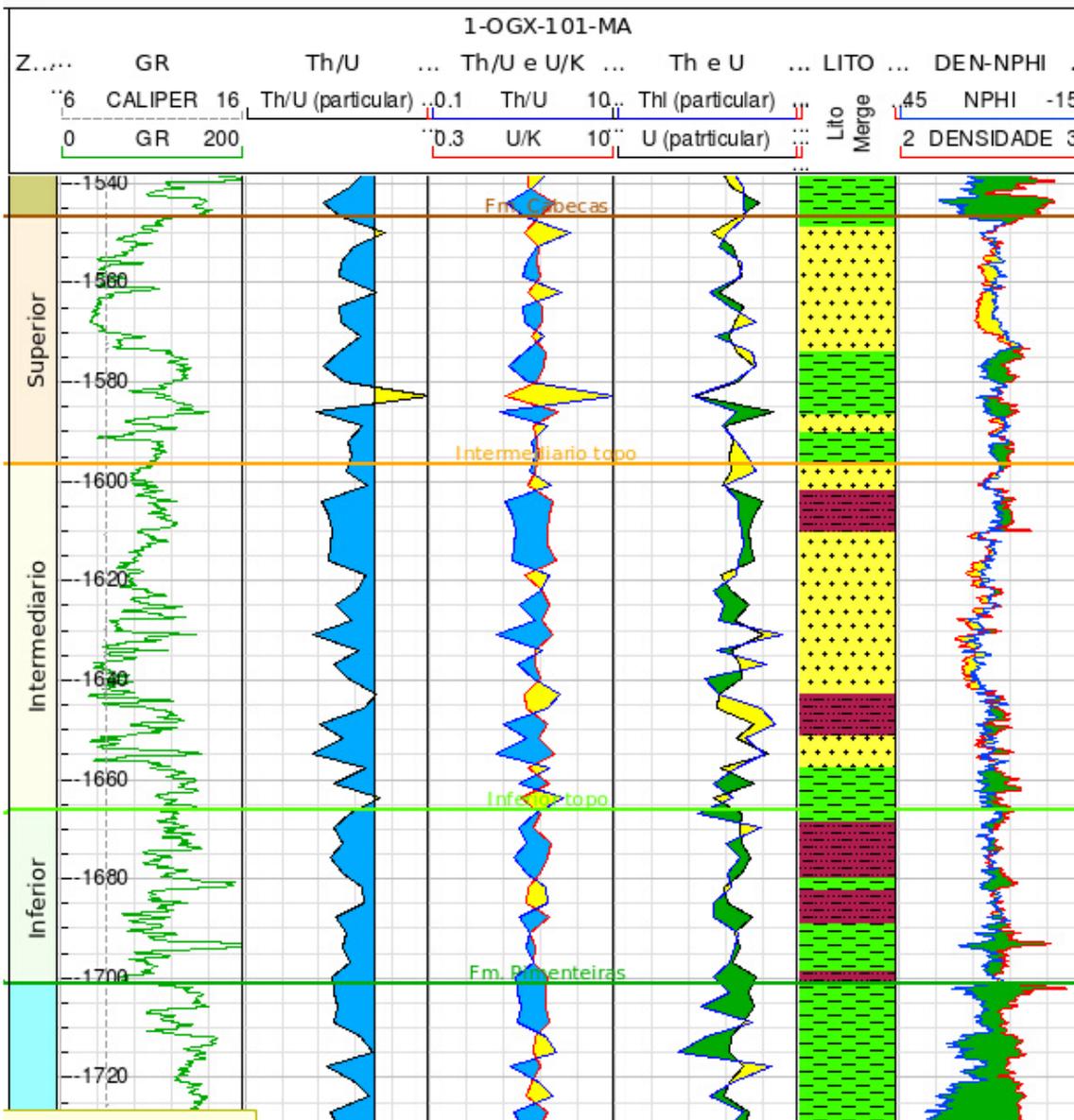


Figura 32 Poço 1-OGX-101-MA com elevação em cota, com os perfis elétricos GR (raios gama), CALIPER (calibre), NPHI (nêutrons) e densidade e de laboratório U e Th, além das razões calculadas Th/U e U/K. Divisão da Formação Cabeças, o intervalo intermediário, entre as linhas laranja e verde, apresenta a razão Th/U mais elevado que nos intervalos inferior e superior. Perceba que a densidade de amostragem nos perfis de laboratório e suas razões calculadas são bem menores que dos perfis elétricos.

7. Resultados:

Com os poços plotados em uma seção arbitrária, e analisando o comportamento dos perfis de Th/U, Th/U x U/K e de raios gama total, identificou-se que, no intervalo intermediário da Fm. Cabeças ocorrem maior frequência de valores mais altos da razão Th/U, assim, como uma queda no perfil de raios gama total. Deste modo dividiu-se a Fm. Cabeças em três intervalos (correlações do ANEXO 2, Figura 43 e Figura 44).

No primeiro intervalo, o inferior, observa-se a queda gradual dos valores de raios gama total para o topo e a relação Th/U, em geral, com valores abaixo de 7. No segundo intervalo, o intermediário, o perfil de raios gama total se mantém baixo na maioria dos poços, e ocorre a razão Th/U mais alta, com muitos valores acima de 7. No intervalo superior, o perfil de raios gama total volta a subir e a razão Th/U novamente se mantém mais baixa, em geral abaixo de 7 (Figura 33).

As medições realizadas em laboratório, com o gama espectrômetro portátil, para a Formação Cabeças, nos poços 4-OGX-49-MA, 1-OGX-93-MA, 1-OGX-101-MA e 1-OGX-110-MA, assim como nos poços onde as aquisições de raios gama espectral foram realizadas nas campanhas de perfilagem, são apresentadas no ANEXO 1, em tabelas de resumos estatísticos, com os valores de média, mediana, máximo, mínimo e desvio padrão de cada parâmetro levantado, API e nGy/h para os raios gama total, % para o potássio e ppm para urânio e tório, bem como de suas razões calculadas Th/U (adimensional), Th/K e U/K (adimensional x 10^{-4}), para a Formação Cabeças e seus sub- intervalos, Inferior, Intermediário e Superior.

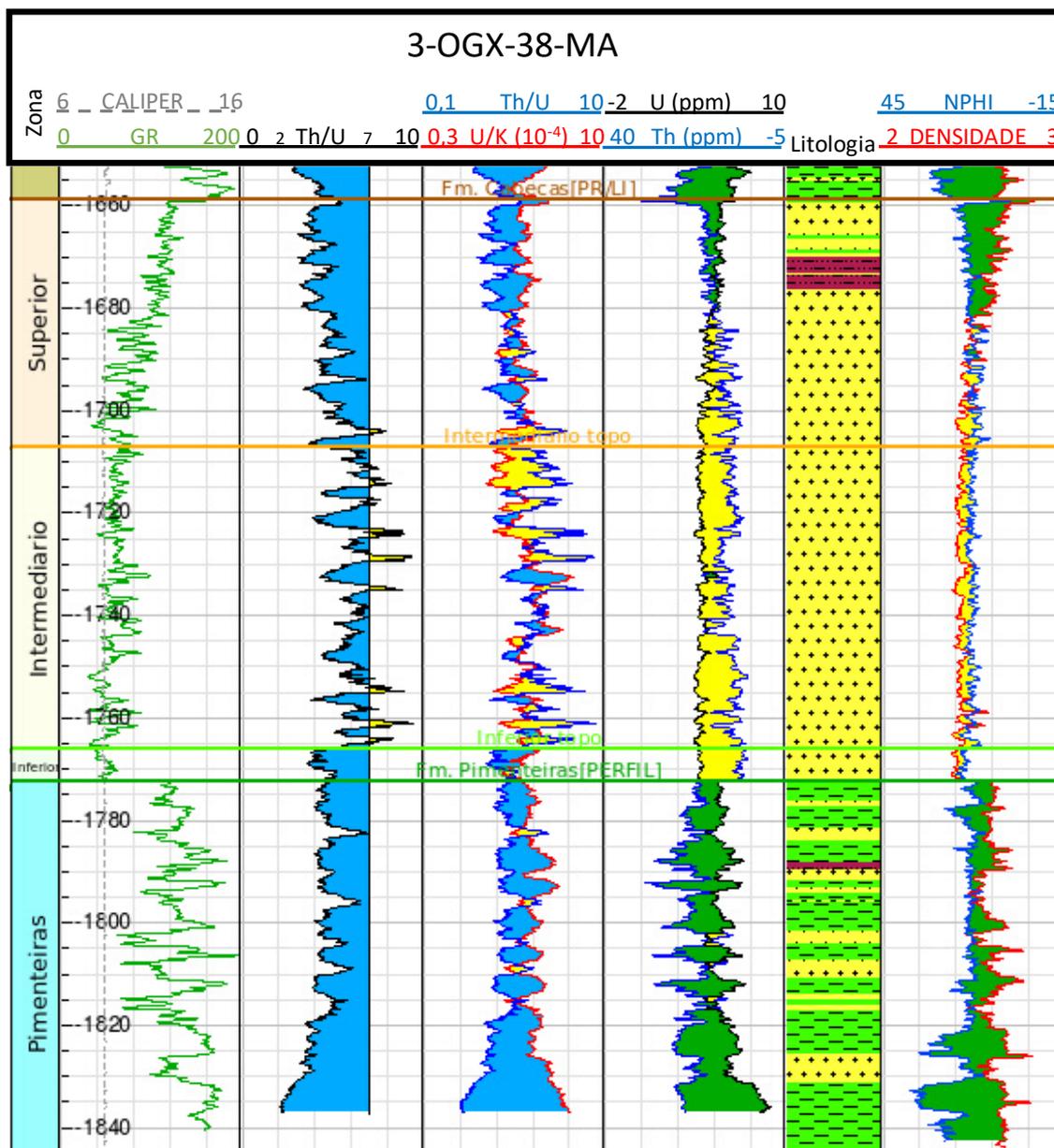


Figura 33 Poço 3-OGX-38-MA com elevação em cota, com os perfis elétricos GR (raios gama), CALIPER (calibre), U e Th, além das razões calculadas Th/U e U/K, NPHI (nêutrons) e densidade. Divisão da Formação Cabeças, o intervalo intermediário, entre os marcadores intermediário topo (linha laranja) e inferior topo (linha verde), apresenta a razão Th/U mais elevado que nos intervalos inferior e superior. Este intervalo com maiores valores da razão Th/U é destacado em amarelo no cruzamento com o perfil da razão U/K.

Foram gerados gráficos *crossplots* dos valores de tório, (em ppm) versus potássio (em percentual), comparando o comportamento dos pontos de acordo com o método de interpretação de dados da Schlumberger (2013) apresentado na Figura 6, que permite a interpretação de minerais. Na Figura 34 foram plotados os poços onde a gamaespectrometria foi adquirida em parfilagem a

poço aberto, já na Figura 35 os poços onde a gamaespectrometria foi adquirida em laboratório.

Minerais pesados são de origem terrígena, já os minerais de argila são fortemente influenciados pelo ambiente sedimentar e a diagênese, estando amplamente relacionados ao conteúdo variável de isótopos radioativos, principalmente potássio e tório (Weaver & Pollard, 1973, *apud* Klaja & Dudek, 2016). A presença de caulinita é identificada à medida que ocorre um aumento na razão Th/K, também, é inferida a presença de esmectita quando aumenta a quantidade de potássio, reduzindo assim a razão Th/K (Hillel, 2008).

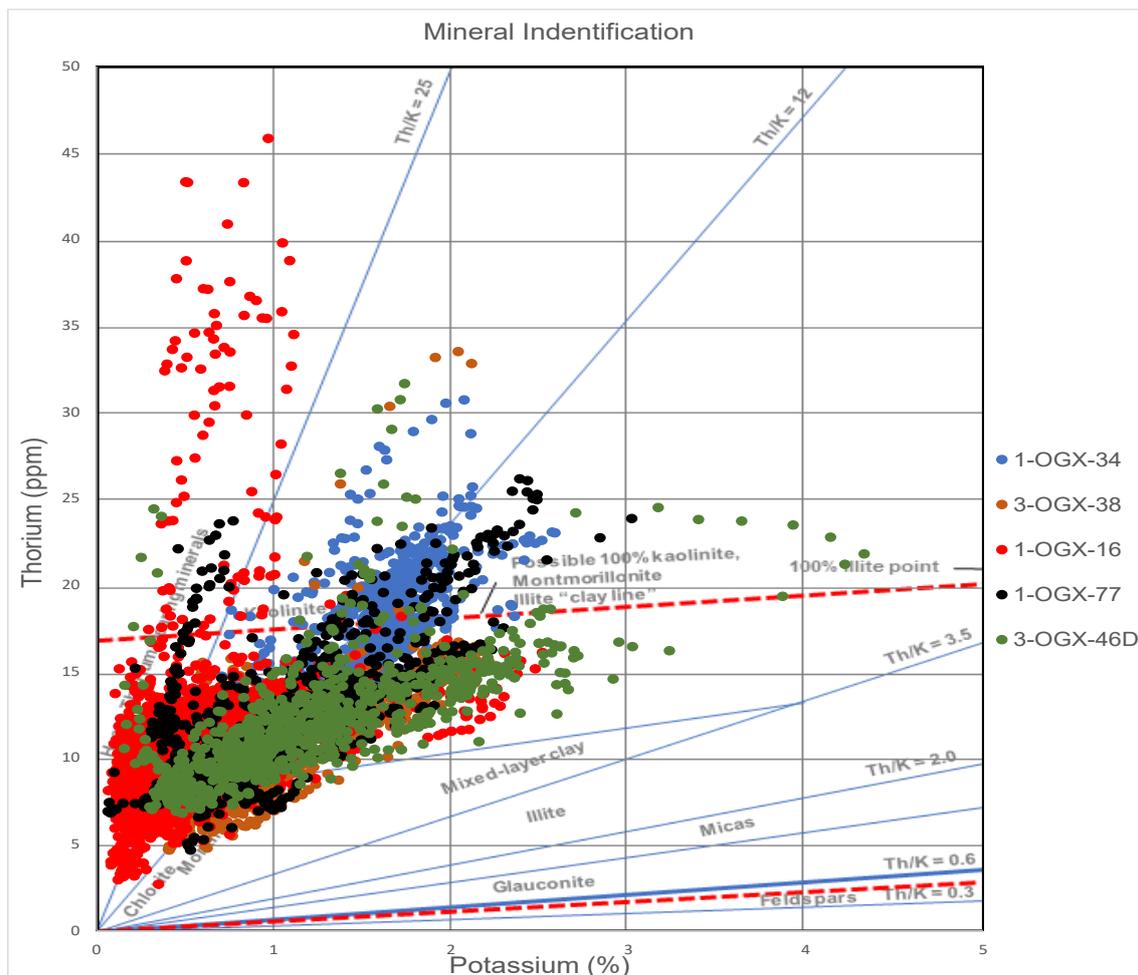


Figura 34 Gráfico *crossplot* dos valores de tório, em ppm versus potássio em percentual, comparando o comportamento dos pontos de acordo com o método de interpretação de dados da Schlumberger, (2013), para todo o intervalo da Fm. Cabeças dos poços 1-OGX-34-MA (azul), 3-OGX-38-MA (laranja), 1-OGX-16-MA (vermelho), 1-OGX-77-MA (preto) e 3-OGX-46D-MA (verde) adquiridos em perfisagens a poço aberto.

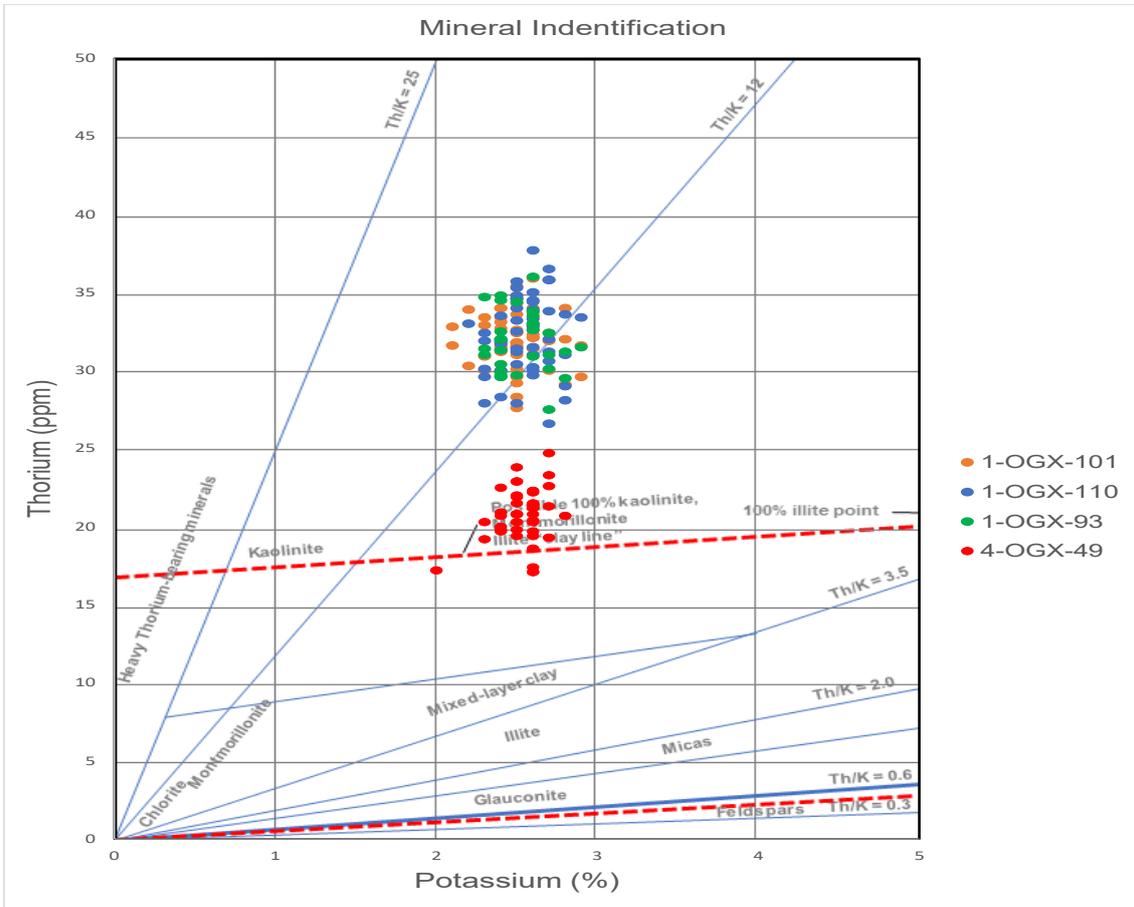


Figura 35 Gráfico *crossplot* dos valores de tório, em ppm versus potássio em percentual, comparando o comportamento dos pontos de acordo com o método de interpretação de dados da Schlumberger (2013), para todo o intervalo da Fm. Cabeças dos poços 1-OGX-101-MA (laranja), 1-OGX-110-MA (azul), 1-OGX-93-MA (verde) e 4-OGX-49-MA (vermelho) adquiridos em laboratório.

8. Discussões:

Para realizar correlações entre poços com diferentes origens de dados gamaespectrais, a utilização de curvas de relação entre Th/U, Th/K e U/K permitem, uma melhor visualização entre as curvas de laboratório e as adquiridas nas operações de perfilagem a poço aberto, pois a relação entre curvas elimina diferenças nas escalas de leitura, assim como a interferência por radiações do *background*.

Analisando os perfis de razão Th/U, U/K e de raios gama total, dividiu-se a Fm. Cabeças em três intervalos:

O intervalo inferior, localizado imediatamente superior à Fm. Pimenteiras, apresenta a mediana dos valores de raios gama total mais altos, quando comparado com o intervalo intermediário. Também se identificou baixa razão Th/U, menor que sete, o que caracteriza um ambiente marinho raso, com menos aporte continental que o intervalo intermediário. Estes resultados corroboram com a descrição apresentada por Caputo (1984) para a base desta formação, onde no Membro Passagem são descritos arenitos médios, micáceos, esbranquiçados, com siltitos intercalados e conglomerados, na sua parte inferior (Figura 32, Figura 34 e Figura 35).

O intervalo intermediário apresenta menores valores medianos de raios gama total, quando comparado aos outros intervalos. Neste intervalo também ocorrem os maiores valores medianos da razão Th/U, muitos valores maiores que sete, o que caracteriza que o influxo continental foi bem maior que nos outros intervalos, talvez grandes ingressões de material continental devidas ao derretimento de camadas de gelo. Caputo (1984) apresentou que na parte superior do Membro Passagem a litologia é similar ao Membro Oeiras, arenitos maciços, de granulação média e menos micáceos, porém apresenta alguns níveis conglomeráticos (Figura 33, Figura 34 e Figura 35).

Neste trabalho não foi possível determinar os limites dos Membros Passagem e Oeiras, utilizou-se apenas sua descrição litológica em posição aproximada.

O intervalo superior apresenta o perfil de raios gama com aumento para o topo, ao mesmo tempo foi descrito como depósitos fortemente laminados por influência de marés, estuário com intervalos argilosos e bioturbados, por Miranda *et al.* 2018. Ocorre uma redução na razão Th/U em relação ao intervalo intermediário e, em alguns poços, a mediana dos valores de total GR é mais elevado que no intervalo intermediário. Provavelmente este ambiente com influência de marés e estuários já não era atingido pelas inundações catastróficas citadas por Della Fávera (2001), mas ainda ocorriam diamictitos e feições de origem glacial nesta parte superior da formação conforme descrição apresentada por Caputo (1984) (Figura 33, Figura 34 e Figura 35) .

Utilizando as medianas dos valores de total GR e da razão Th/U por intervalo, apresentadas nas tabelas do ANEXO 1, construiu-se dois gráficos de

histograma. Um para total GR, onde é possível identificar maiores valores para os intervalos inferior e superior (Figura 36/Figura 33) e outro para razão Th/U, onde se verifica que o intervalo intermediário ocorre mais elevado que os outros dois (Figura 37).

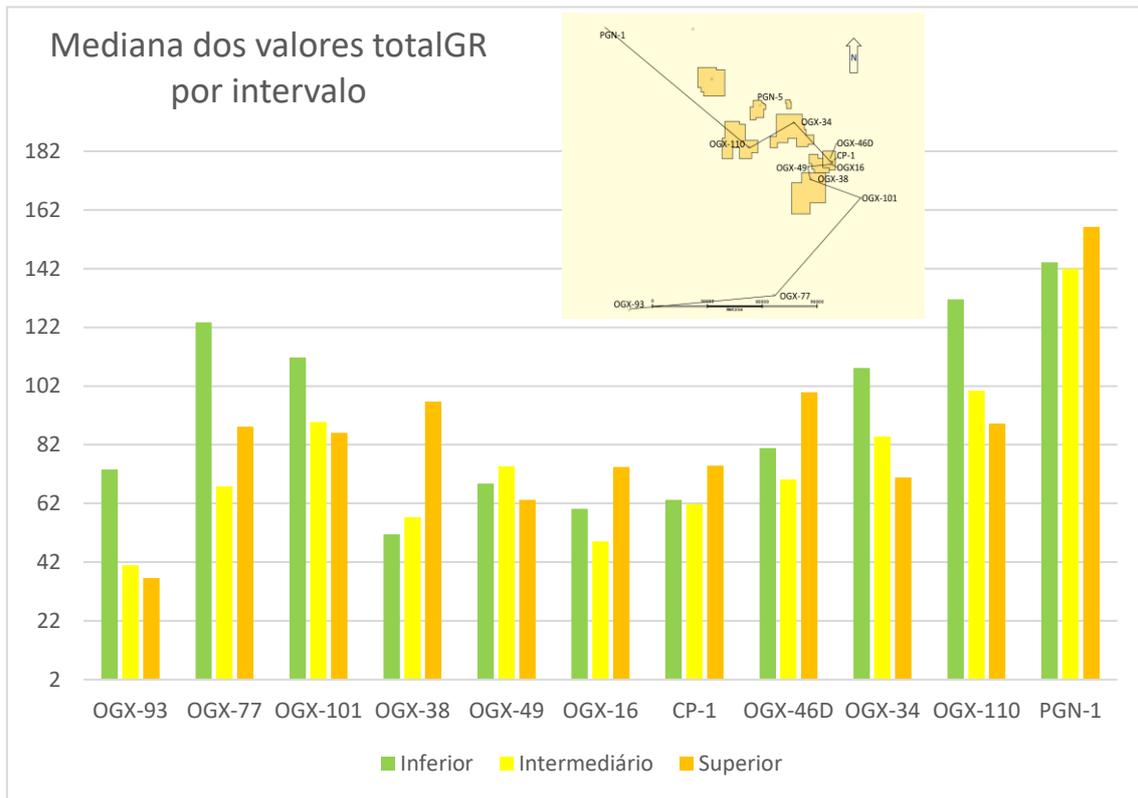


Figura 36 Gráfico de histograma da Mediana dos valores de totalGR por intervalo. Onde o intervalo inferior apresenta valores mais elevados que o intervalo intermediário.

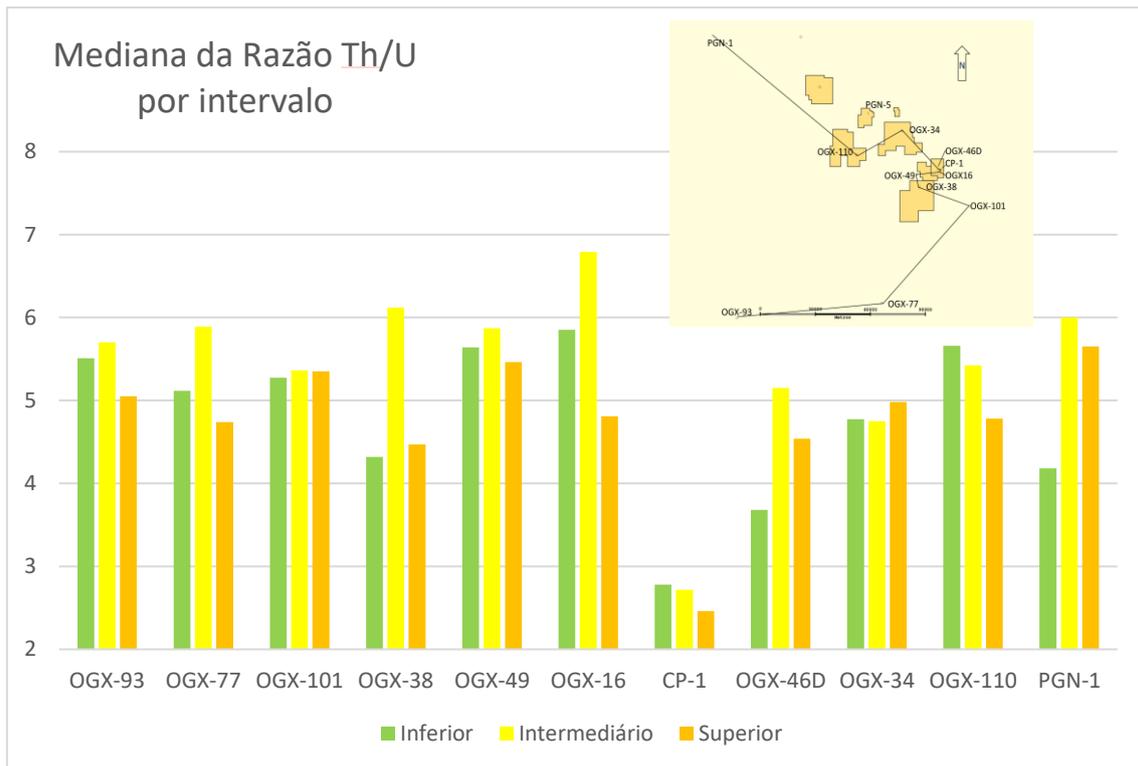


Figura 37 Gráfico de histograma da mediana da Razão Th/U por intervalo. Onde o intervalo intermediário em geral apresenta valores mais elevados que os intervalos inferior e superior, o que denota um maior influxos de sedimentos continentais.

Identificou-se, influxos continentais quando intervalos apresentam uma baixa razão U/K e uma alta razão Th/U, conseqüentemente um aumento nas concentrações de tório frente às concentrações de urânio. (Figura 38 e Figura 39)

Este tipo de análise pode ser feita em poços com a gamaespectrometria realizada em laboratório, como na Figura 38, ou em campo, nas campanhas de perfilagem a cabo como demonstrado na Figura 39.

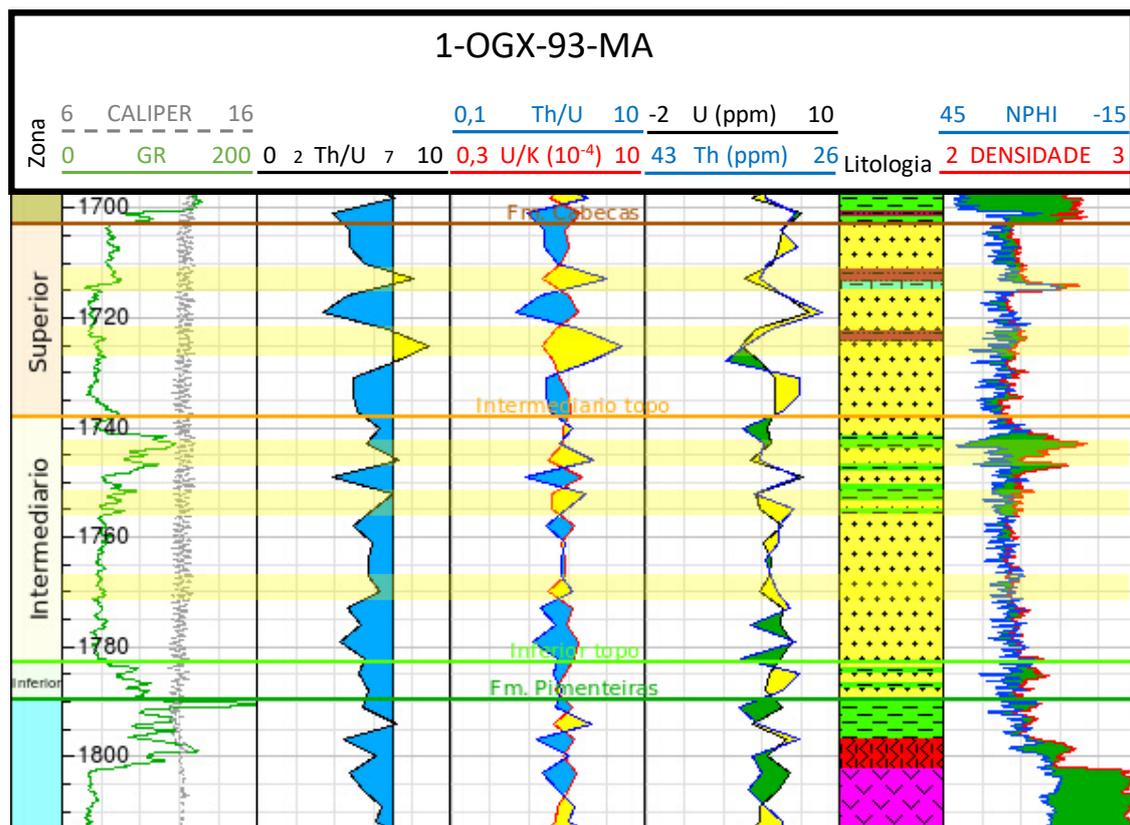


Figura 38 Poço 1-OGX-93-MA em cota, com os três intervalos identificados na Formação Cabeças. Observar que no intervalo superior a razão Th/U cai enquanto a razão U/K aumenta, devido à queda nos valores de tório e aumento de urânio. Nos intervalos destacados em amarelo observamos aumento na razão Th/U e redução na U/K, interpretando, assim, aportes continentais possivelmente devido ao derretimento de camadas de gelo. Este poço teve a gamaespectrometria levantada no laboratório.

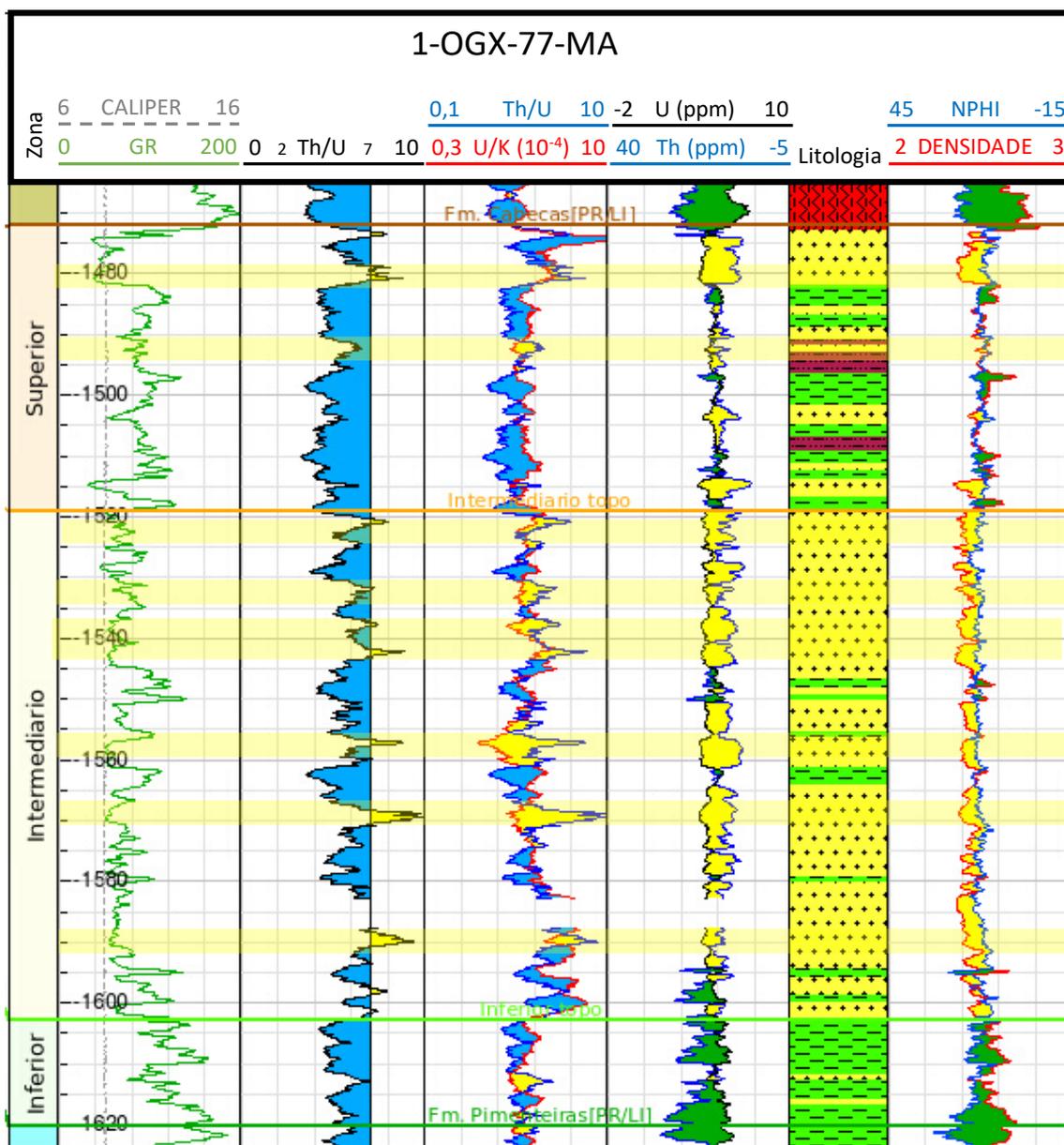


Figura 39 Poço 1-OGX-77-MA em cota, com os três intervalos identificados na Formação Cabeças. Observar que no intervalo superior a razão Th/U cai enquanto a razão U/K aumenta, devido à queda nos valores de tório e aumento de urânio. Nos intervalos destacados em amarelo observamos aumento na razão Th/U e redução na U/K, interpretando, assim, aportes continentais, possivelmente devido ao derretimento de camadas de gelo. Este poço teve a gamaespectrometria levantada na campanha de perfilagem.

Analisando os gráficos *crossplots* dos valores tório x potássio e comparando com o comportamento dos minerais, de acordo com o método de interpretação de dados da Schlumberger (2013) (Figura 6), observou-se que nos poços onde a gamaespectrometria foi adquirida nas perfilagens a poço aberto, os pontos se concentram nas áreas definidas como minerais pesados, caulinita e montmorilonita, não ocorrendo pontos na zona da illita (Figura 34). Como o

aumento do soterramento contribui para a transformação de minerais de argila do grupo da montmorilonita em illita (Dunoyer de Segonzac, 1969; *apud* Hassan *et al.*, 1976), e o soterramento atual da Formação Cabeças na área de estudo varia de 1650 a 2200m, interpretou-se que este intervalo não foi submetido a um soterramento suficiente para esta transformação.

Perry e Hower (1970) demonstraram que a proporção de caulinita, illita discreta e clorita começa a aumentar a 2800 m (9200 pés) e domina completamente as amostras em 3426 m (11240 pés), além disso, este aumento não respeita as idades geológicas ou os limites de formação sedimentar. O tório não sofre nenhuma alteração com o soterramento, porém o potássio aumenta progressivamente devido a proporções crescentes da camada de illita, assim a proporção Th/K diminui sistematicamente com a profundidade.

Os pontos que foram plotados no campo de minerais pesados foram interpretados como de origem terrígena, e a grande quantidade desses minerais interpreta-se como indicativa de um ambiente proximal ou com maior influxo de sedimentos líticos. Os pontos com maiores valores de tório identificados neste trabalho foram no poço 1-OGX-16-MA. Na Figura 40 observa-se que os pontos com mais de 25 ppm de tório deste poço são provenientes dos intervalos Inferior e Superior, e das litologias siltito, metassiltito e poucos pontos de arenito, conforme ocorrência de tório apresentado na Tabela 3, minerais pesados fração de areia e silte. Estes intervalos, tanto o superior como o inferior apresentam frações sedimentares mais finas que o intermediário. Observou-se que estes siltitos e metassiltitos com grandes quantidades de minerais pesados não ocorrem como anomalias de densidade na rocha.

Na Figura 41 observa-se que os prováveis minerais pesados com mais de 25 ppm de tório não são os que apresentam a razão Th/U maior que sete.

No gráfico *crossplot* apresentado na Figura 35 foram plotados os dados de tório e potássio dos poços 1-OGX-49-MA, 1-OGX-93-MA, 1-OGX-101-MA e 1-OGX-110-MA, nos quais a gamaespectrometria foi adquirida em laboratório. Neste caso não foi possível realizar uma conclusão sobre os tipos de minerais. A pouca quantidade de dados, além da grande abrangência da amostra de calha,

que representa a média de 3 metros de investigação em apenas um ponto, impedem uma avaliação apurada como aquela obtida dos perfis corridos em poço aberto. Os dados do poço 4-OGX-49-MA apresentam valores de tório menores que os dos outros poços, onde a gamaespectrometria foi medida em laboratório. A aquisição gamaespectral deste poço foi feita em outra etapa da pesquisa, por outro gamaespectrometro modelo RS-230, que provavelmente apresenta uma calibração diferente do utilizado nos outros poços.

Os valores de tório obtidos nas análises de laboratório foram mais elevados que os obtidos em perfilagem em poço aberto, deslocando os pontos para uma área muito alta, fora do ábaco proposto pela Schlumberger (2013) (Figura 6), onde poucos pontos dos dados obtidos em perfilagem a poço aberto atingiram. Na Figura 42, o retângulo vermelho identifica a área onde as amostras de laboratório foram plotadas, no gráfico à esquerda, e compara a mesma área no gráfico com os valores obtidos em perfis a poço aberto, à direita. Os valores de tório obtidos no poço 4-OGX-49-MA coincidem com os valores obtidos nos poços onde a aquisição se deu nas campanhas de perfilagem.

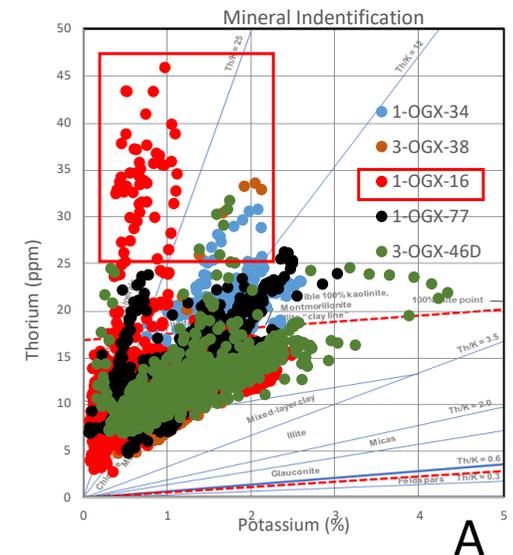
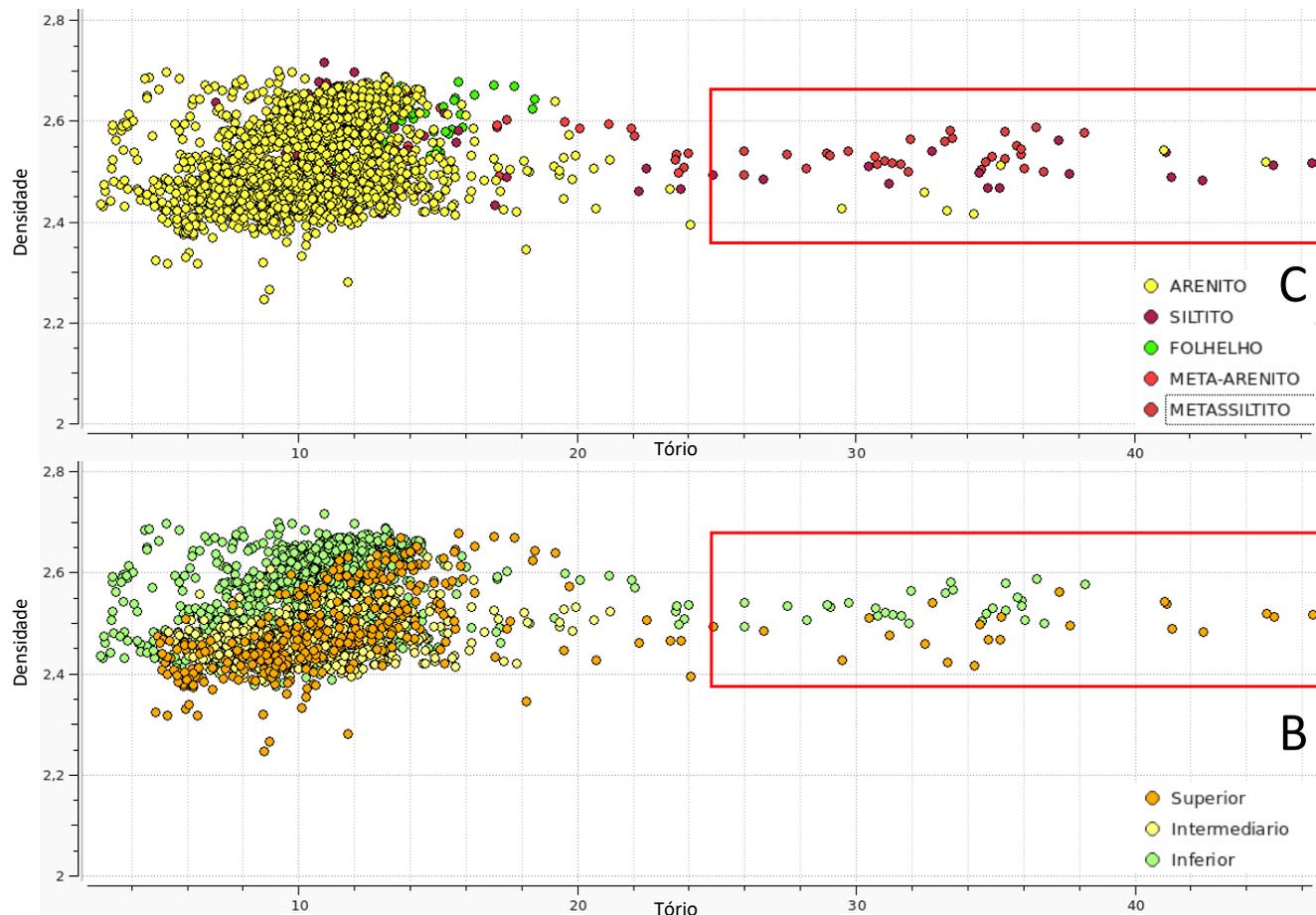


Figura 40 A) Os pontos vermelhos (poço 1-OGX-16-MA) com valores de tório superiores a 25 ppm, identificados pelo retângulo vermelho, são provenientes dos intervalos Inferior e Superior (B), e das litologias siltito, metassiltito e poucos pontos de arenito (C), minerais pesados, onde concentra-se o tório, ocorrem em fração de areia e silte. Observe que estes siltitos e metassiltitos com grandes quantidades de minerais pesados não ocorrem como anomalias de densidade na rocha.

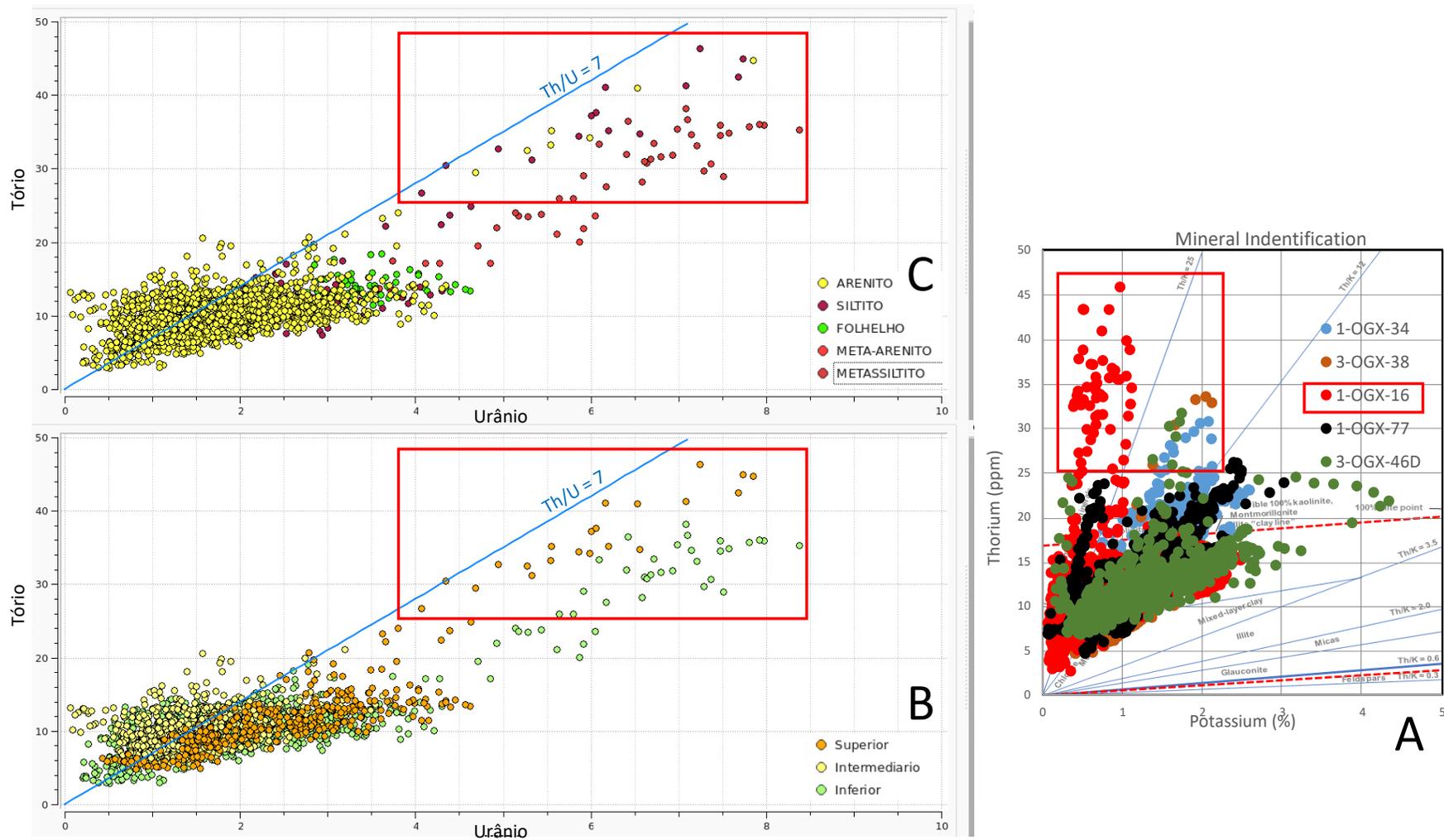


Figura 41 A) Os pontos vermelhos (poço 1-OGX-16-MA) com valores de tório superiores a 25 ppm, identificados pelo retângulo vermelho, são provenientes dos intervalos Inferior e Superior (B), e das litologias siltito, metassiltito e poucos pontos de arenito (C), minerais pesados, onde concentra-se o tório, ocorrem em fração de areia e silte. Observa-se que os prováveis minerais pesados com mais de 25 ppm de tório não são os que apresentam a razão Th/U maior que sete.

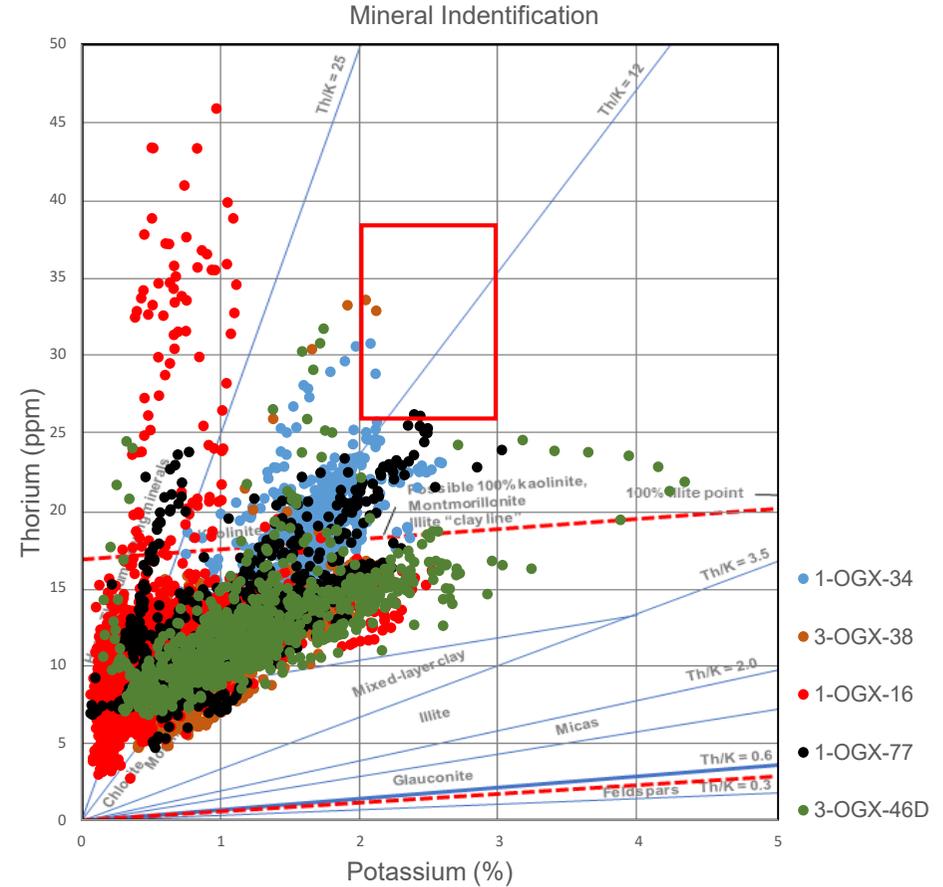
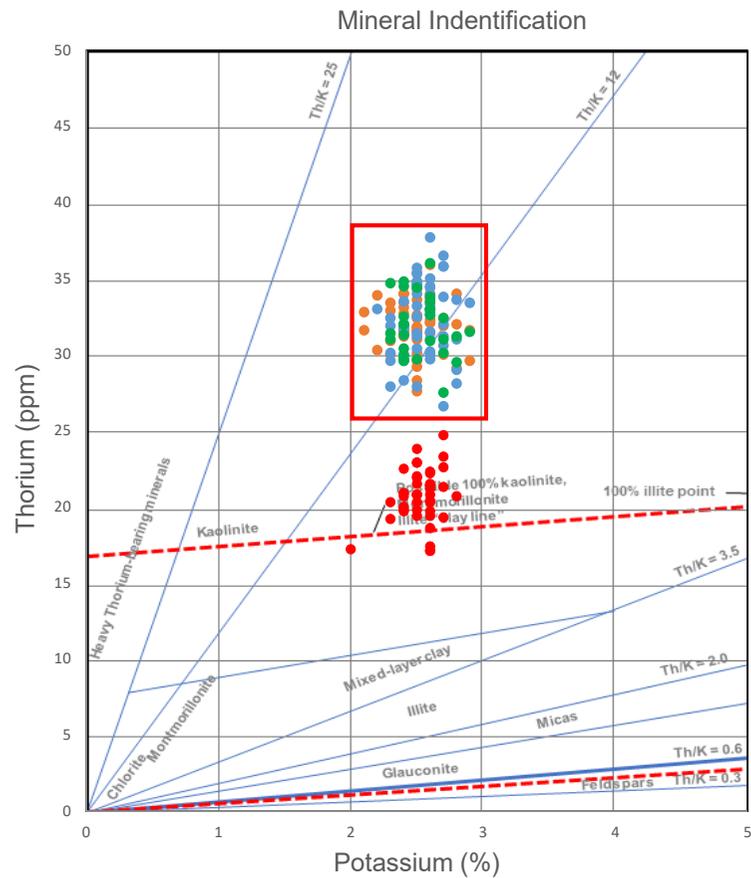


Figura 42 Comparação dos gráficos de Th x K. À esquerda, poços cuja gamaespectrometria foi adquirida em laboratório, à direita adquirida em perfilagem a poço aberto. O retângulo vermelho identifica a área onde as amostras de laboratório foram plotadas, no gráfico à esquerda, e compara a mesma área no gráfico das amostras adquiridas em perfis de poço aberto, à direita. Algumas amostras adquiridas em poço aberto também possuem valores similares às de laboratório, no entanto a grande maioria apresenta valores menores.

9. Conclusões:

A realização de gamaespectrometria em amostras de calha se mostrou eficiente para a realização de correlações entre poços, mesmo comparando com poços onde o registro gamaespectrométrico foi obtido através de ferramenta corrida na campanha de perfilagem a poço aberto. Com isto, foi possível distinguir fácies mais proximais, onde a razão $Th/U > 7$, o que pode contribuir para reconstruções paleoambientais.

Para realizar correlações entre poços com diferentes origens de dados gamaespectrais, a utilização de curvas de relação entre Th/U e U/K permitiram, uma melhor visualização entre as curvas de laboratório e as adquiridas nas operações de perfilagem a poço aberto, pois a relação entre curvas eliminou diferenças nas escalas de leitura, assim como a interferência por radiações do *background*.

A razão Th/K , apresentada nos gráficos *crossplot*, usados com o intuito de identificar tipos de argila presentes nas amostras, não se apresentou eficiente para medidas em laboratório nas amostras de calha como é para os valores medidos em perfilagem a poço aberto. Acredita-se que isto se deva a resolução das medidas, pois as amostras de calha representam um intervalo muito grande, 3 metros, para este tipo de avaliação, enquanto as medidas realizadas em poço possuem intervalo de 0,15 m.

Analisando as tendências das curvas da razão Th/U , U/K e de raios gama total, a Formação Cabeças pôde ser dividida em três estágios deposicionais. No estágio inferior a razão Th/U é baixa, em geral poucos valores maiores que sete, mediana de 5,11, e mediana dos raios gama 80,88, os mais altos dos três intervalos. No intervalo intermediário a relação Th/U é mais alta, mediana de 5,70, ou seja, o influxo de tório é mais alto, maior proximidade com a área fonte, a mediana dos valores de raios gama total são os mais baixos desta Formação, 70,17 gAPI. O terceiro intervalo, superior, apresenta baixa razão Th/U , mediana de 4,81, já o perfil de raios gama mostra aumento para o topo e mediana de 86,03 gAPI. Este tipo de análise mostra que, a ferramenta de

gamaespectrometria, tanto em perfilagem a cabo como em laboratório auxilia no detalhamento estratigráfico.

Para Della Fávera (2001), a Formação Cabeças representaria a região de frente deltaica de um sistema flúvio-deltaico dominado por inundações catastróficas, cujo prodelta seria a Formação Pimenteira. Interpretou-se como os aportes sedimentares resultantes dessas inundações catastróficas os intervalos, onde a razão Th/U é maior que sete, condição oxidante, típica de ambiente continental, solos intemperizados e ambiente marinho raso. O intervalo intermediário, por apresentar maior frequência dessas inundações, depositou-se em ambiente mais proximal que os intervalos Inferior e Superior. Fluxos possantes atingem regiões mais distais na bacia, assim ocorreram os influxos com valores mais altos da razão Th/U nos intervalos inferior e superior da Formação Cabeças.

O fluxo de trabalho realizado em laboratório mostrou que medições de gamaespectrometria em amostras de calha, em laboratório ou durante a perfuração, é uma ferramenta poderosa, podendo ser utilizada principalmente em poços onde as curvas de raios gama espectral não foram registradas em perfilagens a poço aberto. Este trabalho propõe uma metodologia de trabalho eficaz, utilizando uma ferramenta de relativo baixo custo operacional, a fim de realizar interpretações estratigráficas refinadas, favorecendo correlações entre poços e zoneamentos estratigráfico.

10. Bibliografia

ABELHA, M.; PETERSOHN, E.; BASTOS, G.; ARAUJO, D. New insights into the Parnaíba Basin: results of investments by the Brazilian National Petroleum Agency. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Avenida Rio Branco, 65 – Centro, Rio de Janeiro 20090-004, Brazil. <http://sp.lyellcollection.org/> by guest on July 6, 2018

<https://agilescientific.com/blog/2013/2/26/interpreting-spectral-gamma-ray-logs.html> em 2019-08-05

ALMEIDA, F. F. M.; CARNEIRO, C. D. R. Inundações marinhas fanerozóicas no Brasil e recursos minerais associados. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; BRITO-NEVES, B. B. (Org.). Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo: Beca, 2004. p.43-58.

ARAÚJO, D. B.; FERREIRA, A. L., Bacia do Parnaíba Sumário Geológico e Setores em Oferta, Superintendência de Definição de Blocos-SDB, ANP, 2017.

BAGNI, F. L., Correlação estratigráfica e considerações paleogeográficas da transgressão marinha aptiana nas bacias da margem equatorial brasileira Dissertação (mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Geologia. 2010. 103f. : il.

CAPUTO, M. V. Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of Northern Basins of Brazil. 1984. 586 p. Thesis (Doctorate) - University of Califórnia, Santa Bárbara, 1984

CASTRO, D.L.; FUCK, R.A.; PHILLIPS, J.D.; VIDOTTI, R.M.; BEZERRA, F.H.R; DANTAS, E.L. 2014 Crustal structure beneath the Paleozoic Parnaíba Basin revealed by airborne gravity and magnetic data, Brazil, Tectonophysics 614, 128-145.

CORDANI U, G.; PIMENTEL M. M.; ARAÚJO C. E. G.; FUCK R. A. 2013. The significance of the Transbrasiliiano-Kandi tectonic corridor for the amalgamation of West Gondwana, Braz. J. Geol., São Paulo, 43(3): 583-597, September 2013 P. 586-589, 593

DAVIES, S.J.; ELLIOTT, T. Spectral gamma ray characterization of high resolution sequence stratigraphy: examples from Upper Carboniferous fluvio-deltaic systems, County Clare, Ireland. In: Howell, J.A.; Aitken, J.F. (eds) High resolution 66 sequence stratigraphy: Innovations and applications. Geological Society of London, Special Publications, v.104, p. 25-35, 1996.

DELLA FAVERA, J.C., Tempestitos da bacia do Parnaíba: um ensaio holístico. 1990. 243p Tese (Doutorado em Geologia), IG-UFRGS, Porto Alegre.

DELLA FÁVERA, J.C. *Fundamentos de estratigrafia moderna*. Rio de Janeiro: EdUERJ, 2001. 264p.

ELLIS, Darwin & SINGER, Julian. (2007). Gamma Ray Devices, Capítulo 11 pag.267. 10.1007/978-1-4020-4602-5_11. Gamma Ray Devices full text12

<http://www.eneva.com.br/nossos-negocios/exploracao-e-producao/> em 24/07/2020.

<https://eneva.com.br/nossos-negocios/geracao-de-energia/> em 24/07/2020

FERNANDES, R.F. 2011, Estudo da evolução termomecânica da Bacia do Parnaíba/ Regina Freitas Fernandes. – Rio de Janeiro:UFRJ/COPPE, 2011.

FERRAZ, N. C., Análise estratigráfica da sequência Mesodevoniana-Eocarbonífera da Bacia do Parnaíba, Nordeste do Brasil, Dissertação de Mestrado UFRN-Natal, 2015

FERREIRA, A.L., Bacia do Parnaíba, Seminário Técnico, Superintendência de Definição de Blocos, Rodada 15 Concessões de Petróleo e Gás, ANP, 2018.

FERTL, W. H., Gamma Ray Spectral Data Assists In Complex Formation Evaluation, Trans., SPWLA Sixth European Formation Evaluation Symposium, London, March 1979; also Dresser Atlas publication No. 3335, 61.

FERTL, W. H., & RIEKE, H. H. (1980, November 1). Gamma Ray Spectral Evaluation Techniques Identify Fractured Shale Reservoirs and Source-Rock Characteristics. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/8454-PA.

GÓES, A. M. O.; FEIJÓ, F. J. Bacia do Parnaíba. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 57-68, jan./mar. 1994.

GOULART, J. P. M., Caracterização de chaminés de gás nas bacias do Parnaíba, Paraná e Tacutu: uma nova ferramenta exploratória / José Paulo de Melo Goulart. - 2019. 102f.: il.

HASSAN, M., HOSSIN, A., & COMBAZ, A. (1976, January 1). Fundamentals Of The Differential Gamma Ray Log - Interpretation Technique -. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts.

HILLEL, D. Soil fertility and plant nutrition. Soil in the Environment, p. 151-162. 2008. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-348536-6.50016-2>.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY; INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Radioelement mapping. International Atomic Energy Agency (IAEA), 2010.

INTERNATIONAL COMMISSION ON STRATIGRAPHY; International Chronostratigraphic Chart v2019/05 www.stratigraphy.org, 2019.

KLAJA, J.; DUDEK, L., 2016, Geological interpretation of spectral gamma ray (SGR) logging in selected boreholes. Nafta-Gaz. 72. 3-14. 10.18668/NG2016.01.01.

MAGOON, L.B., DOW, W.G., 1994, "The petroleum system". AAPG Memoir n.60, p. 3-24.

MARETT, G.; CHEVALIER, P.; SOUHAITE, P.; SUAUI, J., 1976, Shaly Sand Evaluation Using Gamma Ray Spectrometry, Applied to the North Sea Jurassic, SPWLA 17th Annual Logging Symposium.

MARZOLI, A., RENNE, P.R. & PICCIRILLO, E.M., 2000. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of Mesozoic continental basaltic magmatism, and the opening of the central, equatorial and southern Atlantic ocean. Paper presented at the Penrose Conference 2000: Volcanic Rifted Margins, 27–31 March 2000, Royal Holloway University, London, Abstracts, p.54.

MIRANDA, F. S.; VETORAZZI, A.L.S.; CUNHA, P. R. C.; ARAGÃO, F. B.; MICHELON, D; CALDEIRA, J. L.; PORSCHE, E.; MARTINS, C.; RIBEIRO, R. B.; VILELA, A. F.; CORRÊA, J. R.; SILVEIRA, L. S.; ANDREOLA, K.; ENEVA S.A. Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2018, Atypical igneous-sedimentary petroleum systems of the Parnaíba Basin, Brazil: seismic, well logs and cores. <http://sp.lyellcollection.org/> by guest on September 4, 2018

NOBRE, J. A., Interpretação paleodeposicional das formações Poti e Cabeças com base em dados gamaespectrais, obtidos em amostras de calha de poços da área do Parque dos Gaviões, Bacia do Parnaíba. Universidade Federal Fluminense, Niterói-RJ, 2019.

OLIVEIRA, D. C.; MOHRIAK, W. U. Jaibaras Trough: an important element in the early tectonic evolution of the Parnaíba interior sag Basin, Northeastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, Guildford, v. 20, p. 351-383. 2003.

PERRY, E. A. and HOWER, J. (1970) Burial diagenesis in Gulf Coast pelitic sediments: *Clays & Clay Minerals* 19, 165-177.

PONCIANO, L.C.M.O., Tafofácies da Formação Cabeças, Devoniano da Bacia do Parnaíba, Piauí. 2009. 88p. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Programa de Pós-graduação em Geologia, IGEO-UFRJ, Rio de Janeiro.

PRAXEDES, I.F. Lineamento Transbrasiliano, Contribuição Aerogeofísica, Tectônica e Geocronológica no Setor Nordeste da Faixa Brasília, Dissertação de Mestrado N338 UNB-Brasília, 2015

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

RS-125/230 User Manual, Revision 1.05, December 2015.

SANTOS, M. E. C. M.; CARVALHO, M. S. S., Paleontologia das bacias do Parnaíba, Grajaú e São Luís / Maria Eugênia de Carvalho Marchesini Santos [e] Marise Sardenberg Salgado de Carvalho. – Rio de Janeiro: CPRM Serviço Geológico do Brasil – DGM/DIPALE - 2009. 215 p.

SANTOS, V. H.; Seqüências Siluro-Devoniana e Eocarbonífera da Bacia do Parnaíba, Brasil, como análogos para a exploração de hidrocarbonetos. Tese (doutorado em geociências), Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Geociências, 2005.

SCHLUMBERGER, NGS* Natural Gamma Ray Spectrometry, Tool Mineral Identification—Open Hole, 2013.

SERRA, O. *et al.* Theory, Interpretation, And Practical Applicatons Of Natural Gamma Ray Spectroscopy. In: SPWLA 21st Annual Logging Symposium. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, 1980.

SERRA, O. Fundamentals of Well-log Interpretation V. 1-the Acquisition of Data. Developments in Petroleum Science A, v. 15, Pages 113-134, 1984.

TAUHATA, L., SALATI, I. P. A., DI PRINZIO, R., DI PRINZIO, M. A. R. R. Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos - 9ª revisão novembro/2013 - Rio de Janeiro - IRD/CNEN. 345p.

TROSDTORF, I; MORAIS NETO, J. M.; SANTOS, S. F.; PORTELA FILHO, C. V.; DALL OGLIO, T. A.; GALVES, A. C. M.; SILVA, A. M., Phanerozoic magmatism in the Parnaíba Basin: characterization of igneous bodies (well logs and 2D seismic sections), geometry, distribution and sill emplacement patterns. in Geological Society, London, Special Publications, 472, 321-340, 16 May 2018, <https://doi.org/10.1144/SP472.10>

VAZ P.T., REZENDE V.G.A.M., WANDERLEY FILHO J.R., TRAVASSOS W.A.S.. 2007. Bacia do Parnaíba. Rio de Janeiro, Boletim de Geociências da Petrobras, 15(2):253-263.

VETORAZZI, A.L.S. 2012. Caracterização Sedimentológica dos Arenitos da Formação Cabeças (Devoniano) Na Borda Leste da Bacia do Parnaíba. Dissertação (Mestrado em Geologia) UFRJ/IGeo Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

XU, L.; HUISZON, C.; WANG, J.; ADOLPH, B.; YI, J.; CAVIN, D.; LAUGHLIN, G.; TOLLEFSEN, E.; SCHLUMBERGER, 2015, Spectral Gamma Ray

Measurement While Drilling, SPWLA 56 Annual Logging Symposium, July 18-22, 2015.

ANEXO 1

2-CP-1-MA Fm. Cabeças								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	66,37454		0,221347	3,486996	9,380826	2,796686	-4,7659	-0,68612
Mediana	63,565		0,18	3,33	9,185	2,68	32,63	11,68
Máximo	168,73		1,5	8,6	27,3	7,69	8885,1	3297,38
Mínimo	29,89		-0,4	1,25	2,72	1,28	-29163,4	-12786,5
Desvio Padrão	14,70245		0,2709	0,870488	2,19784	0,75946	1070,321	425,4248

2-CP-1-MA Fm. Cabeças Superior								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	77,75136		0,429717	4,109332	10,29938	2,662391	46,21779	17,56347
Mediana	74,82		0,35	4,03	9,67	2,46	24,22	10,2
Máximo	168,73		1,5	8,6	27,3	5,69	3287,4	760,84
Mínimo	29,89		-0,21	1,59	2,72	1,28	-670,76	-166,89
Desvio Padrão	22,71505		0,337187	1,327711	3,281551	0,896483	231,1712	64,5089

2-CP-1-MA Fm. Cabeças Intermediário								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	64,2441		0,228088	3,290507	9,168908	2,889337	-32,0944	-11,8723
Mediana	61,86		0,18	3,21	8,91	2,72	29,66	10,73
Máximo	104,84		1,43	6,26	16,82	7,69	6766,45	3297,38
Mínimo	38,45		-0,4	1,25	4,93	1,37	-29163,4	-12786,5
Desvio Padrão	12,11065		0,274482	0,709433	1,90694	0,797541	1373,626	572,9222

2-CP-1-MA Fm. Cabeças Inferior								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	63,81111		0,141576	3,406035	9,20847	2,778451	-3,66838	0,716017
Mediana	63,22		0,12	3,34	9,045	2,78	38,865	13,56
Máximo	108,26		1,12	6,27	16,87	5,26	8885,1	3132,91
Mínimo	42,95		-0,34	1,91	5,7	1,45	-22746,3	-7972,75
Desvio Padrão	10,05277		0,190053	0,639831	1,793877	0,662705	1003,569	372,9223

1-OGX-16-MA Fm. Cabeças								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	61,91484		0,552739	1,872784	10,62576	6,50098	23,987	3,933343
Mediana	57,57		0,01	1,65	10,08	5,91	18,11	3,16
Máximo	252,45		2	8,13	45,84	26,11	121,05	21,35
Mínimo	15,4		0	0,1	2,94	2,41	5,6	0,32
Desvio Padrão	26,49816		0,541109	1,020049	4,211296	2,851331	15,75508	2,566207

1-OGX-16-MA Fm. Cabeças Superior								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	79,43647		0,008981	2,580303	12,4322	5,068953	18,27501	3,474215
Mediana	74,44		0,01	2,37	10,82	4,81	11,66	2,6
Máximo	252,45		0,02	7,74	45,84	12,11	85,34	15,25
Mínimo	24,37		0	0,47	5,03	2,83	5,6	1,09
Desvio Padrão	38,62357		0,006548	1,271973	6,957613	1,415594	15,74686	2,473856

1-OGX-16-MA Fm. Cabeças Intermediário								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	53,29112		0,00329	1,476009	10,11681	7,780114	26,80255	3,786695
Mediana	49,12		0	1,41	9,74	6,79	22,38	3,14
Máximo	118,18		0,02	3,59	20,7	26,11	121,05	14,51
Mínimo	28,45		0	0,1	5,46	3,43	9,18	0,32
Desvio Padrão	14,03773		0,004732	0,581936	2,542264	3,761268	14,39768	2,170728

1-OGX-16-MA Fm. Cabeças Inferior								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	61,74624		0,005727	1,887328	10,44668	6,268411	24,0392	4,098183
Mediana	60,175		0,01	1,7	10,145	5,85	16,92	3,32
Máximo	216,07		0,01	8,13	37,15	20,28	101,72	21,35
Mínimo	15,4		0	0,21	2,94	2,41	8,87	0,59
Desvio Padrão	25,39608		0,004948	1,018438	3,857227	2,386259	15,97394	2,722456

1-OGX-34-MA Fm. Cabeças								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	87,92907		1,432015	3,265651	15,74882	4,965034	11,86852	2,415535
Mediana	88,715		0,01	3,27	15,645	4,84	11,3	2,35
Máximo	148,81		3	5,78	30,71	8,98	24,47	4,74
Mínimo	39,82		1	1,06	6,94	3,3	7,77	1,47
Desvio Padrão	22,38277		0,501404	1,010937	4,206618	0,83311	2,427603	0,444678

1-OGX-34-MA Fm. Cabeças Superior								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	73,86566		0,011301	2,647154	13,27038	5,202466	12,39561	2,40477
Mediana	70,89		0,01	2,59	12,74	4,98	11,78	2,35
Máximo	128,82		0,02	4,87	23,43	8,98	21,44	4,08
Mínimo	44,17		0,01	1,06	8,39	3,67	7,77	1,55
Desvio Padrão	16,64214		0,003368	0,776392	2,779577	0,9595	2,770332	0,452652

1-OGX-34-MA Fm. Cabeças Intermediário								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	82,18845		0,013495	3,019385	14,33252	4,894466	11,58757	2,401392
Mediana	84,75		0,01	2,98	14,73	4,75	10,66	2,31
Máximo	126,29		0,02	5,14	23,35	8,33	24,47	4,74
Mínimo	39,82		0,01	1,11	6,94	3,3	8,62	1,47
Desvio Padrão	20,13631		0,004776	0,919435	3,599176	0,86022	2,599795	0,510571

1-OGX-34-MA Fm. Cabeças Inferior								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	107,1277		1,808864	4,109418	19,48723	4,779224	11,57515	2,442022
Mediana	108,185		0,02	4,175	19,63	4,775	11,365	2,375
Máximo	148,81		3	5,78	30,71	7,09	17,52	3,69
Mínimo	51,22		1	2,25	11,31	3,41	8,67	1,69
Desvio Padrão	14,65897		0,414366	0,666672	3,150783	0,576466	1,702424	0,372547

3-OGX-38-MA Fm. Cabeças								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	72,14741		1,156417	2,133209	10,56731	5,369051	10,98409	2,068275
Mediana	63,7		0,01	1,8	9,93	5,23	9,5	1,97
Máximo	194,7		2	6,39	33,51	9,33	26,59	5,3
Mínimo	28,82		0	0,73	4,66	3,05	6,35	1,03
Desvio Padrão	26,23409		0,538602	1,011166	3,527183	1,272068	3,996828	0,61422

3-OGX-38-MA Fm. Cabeças Superior								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	92,01448		0,015298	2,916207	12,6521	4,545078	8,889969	1,983354
Mediana	96,71		0,02	3	12,88	4,47	8,3	1,96
Máximo	194,7		0,02	6,39	33,51	7,72	17,91	3,35
Mínimo	34,42		0	1,03	6,38	3,05	6,35	1,21
Desvio Padrão	26,36004		0,005304	1,027197	3,804823	0,877522	1,999342	0,367935

3-OGX-38-MA Fm. Cabeças Intermediário								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	57,97447		0,008663	1,550283	9,244422	6,146658	12,98961	2,155681
Mediana	57,37		0,01	1,47	8,94	6,12	12,17	2,02
Máximo	98,05		0,02	3,6	15,77	9,33	26,59	5,3
Mínimo	28,82		0	0,73	4,66	3,82	6,55	1,03
Desvio Padrão	12,7812		0,003482	0,458678	2,219006	1,092622	4,346709	0,765329

3-OGX-38-MA Fm. Cabeças Inferior								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	53,21651		0,01	1,602093	7,054186	4,401163	8,244651	1,89907
Mediana	51,45		0,01	1,48	6,33	4,32	7,69	1,89
Máximo	121,16		0,02	3,62	17,12	5,17	11,21	2,69
Mínimo	37,38		0	1,15	4,77	3,54	6,83	1,37
Desvio Padrão	18,15894		0,003086	0,4861	2,461383	0,487155	1,256568	0,367228

3-OGX-46D-MA Fm. Cabeças								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	83,30037		1,190813	2,578669	12,17452	4,978716	12,47577	2,4902
Mediana	80,25		0,01	2,48	11,67	4,79	10,79	2,14
Máximo	186,7		4	7,36	31,66	11,13	74,18	11,32
Mínimo	38,35		0	0,82	6,79	2,86	5,13	1,06
Desvio Padrão	27,19344		0,70132	0,94273	3,426185	1,111867	8,31642	1,342658

3-OGX-46D-MA Fm. Cabeças Superior								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	99,42436		0,015972	3,079083	13,97692	4,68275	12,26386	2,499194
Mediana	99,92		0,02	2,995	13,885	4,54	7,965	1,785
Máximo	186,7		0,04	7,36	31,66	7,66	74,18	11,32
Mínimo	44,47		0	1,05	7,37	3,23	5,13	1,06
Desvio Padrão	30,30658		0,008186	1,021676	4,060602	0,822278	12,13024	1,939271

3-OGX-46D-MA Fm. Cabeças Intermediário								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	70,09102		0,008643	2,084167	10,83788	5,421786	12,75517	2,369881
Mediana	70,175		0,01	2,1	10,77	5,15	11,55	2,21
Máximo	126,07		0,02	3,73	17,31	11,13	23,45	4,09
Mínimo	38,35		0	0,82	6,79	3,85	8,11	1,41
Desvio Padrão	16,60727		0,004007	0,562162	2,084898	1,15862	3,603911	0,525781

3-OGX-46D-MA Fm. Cabeças Inferior (trecho)								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	79,05549		0,010563	2,954789	10,92408	3,867183	11,94254	3,161972
Mediana	80,88		0,01	2,9	10,98	3,68	11,52	3,31
Máximo	107,11		0,02	4,84	14,04	5,35	16,54	4,25
Mínimo	44,14		0,01	1,33	7,08	2,86	8,29	1,87
Desvio Padrão	14,6019		0,002322	0,796252	1,692173	0,771877	2,177603	0,601737

1-OGX-49-MA Fm. Cabeças								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	72,30412	108,2837	2,527907	3,604651	20,69302	6,112149	8,200651	1,437394
Mediana	70,97	108,4	2,5	3,6	20,8	5,641026	8,269231	1,407407
Máximo	173,73	118,5	2,8	5,5	24,7	12,26316	9,52	2,75
Mínimo	32,59	98,9	2	1,9	17,1	3,127273	6,576923	0,703704
Desvio Padrão	18,6183	5,127142	0,138574	0,804142	1,715253	1,85968	0,697313	0,371442

1-OGX-49-MA Fm. Cabeças Superior								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	66,16293	107,6267	2,58	3,506667	20,44	6,253564	7,931876	1,361048
Mediana	63,23	107,1	2,6	3,7	20,8	5,461538	8,153846	1,423077
Máximo	130,57	116,3	2,7	5,1	24,7	10,73913	9,148148	2,04
Mínimo	32,59	98,9	2,4	2,2	17,1	4,078431	6,576923	0,814815
Desvio Padrão	19,31032	5,716826	0,086189	0,834494	1,933465	2,061	0,798527	0,329833

1-OGX-49-MA Fm. Cabeças Intermediário								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	77,01848	108,919	2,504762	3,661905	20,9	6,086558	8,357722	1,482481
Mediana	74,67	108,5	2,5	3,6	20,9	5,871795	8,347826	1,407407
Máximo	173,73	118,5	2,8	5,5	23,8	12,26316	9,52	2,75
Mínimo	45,01	99,5	2	1,9	17,1	3,127273	6,576923	0,703704
Desvio Padrão	18,21799	5,188027	0,171686	0,828539	1,781292	1,935477	0,629637	0,423519

1-OGX-49-MA Fm. Cabeças Inferior								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	70,81506	107,7857	2,485714	3,642857	20,61429	5,885889	8,305385	1,465733
Mediana	68,76	107,9	2,5	3,6	20,7	5,638889	8,25	1,384615
Máximo	99,22	112,7	2,6	4,7	22,5	7,5	9,375	1,88
Mínimo	55,46	100,5	2,4	2,8	19,4	4,12766	7,76	1,153846
Desvio Padrão	10,06309	3,905734	0,089974	0,759072	0,988987	1,3033	0,560939	0,302366

1-OGX-77-MA Fm. Cabeças								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	83,47511		1,063762	2,386249	12,66628	5,558247	14,05031	2,498565
Mediana	79,525		0,01	2,23	12,13	5,42	11,16	2,17
Máximo	173,85		3	4,72	26,14	10,28	91,62	17,29
Mínimo	32,99		0	0,8	4,66	3,25	6,82	0,83
Desvio Padrão	26,68578		0,551761	0,884053	3,844032	1,120997	8,472541	1,328707

1-OGX-77-MA Fm. Cabeças Superior								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	85,71016		0,010836	2,545177	12,14119	4,997492	12,85277	2,525241
Mediana	88,15		0,01	2,64	12,43	4,74	9,75	2,13
Máximo	173,85		0,03	4,62	23,84	8,57	91,62	17,29
Mínimo	32,99		0	0,8	4,66	3,25	7,31	1,51
Desvio Padrão	25,35793		0,005952	0,829881	3,126621	1,013007	10,26733	1,787349

1-OGX-77-MA Fm. Cabeças Intermediário								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	73,54317		0,009072	2,022708	11,66472	5,968859	15,53176	2,581238
Mediana	67,85		0,01	1,88	11,07	5,89	12,47	2,28
Máximo	138,88		0,02	4,23	23,54	10,28	38,27	6,62
Mínimo	45,53		0	0,91	6,57	3,57	6,82	0,83
Desvio Padrão	18,11707		0,004212	0,653139	3,04987	1,103505	7,827554	1,103533

1-OGX-77-MA Fm. Cabeças Inferior								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	124,8268		0,017155	3,586983	18,59784	5,230862	10,60164	2,050776
Mediana	123,675		0,02	3,695	18,47	5,115	10,35	1,995
Máximo	169,21		0,02	4,72	26,14	7,01	13,8	2,91
Mínimo	74,8		0,01	1,84	11,65	4,2	7,58	1,49
Desvio Padrão	23,35558		0,004531	0,723486	3,606209	0,580858	1,442946	0,357499

1-OGX-93-MA Fm. Cabeças								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	46,71067	149,8103	2,531034	5,775862	31,67931	5,667937	12,57045	2,294487
Mediana	40,915	149,7	2,5	5,8	31,4	5,507937	12,66667	2,321429
Máximo	116,46	159,5	2,9	8,1	36	8,820513	15,08696	3,208333
Mínimo	22,1	141,6	2,3	3,9	27,5	3,395062	10,18519	1,56
Desvio Padrão	17,66686	4,758627	0,164975	0,959782	1,933793	1,202743	1,145007	0,424309

1-OGX-93-MA Fm. Cabeças Superior								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	39,32216	149,6	2,569231	5,9	31,30769	5,602493	12,23014	2,298202
Mediana	36,55	147,45	2,6	6	31,1	5,05	12,16667	2,253307
Máximo	59,23	158,2	2,8	8,1	36	8,820513	13,84615	3,04
Mínimo	22,1	143,3	2,3	3,9	27,5	3,395062	10,18519	1,56
Desvio Padrão	9,398787	5,094382	0,154837	1,223383	2,271733	1,607174	1,175347	0,46574

1-OGX-93-MA Fm. Cabeças Intermediário								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	48,59741	150,6733	2,493333	5,826667	32,06	5,628825	12,91043	2,358011
Mediana	40,915	149,9	2,4	5,7	32	5,701754	12,88462	2,333333
Máximo	116,46	159,5	2,9	7,7	34,7	7,333333	15,08696	3,208333
Mínimo	29,16	143,7	2,3	4,5	29,7	3,857143	10,86207	1,724138
Desvio Padrão	19,11708	4,347161	0,166762	0,876247	1,637856	0,938463	1,071497	0,450789

1-OGX-93-MA Fm. Cabeças Inferior								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	71,53383	148,8667	2,466667	5,766667	31,76667	5,511464	12,96726	2,357488
Mediana	73,54	147,6	2,4	5,6	31	5,507937	12,33333	2,333333
Máximo	95,18	157,4	2,7	6,3	34,7	5,740741	15,08696	2,73913
Mínimo	45,11	141,6	2,3	5,4	29,6	5,285714	11,48148	2
Desvio Padrão	12,93684	7,975797	0,208167	0,472582	2,635021	0,227534	1,884478	0,370157

1-OGX-101-MA Fm. Cabeças								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	95,12956	151,2981	2,5	5,988462	32,03269	5,530912	12,87878	2,412395
Mediana	97,5	151,15	2,5	6	31,95	5,274194	12,96077	2,3875
Máximo	308,23	164,7	2,9	8,3	35,9	11,21875	15,61905	3,458333
Mínimo	30,17	137,3	2,1	3,2	27,6	3,631579	10,2069	1,230769
Desvio Padrão	33,28251	5,743726	0,174895	0,988493	1,753732	1,224458	1,183027	0,461551

1-OGX-101-MA Fm. Cabeças Superior								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	85,99517	149,4706	2,470588	5,723529	32,14118	5,88626	13,03408	2,323454
Mediana	86,03	149	2,5	5,8	31,9	5,35	13,04348	2,347826
Máximo	160,43	162,5	2,7	8,3	35,9	11,21875	13,91667	3,458333
Mínimo	32,64	142,2	2,2	3,2	30	3,843373	11,11111	1,230769
Desvio Padrão	32,97146	5,509964	0,131171	1,088307	1,593761	1,65491	0,763656	0,457232

1-OGX-101-MA Fm. Cabeças Intermediário								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	90,79941	151,0792	2,470833	6,1125	31,77083	5,363801	12,91632	2,491182
Mediana	89,785	150,65	2,5	6,15	31,7	5,363482	12,78308	2,50087
Máximo	153,58	162	2,8	8	35,4	7,295455	15,40909	3,333333
Mínimo	30,17	137,3	2,1	4,4	27,6	3,631579	10,39286	1,692308
Desvio Padrão	27,45573	5,903866	0,148848	1,039779	2,035015	1,060607	1,278861	0,490661

1-OGX-101-MA Fm. Cabeças Inferior								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	116,7032	155,2167	2,6	6,133333	32,68333	5,376621	12,69047	2,386456
Mediana	111,765	154,6	2,6	6,15	32,5	5,274194	12,73154	2,329286
Máximo	308,23	164,7	2,9	7,2	35,4	6,415094	15,61905	2,952381
Mínimo	60,52	148,8	2,1	5,1	29,6	4,632353	10,2069	1,892857
Desvio Padrão	35,10444	4,930579	0,23741	0,621338	1,518871	0,580093	1,513646	0,392582

1-OGX-110-MA Fm. Cabeças								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	105,0449	151,9636	2,549091	5,883636	32,15818	5,778727	12,65489	2,325638
Mediana	107,26	151,4	2,6	6	32	5,39	12,80769	2,32
Máximo	227,15	166,4	2,9	8,1	37,7	12,79	15	3,521739
Mínimo	24,46	135,4	2,2	2,8	26,6	3,82	9,851852	1,037037
Desvio Padrão	33,40881	6,713209	0,156196	1,154663	2,404601	1,741947	1,126304	0,522026

1-OGX-110-MA Fm. Cabeças Superior								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	86,35734	150,1105	2,494737	6,326316	30,85789	4,958421	12,43181	2,555608
Mediana	89,21	150,2	2,5	6,7	30,8	4,78	12,48	2,521739
Máximo	164,13	163,3	2,8	7,3	34	6,35	15	3,173913
Mínimo	24,46	141,9	2,2	5	26,6	3,97	9,851852	1,851852
Desvio Padrão	30,32177	5,856515	0,18401	0,765101	1,955424	0,773263	1,196129	0,405951

1-OGX-110-MA Fm. Cabeças Intermediário								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	97,07156	154,0722	2,572222	5,85	32,90556	6,063889	12,82305	2,29144
Mediana	100,46	153,6	2,6	6	33,3	5,425	13,13622	2,298077
Máximo	191,03	166,4	2,9	8,1	37,7	12,79	14,5	3,521739
Mínimo	35,96	141,9	2,3	2,8	27,9	3,82	10,35714	1,037037
Desvio Padrão	26,11856	7,261162	0,152646	1,354405	2,513369	2,165139	1,080878	0,591736

1-OGX-110-MA Fm. Cabeças Inferior								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	131,4011	151,8111	2,583333	5,45	32,78333	6,359444	12,7222	2,11709
Mediana	131,5	152,35	2,6	5,65	32,85	5,66	12,73077	2,167143
Máximo	227,15	160,1	2,8	7,4	36,5	10,5	14,28	3,083333
Mínimo	76,51	135,4	2,4	3	28,1	4,28	10,03571	1,153846
Desvio Padrão	24,54634	6,748585	0,115045	1,166821	2,259685	1,767043	1,120718	0,484339

1-PGN-1-MA Fm. Cabeças								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	146,5662		2,450867	21,16761	3,922336	5,752248	9,078354	1,679805
Mediana	145,52		2,48	21,16	3,72	5,7	8,39	1,57
Máximo	212,92		3,67	29,43	9,39	11,71	21,94	5,11
Mínimo	80,49		1	13,49	1,68	2,16	5,94	0,53
Desvio Padrão	17,89304		0,52958	2,176731	1,097263	1,489399	2,416027	0,61317

1-PGN-1-MA Fm. Cabeças Superior								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	151,7641		2,561634	21,71626	4,016576	5,81358	9,04358	1,676265
Mediana	156,24		2,53	21,73	3,88	5,65	8,57	1,59
Máximo	212,92		3,67	29,43	9,39	11,71	21,94	5,11
Mínimo	80,49		1	13,49	1,68	2,16	5,94	0,53
Desvio Padrão	20,63552		0,628755	2,528924	1,178788	1,664916	2,766118	0,705046

1-PGN-1-MA Fm. Cabeças Intermediário								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	139,3908		2,335274	20,60797	3,437426	6,146118	9,216498	1,552743
Mediana	141,94		2,48	20,7	3,39	6	8,38	1,45
Máximo	168,5		2,91	23,55	4,75	9,63	19,89	4,62
Mínimo	106,72		1	15,7	2,21	4,05	7,04	0,84
Desvio Padrão	11,36949		0,447066	1,480898	0,55367	1,064256	2,257531	0,524038

1-PGN-1-MA Fm. Cabeças Inferior								
	GR (API)	DR (nGy)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Th/K (10 ⁻⁴)	U/K (10 ⁻⁴)
Média	151,1473		2,412877	21,05068	5,177945	4,232055	8,91411	2,147945
Mediana	144,12		2,46	21,22	4,86	4,18	8,7	2,13
Máximo	193,09		2,96	25,82	7,4	6,41	12,26	2,85
Mínimo	126,14		1,94	16,72	3,79	2,79	6,24	1,38
Desvio Padrão	17,05737		0,277521	2,258904	1,043844	0,986208	1,832365	0,350559

ANEXO 2

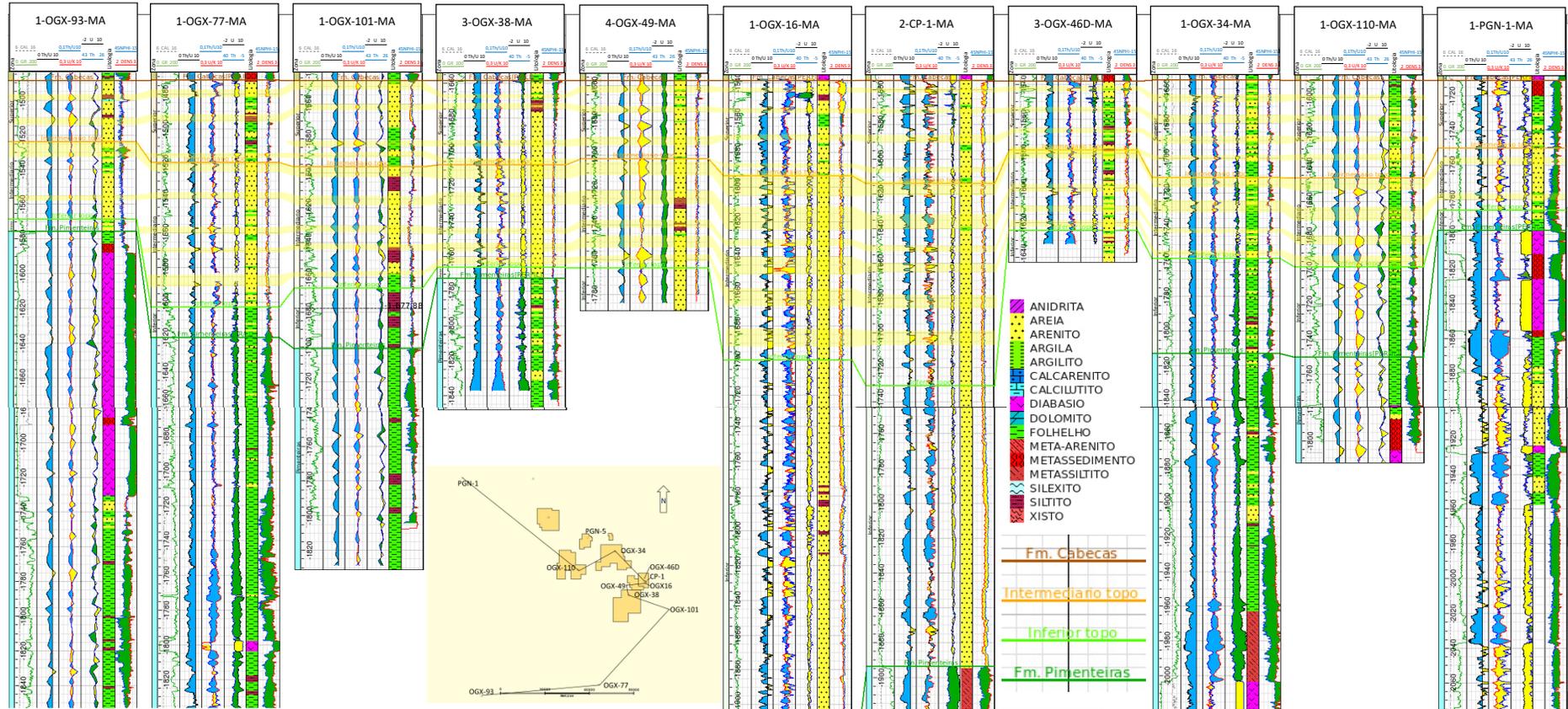


Figura 43 Seção geológica de poços em cota, datum topo da Fm. Cabeças. Toda a Fm. Cabeças. Influxos continentais interpretados em amarelo.

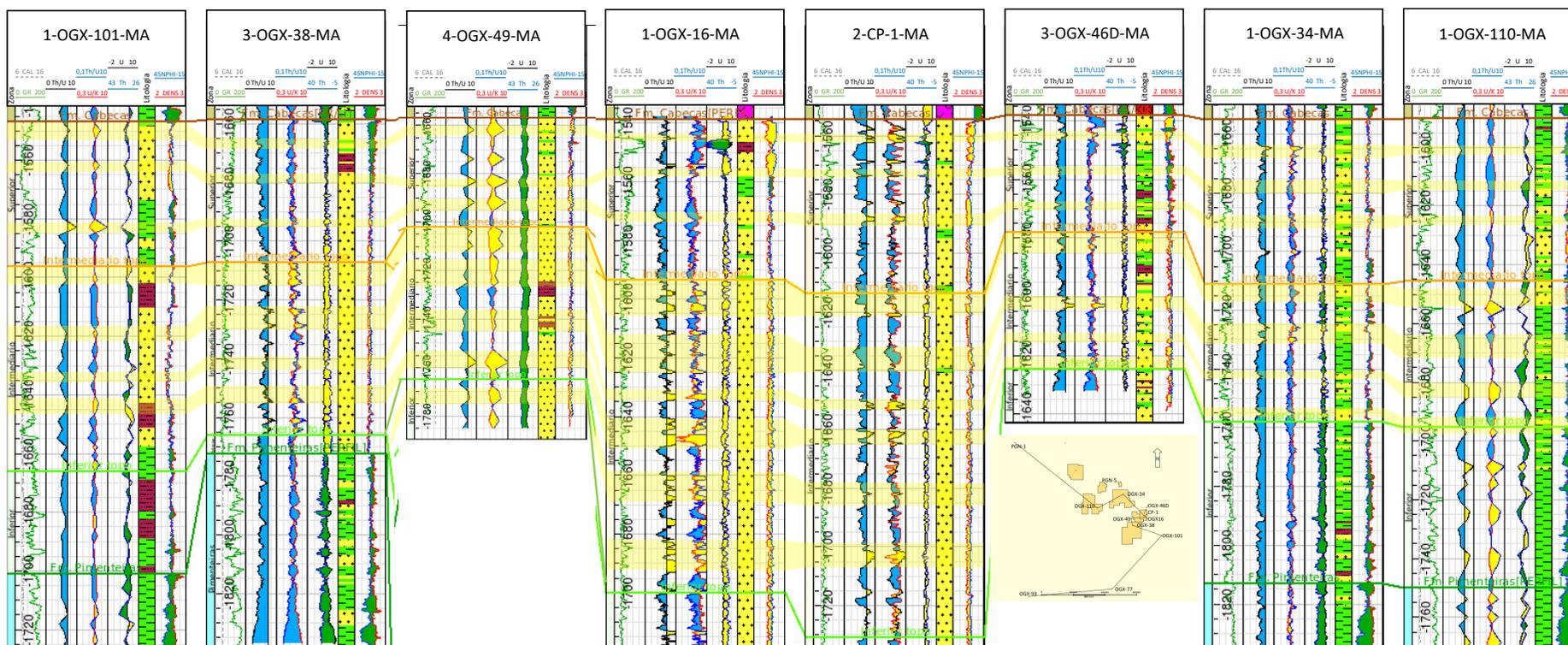


Figura 44 Seção geológica de poços em cota, datum topo da Fm. Cabeças. Intervalos Intermediário e Superior da Fm. Cabeças. Influxos continentais interpretados em amarelo.

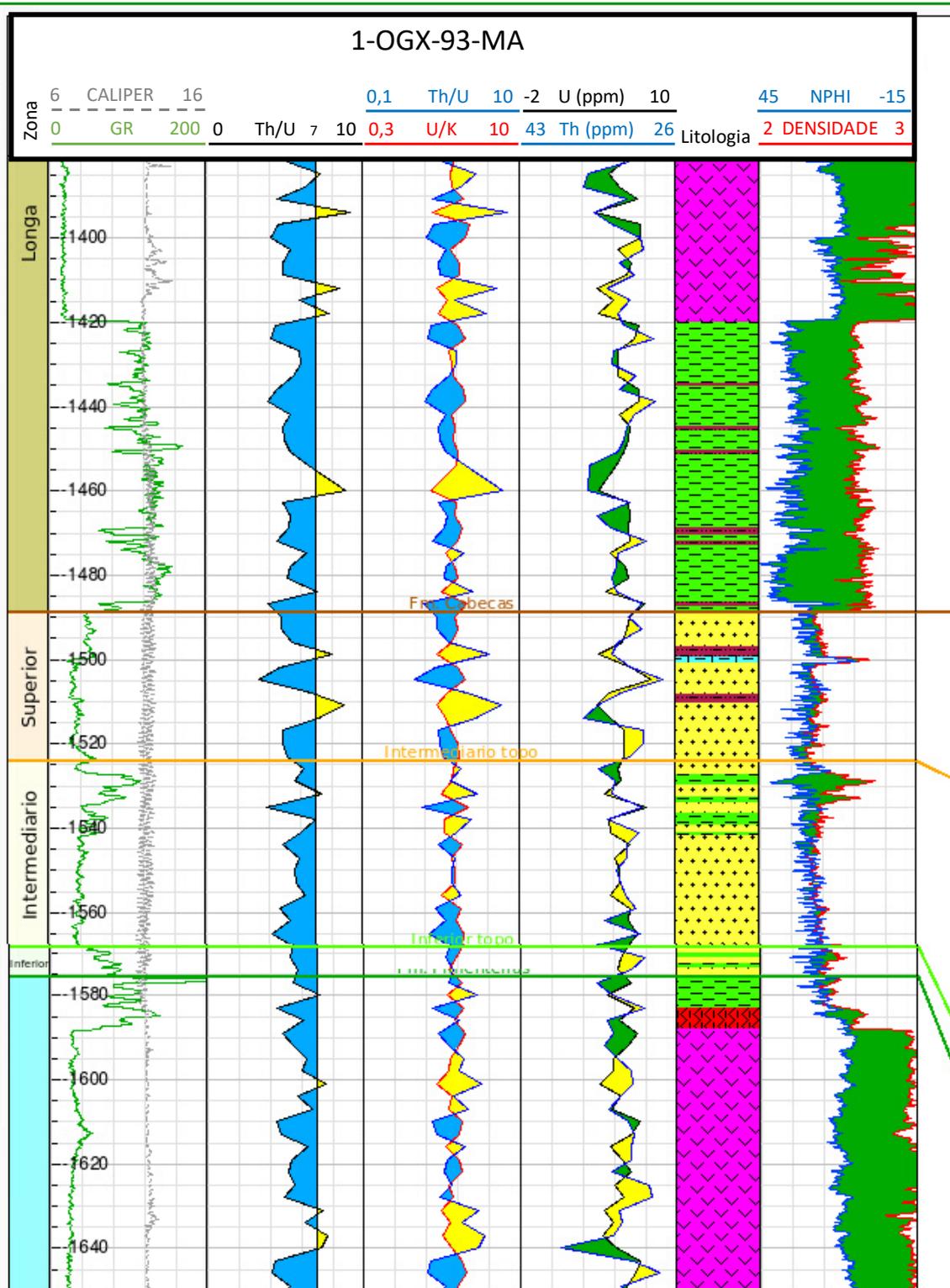


Figura 45 Perfil do poço 1-OGX-93-MA elevação em cota, marcos: Topo da Fm. Pimenteiras em verde escuro, topo do intervalo inferior em verde claro, topo do intervalo intermediário em laranja e topo da Formação Cabeças em marrom.

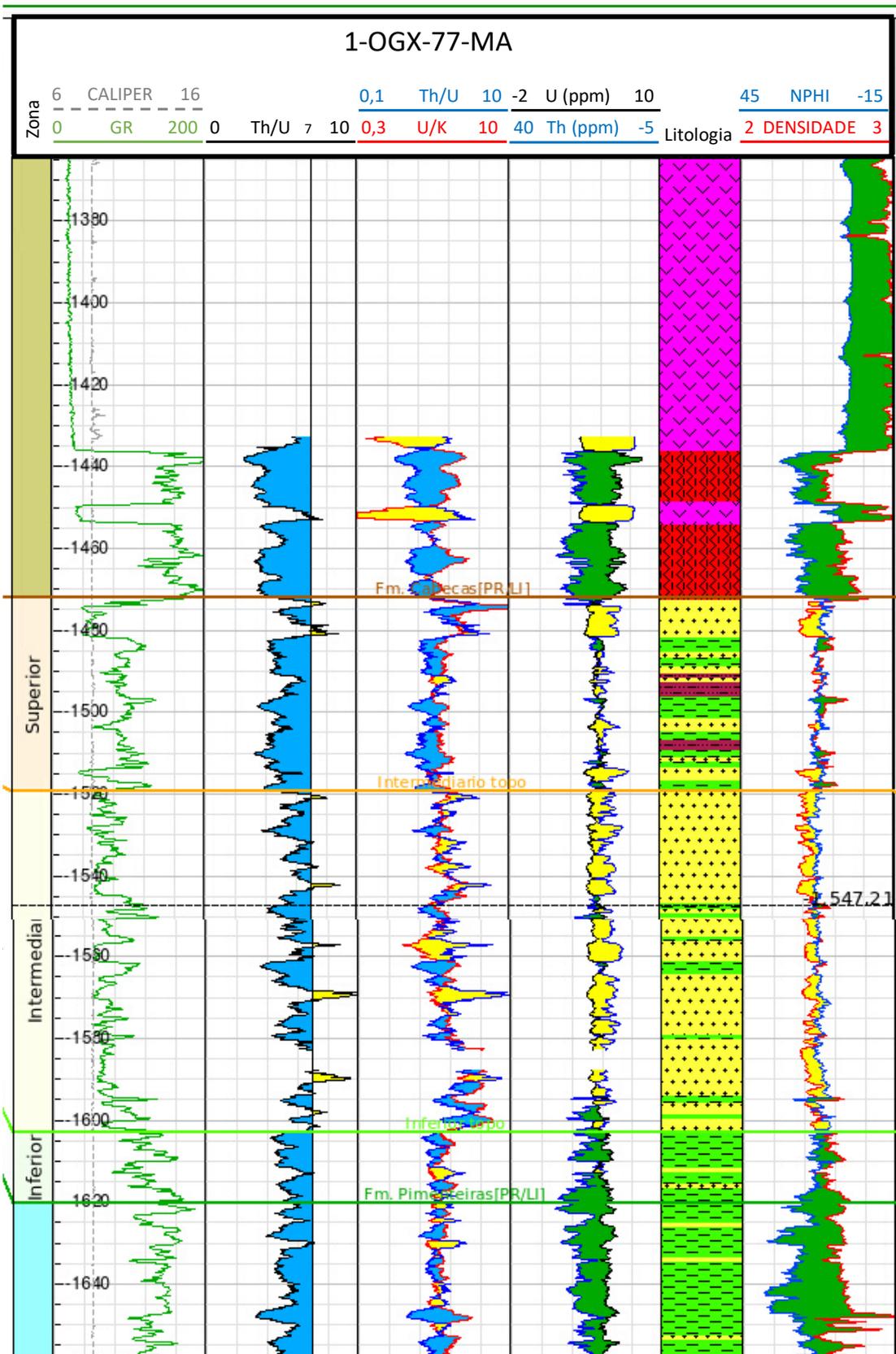


Figura 46 Perfil do poço 1-OGX-77-MA elevação em cota, marcos: Topo da Fm. Pimenteiras em verde escuro, topo do intervalo inferior em verde claro, topo do intervalo intermediário em laranja e topo da Formação Cabeças em marrom.

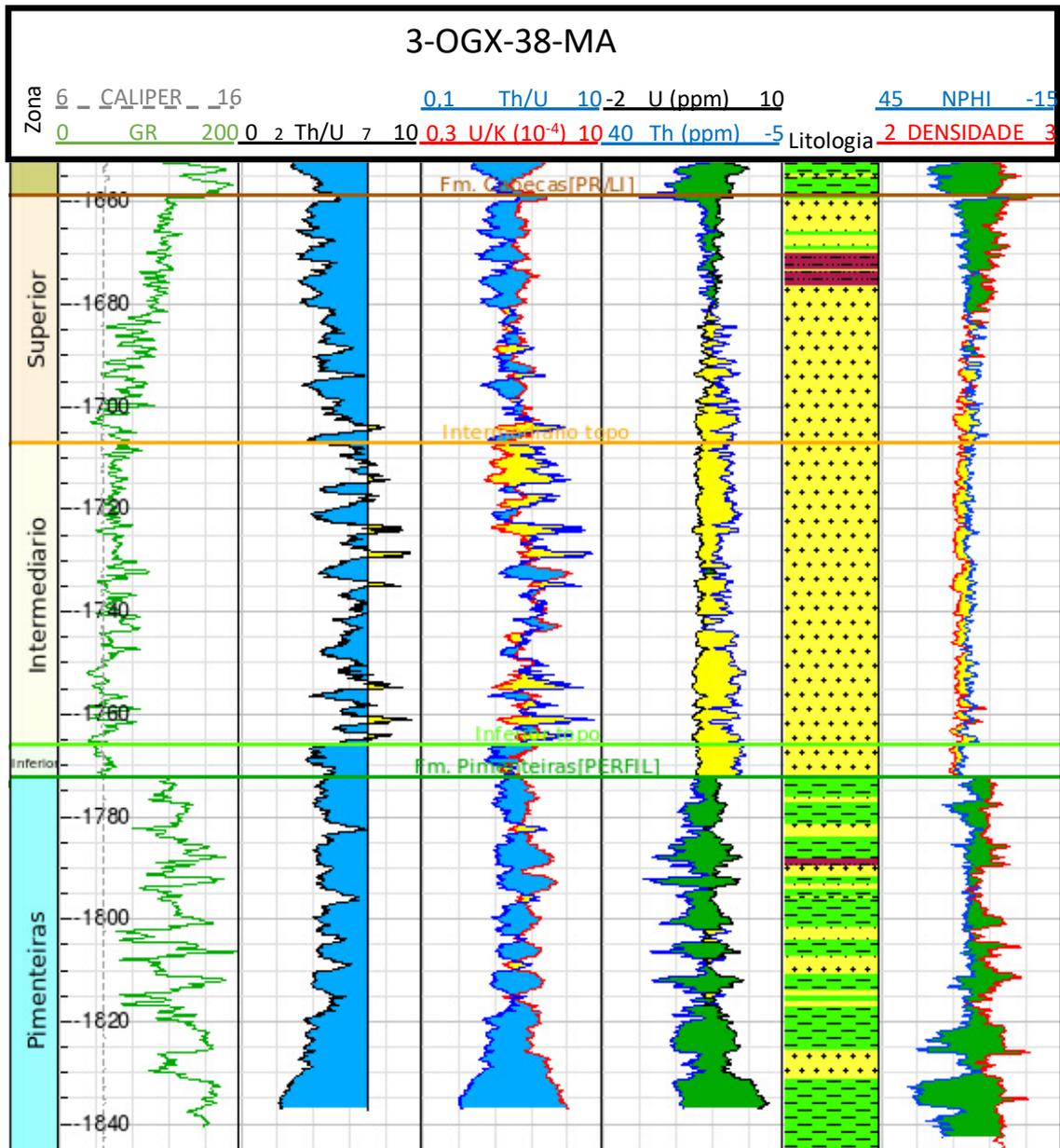


Figura 48 Perfil Perfil do poço 3-OGX-38-MA elevação em cota, marcos: Topo da Fm. Pimenteiras em verde escuro, topo do intervalo inferior em verde claro, topo do intervalo intermediário em laranja e topo da Formação Cabeças em marrom.

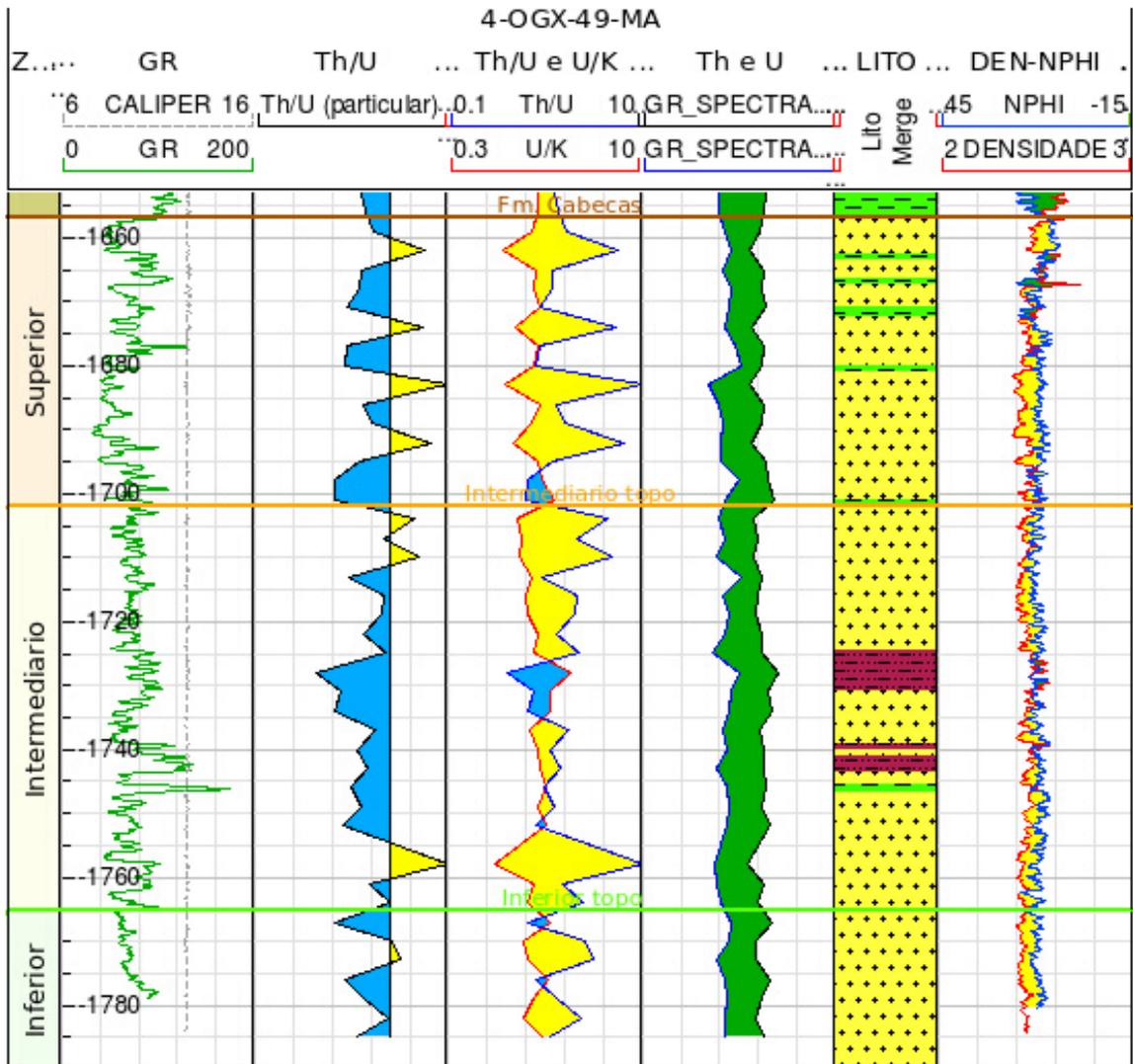


Figura 49 Perfil do poço 4-OGX-49-MA elevação em cota, marcos: Topo da Fm. Pimenteiras em verde escuro, topo do intervalo inferior em verde claro, topo do intervalo intermediário em laranja e topo da Formação Cabeças em marrom.

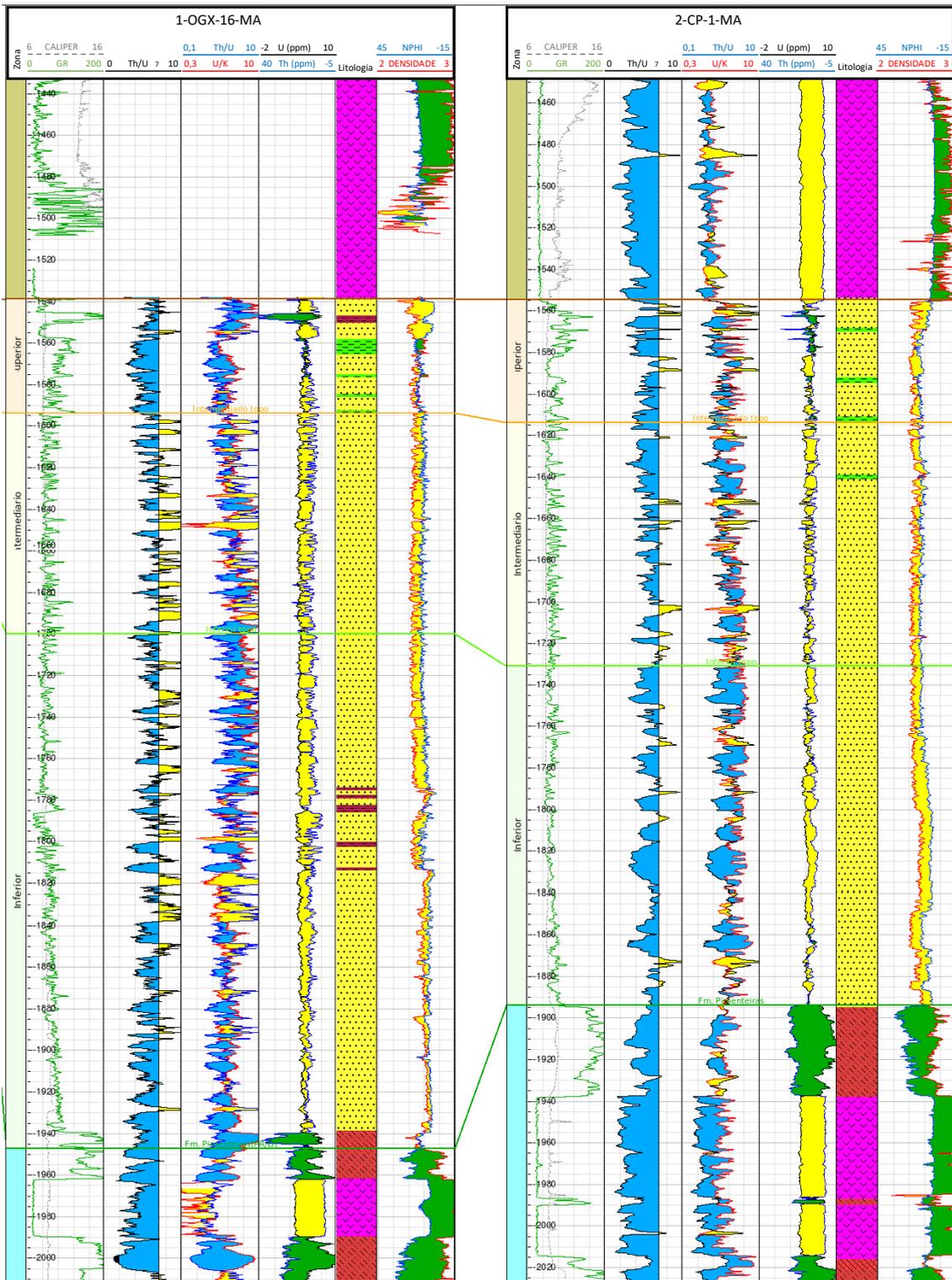


Figura 50 Perfil dos poços 1-OGX-16-MA e 2-CP1-MA, elevação em cota, datum topo da Formação Cabeças, marcos: Topo da Fm. Pimenteiras em verde escuro, topo do intervalo inferior em verde claro, topo do intervalo intermediário em laranja e topo da Formação Cabeças em marrom. A distância entre os poços é de aproximadamente 1km.

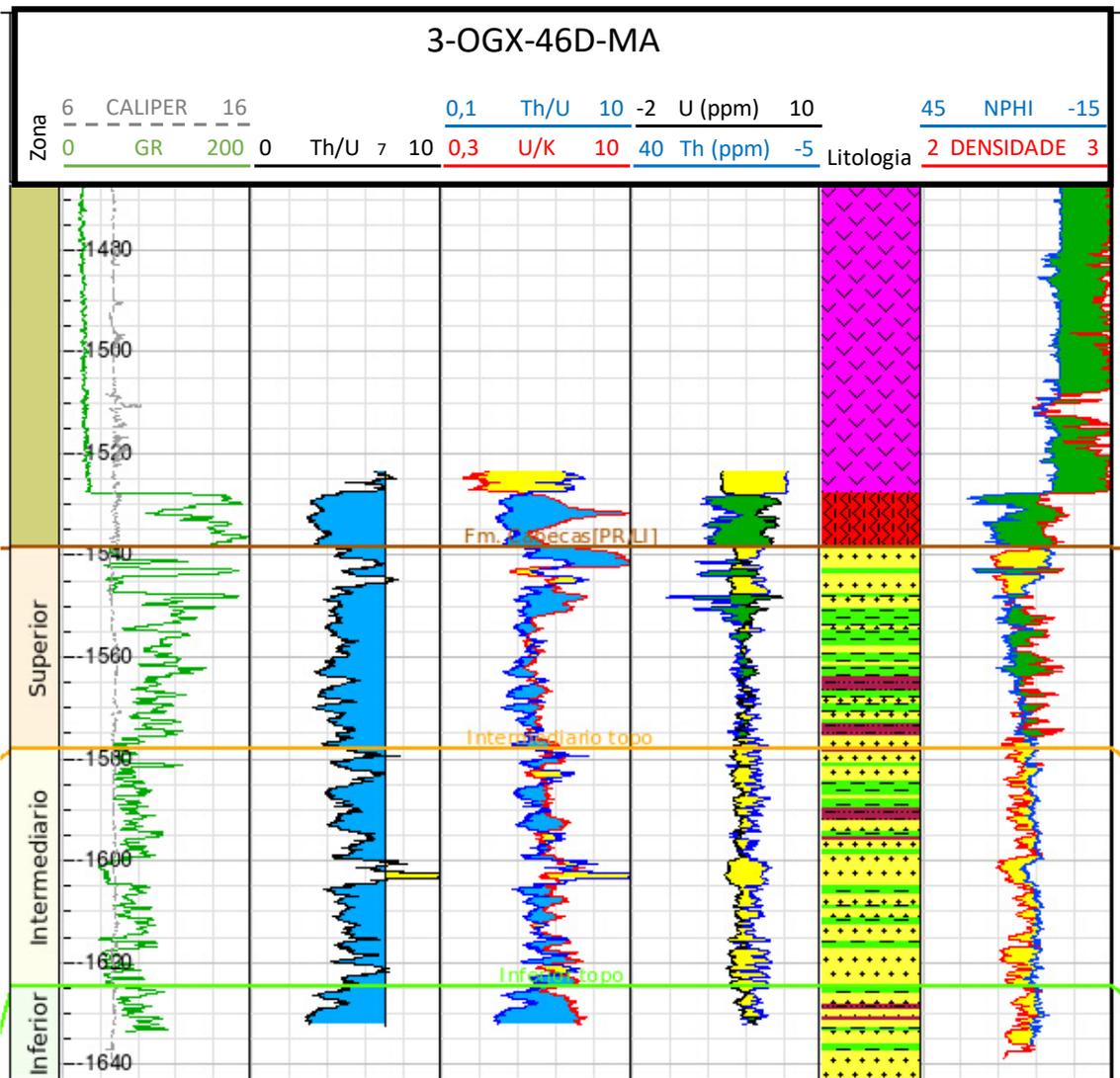


Figura 51 Perfil do poço Perfil do poço 3-OGX-46D-MA elevação em cota, marcos: Topo do intervalo inferior em verde claro, topo do intervalo intermediário em laranja e topo da Formação Cabeças em marrom.

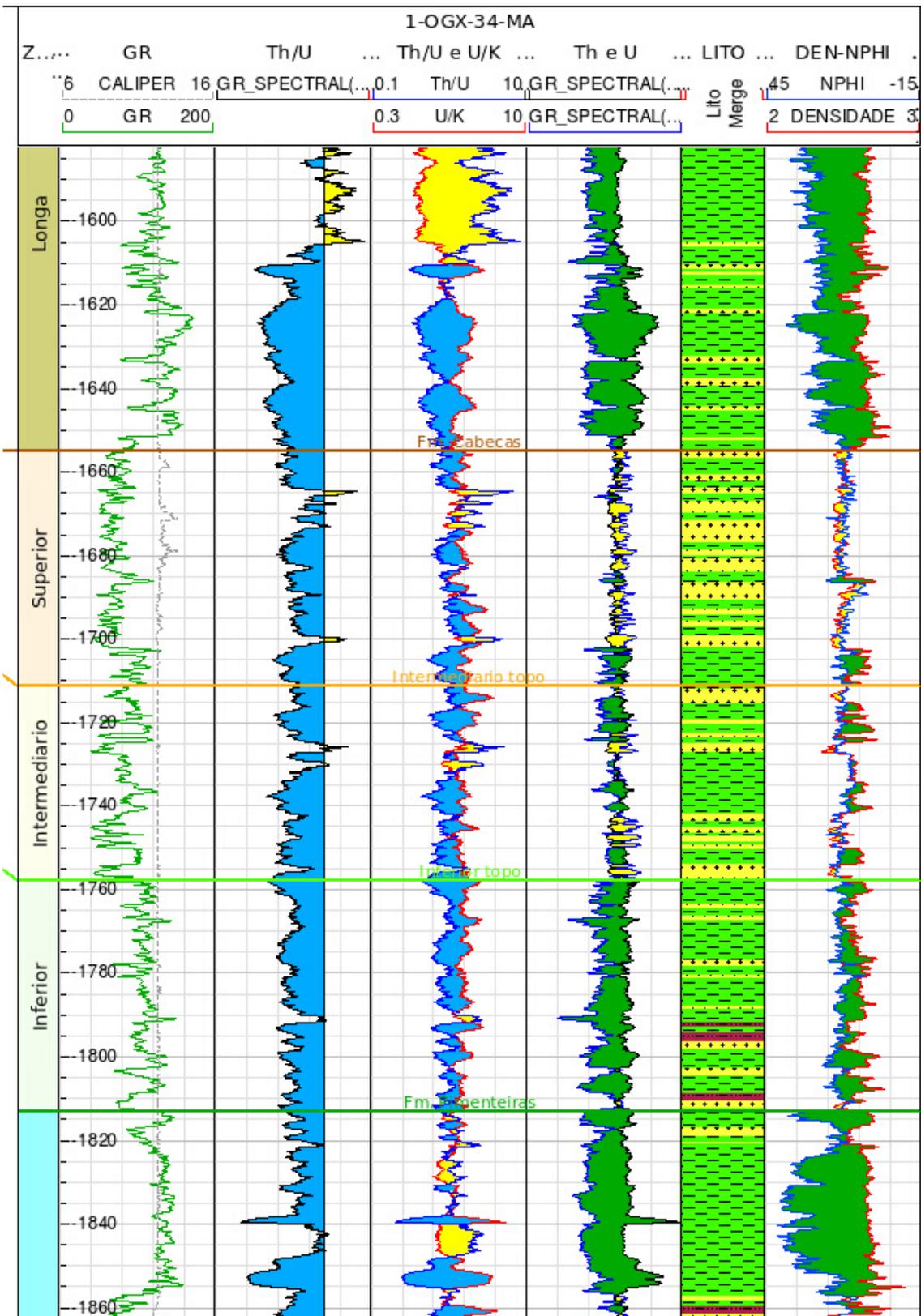


Figura 52 Perfil do poço 1-OGX-34-MA elevação em cota, marcos: Topo da Fm. Pimenteiras em verde escuro, topo do intervalo inferior em verde claro, topo do intervalo intermediário em laranja e topo da Formação Cabeças em marrom.

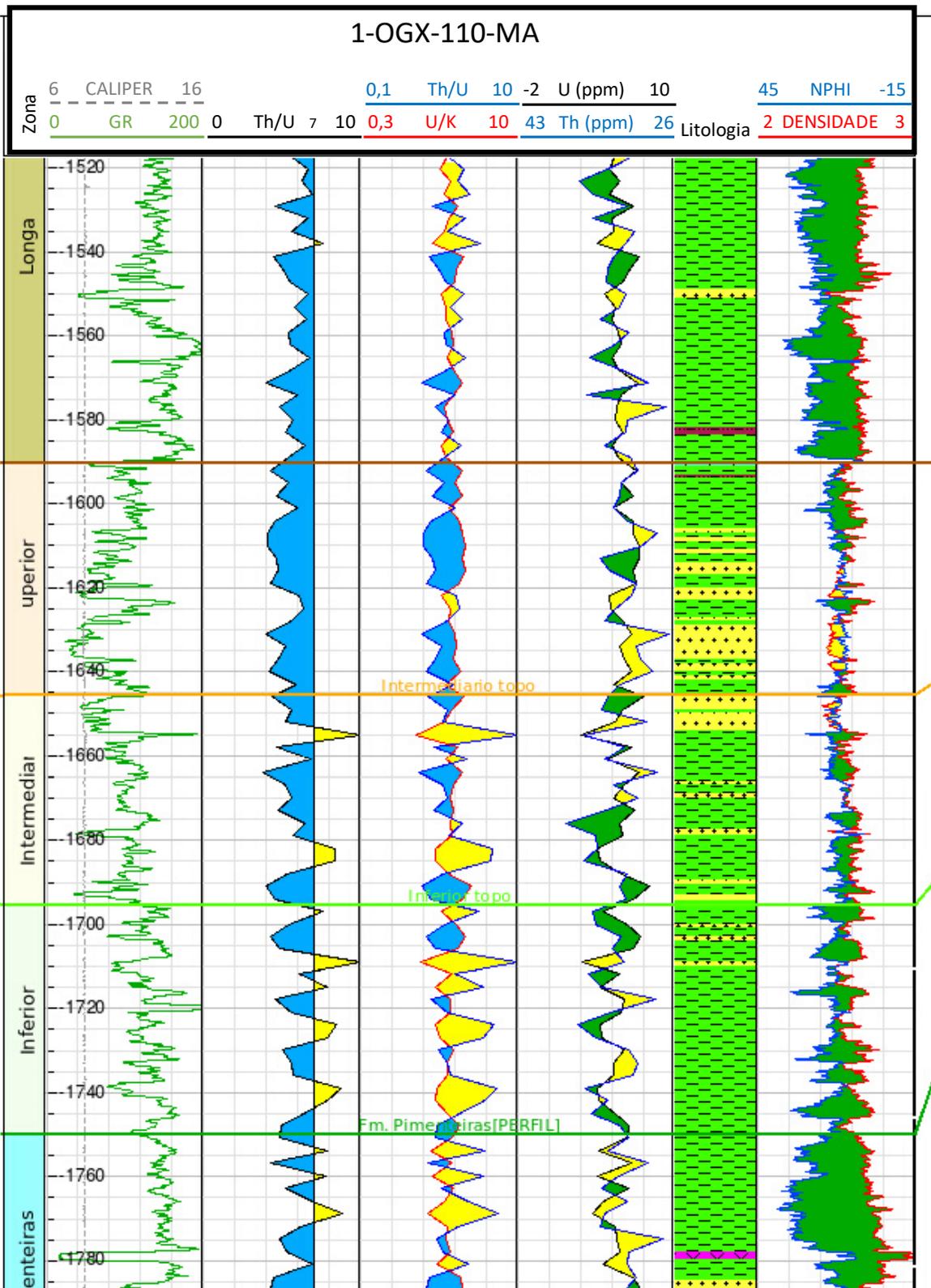


Figura 53 Perfil do poço 1-OGX-110-MA elevação em cota, marcos: Topo da Fm. Pimenteirias em verde escuro, topo do intervalo inferior em verde claro, topo do intervalo intermediário em laranja e topo da Formação Cabeças em marrom.

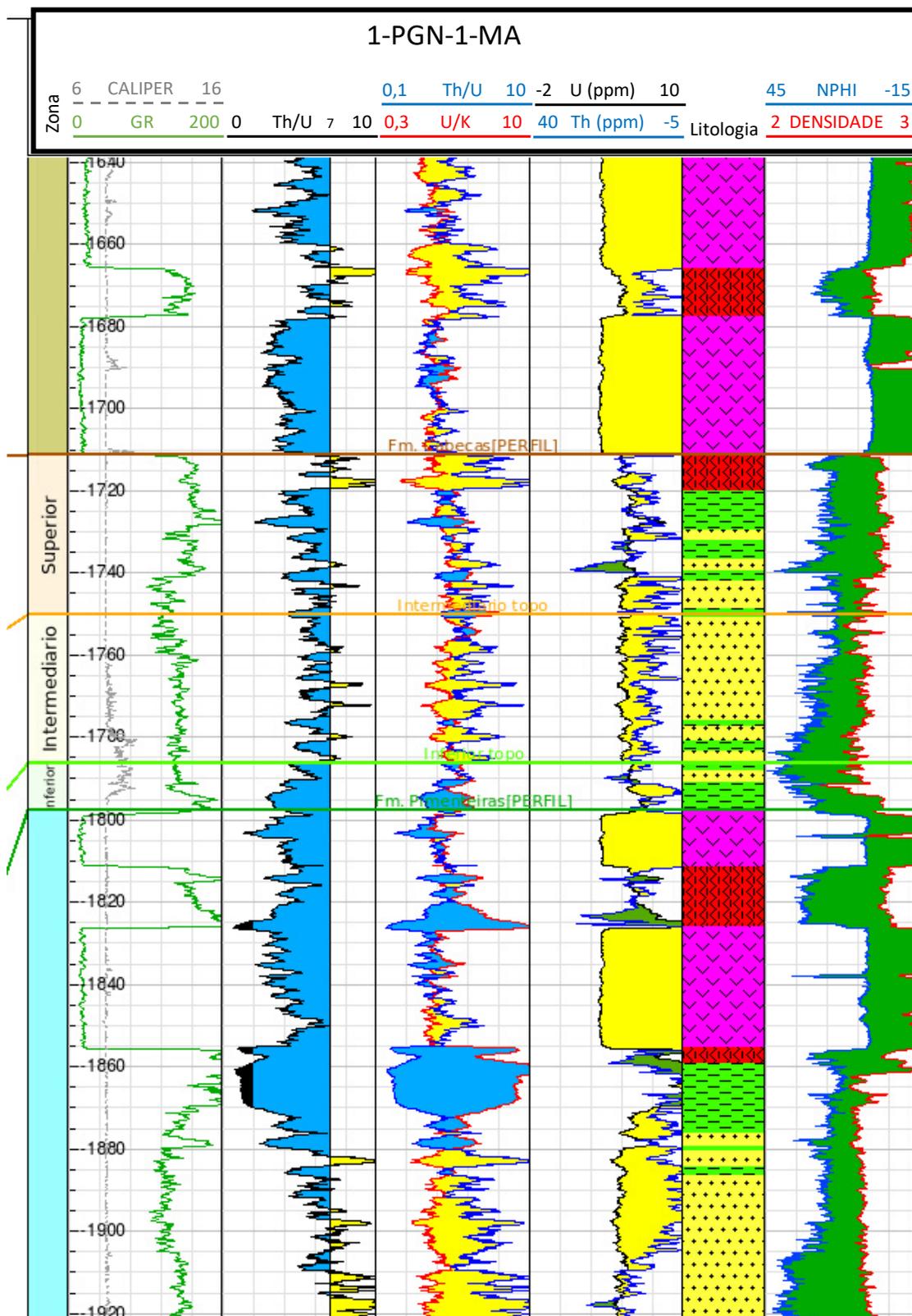


Figura 54 Perfil do poço 1-PGN-1-MA elevação em cota, marcos: Topo da Fm. Pimenteiras em verde escuro, topo do intervalo inferior em verde claro, topo do intervalo intermediário em laranja e topo da Formação Cabeças em marrom.