



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**



Trabalho de Conclusão de Curso

ARCABOUÇO GEOLÓGICO DA REGIÃO DE CAPIVARI – SP

Aluna: Aline Maria Poças Belila
Orientador: Prof. Dr. Alexandre Campana Vidal

Campinas
Dezembro de 2011



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**



ARCABOUÇO GEOLÓGICO DA REGIÃO DE CAPIVARI – SP

Aline Maria Poças Belila

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia, apresentado ao Instituto de Geociências - UNICAMP, como parte das exigências para o cumprimento da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso no ano letivo de 2011.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Campana Vidal

Campinas
Dezembro de 2011

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais por serem minha motivação e apoio para alcançar meus objetivos e ao meu irmão, pelos bons conselhos de sempre.

Ao Guilherme, por estar sempre ao meu lado.

Aos meus queridos 07s, por fazerem desses cinco anos os melhores.

A Carol, Dani, Luana e Cibele, por serem minhas companheiras.

Aos colegas de pesquisa do grupo Carmod, por estarem sempre dispostos a ajudar.

E por fim, ao professor Alexandre Campana Vidal, pela orientação e incentivo durante todo o trabalho.

SUMÁRIO

Lista de Figuras.....	vi
Lista de Tabelas.....	viii
Lista de Anexos.....	viii
Resumo.....	ix
Capítulo 1 – Introdução.....	1
1.1 – Apresentação.....	2
1.2 – Objetivos.....	1
1.3 – Base de dados.....	2
1.4 – Área de estudo.....	2
Capítulo 2 – Contexto Geológico.....	4
2.1 – Na Bacia do Paraná.....	4
2.2 – No Estado de São Paulo.....	6
2.3 – Na região de Capivari-Rafard.....	7
Capítulo 3 – Caracterização Litológica do Poço C-IG/98.....	12
3.1 – Descrição dos testemunhos.....	12
3.2 – Petrografia.....	14
3.2.1 – Classificação e Proveniência.....	16
3.2.2 – Diagênese.....	17
Capítulo 4 – Perfis Geofísicos.....	24
4.1 – Perfilagem Geofísica.....	25
4.1.1 – Raios Gama.....	26
4.1.2 – Perfil Sônico.....	26
4.1.3 – Perfis de Indução Profunda e Normal Curta.....	26
4.2 – Ajuste do Perfil litológico.....	27
4.3 – Caracterização das eletrofácies.....	30
4.3.1 – Análise estatística.....	30
4.3.1.1 – Histogramas.....	31

4.3.1.2 – Boxplots.....	32
4.3.1.3 – Gráficos de dispersão.....	36
4.3.2 – Análise de Componentes Independentes (ICA).....	40
Capítulo 5 – Geoquímica das amostras.....	43
5.1 – Fluorescência de Raios x.....	43
5.2 – ICP-MS.....	44
5.3 – Anomalias.....	46
Capítulo 6 – Correlação com outros poços.....	52
6.1 – Correlação litológica e de Raios Gama.....	52
6.2 – Modelo estratigráfico da área.....	56
6.2.1 – Variogramas.....	56
6.2.2 – Krigagem.....	58
Capítulo 7 – Conclusões.....	63
Capítulo 8 – Referências Bibliográficas.....	64

Lista de Figuras

Figura 1.1: Mapa geológico da região de Capivari-Rafard com a localização dos poços estudados.....	3
Figura 2.1: Coluna Estratigráfica da Bacia do Paraná (modificada de Milani, 1997).....	5
Figura 2.2: Mapa geológico da região de Capivari e Rafard (IPT, 1981).....	7
Figura 2.3: Corte esquemático na região estudada, mostrando as associações de fácies do leque submarino (Petri & Pires, 1991).....	9
Figura 3.1: Perfil litológico do Poço C-IG-98, representadas as profundidades com descrição de amostras macroscópicas em preto e lâminas petrográficas em vermelho (modificado de Vidal, 2002).....	13
Figura 3.2: Fotomicrografias mostrando o arcabouço rochoso. Esquerda: matriz, grãos subarredondados a subangulosos, contato pontual e porosidade intergranular (10x-LP). Direita: intercalação de arenito fino e arenito muito fino (2.5x-LP).....	15
Figura 3.3: Classificação dos arenitos segundo Diagrama de Folk (1968).....	16
Figura 3.4: Proveniência dos arenitos segundo Diagrama de Dickinson (1985).....	16
Figura 3.5: Fotomicrografias evidenciando processos diagenéticos. Esquerda: dissolução do grão de quartzo, restando apenas a borda (10x-LP). Direita: dissolução de feldspato (20x-LP).....	18
Figura 3.6: Fotomicrografias evidenciando dissolução do grão de feldspato preferencialmente nos planos de clivagem (seta).....	19
Figura 3.7: Fotomicrografias evidenciando processos diagenéticos. Esquerda: cimentação por agilominerais (10x-LP). Direita: cimentação e substituição da borda do grão por argilominerais (seta) (10x-LPA).....	20
Figura 3.8: Fotomicrografias evidenciando processos diagenéticos. Esquerda: cimentação por opacos na porosidade intergranular (20x-LP). Direita: opaco ocupando a porosidade intragranular (seta) (10x-LP).....	20
Figura 3.9: Fotomicrografias evidenciando processos diagenéticos. Esquerda: cimentação por calcita em forma poiquilótica (2.5x-LPA). Direita: calcita corroendo as bordas dos grãos e substituindo anidrita (setas) (10x-LPA).....	21
Figura 3.10: Fotomicrografias evidenciando processos diagenéticos. Esquerda: cimentação por clorita (20x-LP). Direita: Clorita substituindo os grãos (20x-LP).....	22

Figura 3.11: Fotomicrografia evidenciando compactação mecânica, muscovita deformada por grão de quartzo (10x-LPA).....	22
Figura 4.1: Gráficos combinados de litologia e perfis geofísicos. 1: Lamito, argilito e siltito, 2: Arenito muito fino, 3: Arenito fino, 4: Arenito médio, 6: Conglomerado.....	28
Figura 4.2: Histogramas dos perfis de Raios Gama e Sônico.....	30
Figura 4.3: Histogramas deos perfis de Indução Profunda e Normal Curta.....	31
Figura 4.4: Diagrama box-plot dos valores de Raios Gama para cada litologia. 1: Lamito, argilito e siltito, 2: Arenito muito fino, 3: Arenito fino, 4: Arenito médio, 6: Conglomerado.....	32
Figura 4.5: Diagrama box-plot dos valores de Perfil Sônico para cada litologia. 1: Lamito, argilito e siltito, 2: Arenito muito fino, 3: Arenito fino, 4: Arenito médio, 6: Conglomerado.....	33
Figura 4.6: Diagrama box-plot dos valores em escala logarítmica de Indução Profunda para cada litologia. 1: Lamito, argilito e siltito, 2: Arenito muito fino, 3: Arenito fino, 4: Arenito médio, 6: Conglomerado.....	34
Figura 4.7: Diagrama box-plot dos valores em escala logarítmica de Indução Curta para cada litologia. 1: Lamito, argilito e siltito, 2: Arenito muito fino, 3: Arenito fino, 4: Arenito médio, 6: Conglomerado.....	35
Figura 4.8: Gráfico de dispersão de Raios Gama x Sônico.....	36
Figura 4.9: Gráfico de dispersão de Raios Gama x Resistividade.....	37
Figura 4.10: Gráfico de dispersão de Sônico x Resistividade.....	38
Figura 4.11: Correlação das colunas litológicas (a esquerda) e eletrofácies obtidas pela ICA (a direita) para os poços C-IG/93, R-IG/94 e R-IG/95. Para as fácies litológicas, 0: Regolito, 1: Lamito, siltito, argilito e ritmito, 2: Arenito muito fino, 3: Arenito fino, 4: Arenito médio, 5: Arenito grosso, 6: Conglomerado, brecha e diamictito.....	40
Figura 5.4: Gráfico da concentração de Urânio (mg/g) em relação a massa perdida durante a Perda ao Fogo (%) para cada amostra.....	45
Figura 5.5: Gráfico da concentração de Urânio (mg/g) em relação a concentração de Tório (mg/g).....	46
Figura 5.6 : Gráficos das concentrações dos elementos Terras Raras (mg/g) em cada amostra (eixo x).....	48
Figura 6.1: Coluna litológica e perfil geofísico de Raios Gama do poço C-IG/98.....	51
Figura 6.2: Correlação dos perfis de Raios Gama e colunas litológicas dos poços C-IG/98, C-IG/93, R-IG/94 e R-IG/95.....	53

Figura 6.2: Correlação dos perfis de Raios Gama e colunas litológicas dos poços C-IG/98, C-IG/93, R-IG/94 e R-IG/95.....	55
Figura 6.4: Disposição dos poços no grid, classificados de acordo com as fácies litológicas. Norte representado pelo eixo y.....	57
Figura 6.5: Modelo tridimensional de probabilidade de ocorrência das fácies litológicas. Nota-se no pacote superior uma rampa com aumento de sedimentos finos para sudoeste (seta). Norte representado pelo eixo y.....	57
Figura 6.6: Modelo tridimensional de probabilidade de ocorrência das fácies litológicas. Visão a partir do sudoeste da área. Norte representado pelo eixo y.....	58
Figura 6.7: Seção horizontal do modelo tridimensional do sentido norte-sul. Norte representado pelo eixo y.....	58
Figura 6.8: Seções verticais do modelo tridimensional. Norte representado pelo eixo y.....	59

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Evolução da classificação e nomenclatura do Grupo Tubarão na área de estudo.....	6
Tabela 3.1: Síntese resumida das texturas (valores em porcentagem total da lâmina)..	14
Tabela 4.1: Medições mais comuns em Perfis Geofísicos de Poço.....	23
Tabela 5.1: Resultados da FRX para os óxidos maiores (valores em %)..	43
Tabela 5.2: Resultados do ICP-MS para 42 elementos traço (valores em mg/g), com destaque para os elementos Th e U.....	44
Tabela 5.3: Amostras selecionadas para análise e valores de Raios Gama (GR) e litologias associados.....	45

Lista de Anexos

Anexo 1 – Rotinas de programação em Visual Basic.

RESUMO

A região de Capivari localiza-se no centro-leste do Estado de São Paulo. As rochas sedimentares da região são pertencentes ao Grupo Itararé, de idade neopaleozóica, compostos por arenitos, diamictitos, conglomerados e sedimentos de granulação fina, depositados sob influência glacial.

O presente trabalho utilizou a análise integrada de dados litológicos, petrográficos, geoquímicos e geofísicos para a caracterização faciológica do poço C-IG/98 e definição de relações rocha-perfil, por meio de métodos estatísticos, utilizadas na caracterização de reservatórios.

Foi realizada a correlação entre 17 poços da região, dos quais 15 localizam-se no município de Capivari e 2 no município de Rafard, permitindo a determinação do ambiente paleogeográfico de sedimentação e a produção de um modelo estratigráfico tridimensional para a área.

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 - Apresentação

A região de Capivari localiza-se no centro-leste do Estado de São Paulo. Na área afloram sedimentos neopaleozóicos do Grupo Itararé, posicionados sobre o embasamento da Bacia do Paraná. Estes sedimentos são compostos por arenitos, diamictitos, conglomerados e sedimentos de granulação fina, depositados sob influência glacial.

Nas últimas décadas, o Instituto Geológico da Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo (IG-SMA) perfurou inúmeros poços para água subterrânea com testemunhagem completa, localizados no vale do médio Tietê incluindo a região de Capivari-Rafard.

Vários processos geológicos como sedimentação, erosão, diagênese, tectônica, variação do nível do mar, entre outros, produzem complexas distribuições espaciais das propriedades dos corpos sedimentares (Tucker, 2001). São essas heterogeneidades que dificultam a classificação do Grupo Itararé na Bacia do Paraná, inclusive no Estado de São Paulo, devido à variabilidade lateral das camadas, decorrente dos diferentes processos em cada região.

Nesse sentido, para a caracterização dos corpos sedimentares e definição de suas gêneses, exige-se um estudo integrado de dados de subsuperfície. A geofísica é o método indireto mais utilizado para a definição da geologia de subsuperfície, a correlação com os testemunhos de poço torna-se essencial para a definição de padrões, valores e relações que possam ser utilizados na caracterização de reservatórios e propriedades físicas das rochas. A análise petrográfica atribui detalhamento às análises faciológicas e fornece informações sobre a evolução dos sedimentos e, portanto, sobre a evolução da bacia. A geoquímica, por meio das concentrações de determinados elementos, evidencia processos químicos e físicos que ocorreram durante a sedimentação.

Para a integração e correlação de dados, diversos métodos geoestatísticos vêm sendo utilizados e testados, buscando padrões e classificações que possam ser aplicadas na caracterização em subsuperfície.

1.2 – Objetivos

Os objetivos desse trabalho podem ser divididos em três etapas sequenciais:

- (a) Descrição litológica do poço C-IG/98, por meio da análise de testemunhos, petrografia e geoquímica das amostras, e a investigação dos processos presentes na deposição e evolução dos sedimentos.

- (b) Estudo estatístico das relações entre os perfis geofísicos e litologias, de modo a definir padrões para as propriedades reservatório das rochas.
- (c) Correlação estratigráfica da área de estudo visando a construção de um modelo estratigráfico tridimensional que, somado às outras duas etapas, evidencie a paleogeografia da área.

1.3 – Base de dados

Para a pesquisa, foram utilizados dados coletados de trabalhos anteriormente publicados e do cadastro de 17 poços nos municípios de Capivari e Rafard pelo Instituto Geológico. As informações reunidas incluem: descrição de testemunhos dos 17 poços; perfis de Raios Gama para 4 poços; e perfilagem de Raios Gama, Sônico e Indução para o poço C-IG/98.

Para as análises estatísticas, as litologias catalogadas foram divididas em 6 fácies litológicas, escolhidas de modo a realçar as litologias com qualidade de reservatório, são elas:

- 1: Lamito, argilito, silito e ritmito.
- 2: Arenito muito fino.
- 3: Arenito fino.
- 4: Arenito médio.
- 5: Arenito grosso.
- 6: Conglomerado, diamictito e brecha.

Para o desenvolvimento do estudo, foram utilizados os softwares estatísticos R e SgeMS, e para a preparação e manipulação dos dados foram utilizadas rotinas de programação em Visual Basic.

1.4 – Área de estudo

Os poços estudados localizam-se nos municípios de Capivari e Rafard, situados na porção centro-leste do Estado de São Paulo. As cidades ocupam uma área territorial de aproximadamente 450 km² e distam cerca de 110 km da capital São Paulo. O acesso aos municípios pode ser feito pelas Rodovias do Açúcar e Castelo Branco (figura 1.1).

Mapa Geológico - Região Capivari-Rafard

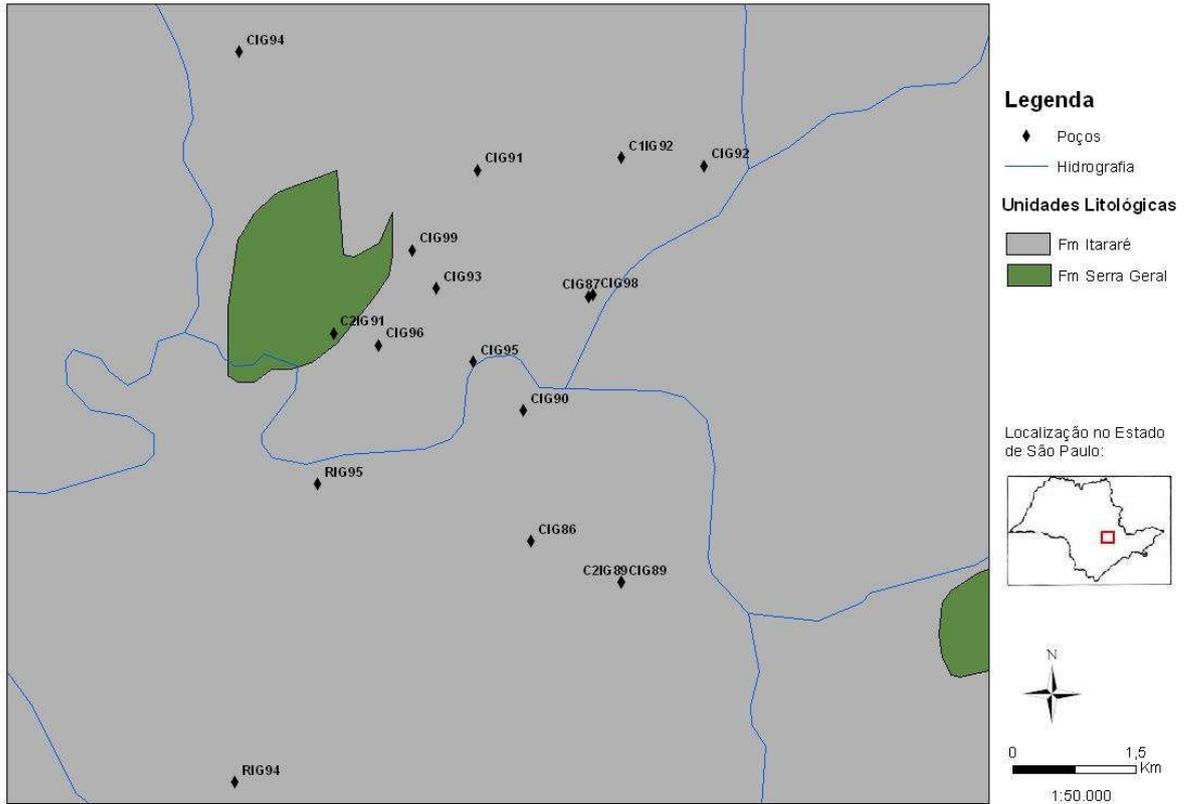


Figura 1.1: Mapa geológico da região de Capivari-Rafard com a localização dos poços estudados.

CAPÍTULO 2 – CONTEXTO GEOLÓGICO

O objetivo deste tópico é situar o Grupo Itararé, alvo deste estudo, no contexto de deposição da Bacia do Paraná, suas características no Estado de São Paulo e na região de Capivari-Rafard, onde estão localizados os poços estudados.

2.1 – Na Bacia do Paraná

A Bacia do Paraná é do tipo intracratônica, com aproximadamente 1.600.000 km² distribuídos entre Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai, sendo 1.100.000 km² localizados no território brasileiro. A bacia foi formada no supercontinete Gondwana por subsidência termal da crosta após múltiplas colisões durante o Ciclo Orogênico Brasileiro-Panafricano (Zalán et al. 1990).

A bacia atinge até 6.000 m de espessura de rochas sedimentares e vulcânicas (figura 2.1), dividida, segundo Milani & Ramos (1998), em seis supersequências de deposição : Rio Ivaí (Ordovício-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero- Eotriássico), Gondwana II (Neotriássico), Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo). As três primeiras supersequências correspondem a grandes ciclos transgressivos paleozóicos, enquanto as demais são representadas por sedimentação continental e rochas ígneas associadas.

O Grupo Itararé pertence a supersequência Gondwana I, que compreende desde a sedimentação sob influência glacial, ocorrida durante o Neocarbonífero, até o domínio da acumulação na forma de dunas eólicas no Eotriássico, sendo o Grupo Itararé depositado no intervalo do Neocarbonífero ao Eopermiano, sob influência glacial.

A deposição do Grupo Itararé é dividida em três ciclos, segundo França & Potter, 1988:

- Unidade inferior: Formação Lagoa Azul, formada pelo Membro Tarabaí, constituído por lamitos seixosos intercalados com arenitos, e Membro Cuiabá Paulista, constituído por arenitos finos.

- Unidade intermediária: Formação Campo Mourão, constituída por siltitos, folhelhos e lamitos seixosos intercalados com arenitos. Na parte basal apresenta arenitos grossos a médios e conglomeráticos.

- Unidade superior: Formação Taciba, formada pelo Membro Chapéu do Sol, constituído por lamitos seixosos intercalados com arenitos, e Membro Rio Segredo, constituído por arenitos grossos com ocorrências de carbonatos e bioturbação.

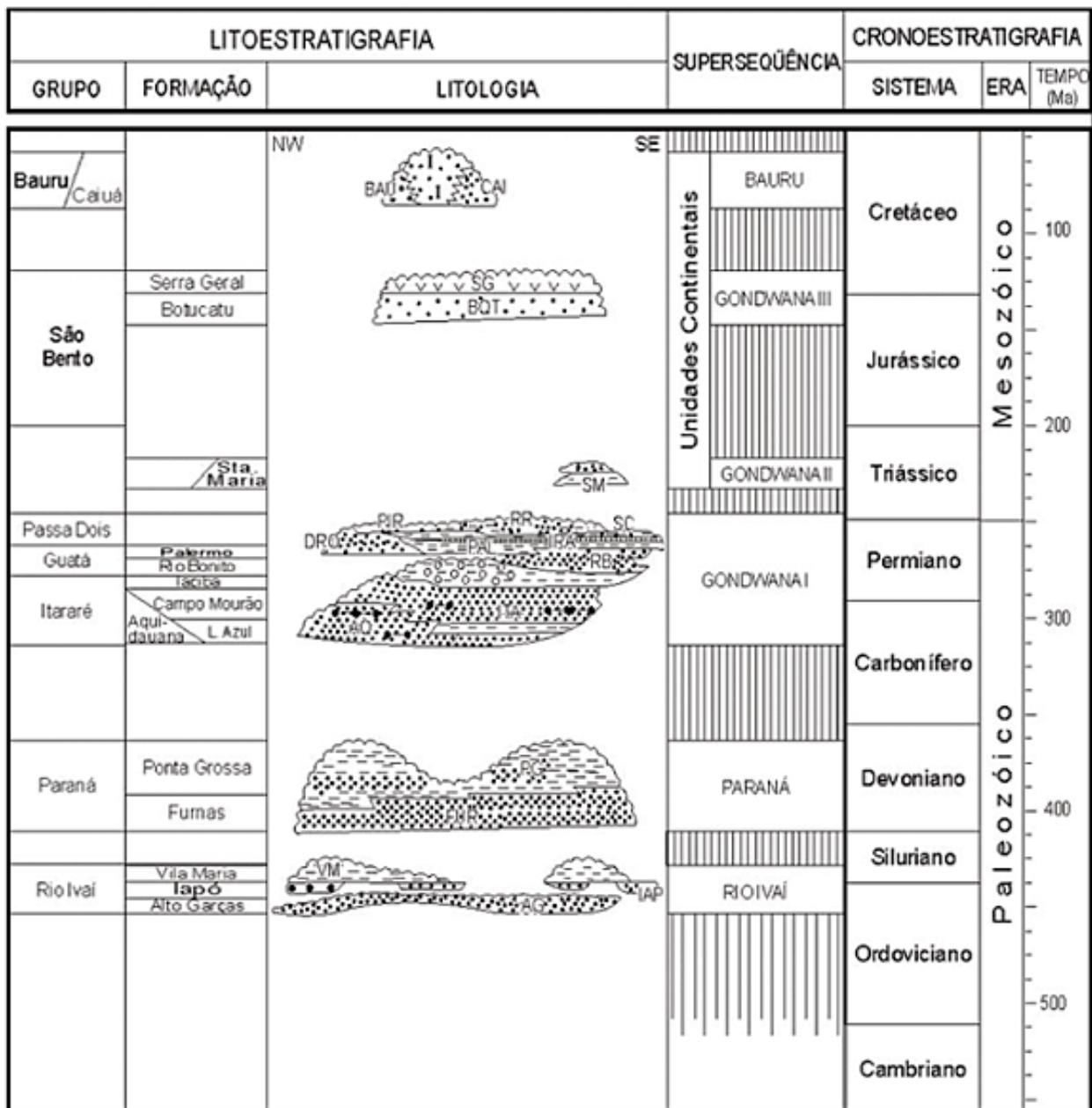


Figura 2.1: Coluna Estratigráfica da Bacia do Paraná (modificada de Milani, 1997).

2.2 – No Estado de São Paulo

No Estado de São Paulo, a unidade Itararé encontra-se indivisa em muitos trabalhos, sendo reconhecida como Subgrupo Itararé, pertencente ao Grupo Tubarão (Vidal, 2002). Vários autores classificam as rochas do Grupo Tubarão de maneiras diferentes. Saad (1977) relacionou diversas classificações na tabela 2.1.

Tabela 2.1: Evolução da classificação e nomenclatura do Grupo Tubarão na área de estudo:

PACHECO (1927)	WASHBURNE (1930)	BARBOSA & GOMES (1958)	PETRI (1964)	SCHNEIDER et. al. (1974)	SOARES et. al. (1973)
TATUÍ	FM TATUÍ	FM ITAPETININGA	FM TATUÍ	FM PALERMO FM RIO BONITO	FM TATUÍ
GLACIAL	FM ITARARÉ	FM TIETÊ FM GRAMADINHO FM CAPIVARI FM ELIAS FAUSTO FM ITU	SUBGRUPO ITARARÉ	GRUPO ITARARÉ	SUBGRUPO ITARARÉ

Fonte: modificada de Saad (1977).

Saad (1977) estudou os sedimentos do Subgrupo Itararé no centro e sul do Estado de São Paulo, dividindo-o em quatro pacotes litológicos distintos, da base para o topo:

Pacote D: clásticos finos associados a diamictitos e clásticos grossos, na região centro-leste. Em direção ao sul, predominam diamictitos e clásticos grossos em relação aos finos.

Pacote C: maior incidência de clásticos finos, ocorrendo, subsidiariamente, diamictitos e clásticos grossos.

Pacote B: grande quantidade de clásticos finos, associados a diamictitos e clásticos grossos, na parte centro-leste, enquanto que em direção ao sul e a nordeste voltam a predominar clásticos grossos e diamictitos, em relação aos sedimentos mais finos.

Pacote A: mesma situação do pacote C. Tanto na região centro-leste, como na centro-sul, há maior incidência de clásticos finos, em relação aos grossos e diamictitos. Na região nordeste predominam os clásticos grossos sobre os demais termos litológicos.

O início da sedimentação do pacote D ocorreu sobre um embasamento de topografia irregular, com regiões intrabassinais deprimidas de orientação geral SE-NO e regiões elevadas. Essa disposição gerou a variação lateral de fácies encontrada neste pacote. Após a deposição do conjunto D, a sub-bacia regional parece ter passado por um período de calma tectônica, fazendo com que os movimentos de avanço e recuo das geleiras fossem os movimentos predominantes. Esta característica é evidenciada pela maior porcentagem de clásticos finos e pelo registro de intercalações marinhas no pacote C. Na época de deposição do pacote B, teve início um levantamento gradual da borda nordeste da Bacia, que se manteve até o final da deposição do Subgrupo. Durante a deposição do pacote A, predominou, na região nordeste, a sedimentação continental, gradando, em direção ao sul, para sedimentação com influências marinhas, sendo os sedimentos a nordeste mais grossos do que nas regiões centro-leste e centro-sul (Saad, op. cit.).

2.3 – Na região de Capivari-Rafard

Na região de Capivari-Rafard afloram as rochas do Subgrupo Itararé e intrusivas básicas (figura 2.2).

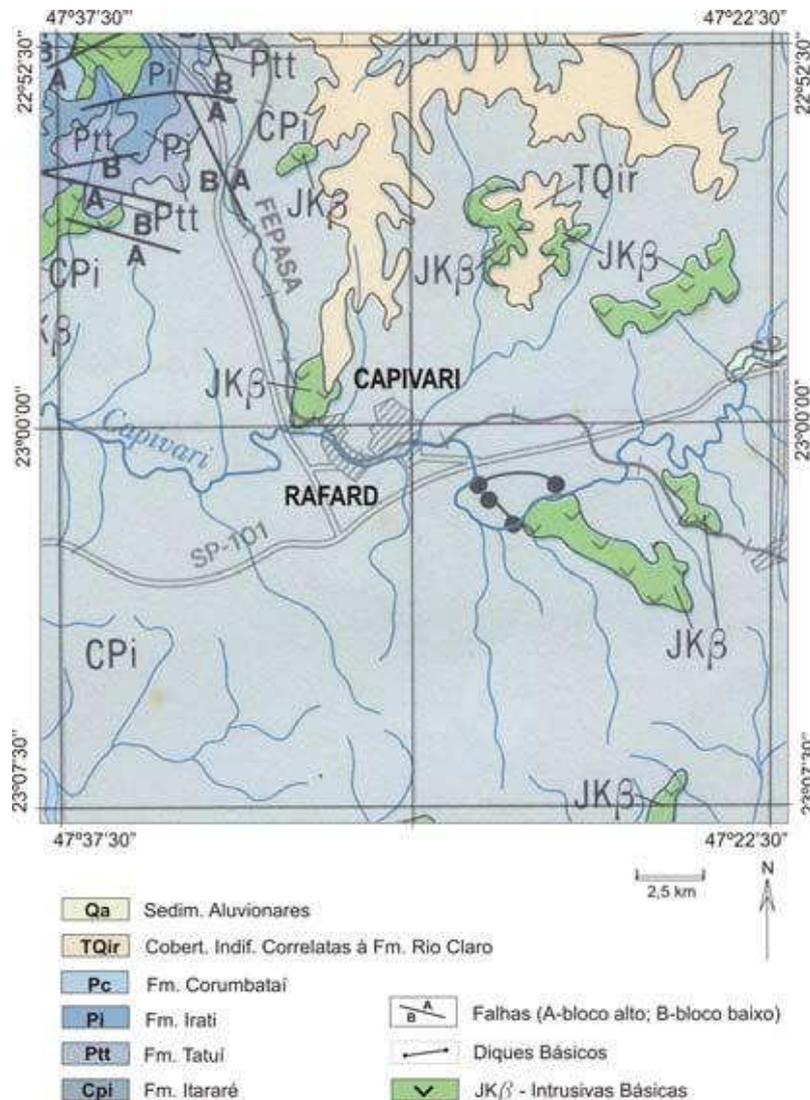


Figura 2.2: Mapa geológico da região de Capivari e Rafard (IPT, 1981)

Os depósitos nesta região são resultado de um episódio transgressivo marinho, caracterizando uma sequência retrogradacional que expandiu os limites da bacia sedimentar pretérita (Petri & Pires, 1992).

Petri & Pires (1991) identificaram 6 fácies sedimentares diferentes para a região de Capivari-Rafard, e com a interpretação de suas gêneses propuseram um modelo paleogeográfico para a área.

Fácies A: predominantemente argilosa, apresentando bancos espessos de argilito maciço ou finamente laminado, lamitos.

Fácies B: conglomerados polimíticos, com seixos de rochas metamórficas e ígneas do embasamento da Bacia do Paraná. Estas fácies são matriz-suportadas, com matriz areno-silto-argilosa, sendo classificados como diamictitos. A ocorrência dos diamictitos tem origem em canais escavados nas fácies argilosas (Fácies A), muitas vezes incorporando material fino por erosão.

Fácies C: arenitos grossos, médios, finos e, subordinadamente, conglomerados. Estão dispostos em bancos arenosos de grandes dimensões cortando as fácies argilosas. Os bancos apresentam granodecrescência ascendente e contatos basais erosivos.

Fácies D: arenitos finos a muito finos dispostos em bancos espessos, associados a blocos métricos constituídos de arenitos finos a muito finos, argilitos e conglomerados.

Fácies E: arenitos finos a médios, localmente grossos, mal selecionados, classificados como brechas intraformacionais. Apresentam granodecrescência ascendente, laminações plano-paralelas e laminações cruzadas cavalgantes. Estas camadas encontram-se muito deformadas devido aos movimentos de deslizamento (slides e slumps) pelos quais foram geradas.

Fácies F: diamictitos de matriz silto-arenosa, sem estruturas sedimentares, com seixos de rochas metamórficas e ígneas do embasamento da Bacia do Paraná. Afloram em grande porção da área a oeste, estando associados a topografias elevadas. São interpretados como fluxos de detritos não canalizados em porções distais, possivelmente devido a variações laterais e temporais de leques submarinos.

A deposição do Subgrupo Itararé na área estudada originou-se de um leque submarino, através de sedimentos redepositados por fluxos de detritos, corridas de lama, correntes de turbidez e deslizamentos, transportados por movimentos gravitacionais e depositados em ambientes de águas calmas e profundas (Petri & Pires, 1991). A ocorrência de tais movimentos implicam em declives acentuados do ambiente de deposição, sendo encontradas na base deste declive as brechas intraformacionais. Os canais de fluxos de detritos nos quais ocorreram a deposição dos diamictitos possuem direção SW-NE, comprovada pela descrição de seis poços na região de Capivari-Rafard por Petri (1992), que evidencia a correlação dos paleocanais entre os poços descritos neste sentido. Além disso, as estratificações cruzadas cavalgantes geradas pelos movimentos gravitacionais observadas em afloramentos indicam transporte para SW (Petri & Pires, 1991). Dessa forma, infere-se uma rampa de deposição pretérita SW-NE, com mergulho para SW e fonte de sedimentos situada a NE. A figura 2.3 mostra o esquema do ambiente pretérito de deposição na região.

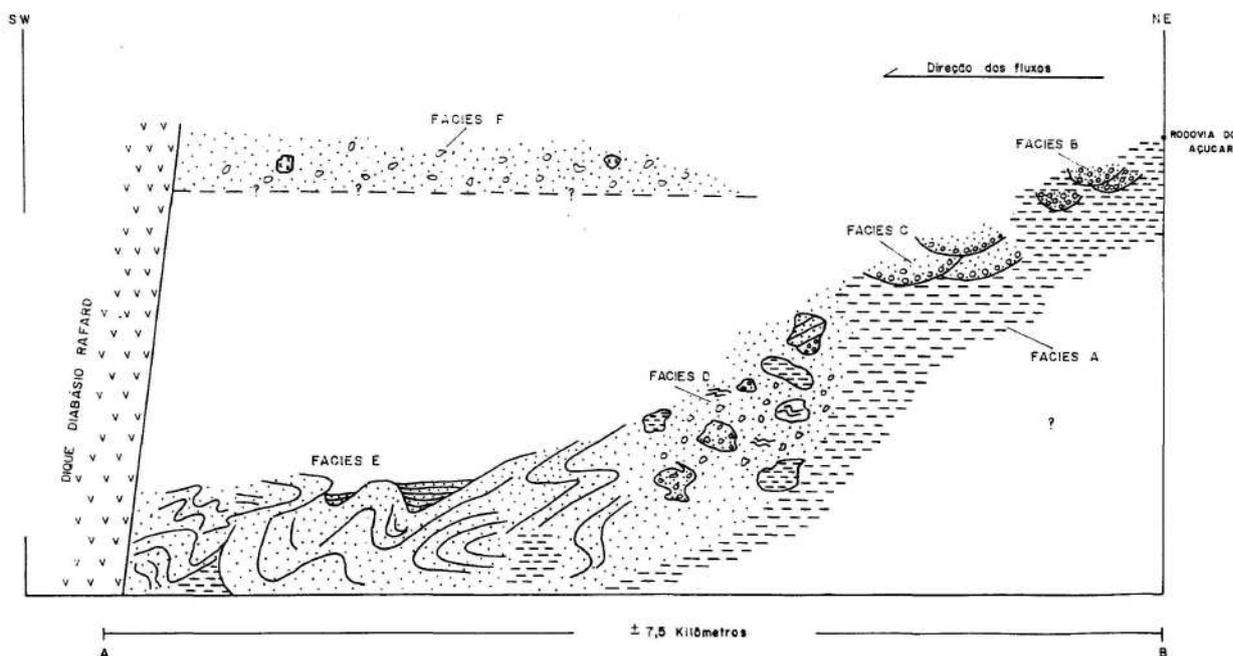


Figura 2.3: Corte esquemático na região estudada, mostrando as associações de fácies do leque submarino (Petri & Pires, 1991).

Petri et. al. (1996a) correlacionaram estratigraficamente três poços localizados nos municípios de Capivari e Rafard, C-IG/93, R-IG/94 e R-IG/95, e reconheceram quatro pacotes principais de sedimentação para a região, da base para o topo:

Pacote D: constituído por brechas e conglomerados matriz suportados e arenitos com grânulos muito grossos, grossos e médios.

Pacote C: caracterizado por apresentar o maior conteúdo em sedimentos finos. Constituído por lamitos, siltitos, ritmitos e lâminas finas no interior de arenitos finos e médios. A contagem de raios gama aumenta no intervalo deste pacote.

Pacote B: constituído na base por arenitos mais grossos, com fácies sedimentares condicionadas pela variação de argila, e no topo por arenitos com alta emissão de raios gama, concomitantemente com o aumento da resistividade elétrica devido a cimentação carbonática no topo do pacote. O contato com o pacote A é marcado por uma camada de sedimentos clásticos grossos.

Pacote A: este pacote representa o afogamento da bacia pela subida do mar Capivari, marcada pela granodecrescência ascendente com aumento de argila para o topo. A contagem de raios gama aumenta neste pacote e a resistividade elétrica diminui.

Os pacotes definidos por Petri et. al. (1996a) para a área de Capivari-Rafard assemelham-se aos pacotes definidos por Saad (1977) para o centro e sul do Estado de São Paulo, havendo uma alternância de pacotes com maior incidência de sedimentos finos (A e C) e pacotes com sedimentos mais grossos (B e D).

A sequência de deposição do Sugrupo Itararé na área de estudo foi dividida em duas unidades por Petri & Pires (1992), Formações Itu e Capivari. A Formação Itu é predominantemente arenosa e pertence a depósitos marginais fluvio-deltaicos, enquanto a Formação Capivari é predominantemente constituída por depósitos finos e subordinadamente arenitos e diamictitos, representando depósitos marinhos que transgridem sobre a Formação Itu, em contato transicional. O ritmito “varvito de Itu” representa um marco transgressivo, indicando a base da Formação Capivari, a qual é representativa de um mar proveniente de sudoeste, sempre presente durante o resto da deposição do Itararé, e avançando gradativamente para nordeste (Petri & Pires, 1992).

A Formação Capivari registra a presença de mar através de fósseis marinhos, encontrando-se na cidade de Capivari as únicas evidencias de salinidade marinha sem influências de água doce (Petri & Pires, 1992). A assembléia faunística de Capivari é a mais diversificada no Subgrupo Itararé, incluindo os bivalves *Limipecten capivariensis* e *Phestia* sp., *Streblopteria* sp., os braquiópodes *Attenuatella* s.p. e *Rhynchopora grossopunctata* Mendes, e o gastrópode *Peruvispira delicata* Chronic, além de coloniais de crinóides (Mendes, 1952 apud Saad, 1977). Estes fósseis indicam idade Eopermiana.

A Formação Tatuí, equivalente ao Grupo Guatá na porção sul da bacia, se sobrepõe a Formação Capivari em contato transicional e representa o máximo de transgressão marinha na área, representando o início do ciclo de deposição pós-glacial na Bacia do Paraná, de idade permiana (Fúlfaro et al., 1991). A passagem do mar Capivari para o mar Tatuí, na região estudada, teria sido contínua, avançando para nordeste. Na área de estudo, a Formação Tatuí está representada por ritmitos, inclusive ritmitos calcários (Petri & Pires, 1992).

A subdivisão tripartite do Itararé paulista foi utilizada também por França & Potter (1988): Formações Lagoa Azul, Campo Mourão e Taciba. Contudo, as diferentes subdivisões se devem a grande extensão da Bacia do Paraná no território brasileiro, e seus complexos mecanismos de deposição. Os ambientes de sedimentação são particulares para cada área, originando diferentes geometrias e padrões de empilhamento, e assim diferentes classificações dos sedimentos. Além disso, França & Potter (op. cit.) admitiram que os sedimentos situados no depocentro da bacia seriam os mais antigos, enquanto os sedimentos das bordas seriam mais novos, provavelmente devido a maior subsidência da bacia na área central, que teria permitido o

acúmulo dos sedimentos da base da sequência, enquanto nas bordas estes sedimentos teriam sido erodidos com o tempo. No entanto, alguns desses sedimentos devem ter sido preservados, pois fósseis marinhos na borda centro-leste do Estado de São Paulo foram datados de idades do Neocarbonífero e também do Eopermiano (Petri & Pires, 1992).

CAPÍTULO 3 – CARACTERIZAÇÃO LITOLÓGICA DO POÇO C-IG/98

O Poço C-IG/98 está localizado na região leste do município de Capivari, no bairro loteamento Santa Rita, com coordenadas UTM de 244700 EW e 7454900 NS (figura 1.1).

O poço está inserido nos depósitos do Subgrupo Itararé, posicionados sobre o embasamento na região centro-oriental (Vidal, 2002), apresentando testemunhagem contínua em 300 m de profundidade.

3.1 – Descrição dos testemunhos

A definição da litologia do poço foi realizada com base na descrição de 376 amostras macroscópicas de variadas profundidades, classificadas conforme granulometria, estruturas sedimentares, grau de seleção e cor, definindo o perfil litológico do poço com base nessas propriedades (figura 3.1).

As amostras descritas são compostas 72% por arenitos, 20% por lamitos, 5% por siltitos e argilitos, 2% por ritmitos e 1% por conglomerados. As cores variam de cinza escuro a amarelo claro, sendo que os tons de cinza referem-se aos sedimentos finos e os tons de amarelo aos sedimentos mais grossos.

Os testemunhos apresentaram, em geral, boa seleção, sendo apenas 20% com seleção média e 3% com baixa seleção.

As litologias arenosas foram classificadas de acordo com sua granulometria em arenito muito fino, arenito fino, arenito médio a fino e arenito médio. Os arenitos muito finos e finos mostraram, em geral, laminações plano-paralelas e lentes de argila em 20% das amostras. Já os arenitos finos e médios apresentaram-se sempre maciços, com poucas lentes argilosas. Alguns arenitos finos apresentaram pequenos seixos, sendo classificados com baixa seleção.

Os lamitos foram divididos em duas categorias, os lamitos maciços com alta seleção e os lamitos arenosos, com seleção média, por apresentarem clastos milimétricos dispersos na matriz.

Os argilitos apresentaram-se maciços, bem selecionados, enquanto os siltitos apresentaram lentes argilosas centimétricas na maioria das amostras.

Os ritmitos apresentaram boa seleção e laminações plano-paralelas na fração silte.

Os conglomerados apresentam baixas seleções, apresentando grãos grossos e seixos dispersos na matriz fina, com seixos de rochas ígneas e metamórficas do embasamento da Bacia do Paraná.

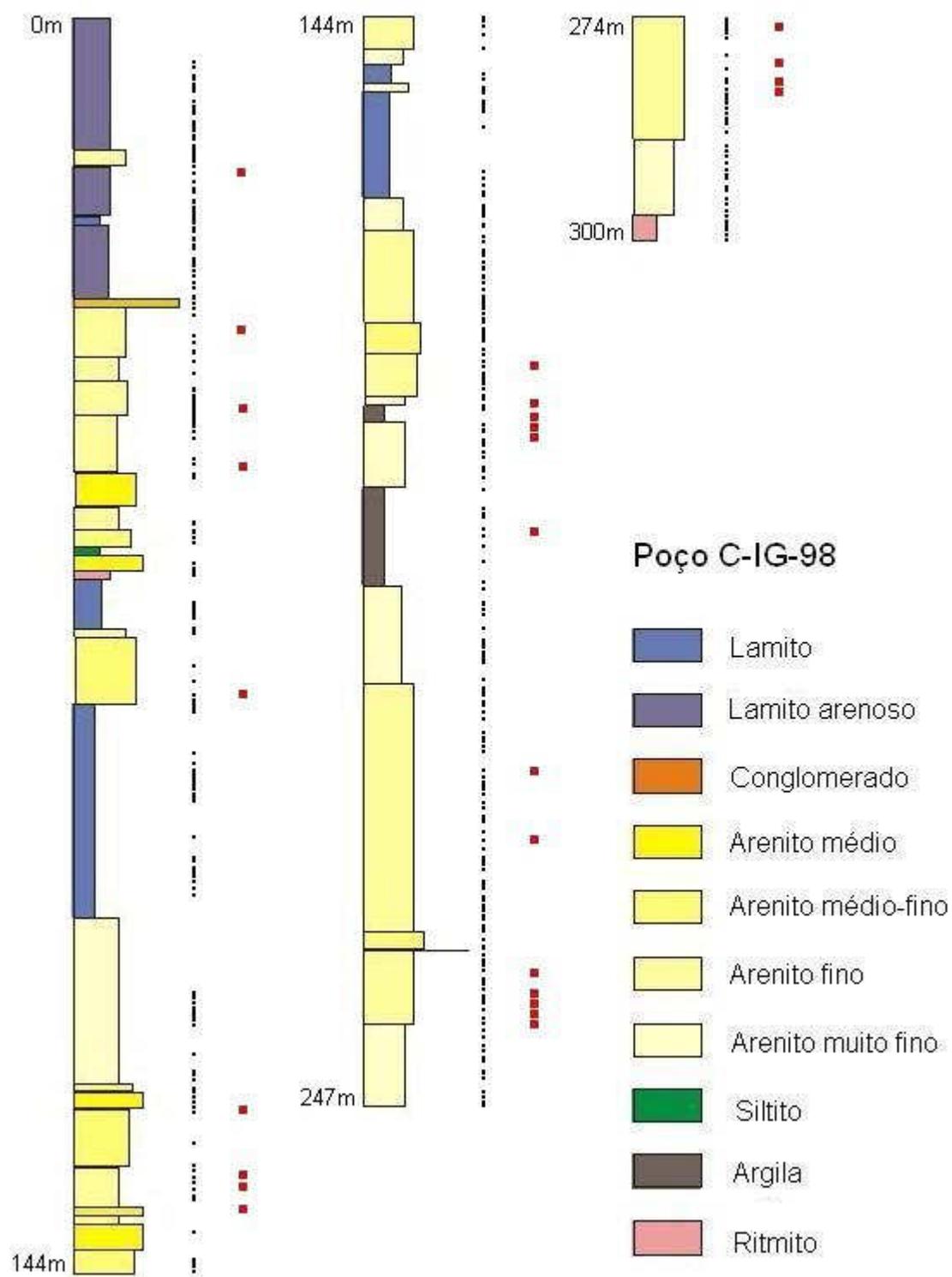


Figura 3.1: Perfil litológico do Poço C-IG-98, representadas as profundidades com descrição de amostras macroscópicas em preto e lâminas petrográficas em vermelho (modificado de Vidal, 2002).

3.2 - Petrografia

A análise petrográfica convencional foi realizada em 37 lâminas de variadas profundidades, impregnadas com resina epoxy azul. Foi realizada a contagem modal de 150 pontos, em média, em cada lâmina, considerando quartzo monocristalino e quartzo policristalino, feldspatos, fragmentos líticos, matriz, cimento e porosidade.

Tabela 3.1: Síntese resumida das texturas (valores em porcentagem total da lâmina).

Lâmina	Gran. (mm)	Qm	Qp	Felds.	Frag. Lítico	Matriz	Opacos	Calcita	Clorita	Porosidade
17	0,09	73	1	6	4	0	0	6		10
17,6	0,10	80	1	3	0	0	2	6		9
18,5	0,23	60	1	17	2	1	13	5		14
35,7	0,22	68	2	6	7	0	1	3		14
36	0,20	69	3	8	4	0	0	2		14
44,1	0,20	76	1	5	5	0	3	8		5
51,5	0,21	77	1	4	3	3	0	7		6
65,5	0,12	79	1	6	2	1	2			12
76	0,20	80	1	6	4	0	2			11
77,5	0,21	78	1	5	5	0	2	1		10
111	0,20	76	0	7	3	3	2	5		6
124,5	0,16	64	2	8	6	1	0	9		9
132	0,15	62	2	8	9	0	2	11		9
133	0,15	68	2	6	7	0	1	10		8
141	0,20	70	2	7	6	0	7	4		10
143	0,18	76	0	3	2	1	2	3		15
143,5	0,21	68	1	7	6	1	7	3		14
175,5	0,22	70	0	6	5	2	3	8		8
187,5	0,18	67	0	9	5	1	3	7		13
189,5	0,17	75	0	5	1	1	2	10		9
190	0,18	72	0	2	9	0	3	7		10
191	0,09	80	0	6	2	0	5	5		7
202	0,12	73	2	2	0	1	0	20		4
229	0,08	78	0	5	1	0	6			17
236,5	0,12	76	1	6	1	1	1	12		3
238	0,14	75	0	7	5	1	14			10
242	0,11	68	1	7	5	0	2	7		12
245	0,10	76	0	7	1	0	2	3	7	8
252,5	0,12	69	0	4	6	0	1	7	5	11

258	0,16	75	1	2	4	0	0	7	3	9
260	0,12	79	1	8	7	0	1		2	3
261	0,14	81	1	5	3	0	1		2	10
274,5	0,15	75	1	6	4	0	0	7	3	7
279,5	0,17	64	2	12	1	1	4	5		17
281,5	0,18	76	1	3	6	0	2			11
282	0,17	77	5	5	4	0	0			9
283	0,18	67	1	10	5	1	1			16

O arcabouço rochoso apresentou, em geral, grãos subarredondados a subangulosos, com contato pontual. Alta porcentagem em quartzo, com predomínio de quartzo monocristalino (>95%). Matriz raramente foi encontrada, indicando maturidade mineralógica dos arenitos (figura 3.2). Os feldspatos mais encontrados foram os plagiocásios, e secundariamente, os potássicos. Os fragmentos líticos apresentaram granulometrias maiores que os grãos do arcabouço, sendo de origem principalmente sedimentar e, secundariamente, metamórfica.

Os arenitos em geral são bem selecionados, com algumas lâminas apresentando intercalações de arenito fino e arenito muito fino (figura 3.2).

A porosidade intergranular foi a mais frequente em todas as lâminas, sendo encontradas também porosidades intragranulares e móldicas.

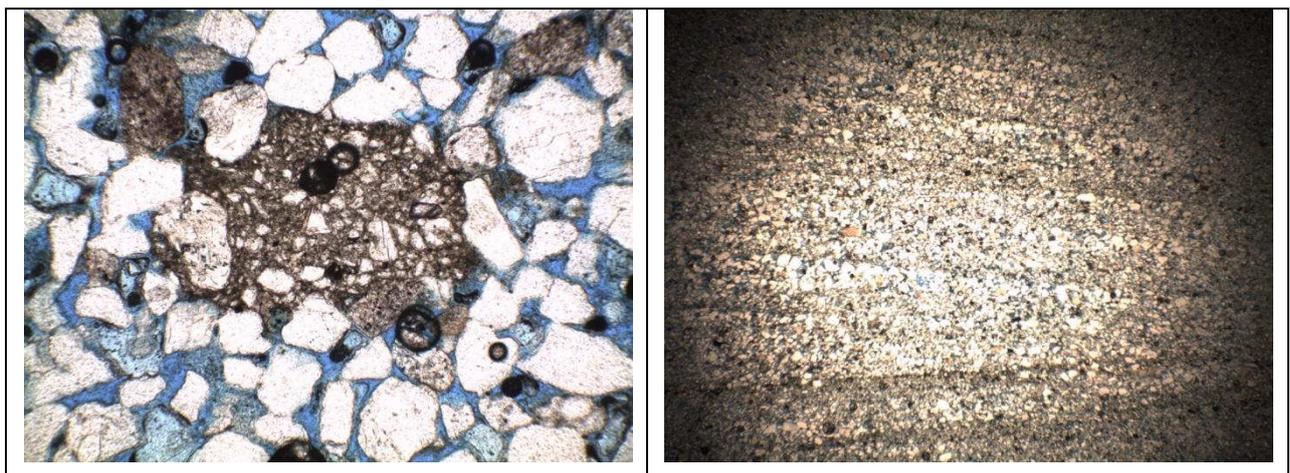


Figura 3.2: Fotomicrografias mostrando o arcabouço rochoso. Esquerda: matriz, grãos subarredondados a subangulosos, contato pontual e porosidade intergranular (10x-LP). Direita: intercalação de arenito fino e arenito muito fino (2.5x-LP).

3.2.1 – Classificação e Proveniência

A classificação das amostras foi feita a partir das porcentagens normalizadas de sedimentos clásticos (quartzo, feldspato e fragmentos líticos) segundo diagrama QFL de Folk (1968). As amostras foram classificadas como arenitos subarcóseos em 82% dos casos e o restante como sublitoarenitos.

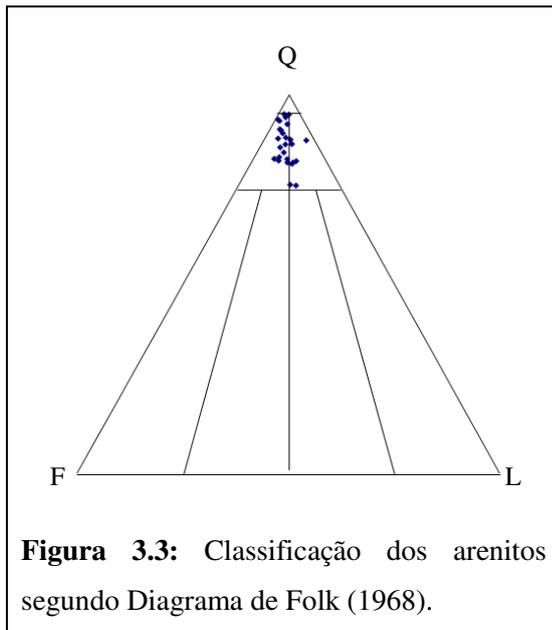


Figura 3.3: Classificação dos arenitos segundo Diagrama de Folk (1968).

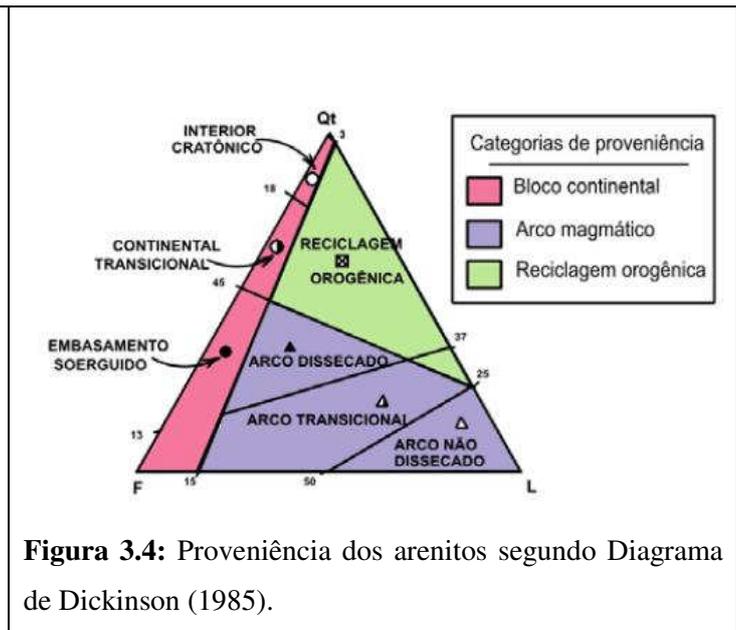


Figura 3.4: Proveniência dos arenitos segundo Diagrama de Dickinson (1985).

Nas amostras classificadas como subarcóseas, os grãos do arcabouço dos arenitos apresentaram alta porcentagem em quartzo (maior que 78%), moderada porcentagem em feldspato (menor que 15%) e poucos fragmentos líticos (menor que 8%). Os arenitos classificados como sublitoarenitos apresentaram alta porcentagem em quartzo, moderada porcentagem em feldspato e os fragmentos líticos representaram 12% dos sedimentos detríticos.

A classificação dos arenitos, segundo diagrama QFL de Dickinson (1985), indica proveniência de interior cratônico e reciclagem orogênica, em concordância com o trabalho realizado por França (1987), que mostrou que os arenitos do Subgrupo Itararé, em toda Bacia do Paraná, são oriundos de reciclagem orogênica e de bloco continental.

O embasamento da Bacia do Paraná é constituído por núcleos cratônicos, limitados por cinturões móveis orogênicos, formados a partir da colisão de diversos crátons durante o Ciclo Brasileiro (Zalán et. al. 1987 apud Bocardi, 2005).

Arenitos provenientes de crátons estáveis são depositados sobre o próprio cráton ou ao longo das margens continentais sob tectônica do tipo rifte, são caracterizados pela presença de

grande quantidade de quartzo e de poucos fragmentos líticos. Estes arenitos são mais maduros e refletem sua derivação a partir de complexos cristalinos cratônicos e de rochas sedimentares existentes sobre a plataforma. São tipicamente policíclicos e podem conter mais de 95% de quartzo monocristalino (Wu et al., 1991).

Arenitos provenientes de reciclagem orogênica são sequências sedimentares deformadas e soergidas nas zonas de subducção, ao longo de faixas de colisão ou dentro de cinturões de dobramento e empurrão. Os arenitos descritos enquadram-se, segundo conceitos de Wu (op. cit.), em sedimentos provenientes de cinturões de dobramento ou de bloco continental, apresentando em ambos os casos alto conteúdo em quartzo.

Assim, a proveniência dos arenitos do Subgrupo Itararé está ligada a evolução tectônica da Bacia do Paraná e a evolução geológica do embasamento cristalino.

3.2.2 – Diagênese

A diagênese compreende os processos físicos e químicos que atuam nos sedimentos após sua deposição. Segundo Bocardi et al. (2008), a deposição do Grupo Itararé relaciona-se a um período em que ocorreram as maiores taxas de subsidência na Bacia do Paraná. Esta subsidência acentuada teve influência marcante na redução da porosidade por compactação. Com o progressivo aumento da profundidade de soterramento, as alterações diagenéticas passam a ser controladas por pressão e temperaturas mais elevadas.

A eodiagênese compreende os processos controlados pelo ambiente deposicional e estende-se desde próximo à superfície até aproximadamente 1 km de profundidade, com temperatura em torno de 50°C. Os processos são influenciados por mudanças relativas do nível do mar, fácies deposicionais e pela interação entre os fluidos. A mesodiagênese refere-se às condições de soterramento efetivo a partir de 1 km até cerca de 5 a 7 km de profundidade, abrangendo variações de 50°C a 200°C de temperatura (Bocardi, 2005). A telodiagênese ocorre quando unidades sedimentares, que foram submetidas a eodiagênese e mesodiagênese, são soergidas e sofrem influência de fluidos meteóricos.

Wu (1989) estudou os arenitos do Subgrupo Itararé no Sul do Estado de São Paulo, e observou em todo o material evidências de telodiagênese.

As alterações diagenéticas observadas neste estudo caracterizaram-se pela dissolução de grãos, substituição por argilominerais e cimentação por opacos, calcita e clorita.

Dissolução

A dissolução de grãos está presente em todo o perfil, principalmente em feldspatos, mas também em quartzos, fragmentos líticos e cimentação carbonática. A dissolução ocorre nas bordas e no interior dos grãos, ou atua na completa dissolução do grão, sendo responsável pela porosidade secundária da rocha (figura 3.5).

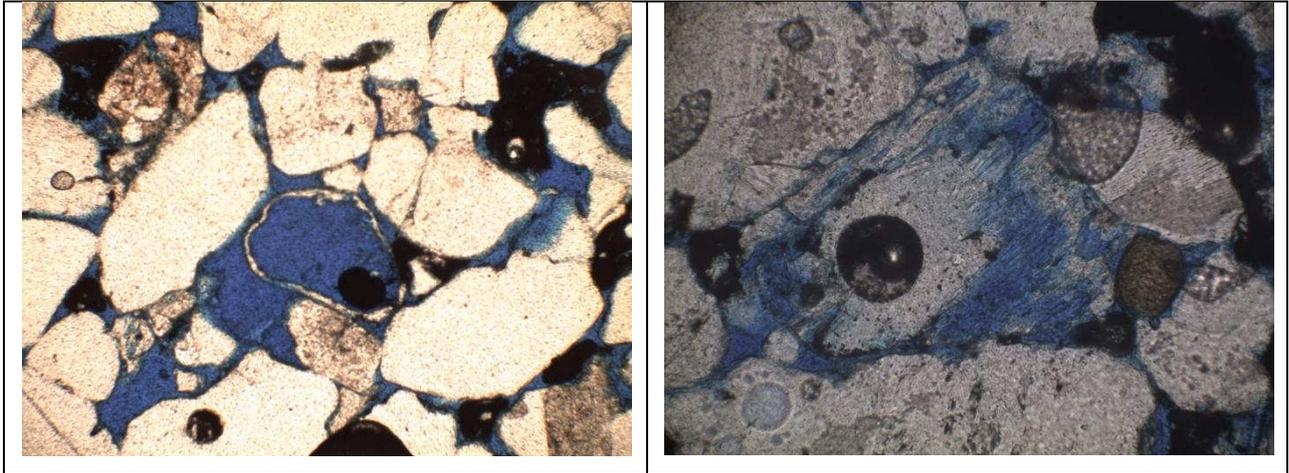


Figura 3.5: Fotomicrografias evidenciando processos diagenéticos. Esquerda: dissolução do grão de quartzo, restando apenas a borda (10x-LP). Direita: dissolução de feldspato (20x-LP).

A dissolução pode estar relacionada a processos na mesodiagênese ou telodiagênese. Segundo Bloch (1994), na mesodiagênese os mecanismos mais comuns utilizados para explicar a dissolução de grãos e cimentos em arenitos incluem o dióxido de carbono gerado como produto da maturação termal orgânica e as reações com ácidos carboxílicos durante a maturação termal da matéria orgânica.

Contudo, a dissolução observada nos feldspatos ocorre usualmente ao longo de clivagens e planos de fraturas (figura x), indicando ação de processos superficiais, sob baixa temperatura (Bocardi, 2005).

Dessa forma, a dissolução está relacionada a telodiagênese ocorrida em ambientes superficiais, onde a dissolução dos grãos é ocasionada pela percolação de água meteórica, com características ácidas e de baixa salinidade.

Tal afirmativa está em concordância com o trabalho de França (1987), que associa os processos de dissolução e criação de porosidade secundária ao estágio de telodiagênese .

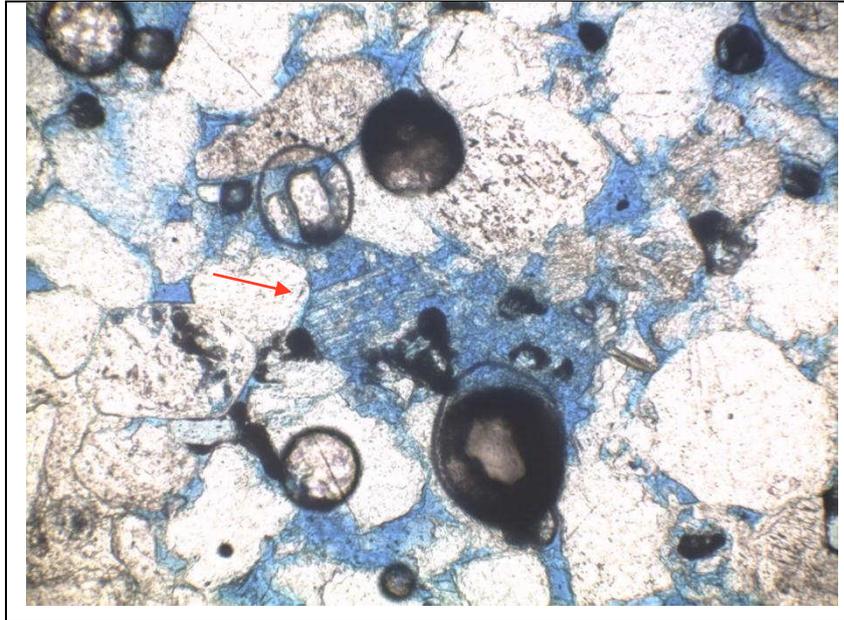


Figura 3.6: Fotomicrografias evidenciando dissolução do grão de feldspato preferencialmente nos planos de clivagem (seta).

Argilominerais

Como consequência à dissolução dos grãos, são liberados íons dissolvidos no meio poroso da rocha, que são responsáveis pela precipitação de argilominerais.

Os argilominerais são filossilicatos secundários, geralmente resultantes da hidrólise de aluminossilicatos primários por meio de processos hidrotérmicos de baixa temperatura (Krauskopf, 1972 apud Lima, 2008).

Os argilominerais diagenéticos foram encontrados ocupando os espaços porosos, cimentando os grãos na forma de concreções ou substituindo as bordas dos grãos.

Trabalhos anteriores constataram, através de análises de difração de Raios x e microscópio eletrônico de varredura, que os argilominerais presentes no poço C-IG/98 são compostos por caulinita (estrutura 1:1), illita e esmectita (estruturas 2:1) (Vidal et. al., 2006).

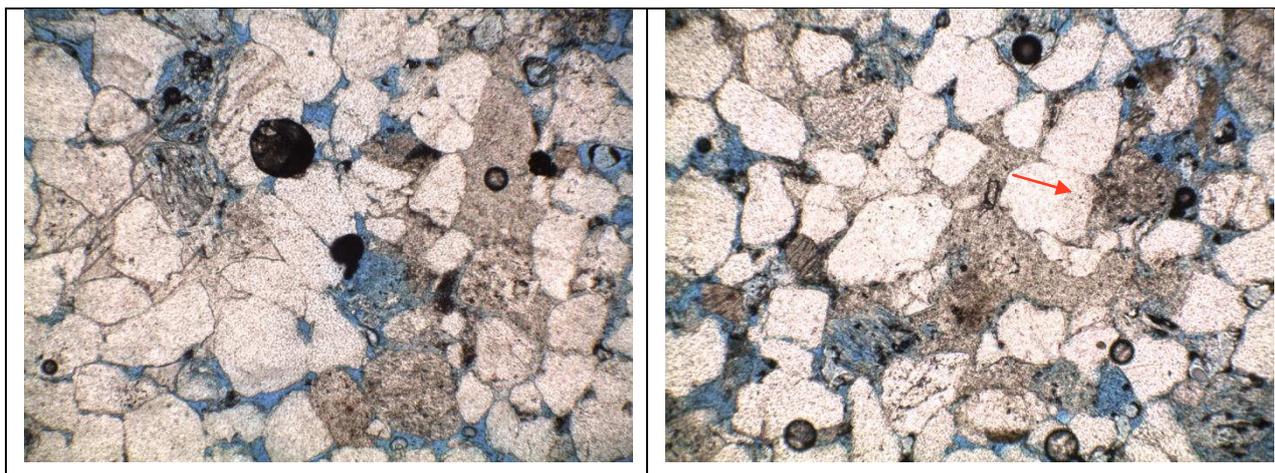


Figura 3.7: Fotomicrografias evidenciando processos diagenéticos. Esquerda: cimentação por argilominerais (10x-LP). Direita: cimentação e substituição da borda do grão por argilominerais (seta) (10x-LPA).

Opacos

A cimentação por opacos encontra-se distribuída por todo o perfil, não permitindo um zoneamento desse tipo de alteração. Apresenta-se ocupando os espaços porosos, tanto intergranulares como intragranulares.

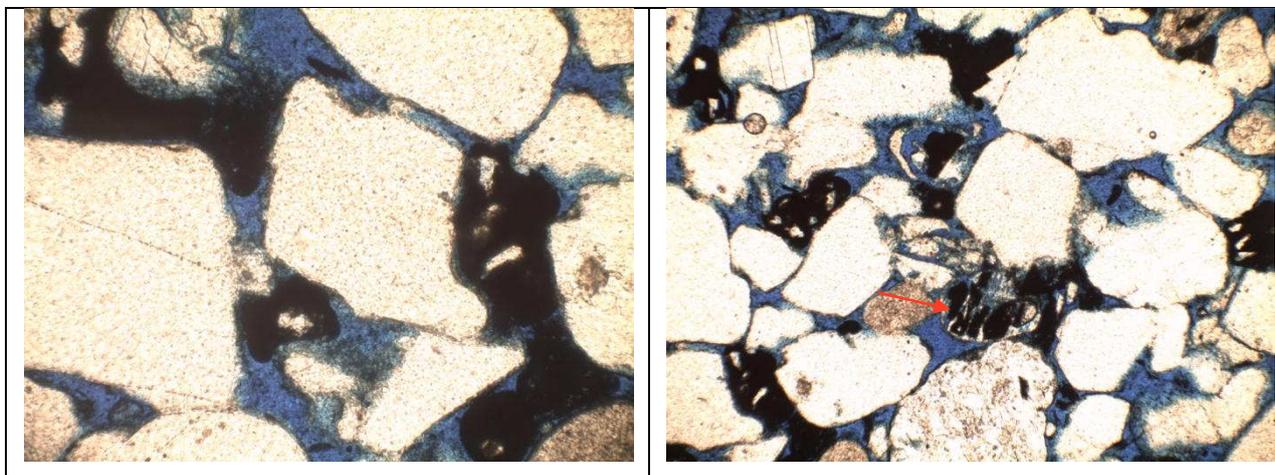


Figura 3.8: Fotomicrografias evidenciando processos diagenéticos. Esquerda: cimentação por opacos na porosidade intergranular (20x-LP). Direita: opaco ocupando a porosidade intragranular (seta) (10x-LP).

Nota-se que os opacos ocupam os poros gerados pela dissolução dos grãos, sendo posteriores a dissolução e, portanto, resultado da telodiagênese.

Wu (1989) classifica a cimentação por opacos como predominantemente ferruginosa (limonita e hematita).

A fonte do ferro pode ser a alteração de micas e minerais ferruginosos.

Calcita

A cimentação por calcita condicionada pela composição da rocha, ou proximidade a depósitos carbonáticos, e pela circulação dos fluidos no interior das camadas. Dessa forma, a cimentação está associada a maiores permeabilidades.

A cimentação por calcita ocorre por todo o perfil na forma poiquilotópica, como concreções de até 3mm, atingindo altas porcentagens a maiores profundidades.

Na profundidade de 202 m a cimentação por calcita foi observada em 20% da lâmina, este valor acima da média provavelmente deve-se ao fato deste intervalo arenoso estar isolado por camadas de argilito impermeáveis, concentrando o fluido naquele espaço.

Observou-se frequentemente a calcita substituindo ou corroendo os grãos de quartzo, feldspato e fragmentos líticos.

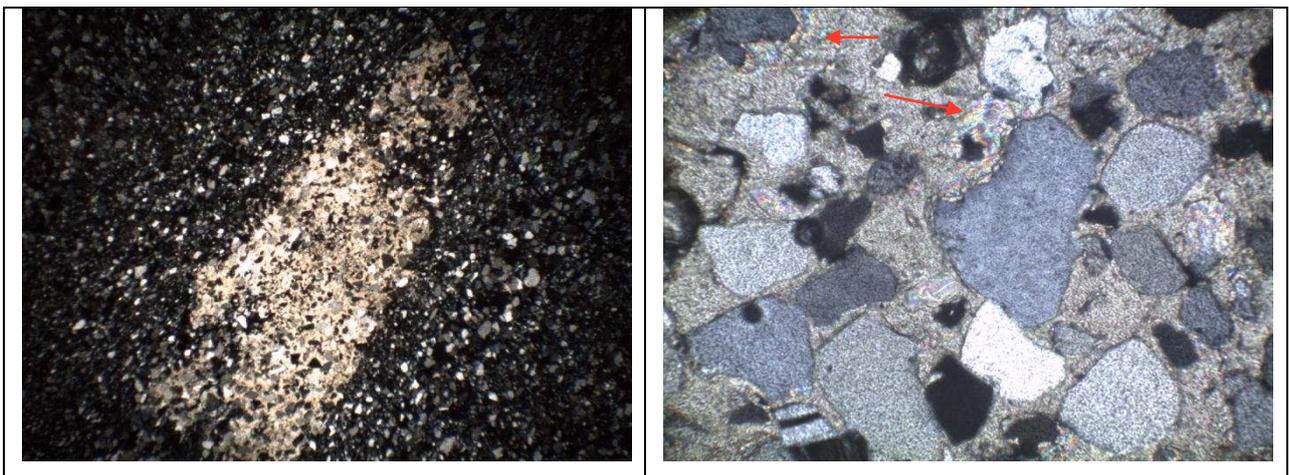


Figura 3.9: Fotomicrografias evidenciando processos diagenéticos. Esquerda: cimentação por calcita em forma poiquilotópica (2.5x-LPA). Direita: calcita corroendo as bordas dos grãos e substituindo anidrita (setas) (10x-LPA).

Clorita

A cimentação por clorita foi observada apenas em profundidades superiores a 230 m. A clorita é estável em condições de pH neutros a alcalinos e as águas de percolação, que são ácidas nas porções superiores, quando passam a profundidades maiores tornam-se mais alcalinas, possibilitando a fase de equilíbrio da clorita.

A cimentação por clorita ocorre na forma poiquilotópica nos espaços entre os grãos, ou substituindo os mesmos.

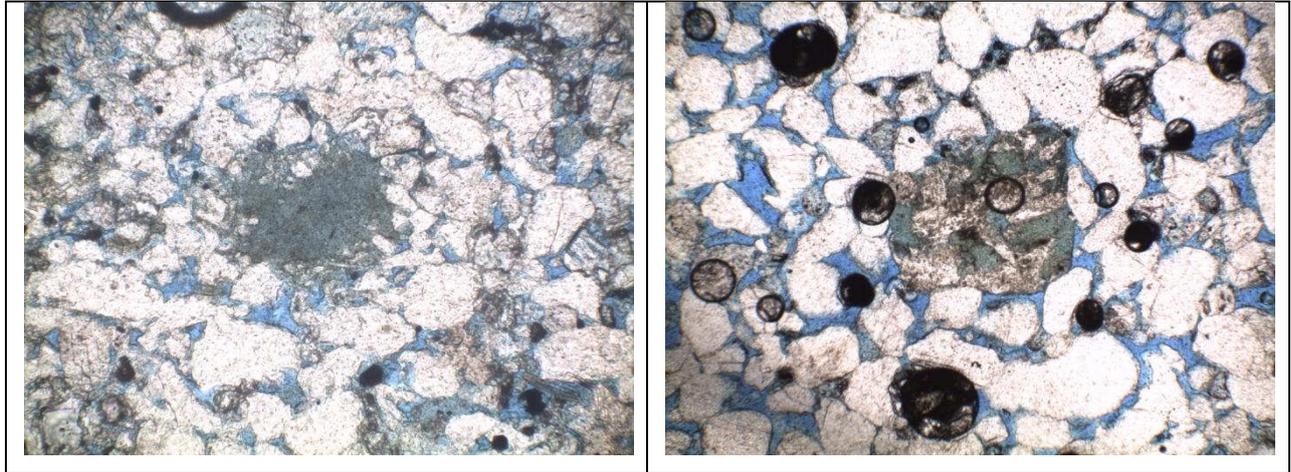


Figura 3.10: Fotomicrografias evidenciando processos diagenéticos. Esquerda: cimentação por clorita (20x-LP). Direita: Clorita substituindo os grãos (20x-LP).

Compactação mecânica

O processo de compactação mecânica pode ser diagnosticado pela deformação de intraclastos argilosos (figura 3.11). A redução de porosidade por compactação apresenta um aspecto irreversível na diminuição do sistema poroso e na geometria dos poros. Somadas, a compactação mecânica e a cimentação são os principais fatores responsáveis pela redução da porosidade.

A compactação mecânica ocorre devido ao soterramento e peso dos sedimentos sobrepostos na mesodiagênese, mas pode ocorrer a pequenas profundidades, logo após o soterramento, no domínio eodiagenético (De Ros & Moraes, 1984 apud Bocardi, 2005).



Figura 3.11: Fotomicrografia evidenciando compactação mecânica, muscovita deformada por grão de quartzo (10x-LPA).

CAPÍTULO 4 – PERFIS GEOFÍSICOS

4.1 – Perfilagem geofísica

A perfilagem geofísica consiste no registro contínuo dos parâmetros geofísicos captados ao longo da parede de um poço, por meio de ferramentas a cabo ou de ferramentas acopladas nas colunas de perfuração. Os valores medidos são associados à profundidade das informações obtidas dos poços (Rider, 2000).

Tabela 4.1: Medições mais comuns em Perfis Geofísicos de Poço.

Princípio Físico	Perfil	Parâmetro de Formação Medido
Medições Mecânicas	Calibre (Caliper)	Diâmetro do Poço
Medições Espontâneas	Temperatura	Temperatura do Poço
	Potencial Espontâneo	Correntes Elétricas Espontâneas
	Raios Gama	Radioatividade Natural
Medições Induzidas	Resistividade	Resistência à Corrente Elétrica
	Indução	Condutividade à Corrente Elétrica
	Sônico	Velocidade da Propagação do Som
	Densidade	Reação ao Bombardeamento de Raios Gama
	Fotoelétrico	Reação ao Bombardeamento de Raios Gama
	Neutrão	Reação ao Bombardeamento de Nêutrons

Fonte: Rosa (2006).

Utilizando-se os perfis geofísicos pode-se avaliar a qualidade e quantidade de hidrocarbonetos do reservatório, uma vez que os parâmetros geofísicos permitem o cálculo dos atributos físicos da rocha. Segundo Serra (1986), são necessários quatro principais parâmetros físicos (ϕ , Shc , Vhc e k) de reservatórios para que se possa avaliá-los em termos de qualidade e de comercialidade. A quantificação de óleo e gás do reservatório é obtida pelo produto da porosidade (ϕ) pela saturação de hidrocarbonetos (Shc), sendo que a porosidade corresponde ao volume poroso por unidade de volume de formação e a saturação de hidrocarbonetos corresponde à fração de volume poroso preenchido por hidrocarboneto. Para avaliar a qualidade do reservatório é importante conhecer o volume de formação de hidrocarbonetos (Vhc), calculado utilizando a área e espessura dos intervalos de acumulações de hidrocarbonetos, e a permeabilidade (k), que está diretamente relacionada a interconexão dos poros e permite o fluxo de hidrocarbonetos no interior do reservatório.

A perfilagem geofísica consiste em um método mais preciso que a amostragem do poço, pois os testemunhos não representam exatamente as profundidades as quais estão associadas. No caso dos testemunhos de poço, o problema são as litologias friáveis, com baixa coesão entre os grãos, nas quais a recuperação dos testemunhos é menor do que o intervalo amostrado, dificultando o posicionamento das amostras em relação a profundidade. Assim, os perfis auxiliam no correto posicionamento dos testemunhos amostrados.

4.1.1 – Perfil de Raios Gama

Os Raios Gama (RG) consistem em ondas eletromagnéticas emitidas espontaneamente pelas rochas, sendo que quase toda a radiação natural das rochas provém dos elementos K, Th e U. Os elementos radioativos tendem a se concentrar nas argilas e folhelhos e, por isso, o perfil de Raios Gama é um bom indicador de argilosidade, apresentando altos valores em rochas com alto grau de argilosidade e baixos valores para arenitos e rochas carbonáticas, com exceção dos arenitos arcósios (com alto conteúdo em feldspatos alcalinos) que devido a concentração de K apresentam altas leituras de radioatividade.

As principais aplicações do perfil de Raios Gama em rochas sedimentares estão relacionadas à utilização como indicador de litologia, à avaliação quantitativa do conteúdo argiloso presente nas rochas reservatório e à correlação entre perfis de diferentes poços (Schlumberger, 1987). A correlação entre perfis de diferentes poços é realizada pela análise das curvas dos perfis, correlacionando picos e intervalos com baixos valores.

O perfil de Raios Gama possibilita a determinação do volume de argila (Vsh). O cálculo da argilosidade de uma rocha com o perfil de RG baseia-se no fato de que toda ela seja devida a presença exclusiva do K^{40} , uma vez que os argilominerais originam-se da hidrólise das micas e dos feldspatos potássicos (Nery & Barros, 2000). O cálculo é realizado primeiramente observando-se os valores máximos e mínimos do perfil, e aplicando-se a seguinte equação para a determinação do Vsh num determinado ponto:

$$Vsh = (RG - RG(\text{min.})) / (RG(\text{max.}) - RG(\text{min.}))$$

onde:

Vsh = Volume de argila;

RG = Valor de RG em um determinado ponto do perfil;

RG(max.) = Valor máximo de RG;

RG(min.) = Valor mínimo de RG.

O volume de argila é utilizado para a definição dos valores de corte para a classificação do perfil em rochas reservatório e não reservatório.

No entanto, valores acima de 5% de K₂O foram observados nos arcósios, nos conglomerados policompostos e nos arenitos resultantes de depósitos em ambientes redutores. Portanto, nessas litologias, as altas radioatividades registradas pelos perfis de RG não representam, necessariamente, altas argilósidades, fato este que limita e complica seu uso como quantificador de VSH e identificador litológico (Nery & Barros, 2000).

4.1.2 – Perfil Sônico

O perfil Sônico (DT) registra o tempo que um pulso sonoro leva para atravessar um intervalo de formação (Rider, 2000). O tempo de trânsito é maior para meios menos densos, assim os valores tem relação direta com a porosidade da rocha, quanto maior o tempo de trânsito, maior é a porosidade, sendo ainda que tempos elevados podem representar fraturas, desmoronamentos ou presença de gás no poço.

A porosidade da rocha pode ser calculada por meio do perfil Sônico utilizando a seguinte equação:

$$\phi = (\Delta t - \Delta t(\text{ma})) / (\Delta t(\text{f}) - \Delta t(\text{ma}))$$

onde:

ϕ = Porosidade;

Δt = Tempo de trânsito em um determinado ponto do perfil;

$\Delta t(\text{f})$ = Tempo de trânsito do fluido que satura a formação;

$\Delta t(\text{ma})$ = Tempo de trânsito na matriz.

Embora o perfil Sônico frequentemente seja expresso em unidades de porosidade, esta formulação baseia-se na litologia do calcário ou do arenito. No caso de litologias complexas, com dois ou mais minerais constituindo a matriz, como é o caso dos folhelhos, a determinação da porosidade requer a combinação de pares de perfis como Densidade-Neutrônico, Sônico-Neutrônico e Sônico-Densidade, uma vez que estes respondem indistintamente à porosidade, além da litologia, do fluido dos poros e do tamanho dos poros (Rabe et. al. 2003).

4.1.3 – Perfis de Indução Profunda e Indução Normal Curta

Os perfis de Indução Profunda (DIR) e Indução Normal Curta (SN) registram as diferentes resistividades das rochas através da passagem induzida de uma corrente elétrica. Quantitativamente, as curvas de resistividade investigam volumes radiais distintos de rocha, a profunda abrange a zona virgem e a curta a zona lavada (Nery & Barros, 2000).

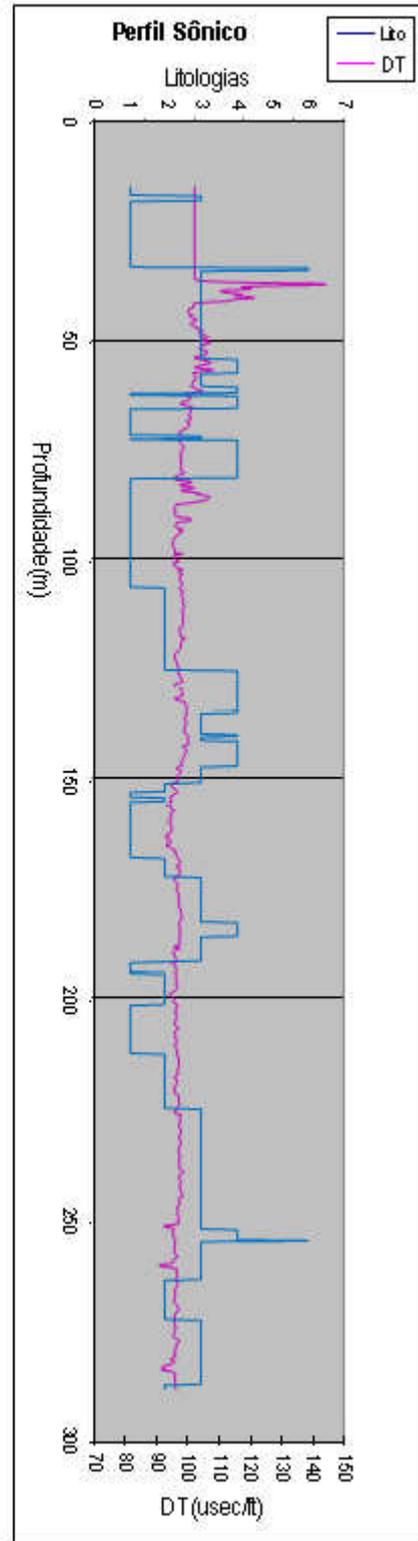
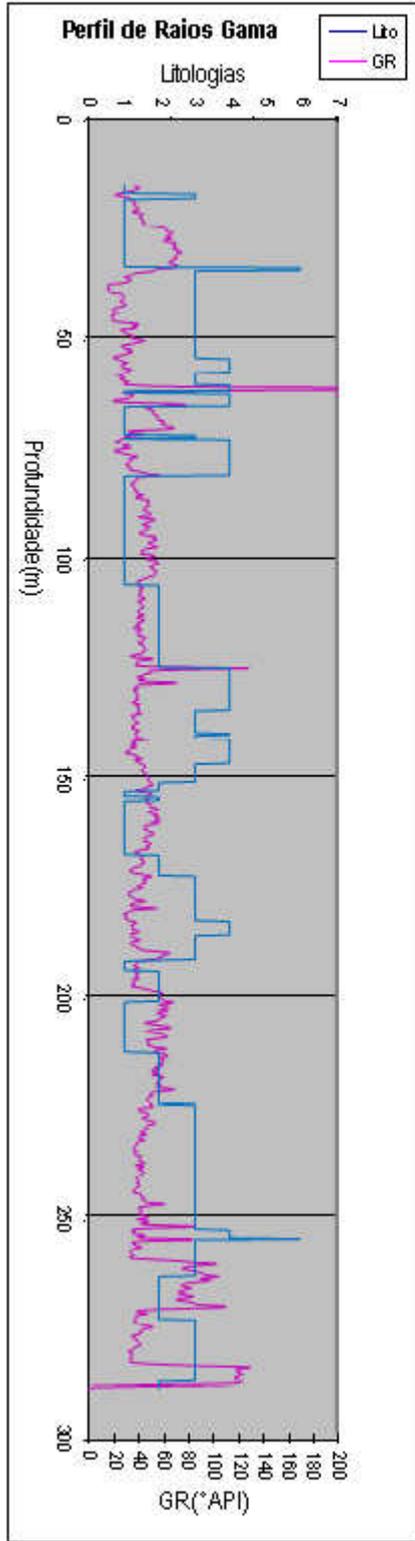
Os perfis de indução podem ser usados para a correlação poço a poço, identificação qualitativa da litologia e do fluido das rochas, idéia qualitativa da permeabilidade em função da separação entre as curvas, a saturação em água e o Fator de Formação.

Segundo Nery & Barros (op. cit.), o perfil de Indução Normal não é muito aconselhável por sofrer fortes influências ambientais, como lama ou invasão do filtrado. Para efeito de comparação entre os dois perfis, observa-se que em camadas impermeáveis ocorre a superposição das curvas de DIR e SN, porém em camadas permoporosas ocorre uma separação correspondente à invasão e a conseqüente presença de fluidos distintos.

Em geral, os perfis de indução são bons indicadores de fluidos, uma vez que a resistência à passagem da corrente elétrica varia conforme o tipo de fluido. Fluidos muito diluídos oferecem alta resistividade, ao passo que em fluidos salinos a resistividade é muito baixa. Hidrocarbonetos são infinitamente resistivos, sendo facilmente identificados na curva de resistividade.

4.2 – Ajuste do Perfil litológico

Correlacionando os perfis geofísicos com as litologias, notou-se um deslocamento das profundidades do perfil litológico em relação aos parâmetros geofísicos, uma vez que os testemunhos não representam precisamente a profundidade das amostras, de forma que os perfis geofísicos auxiliam no correto posicionamento. Assim, utilizando gráficos combinados, foi possível posicionar corretamente as profundidades dos testemunhos do poço através dos padrões de picos e quebras dos perfis geofísicos, relacionando-os as mudanças litológicas.



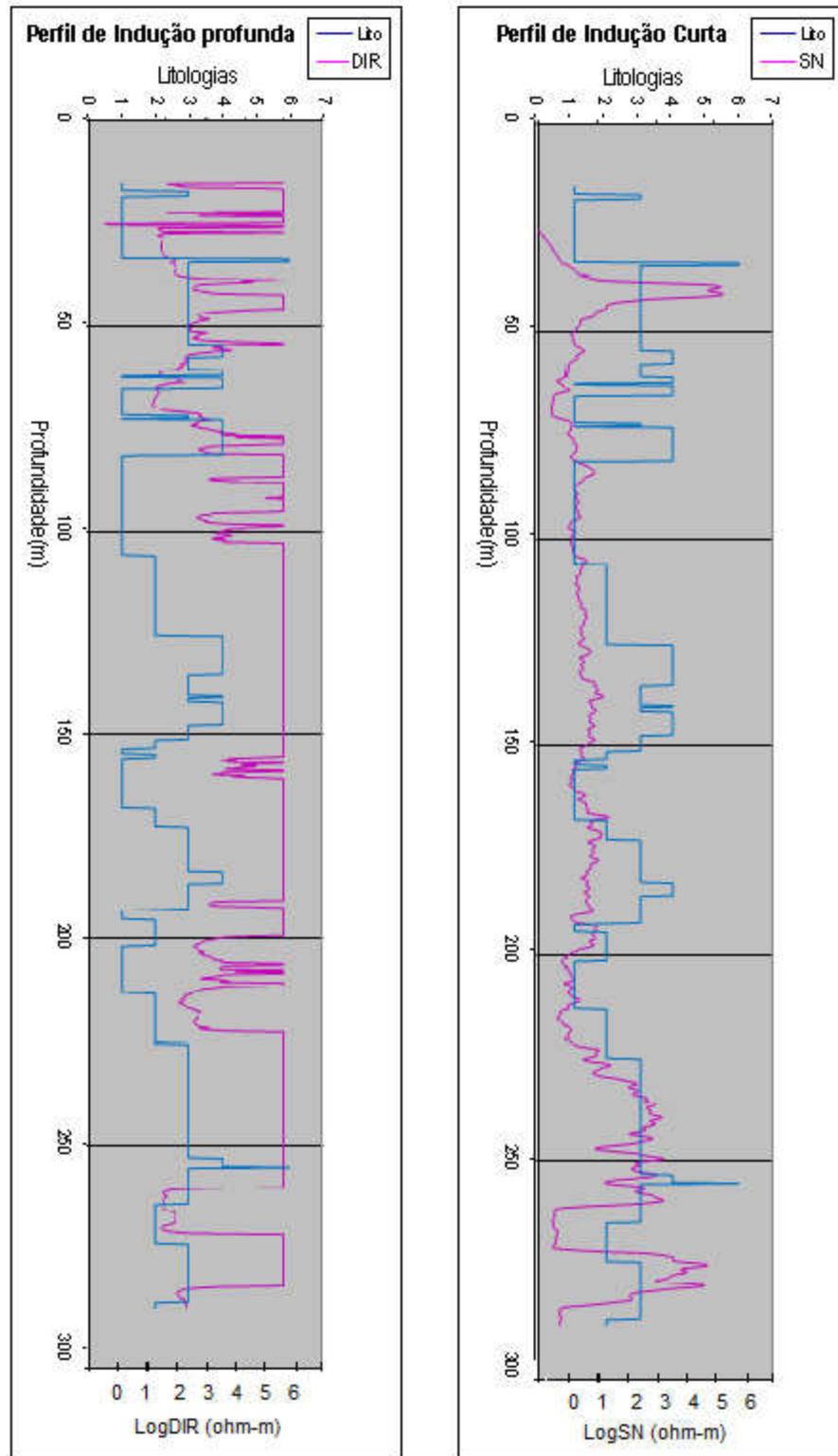


Figura 4.1: Gráficos combinados de litologia e perfis geofísicos. 1: Lamito, argilito e siltito, 2: Arenito muito fino, 3: Arenito fino, 4: Arenito médio, 6: Conglomerado.

4.3 – Caracterização das eletrofácies

Os perfis geofísicos são de grande importância para a caracterização de eletrofácies. As eletrofácies obtidas a partir da análise estatística dos perfis são intervalos em profundidade que possuem respostas semelhantes nos perfis.

É importante ressaltar que as eletrofácies consistem em uma representação numérica do empilhamento litológico referente ao poço mapeado por perfis (Rider, 2000). Assim, as eletrofácies não representam as fácies litológicas, pois as mudanças litológicas (mineralógicas, texturais, etc) não correspondem necessariamente às variações petrofísicas contidas nos perfis. Dessa forma, as eletrofácies são elaboradas a partir de agrupamentos de características petrofísicas e podem representar várias fácies litológicas. Nesse sentido, os testemunhos são essenciais para determinar o significado geológico das eletrofácies.

Neste estudo utilizou-se dois métodos de elaboração de eletrofácies, o primeiro através de análises estatísticas utilizando os perfis geofísicos associados aos testemunhos, e o segundo utilizando o método de Análise de Componentes Independentes (ICA) para a definição de eletrofácies a partir dos Perfis de Raios Gama.

4.3.1. Análise estatística

Na análise estatística são utilizados histogramas, box-plots e gráficos de dispersão para a visualização dos dados, de forma que aponte semelhanças, agrupamentos, tendências e detalhamento da distribuição dos dados em cada perfil e litologia.

- Histogramas: possibilitam a representação gráfica de uma distribuição de frequência apresentada na forma de um diagrama de barras. Ele fornece uma exibição simplificada de um registro de dados. Um histograma mostra os valores típicos e extremos de uma amostra e permite avaliar a localização, a extensão da dispersão e a forma de distribuição. Nos histogramas construídos neste estudo, utilizou-se ainda uma função capaz de produzir uma estimativa usando uma aproximação do tipo Kernel na densidade da distribuição de uma variável contínua (perfis geofísicos), criando uma curva representativa da amostragem. Foi utilizada também uma função para desenhar pequenos traços no eixo X representando os valores concretos da variável.

- Box-plots: os diagramas box-plots são gráficos que permitem avaliar a simetria dos dados, sua dispersão e a existência ou não de outliers nos mesmos, sendo especialmente adequados para a comparação de dois ou mais conjuntos de dados correspondentes às categorias

de uma variável qualitativa. Neste estudo, utilizou-se as distribuições dos valores dos perfis geofísicos segundo cada litologia.

- Gráficos de Dispersão: Os diagramas de dispersão são utilizados para representar duas ou mais variáveis, uma em função da outra. É muito eficiente para correlacionar dados, mostrando intervalos irregulares, tendências ou agrupamentos. Neste contexto, encaixa-se o agrupamento das eletrofácies, ao passo que, correlacionando os perfis geofísicos, é possível distinguir famílias de dados com características semelhantes em relação aos perfis.

4.3.1.1 – Histogramas

Inicialmente, para a elaboração das eletrofácies, foram confeccionados histogramas para uma análise preliminar para cada perfil geofísico. Os gráficos indicaram uma tendência bimodal dos dados estudados. Para os perfis de GR, DT e DIR, nota-se pela curva de densidade, que há dois picos evidenciando duas modas de dados, sendo uma população com altos valores e outra com baixos valores. As duas populações de dados representam as possíveis rochas reservatório e as rochas não-reservatório.

Para o histograma de Raios Gama, a primeira família encontra-se até 100 °API e a segunda entre 100 e 200 °API, mostrando que a maior frequência encontra-se na primeira família. Para o perfil Sônico, a primeira família encontra-se entre 60 e 90° API e a segunda entre 90 e 120 msec/ft (figura 4.2).

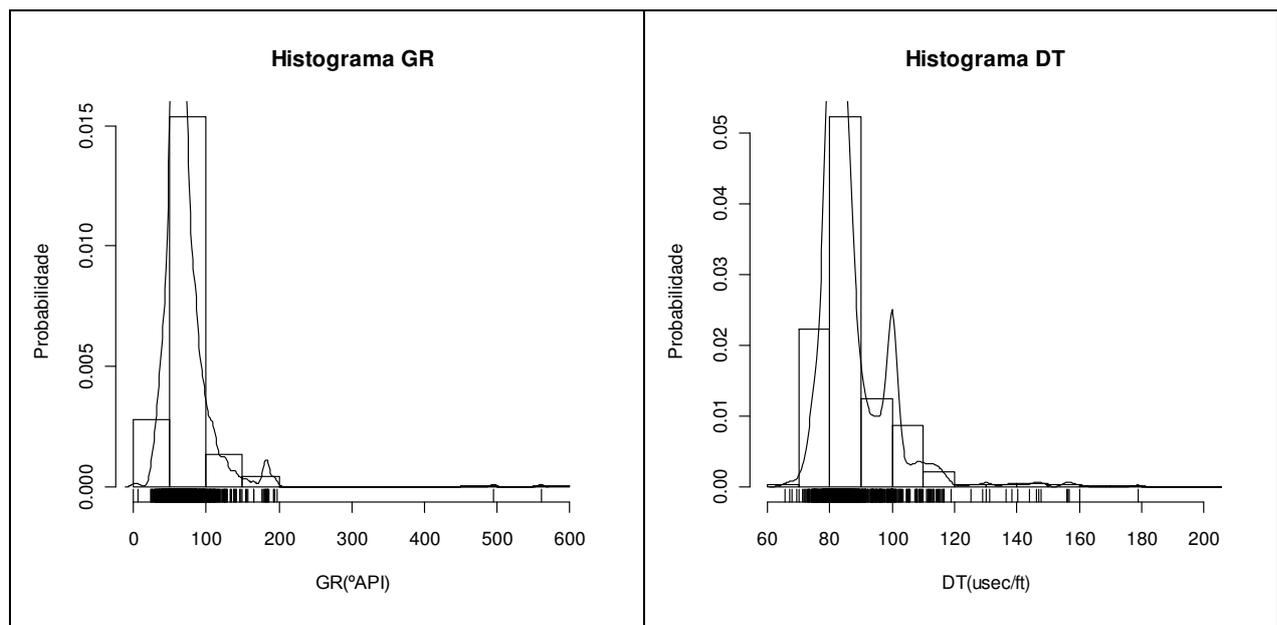


Figura 4.2: Histogramas dos perfis de Raios Gama e Sônico.

Para o perfil de resistividade, observou-se que a distribuição dos dados é muito assimétrica, mais da metade dos valores encontram-se dentro de um intervalo de classes, a medida de dispersão dos dados (desvio padrão) é muito alta. Calculando-se o coeficiente de variação (porcentagem obtida através da divisão do desvio padrão pela média aritmética), obtemos $C = 103,3\%$. De acordo com Koch e Link, 1971 apud Licht, 1998, valores de C maiores que 80% indicam uma distribuição fortemente assimétrica ou lognormal. Assim, conclui-se que os dados de DIR compõem uma distribuição lognormal. Sendo assim, é necessário realizar a anamorfose dos dados, transformando os valores originais em seus logaritmos.

Com a transformação dos dados, observa-se uma distribuição bimodal nos valores de DIR, sendo uma população composta por valores máximos em $12 \log_{10}$, representando as rochas saturadas e a outra população possui valores entre 3 e $10 \log_{10}$.

A distribuição de SN não mostra nenhuma semelhança com a curva de DIR, indicando que houve influência da zona invadida na medição das litologias porosas. As frequências encontram-se entre 2 e $6,5 \log_{10}$ (figura 4.3).

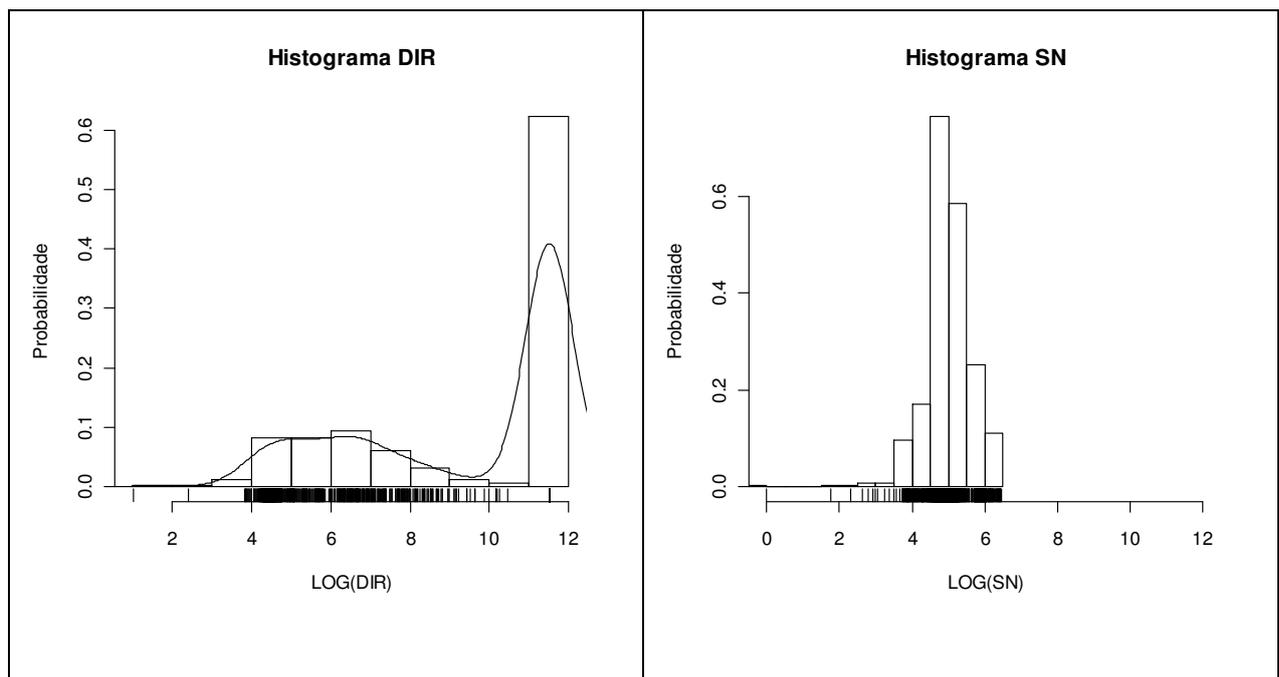


Figura 4.3: Histogramas de os perfis de Indução Profunda e Normal Curta.

4.3.1.2 – Boxplots

Os diagramas box-plots foram gerados com a inserção de dados concretos na análise estatística, utilizando-se os testemunhos do poço, representados pelas principais litologias

caracterizadas neste estudo. Uma nova análise para cada perfil geofísico foi feita, visando distinguir as características das litologias definidas.

Através do diagrama para Raios Gama, nota-se claramente a diminuição de valores entre as fácies arenosas, com as maiores frequências para arenito muito fino entre 60 e 85 °API, para arenito fino entre 50 e 65 °API e para arenito médio entre 50 a 60 °API (figura 4.4). Essa constante diminuição de valores condiz com a diminuição da argilosidade presente nas fácies. Isso porque com o aumento da granulometria ocorre a diminuição da fração argila.

Os lamitos, siltitos e argilitos possuem intervalos de frequências semelhantes as dos arenitos muito finos, estando as maiores concentrações entre 65 e 85 °API, valores estes decorrentes das altas argilosidades.

Para os conglomerados, a altos valores registrados (entre 80 e 125 ° API) podem ser explicados pelo alto conteúdo em potássio encontrado em conglomerados policompostos (Nery & Barros, 2000), sendo que os conglomerados deste estudo são policompostos, com seixos de rochas metamórficas e ígneas do embasamento da Bacia do Paraná.

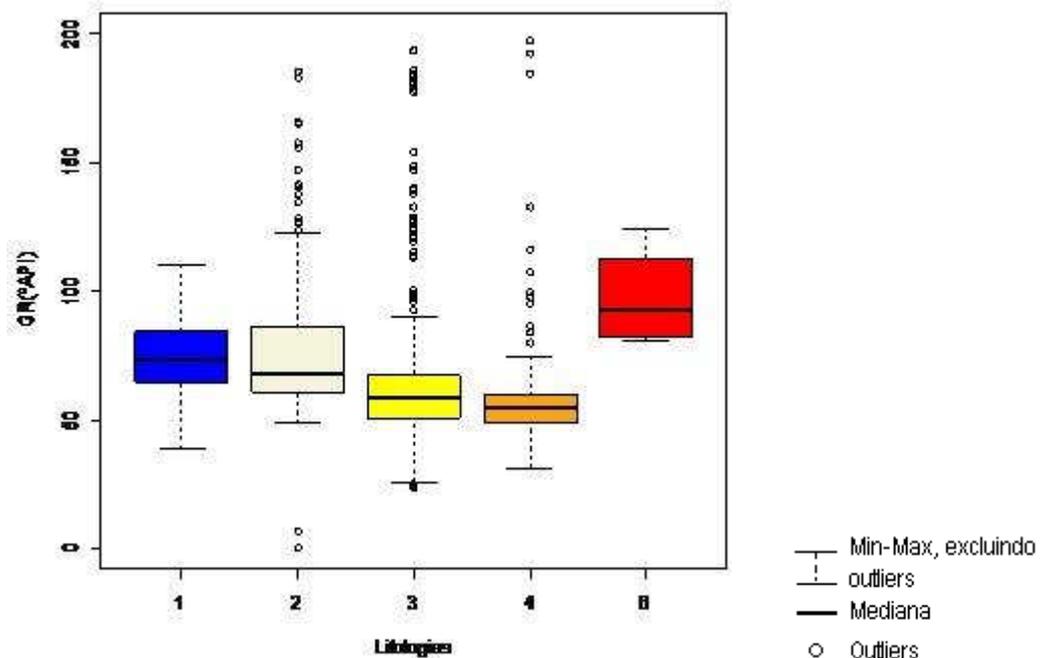


Figura 4.4: Diagrama box-plot dos valores de Raios Gama para cada litologia. 1: Lamito, argilito e siltito, 2: Arenito muito fino, 3: Arenito fino, 4: Arenito médio, 6: Conglomerado.

Para o perfil Sônico, observa-se que os conglomerados exibem os maiores valores de Perfil Sônico, com maiores frequências entre 90 e 100 msec/ft, devido as maiores porosidades alcançadas por essa litologia.

Observa-se, inclusive, um aumento gradativo de valores de arenito muito fino até os conglomerados, estando as maiores concentrações dos arenitos muito finos entre 80 e 85 msec/ft, do arenitos finos entre 80 e 95 msec/ft e dos arenitos médios entre 85 e 95 msec/ft (figura 4.5).

Os altos valores observados na fácies 1 (concentrados entre 80 e 100 msec/ft) são causados pelos lamitos, isso deve-se ao fato dos lamitos serem litologias complexas, com dois ou mais minerais constituindo a matriz e, neste caso, apenas o perfil Sônico não é eficaz para quantificar a porosidade.

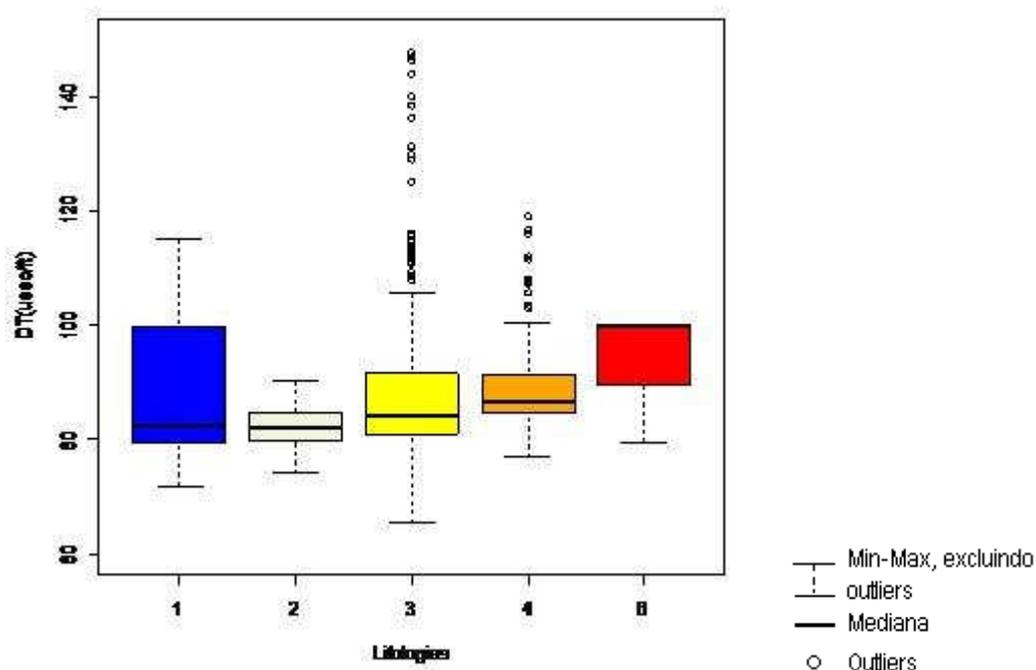


Figura 4.5: Diagrama box-plot dos valores de Perfil Sônico para cada litologia. 1: Lamito, argilito e siltito, 2: Arenito muito fino, 3: Arenito fino, 4: Arenito médio, 6: Conglomerado.

O diagrama de Indução Profunda (DIR) para as diferentes litologias, em escala logarítmica, apresentou valores máximos para fácies 1, 2, 3 e 4 (lamitos, argilitos, siltitos e arenitos) indicando que os intervalos com valores máximos destas litologias estão saturados por fluidos muito diluídos (figura 4.6).

Os conglomerados apresentaram menores resistividades, mostrando que não há presença de fluidos nestas litologias, e a porosidade contribui para a passagem da corrente elétrica.

Os lamitos, argilitos e siltitos apresentaram seus valores mínimos abaixo dos valores das outras fácies, isso porque, nos intervalos que não estão saturados por fluidos, apresentam baixa resistividade devido a condutividade dos argilominerais.

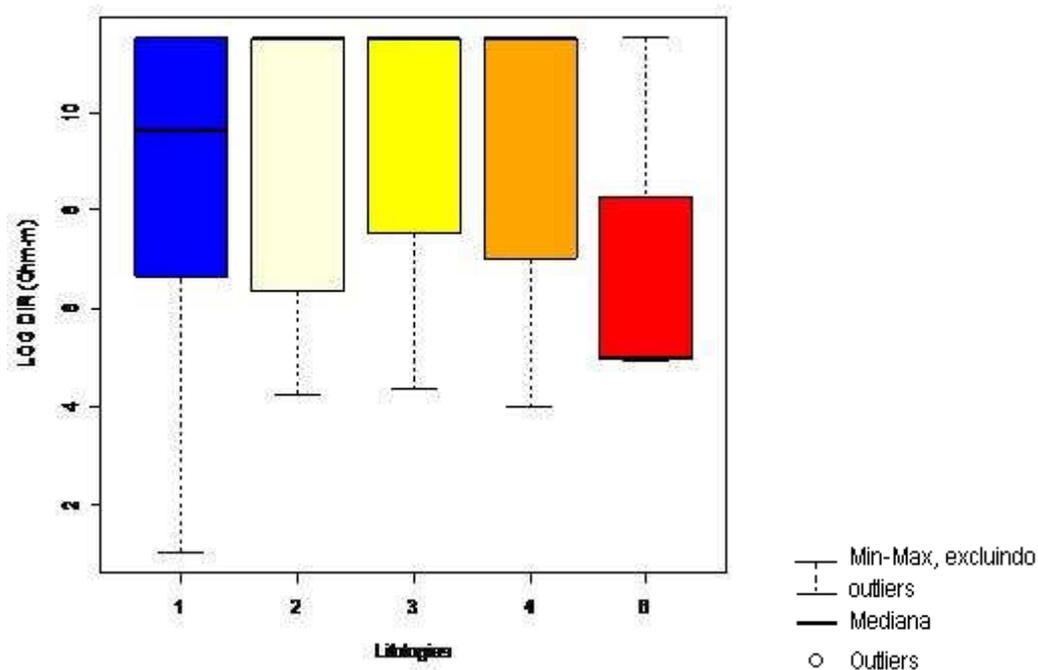


Figura 4.6: Diagrama box-plot dos valores em escala logarítmica de Indução Profunda para cada litologia. 1: Lamito, argilito e siltito, 2: Arenito muito fino, 3: Arenito fino, 4: Arenito médio, 6: Conglomerado.

Usando-se a escala logarítmica para os dados de Indução Normal Curta (SN), observou-se que arenitos apresentam os maiores valores de SN e as fácies 1 e 6 os menores valores (figura 4.7).

Podemos notar, comparando SN e DIR, que para os arenitos e lamitos a indução normal curta apresenta valores significativamente menores que a indução profunda, pois os valores de SN estão influenciados pela zona invadida, e, provavelmente, preenchida por filtrado mais salino.

Para todas as litologias os valores de SN foram menores que o de DIR, sinalizando invasão de fluidos em todo o perfil e, portanto, condições de permo-porosidade em todas as litologias.

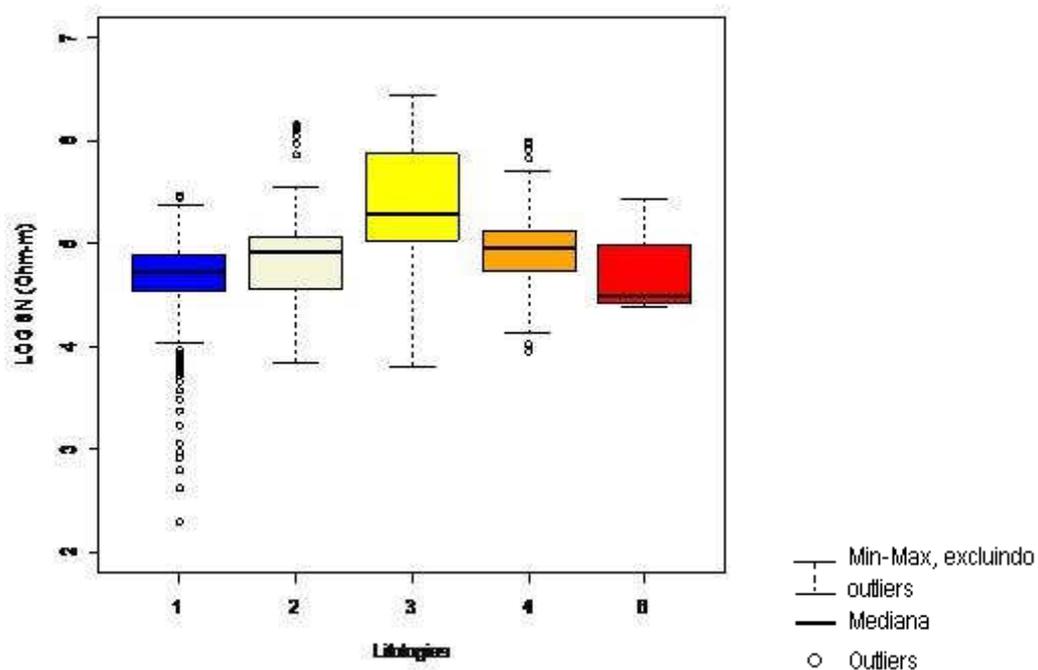


Figura 4.7: Diagrama box-plot dos valores em escala logarítmica de Indução Curta para cada litologia. 1: Lamito, argilito e silito, 2: Arenito muito fino, 3: Arenito fino, 4: Arenito médio, 6: Conglomerado.

4.3.1.3 – Gráficos de dispersão

Nesta etapa, é feita a aplicação das eletrofácies, combinando-se os agrupamentos e intervalos observados aos dados de poço interpretados geologicamente.

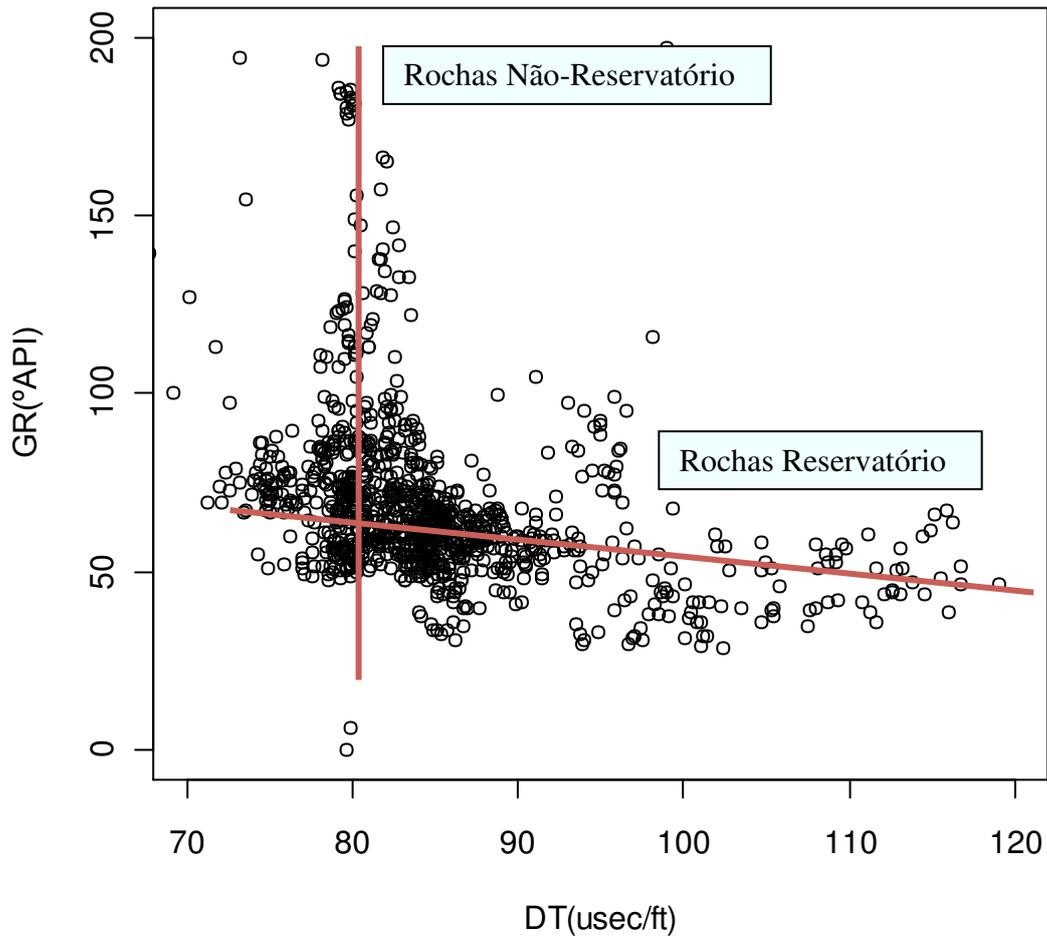


Figura 4.8: Gráfico de dispersão de Raios Gama x Sônico.

O gráfico de GRxDT (figura 4.8) mostra duas tendências dos dados, a primeira com aumento de argilosidade e baixa porosidade, caracterizando as rochas não-reservatório, a segunda com aumento de porosidade e baixa argilosidade, caracterizando as rochas reservatório. Pelas características de cada litologia, observadas nos box-plots, pode-se classificar as potenciais rochas reservatório como sendo os arenitos finos, médios e os conglomerados, e as litologias com crescente GR e baixo DT, rochas não-reservatório, como os lamitos, argilitos, siltitos e arenitos muito finos.

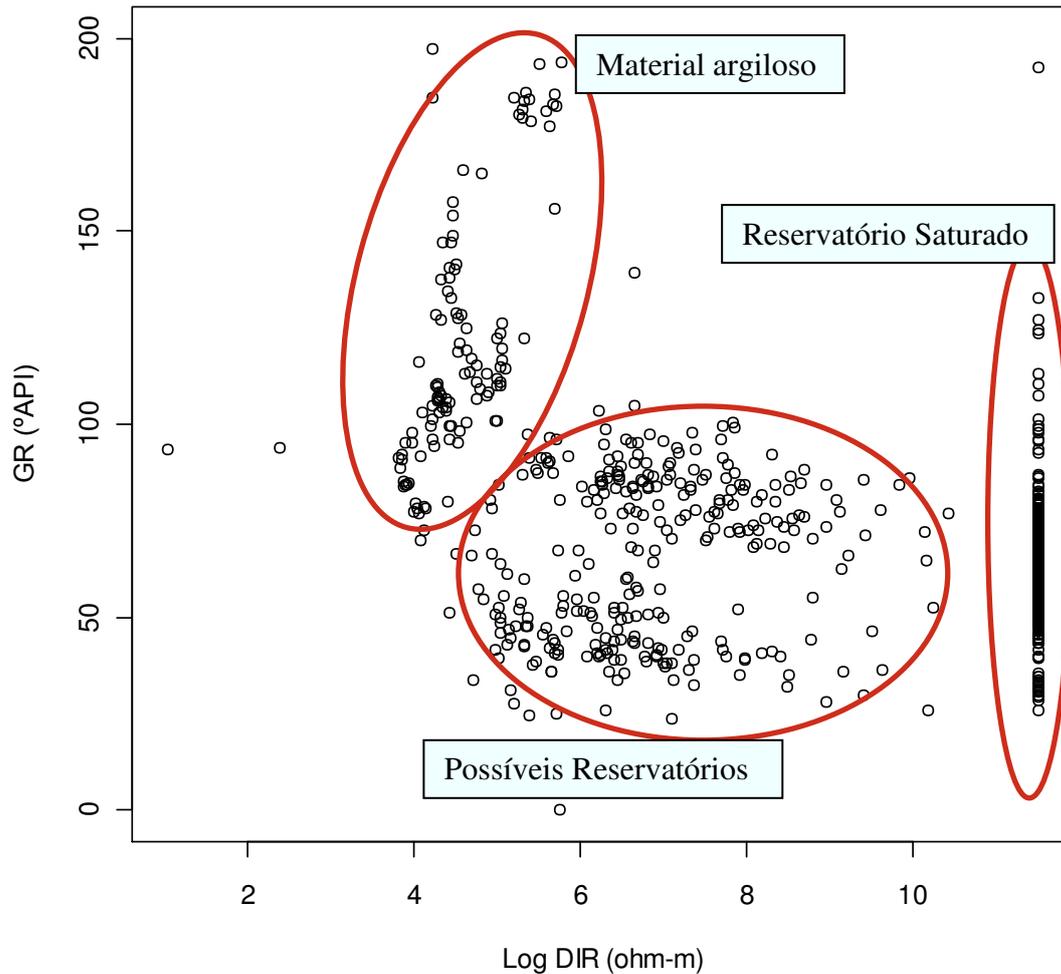


Figura 4.9: Gráfico de dispersão de Raios Gama x Resistividade.

No gráfico GRxDIR (figura 4.9) podemos distinguir três agrupamentos de dados: o primeiro representa os materiais argilosos, com alto GR e baixa resistividade; o segundo são os possíveis reservatórios, com baixo GR e maiores resistividades, representando os arenitos limpos, sem argilosidade; o terceiro são os reservatórios saturados por fluido, com máxima resistividade e predominantemente baixo GR, embora ocorram amostras com valores médios de GR saturadas por fluido. Essas amostras são representadas por sedimentos finos, isso porque, pela comparação com os gráficos box-plots, observa-se que as litologias saturadas por fluido são pertencentes aos sedimentos finos e arenosos. Os possíveis reservatórios são os arenitos finos e médios e os materiais argilosos são os lamitos, siltitos, argilitos e arenitos muito finos. Os conglomerados, apesar da porosidade, neste gráfico não aparecem como fácies reservatório, isso porque apresentam valores altos de GR devido a sua composição polimítica.

4.3.2 – Caracterização de eletrofácies a partir da ICA

Segundo Sancevero (2007), a análise de componentes independentes (ICA) trata de maneira eficiente os dados multivariados, sendo utilizada com sucesso na área de redes neurais. Contudo, na caracterização de reservatórios, poucos são os trabalhos encontrados onde se utiliza a ICA.

Diferente de outros métodos de análise multivariada, a ICA procura estimativas dos componentes independentes não-gaussianos, isto é, os mais díspares possíveis da distribuição gaussiana (Sanchetta, 2010). Na ICA, os dados não precisam apresentar correlação, pelo contrário, devem ser independentes um do outro.

A interpretação automática de dados de perfil de poço é uma tarefa complexa, pois as medidas executadas no poço expressam as mudanças das propriedades físicas e, não necessariamente, as variações litológicas.

A partir da ICA, pode-se extrair as componentes independentes dos sinais. Essas componentes formam um novo conjunto de dados que podem ser consideradas como sinais-fontes que se combinados resultam nos perfis originais (Sanchetta, 2010).

Assim, as componentes independentes são usadas como uma nova base de dados, que treinadas por classificadores, predizem as eletrofácies que geraram os sinais medidos nos perfis geofísicos. Essa predição é analisada a partir dos dados de testemunhos do poço, validando a eficiência do método.

A análise foi feita com base nos perfis de Raios Gama de três poços (C-IG/93, R-IG/94 e R-IG/95), visando a caracterização das eletrofácies através dos sinais medidos em profundidade. O teste foi realizado de forma supervisionada e não supervisionada. O método supervisionado utilizou a correlação do perfil de Raios Gama e perfil litológico do poço C-IG/98 como classificador. O método não supervisionado utilizou unicamente os Raios Gama dos três poços em questão. Os melhores resultados foram obtidos por meio do método não supervisionado.

A análise de componentes independentes permite individualizar o número desejado de fácies, no caso deste estudo, o número escolhido foi de 6 fácies distintas para a caracterização das variações litológicas.

Comparando-se as colunas de dados concretos, obtidos a partir da descrição de testemunhos de poço, dos três poços e as eletrofácies obtidas a partir da ICA, observa-se que alguns intervalos litológicos podem ser definidos com base nas eletrofácies.

A distinção dos pacotes ocorre pela predominância de algumas eletrofácies em determinado intervalo. Nota-se que é possível distinguir pacotes com predominância de sedimentos finos de pacotes com predominância de sedimentos .

Considerando o predomínio de eletrofácies em determinados intervalos, temos:

- Sedimentos finos (lamitos, argilitos, siltitos e ritmitos) são definidos pelas eletrofácies 4, 5 e 6.
- Arenitos muito finos e finos são definidos pelas eletrofácies 2, 3 e 4.
- Arenitos médios e grossos são definidos pelas eletrofácies 1 e 2.
- Sedimentos grossos (conglomerados, brechas e diamictitos) são definidos pelas eletrofácies 5 e 6.

Entretanto, algumas considerações devem ser feitas: os arenitos finos e muito finos assemelham-se em alguns intervalos aos sedimentos finos, isso deve-se às lentes e laminações de argila presentes nos arenitos, assim como os conglomerados, brechas e diamictitos, que podem ser confundidos com os sedimentos finos, devido a sua matriz fina.

As melhores correlações foram obtidas para os poços C-IG/93 e R-IG/95, sendo que o poço R-IG/94 não apresentou uma boa definição dos pacotes litológicos. Isso deve-se ao fato das litologias terem sido agrupadas em classes sem distinção de estruturas e características específicas. Porém, uma análise mais detalhada da descrição dos testemunhos, realizada pelo Instituto Geológico, indica as diferenças entre as litologias de cada poço. Nos poços C-IG/93 e C-IG/95 os intervalos arenosos médios a grossos são geralmente homogêneos, com boa seleção, ou com isoladas lâminas argilosas, e os conglomerados, diamictitos e brechas possuem matriz argilosa. Enquanto no poço R-IG/95 os arenitos apresentam frequentes laminações argilosas, as ocorrências de brechas são formadas por arenitos finos com matriz arenosa grossa, e os lamitos possuem seixos de litologias variadas.

Devido às características específicas do poço C-IG/94, a definição dos pacotes litológicos torna-se difícil. Contudo, as eletrofácies evidenciam o maior conteúdo em sedimentos finos deste poço em relação aos outros, fato que corrobora a hipótese de um mar a sudoeste e fonte de sedimentos a nordeste, uma vez que o poço C-IG/94 encontra-se a sudoeste dos outros dois poços.

Além disso, observou-se que os arenitos finos e médios limpos, que são as potenciais fácies reservatórios, são bem identificados pelas eletrofácies, e os sedimentos finos ou sedimentos com alguma contribuição de finos também podem ser identificados no perfil. Dessa forma, utilizando-se a ICA a partir unicamente dos Perfis de Raios Gama, é possível definir pacotes litológicos com diferentes características.

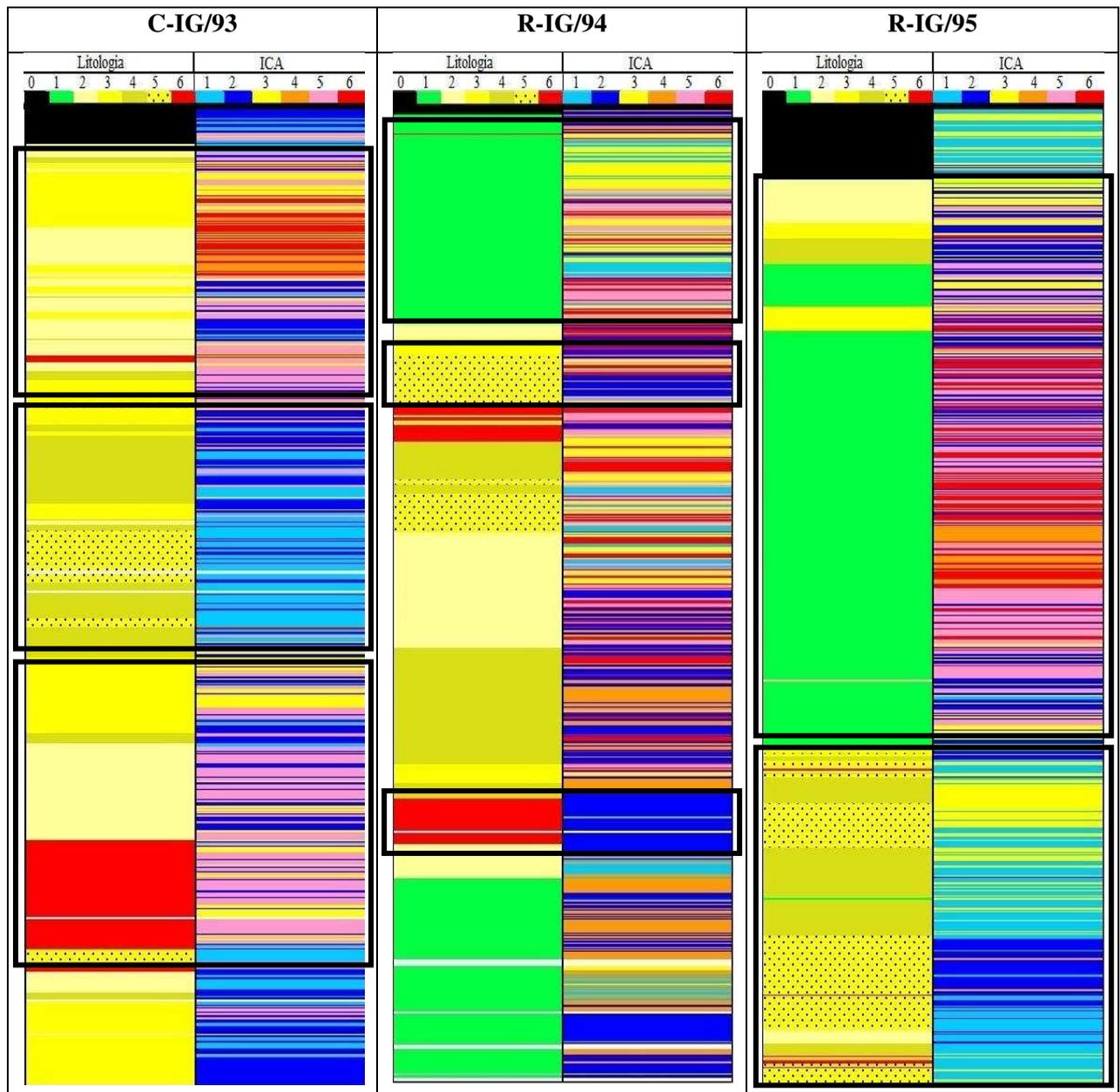


Figura 4.11: Correlação das colunas litológicas (a esquerda) e eletrofácies obtidas pela ICA (a direita) para os poços C-IG/93, R-IG/94 e R-IG/95. Para as fácies litológicas, 0: Regolito, 1: Lamito, siltito, argilito e ritmito, 2: Arenito muito fino, 3: Arenito fino, 4: Arenito médio, 5: Arenito grosso, 6: Conglomerado, brecha e diamictito.

CAPÍTULO 5 – GEOQUÍMICA DAS AMOSTRAS

A análise geoquímica das amostras foi realizada para a obtenção dos valores dos elementos maiores e traços nas amostras para avaliar as anomalias registradas no perfil de Raios Gama. Para tanto, utilizou-se dois métodos: Espectrometria de Fluorescência de Raios X e ICP-MS para 10 amostras selecionadas de variadas profundidades.

5.1 - Espectrometria de Fluorescência de Raios X

Na Espectrometria de Fluorescência de Raios x, a amostra é atingida por um feixe de raios x produzido pelo equipamento, que ao atingirem os átomos fazem com que os elétrons das camadas próximas ao núcleo sejam ejetados, criando vacâncias que necessitam ser preenchidas por outros elétrons vindos das camadas mais externas. A transição eletrônica dos elétrons das camadas mais externas para as mais internas provoca uma emissão de energia, que é compatível com as energias dos níveis e subníveis do elemento, sendo que essas energias são únicas de cada elemento e permitem a identificação do mesmo. Foram analisados e quantificados para cada amostra os chamados “10 óxidos maiores”, ou seja: SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, K₂O, Na₂O, TiO₂, MnO e P₂O₅ (tabela 5.1).

Paralelamente ao ensaio de análise química por FRX, foi realizado para as amostras a serem analisadas o ensaio de perda ao fogo. Neste ensaio, a amostra é calcinada a 1000 °C por 2 horas e sua variação de massa avaliada. Desta maneira, é possível somar à análise química dos 10 óxidos os valores correspondentes à perda de água, carbonato e matéria orgânica presentes nas amostras, uma vez que os elementos mais leves como H, C e O não são detectados pelo espectrômetro. A soma da perda ao fogo com as concentrações obtidas por FRX deve ser próxima de 100 %, nos casos em que outros elementos estão presentes apenas como traços. O chamado “fechamento estequiométrico” em uma análise química quantitativa total é o primeiro índice de qualidade de um resultado, sendo aceitos valores entre 99,5 % e 100,5 % (Em: <http://www.lamir.ufpr.br/index.php?option=com_content&view=article&id=14&Itemid=6>. Acesso em: 10/11/2011.).

Além disso, para o controle de qualidade dos resultados, uma amostra (C-60,5) foi duplicada durante sua preparação. Um disco do material de referência internacional BRP-1 foi preparado e analisado e as amostras de materiais de referência internacionais (OU-6 e BRP-1) foram analisadas em paralelo.

Tabela 5.1: Resultados da FRX para os óxidos maiores (valores em %).

Amostras		C-60,5-A	C-60,5-B	C-62,5	C-125	C-125,6	C-194	C-209,5	C-266	C-270	C-284,5	C-285,5
SiO ₂	%	84,45	84,45	80,81	74,59	78,98	76,37	65,95	64,56	70,17	88,09	80,76
TiO ₂	%	0,344	0,352	0,564	0,399	0,396	0,498	0,695	0,68	0,651	0,158	0,136
Al ₂ O ₃	%	7,75	7,76	9,51	8,97	9,01	9,58	13,2	14,96	13,31	5,64	5,39
Fe ₂ O ₃	%	1,39	1,4	0,79	2	1,81	2,26	5,11	5,5	4,42	0,44	0,86
MnO	%	1,39	1,4	0,79	2	1,81	2,26	0,064	0,042	0,069	0,026	0,191
MgO	%	0,38	0,38	0,39	2,03	1,11	1,56	3,04	2,46	1,95	0,19	1,06
CaO	%	0,31	0,3	0,36	3,65	1,89	1,67	1,62	0,45	0,68	0,67	4,32
Na ₂ O	%	1,26	1,25	2,68	2,88	2,72	2,89	2,94	2,91	3,02	1,59	1,53
K ₂ O	%	1,97	1,95	1,77	1,5	1,87	2,15	3,11	3,3	2,76	1,8	1,32
P ₂ O ₅	%	0,034	0,036	0,06	0,139	0,13	0,145	0,183	0,122	0,133	0,045	0,057
PF	%	1,39	1,35	2,27	3,75	1,95	2,13	3,31	4,09	2,75	0,58	3,75
Soma	%	99,3	99,3	99,2	100	99,9	99,3	99,2	99,1	99,9	99,2	99,4

5.2 – ICP-MS

A espectrometria de massas com fonte de plasma indutivamente (ICP-MS) é uma técnica para análise multielementar de grande exatidão, possibilitando a identificação de elementos traço em águas, solos e rochas. A ionização em fonte de plasma ocorre à pressão atmosférica, tendo o plasma energia suficiente para dessolvatar e ionizar os elementos em solução, produzindo cátions monovalentes e, em menor proporção, cátions divalentes e íons moleculares. Os íons gerados no plasma são transferidos para uma região de alto vácuo onde os íons são focalizados empregando lentes iônicas e direcionados para o espectrômetro de massas visando separação em função da razão massa/carga e identificando, assim, os elementos presentes.

Foi feita a identificação das concentrações de elementos traço para 10 amostras selecionadas (tabela 5.2). O controle de qualidade foi efetuado com a preparação e análise de uma duplicata (C-60,5) e através da análise do material de referência BRP-1 (Basalto - UNICAMP, Instituto de Geociências).

Tabela 5.2: Resultados do ICP-MS para 42 elementos traço (valores em mg/g), com destaque para os elementos Th e U.

Amostras		C-60,5-A	C-60,5-B	C-62,5	C-125	C-125,6	C-194	C-209,5	C-266	C-270	C-284,5	C-285,5	LD
Ba	mg/g	390	403	361	288	470	418	698	445	427	397	350	0,01
Be	mg/g	1,31	1,38	1,40	1,18	1,26	1,25	2,52	2,73	2,15	0,62	0,74	0,001
Bi	mg/g	0,07	0,06	0,05	0,04	0,06	0,12	0,24	0,31	0,24	0,02	0,02	0,001
Cd	mg/g	0,03	0,02	3,71	0,02	0,04	0,01	0,04	0,27	0,14	0,19	0,02	0,004
Ce	mg/g	31,6	31,6	189	34,1	50,6	55,3	71,0	79,4	50,4	22,0	14,4	0,2
Co	mg/g	4,59	4,80	2,16	3,11	2,77	5,25	9,58	18,4	10,0	1,34	1,12	0,01
Cr	mg/g	23,8	29,9	24,5	22,8	22,8	27,8	49,2	59,0	49,1	11,4	15,1	0,009
Cs	mg/g	2,84	2,85	2,87	0,75	0,91	1,29	3,05	8,55	6,08	0,60	0,45	0,02
Cu	mg/g	2,52	3,82	7,35	2,71	2,66	16,3	12,8	31,0	14,2	2,72	2,37	0,001
Dy	mg/g	1,99	2,16	6,19	2,75	2,86	3,41	4,64	4,18	3,28	1,19	1,45	0,007
Er	mg/g	1,32	1,45	2,95	1,76	1,72	1,94	2,70	2,78	2,38	0,67	0,84	0,002
Eu	mg/g	0,53	0,51	3,36	0,69	0,92	0,97	1,28	1,11	0,72	0,45	0,44	0,02
Ga	mg/g	8,50	9,05	9,47	8,66	8,76	9,70	17,0	17,1	15,2	4,49	5,28	0,001
Gd	mg/g	2,10	2,20	12,84	2,99	3,61	4,18	5,63	4,88	3,13	1,53	1,50	0,004
Hf	mg/g	2,70	2,92	4,28	2,83	3,16	3,04	3,21	3,34	3,37	1,30	1,04	0,001
Ho	mg/g	0,43	0,48	1,08	0,56	0,58	0,67	0,94	0,89	0,74	0,24	0,29	0,05
La	mg/g	15,9	15,6	83,7	16,4	24,4	26,5	34,0	35,5	24,3	10,7	6,89	0,004
Li	mg/g	5,91	6,41	7,14	16,3	11,5	14,6	32,3	38,4	34,2	5,81	10,7	0,1
Lu	mg/g	0,21	0,23	0,40	0,26	0,25	0,26	0,37	0,42	0,38	0,10	0,11	0,001
Mo	mg/g	0,13	0,19	0,62	0,13	0,09	0,30	0,33	47,5	1,48	0,57	0,53	0,001
Nb	mg/g	6,12	6,46	9,06	7,08	6,75	8,90	12,4	12,4	12,0	3,16	2,71	0,001
Nd	mg/g	12,7	12,6	91,9	15,6	22,8	24,7	30,9	32,6	19,5	9,79	7,17	0,001
Ni	mg/g	6,68	10,3	6,01	5,67	5,78	9,91	21,0	29,9	20,4	3,50	4,97	0,3
Pb	mg/g	23,3	23,5	13,5	10,3	11,9	11,0	11,9	63,3	22,9	10,7	9,83	0,003
Pr	mg/g	3,55	3,50	23,7	4,10	6,09	6,57	8,25	8,87	5,44	2,61	1,80	0,007
Rb	mg/g	47,8	50,2	43,5	31,8	37,8	46,7	79,8	107	81,0	37,6	26,3	0,001
Sb	mg/g	0,23	0,43	0,43	0,24	0,22	0,29	0,42	2,39	0,75	0,21	0,29	0,001
Sc	mg/g	4,39	4,71	4,91	5,04	5,36	6,14	9,87	11,5	9,72	1,25	2,01	0,004
Sm	mg/g	2,48	2,42	17,5	3,14	4,29	4,70	6,08	5,89	3,49	1,81	1,57	0,006
Sn	mg/g	1,16	1,39	1,41	1,06	0,98	1,46	2,43	3,10	2,79	0,59	0,59	0,007
Sr	mg/g	80,0	85,9	112	143	141	120	135	166	145	91,3	113	0,001
Ta	mg/g	0,49	0,52	0,77	0,57	0,55	0,71	0,98	0,97	1,00	0,27	0,26	0,1
Tb	mg/g	0,33	0,34	1,42	0,46	0,52	0,61	0,82	0,72	0,52	0,20	0,24	0,001
Th	mg/g	5,94	6,00	9,00	5,01	5,75	6,76	10,8	13,9	11,7	3,06	2,98	0,2
Tm	mg/g	0,20	0,21	0,39	0,26	0,25	0,26	0,37	0,41	0,36	0,10	0,11	0,001
U	mg/g	2,06	2,16	8,63	1,81	1,91	1,73	2,63	2,97	4,51	0,89	0,81	0,014
V	mg/g	30,0	33,1	40,0	29,7	29,3	37,6	71,0	109	81,4	8,2	12,3	0,001
W	mg/g	0,68	1,03	0,92	0,64	0,55	0,94	1,37	1,85	1,71	0,71	0,85	0,001
Y	mg/g	11,0	12,3	25,9	14,5	14,3	16,9	23,3	20,9	17,7	5,64	7,26	0,004
Yb	mg/g	1,36	1,54	2,74	1,87	1,72	1,76	2,44	2,84	2,65	0,69	0,76	0,001
Zn	mg/g	106	116	440	14,7	12,9	26,1	56,6	77,8	58,4	14,5	7,66	0,04
Zr	mg/g	96,1	105	161	99,8	118	108	109	114	112	46,4	37,3	0,001

5.3 – Anomalias

A análise geoquímica foi feita como meio de evidenciar as causas das anomalias de Raios Gama em algumas amostras, sabendo-se que a radioatividade natural da rocha advém dos elementos K, Th e U. Assim, foram escolhidas amostras com valores normais e amostras com valores acima dos esperados de Raios Gama (tabela 5.3). As principais anomalias encontram-se nas profundidades de 62,5 m, 125,6 m, 270 m e 285,5 m, sendo a maior delas a 62,5 m.

Tabela 5.3: Amostras selecionadas para análise e valores de Raios Gama (GR) e litologias associados.

Amostras		C-60,5	C-62,5	C-125	C-125,6	C-194	C-209,5	C-266	C-270	C-284,5	C-285,5
GR	°API	42,33	494,93	60,84	192,31	60,94	95,89	116,97	126,78	100,28	179,31
Litologia		Arenito fino - argila	Argila	Arenito muito fino	Arenito fino a médio - argila	Argila	Argila	Arenito muito fino	Arenito muito fino	Arenito fino	Arenito fino

Com os resultados obtidos, observou-se que o K não possui variações significativas nas amostras capazes de causar os picos de GR. No entanto, os elementos Th e U apresentaram maiores concentrações nas amostras com altos valores de GR, sendo os responsáveis pelos picos.

O Urânio é um elemento metálico radioativo pertencente à família dos actinídeos, seus principais minerais radioativos são: Uraninita, Torita, Uranotorita, Monazita, Titanita, Allanita, Epidoto, Xenotímio e minerais do Zircão.

Em rochas sedimentares, o Urânio pode ser de origem detrítica ou estar associado a ocorrência de matéria orgânica. A associação com a matéria orgânica ocorre porque as condições de precipitação do U são semelhantes a da preservação da matéria orgânica: ambientes redutores, e a MO apresenta propriedades singulares como a complexação ou adsorção de íons traço, resultando na imobilização e redução de seus estados de valência, com mudanças nas suas propriedades químicas.

Na forma detrítica, o U se deposita junto com o Tório, por possuírem a mesma granulagem na fração de argila (Bocardi, 2005).

O Tório é um elemento radioativo e metálico, ocorrendo sua precipitação apenas em ambientes oxidados. Em rochas sedimentares a principal ocorrência de Th ocorre na fração correspondente a arenitos, apenas em locais onde há ocorrência de minerais pesados, como Monazita, Torita, Zircão, Titanita e Allanita.

As amostras foram submetidas à Perda ao Fogo, que indica o teor em água e voláteis como H, C e O, liberados durante o aquecimento. O conteúdo em voláteis nas amostras fornece uma indicação da presença de matéria orgânica, uma vez que a MO é composta primariamente pelos elementos C, H, N, O, P e S.

No entanto, observando a relação da massa perdida durante o aquecimento a 1000°C (em % de massa da amostra) e as concentrações de U, notou-se que não há incremento de U com o aumento da massa de voláteis perdida (figura 5.4). Sendo assim, as maiores concentrações de Urânio não estão relacionadas a matéria orgânica, mas sim a origem detrítica. Tal fato não exclui a possibilidade de U associado a matéria orgânica, mas constata que a quantidade de U autigênico não poderia sozinha ter gerado as anomalias observadas.

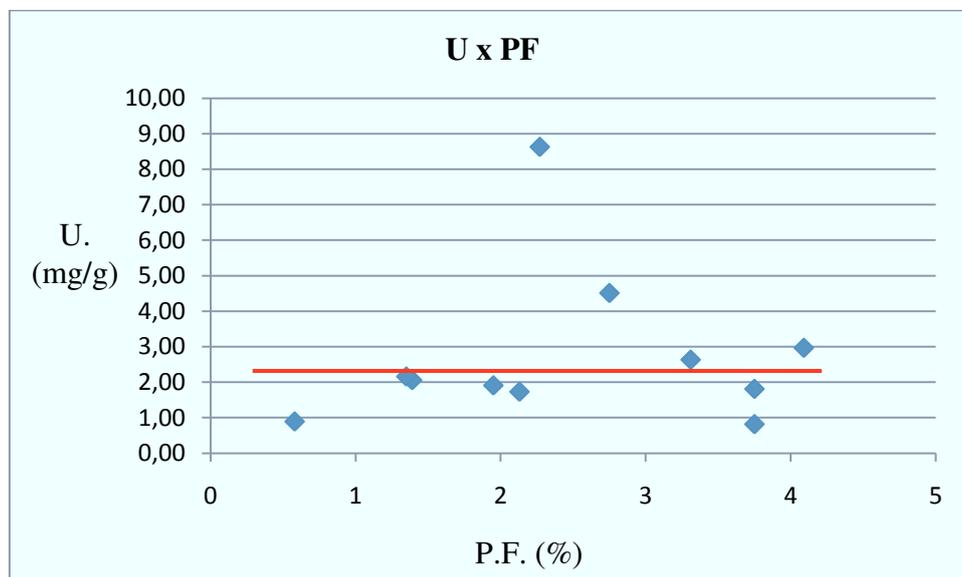


Figura 5.4: Gráfico da concentração de Urânio (mg/g) em relação a massa perdida durante a Perda ao Fogo (%) para cada amostra.

Além disso, observa-se que no intervalo com maior anomalia de Raios Gama não há aumento de resistividade, considerando que medições de resistividade elétrica em folhelhos da Formação Irati mostraram que os níveis enriquecidos em matéria orgânica são mais resistivos (Paula Neto, 1988), elimina-se, então, a hipótese do U e Th estarem associados a matéria orgânica. Não é descartada a possibilidade de U e Th associados a matéria orgânica, contudo, constata-se que os elementos autigênicos não seriam suficientes para causar as anomalias observadas.

Outro fator a ser analisado é a razão Si/Al. O Alumínio indica fonte de detritos clásticos e correlaciona-se com os elementos: Titânio (Ti), Magnésio (Mg), Sódio (Na), Potássio (K), Gálio

(Ga), Lantânio (La) e Nióbio (Nb) (Bocardi, 2005). As amostras com menor razão Si/Al apresentaram as maiores concentrações de Th e U, reforçando a hipótese de origem detrítica.

Uma vez que o Th e U de origem detrítica depositam-se juntos, observa-se que o incremento de U está relacionado ao incremento de Th (figura 5.5).

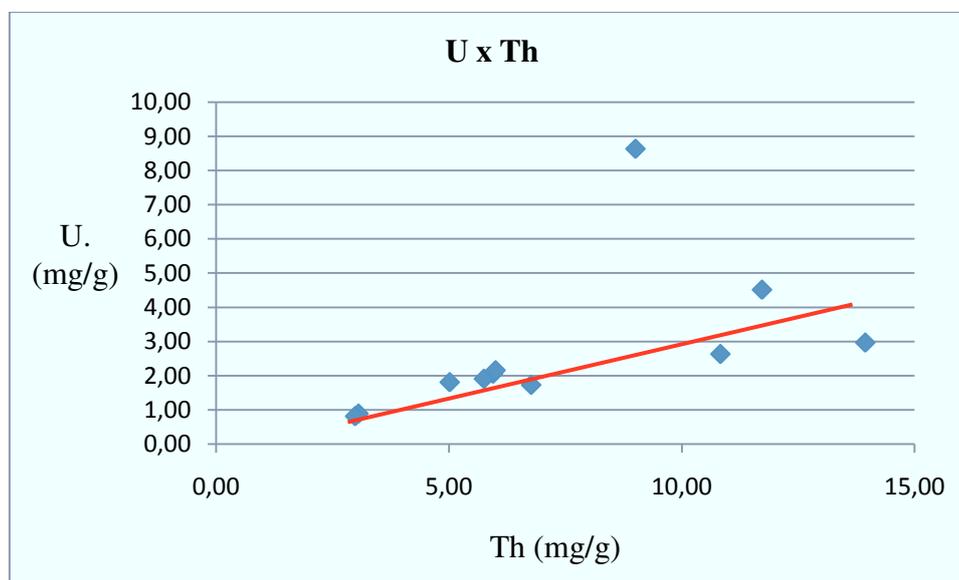
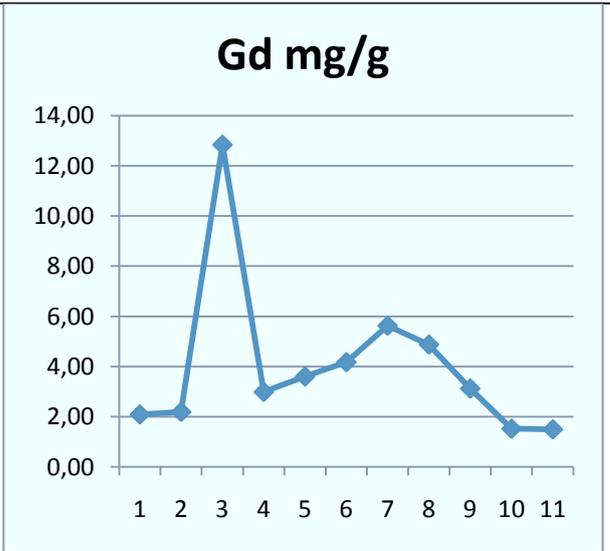
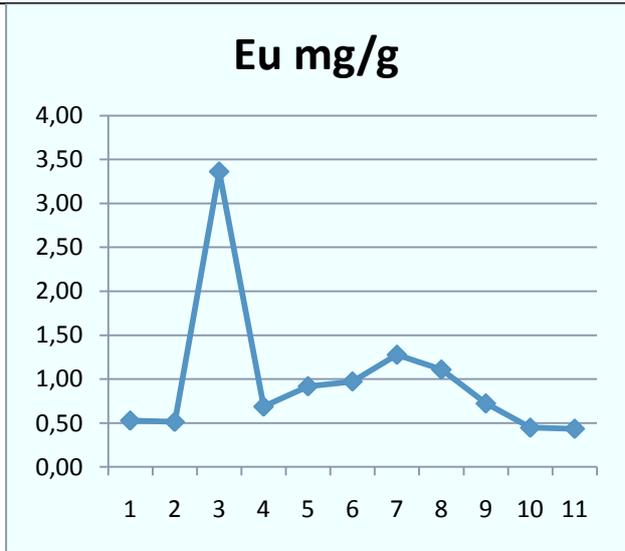
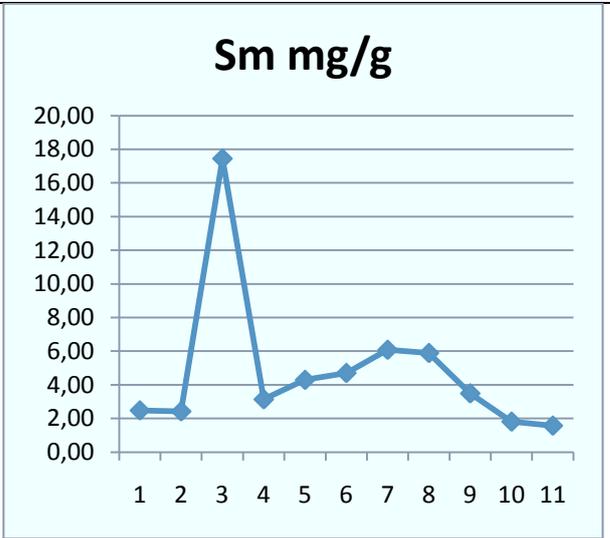
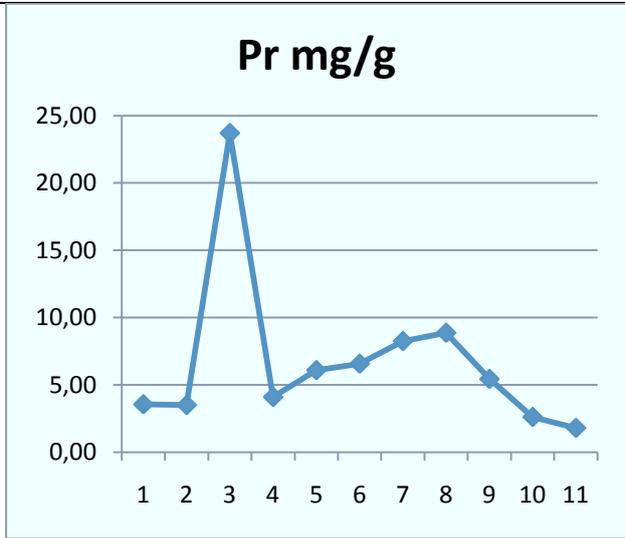
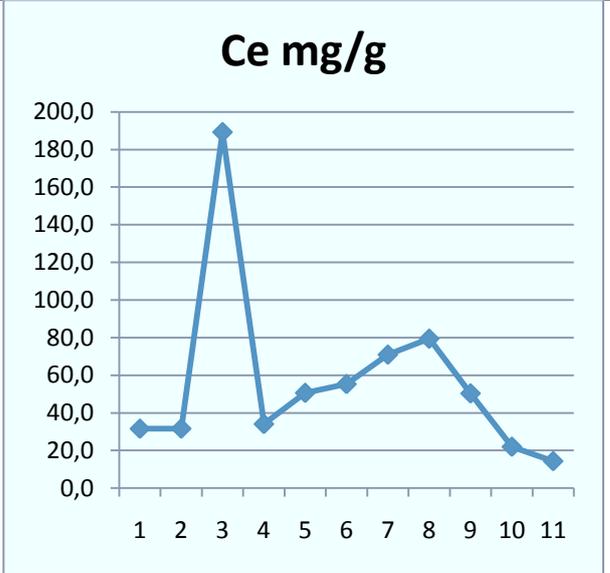
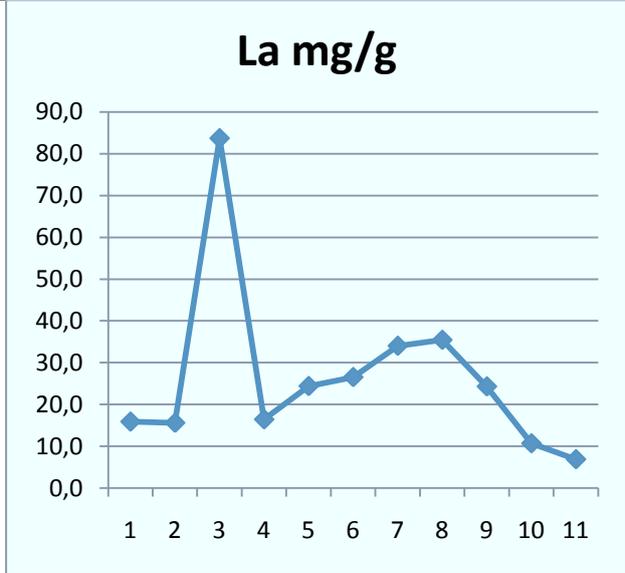


Figura 5.5: Gráfico da concentração de Urânio (mg/g) em relação a concentração de Tório (mg/g).

Observa-se, contudo, que a maior concentração de U observada (amostra 3: C-62,5 m) é responsável pela maior anomalia de Raios Gama. Na mesma amostra, há também anomalias de elementos terras raras (ETR), observadas nos elementos La, Ce, Pr, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu. As maiores concentrações foram observadas nos elementos terras raras leves, diminuindo com o aumento do peso atômico, como pode ser observado no gráfico das concentrações de cada elemento em cada amostra:



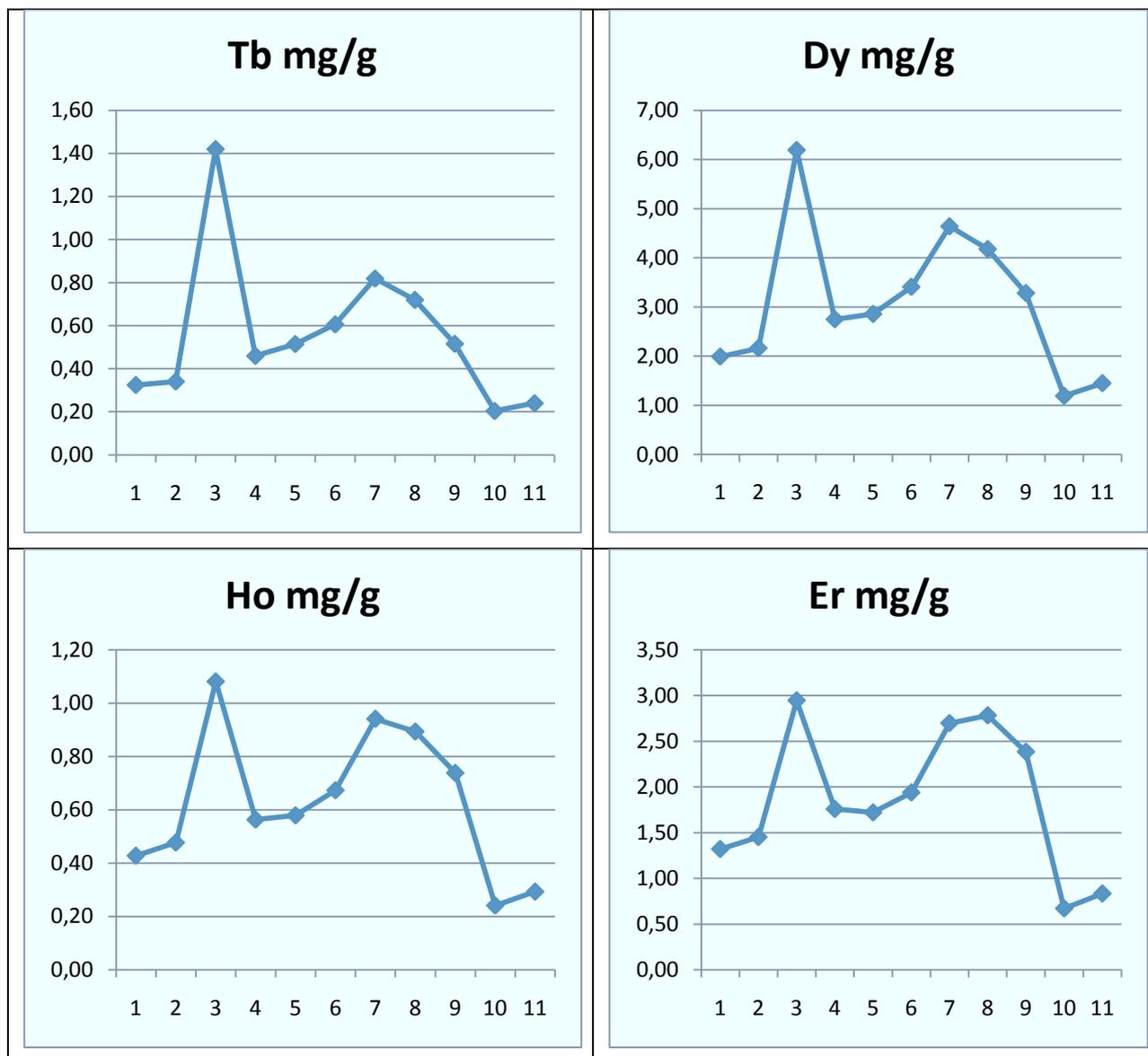


Figura 5.6 : Gráficos das concentrações dos elementos Terras Raras (mg/g) em cada amostra (eixo x).

Mello et al. (1994) definiram os litotipos costeiros permocarboníferos do Grupo Itararé como armadilhas faciológicas eficientes para depósitos terras raras do tipo placer, sendo o embasamento pré-cambriano a origem dos minerais detríticos. Nos pláceres os minerais enriquecidos em ETR, normalmente monazita (Ce) e xenotímio (Y), se concentram em sedimentos detríticos areno-rudáceos. Isso acontece devido ao retrabalhamento dos sedimentos pelas águas, lavando os minerais leves e concentrando os pesados.

A maior anomalia dentre os terras raras foi do elemento Ce (monazita). A monazita, por sua vez, é um dos principais minerais de Th e U.

Dessa forma, conclui-se que um depósito do tipo placer de pequeno porte de ETR formou-se durante a deposição do Itararé na região estudada e associado a ele ocorreram as

deposições de U e Th detríticos responsáveis pelas anomalias de Raios Gama. A formação deste tipo de depósito evidencia as condições costeiras de sedimentação, contribuindo para a definição da paleogeografia da área estudada.

CAPÍTULO 6 – CORRELAÇÃO COM OUTROS POÇOS

6.1 – Correlação litológica e de Raios Gama

Primeiramente, para a correlação com outros poços, o poço C-IG/98 foi dividido em 5 intervalos de sedimentação, com as interpretações das condições energéticas do ambiente de deposição:

Intervalo Ia (300 a 213 m): inicia-se com ritmito de 300 a 297 m, ocorrem intercalações de arenito muito fino a fino com lentes argilosas, e uma ocorrência de conglomerado e arenito médio de 255 a 253 m. Este intervalo indica ambiente de fluxo inferior, com perturbações evidenciadas nas laminações irregulares de argila e nos fluxos de sedimentos que depositaram o conglomerado.

Intervalo Ib (213 a 192 m): neste intervalo ocorre argilito com uma intercalação de arenito muito fino. As condições de deposição foram de baixa energia.

Intervalo IIa (192 a 168 m): observa-se neste subintervalo granodecrescência ascendente, passando de arenito médio para arenito fino e muito fino, diminuindo a energia de deposição.

Intervalo IIb (168 a 153 m): ocorrem lamitos, depositados em condições de baixa energia.

Intervalo IIIa (153 a 106 m): ocorrem intercalações de arenitos finos, médios e muito finos. Evidenciam flutuações das condições energéticas.

Intervalo IIIb (106 a 66 m): este subintervalo é formado predominantemente por lamitos, com uma intercalação de arenito fino a médio. Esta intercalação de arenito em uma ambiente de baixa energia pode ser gerada por fluxos de sedimentos.

Intervalo IV (66 a 33 m): na base do intervalo há ritmitos, siltitos e arenitos médios, indicando alternância de períodos calmos e períodos afetados por correntes. Para o topo do intervalo predominam arenitos muito finos e finos. No contato com o intervalo V ocorre uma camada de conglomerado. Este pacote, provavelmente, representa um canal de fluxo de detritos, com sedimentos grossos e sedimentos finos incorporados por erosão, uma vez que no pacote sotoposto ocorre sedimentos finos.

Intervalo V (33 a 0 m): predominantemente lamito arenoso, com camada de arenito fino a 17 m. Representa a transgressão marinha, ocorrendo significativo aumento de raios gama neste pacote.

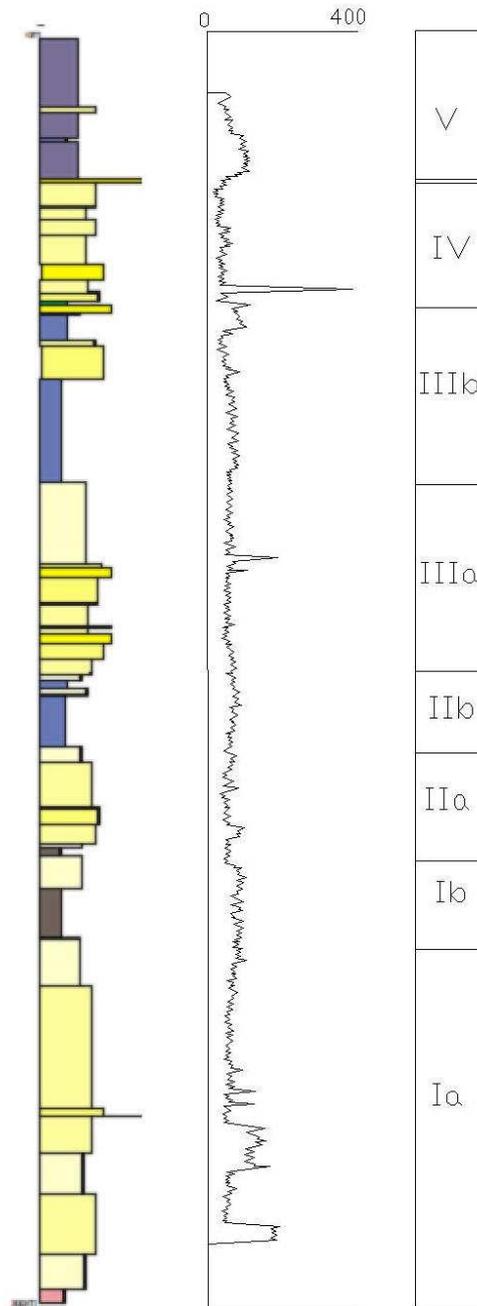


Figura 6.1: Coluna litológica e perfil geofísico de Raios Gama do poço C-IG/98.

Petri et. al. (1996a) definiram quatro pacotes de sedimentação para os poços C-IG/93, R-IG/94 e R-IG/95, buscou-se, então, correlacionar os intervalos do poço C-IG/98 aos pacotes descritos por Petri. O poço C-IG/98 localiza-se a nordeste dos outros poços e, assim, pode somar mais informações ao modelo paleogeográfico proposto nos trabalhos anteriores.

A correlação foi baseada nas condições de energia no ambiente de sedimentação e não propriamente nas variações litológicas, com o auxílio dos perfis de Raios Gama.

O pacote D não é correlacionável, sendo característico apenas do poço C-IG/93. O pacote C engloba desde a base do poço até a profundidade de 192 m, apresentando camadas de lamitos, argilitos, ritmitos, arenitos finos a médios com pequenas lâminas de arenito muito fino ou siltito e uma fina camada de conglomerado, neste intervalo nota-se níveis com alta contagem de raios gama. O pacote B estende de 192 até 66 m, este intervalo é constituído por camadas de arenitos muito finos a médios, lamitos, ritmitos e siltitos, sendo que a contagem de raios gama aumenta em direção ao topo do pacote. O pacote A é delimitado na base por camadas de arenitos finos a médios e um aumento acentuado de Raios Gama, ocorre uma camada de conglomerado a 33 m, a parte superior do pacote é constituída predominantemente por lamitos até o topo do poço, com aumento considerável de emissão de raios gama, indicando o afogamento da bacia.

Observa-se que os poços a sudoeste (R-IG/94 e R-IG/95) possuem maior quantidade de sedimentos finos. Além disso, o poço C-IG/98 possui o pacote A (relacionado ao afogamento da bacia) menos espesso que os demais poços. Tais observações corroboram a paleogeografia proposta por Petri & Pires (1991), na qual uma rampa pretérita estaria localizada na região de Capivari-Rafard com mergulho para sudoeste e área fonte a nordeste, sendo que o poço C-IG/98 estaria localizado na zona costeira, com influências continentais, e durante o afogamento da bacia o mar avançaria para nordeste, sendo mais espessos os sedimentos deste pacote a sudoeste.

Outra relação observada foi que as sequências sedimentares dos poços enquadram-se nas formações Itu e Capivari, descritas por Petri & Pires (1992), uma vez que a primeira apresenta predominância de sedimentos arenosos (pacotes B e C) e a segunda apresenta maior conteúdo em finos (pacote A).

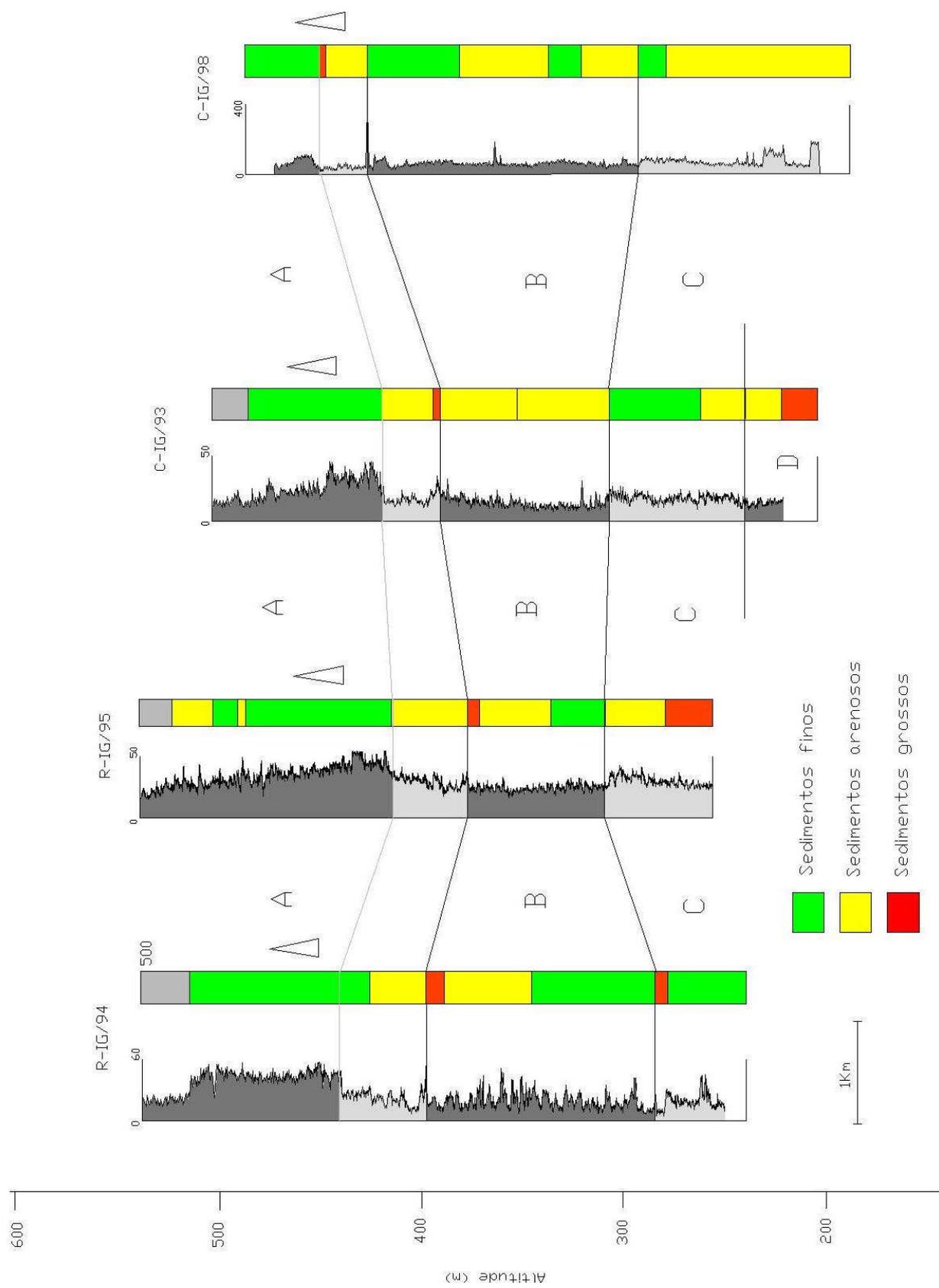


Figura 6.2: Correlação dos perfis de Raios Gama e colunas litológicas dos poços C-IG/98, C-IG/93, R-IG/94 e R-IG/95.

6.2 – Modelo estratigráfico da área

O modelo estratigráfico da área foi produzido a partir de dados litológicos provenientes de 17 poços nos municípios de Capivari e Rafard. A correlação foi realizada aplicando-se técnicas de geoestatística baseadas na teoria das variáveis regionalizadas, que estuda a variabilidade espacial de um determinado fenômeno, assumindo que há correlação entre as variações espaciais. Para a análise espacial, dois passos são necessários: a construção de variogramas e a krigagem.

Neste estudo, o método utilizado foi o da krigagem indicativa, uma vez que os dados litológicos constituem dados discretos e não contínuos. Para tanto, foi necessária a transformação binária dos dados individualizando cada fácies como variáveis indicatrizes, em que assume-se que a ocorrência da fácies no conjunto de dados é 0 ou 1. A variável indicatriz $I(x_i)$ é dada por Felgueiras et al. (2002):

$$I(x_i) = 1, \text{ se } x_i \in X \\ = 0, \text{ se } x_i \in X^c,$$

onde X é um conjunto do domínio A e X^c o conjunto complementar de X .

6.2.1 – Variogramas

Os variogramas são utilizados para a análise estrutural das variáveis, ou seja, a área de influência de cada amostra. Os variogramas apresentam três parâmetros fundamentais: o alcance, que corresponde a distância a partir da qual as amostras apresentam comportamento aleatório; o patamar, que representa a estabilização do variograma no campo aleatório; e a efeito pepita, que reflete estruturas não captadas pelas esclas amostrais, como erros analíticos e amostrais (Licht, 1998).

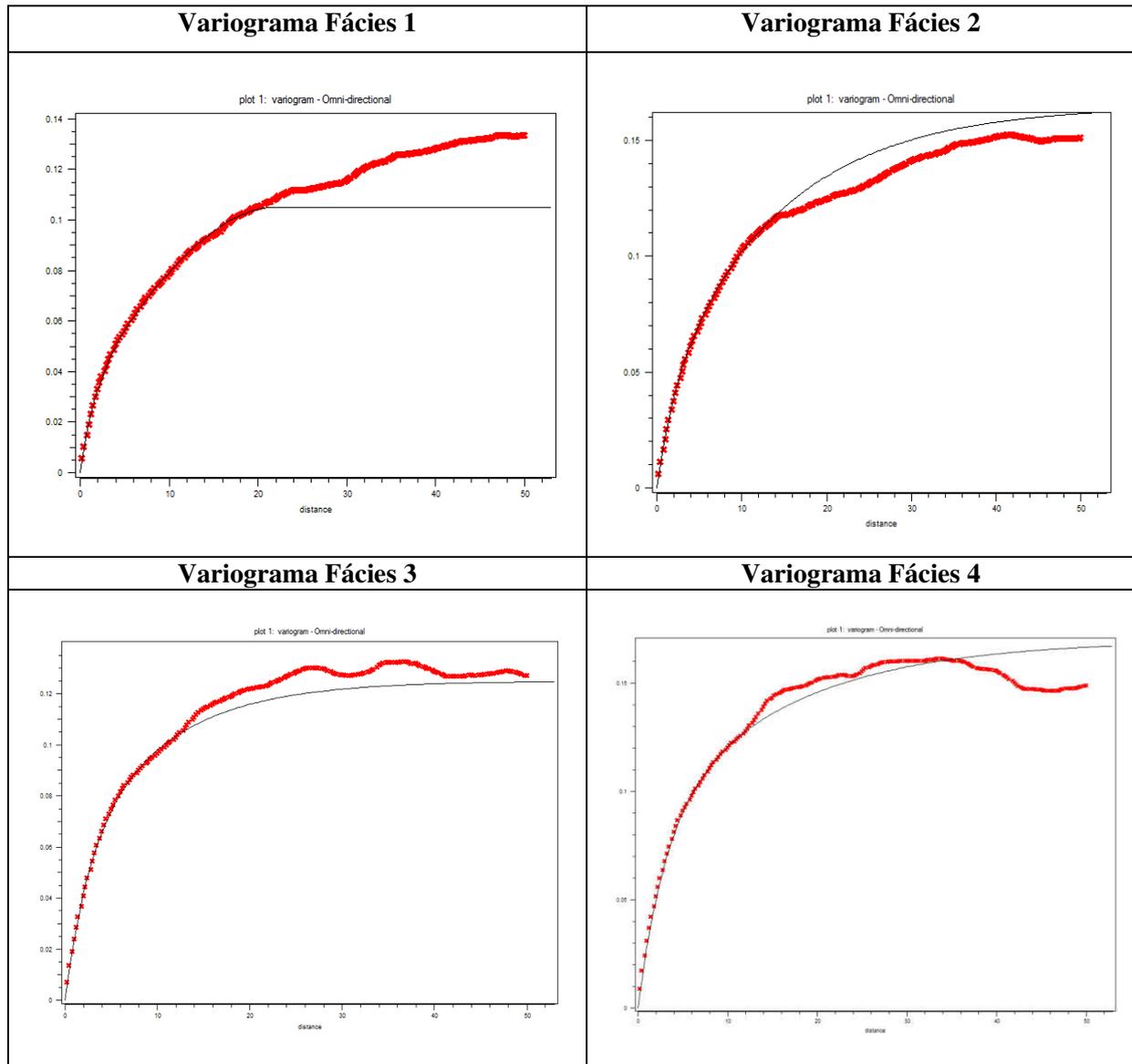
Os dados iniciais dos variogramas são os mais importantes para se analisar, pois possuem as maiores correlações espaciais, sendo que quando atingem o patamar os dados apresentam caráter aleatório.

A produção dos variogramas foi feita para cada variável indicatriz, que são as fácies 1 a 6. Para todas as fácies, os parâmetros utilizados para a produção dos variogramas experimentais foram os mesmos: a direção escolhida foi omnidirecional, o número de passos foi 250, o tamanho do passo de 0,2 m, a tolerância do comprimento de 0,1 m e a tolerância angular de 95°. A seleção da direção do ângulo de 95° resulta na direção omnidirecional. O variograma

omnidirecional traduz a semivariância em função das distâncias entre os pontos, onde todas as direções são consideradas.

O variograma da indicatriz representa a probabilidade de que, para cada par de pontos separados por uma distancia h , um deles pertença a 1 ou a 0.

Após o cálculo do variograma experimental, foi feito o ajuste de uma função matemática representada por um modelo teórico do variograma, essa função descreve a variabilidade espacial dos dados a partir dos dados do variograma experimental (figura 6.3).



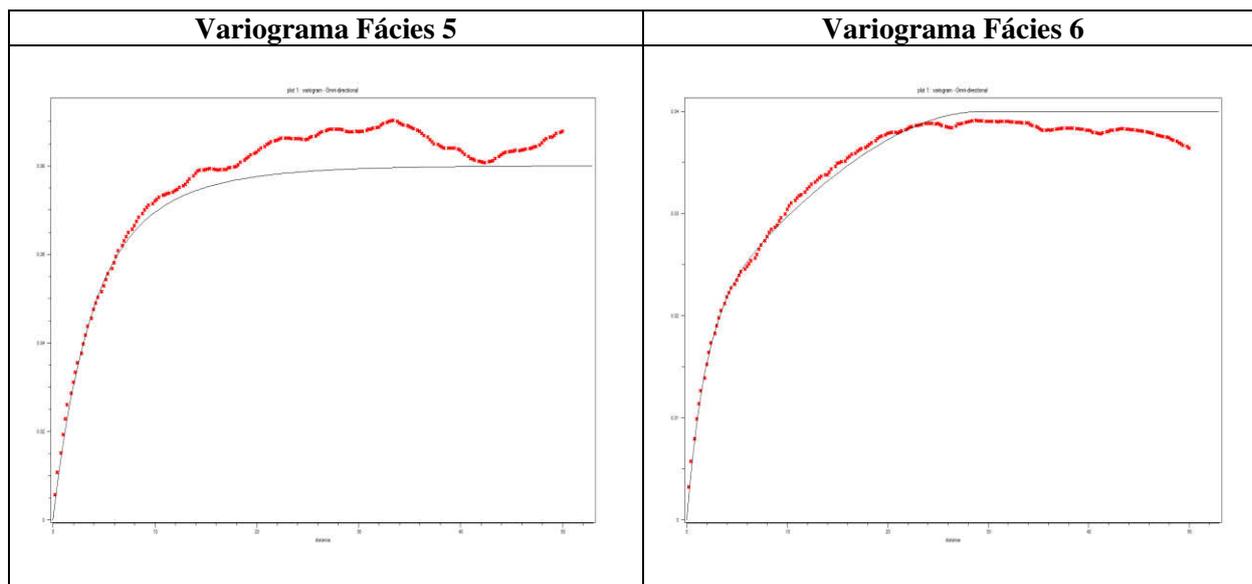


Figura 6.2: Correlação dos perfis de Raios Gama e colunas litológicas dos poços C-IG/98, C-IG/93, R-IG/94 e R-IG/95.

6.2.2 – Krigagem

A krigagem é um método geoestatístico de interpolação dos dados em que se estima valores para locais onde não há dados concretos, a partir da relação espacial entre os dados dos 17 poços estudados (figura 6.4). Este método baseia-se na análise de dependência no espaço, que é obtida pelos variogramas experimentais.

Para a krigagem indicativa, utilizou-se a krigagem ordinária em cada variável indicatriz. Na krigagem ordinária o estimador consiste na média ponderada dos valores, sendo a somatória dos pesos igual a 1.

Após a produção dos variogramas, foi feita então a krigagem ordinária para cada variável. A malha foi definida por células de 96 m de comprimento, 95 m de largura e 1,8 m de altura. O maior número de células em z (altura) busca evidenciar variações litológicas verticais e empilhamento de fácies. A krigagem produziu um grid para cada variável indicatriz, no qual cada célula de um ponto não amostrado apresenta a probabilidade de pertencer à variável.

Na próxima etapa, utilizou-se rotinas de programação em Visual Basic para determinar qual variável possuía maior probabilidade de ocorrer em cada célula do grid. Isso foi feito selecionando os maiores valores de probabilidade de cada variável e considerando-se ainda a porcentagem obtida dos dados concretos para cada fácies, de forma que a porcentagem estimada de cada fácies fosse igual a sua porcentagem nos dados amostrados. Dessa forma, criou-se um modelo tridimensional da probabilidade de ocorrência de cada fácies litológica (figuras 6.5, 6.6, 6.7 e 6.8).

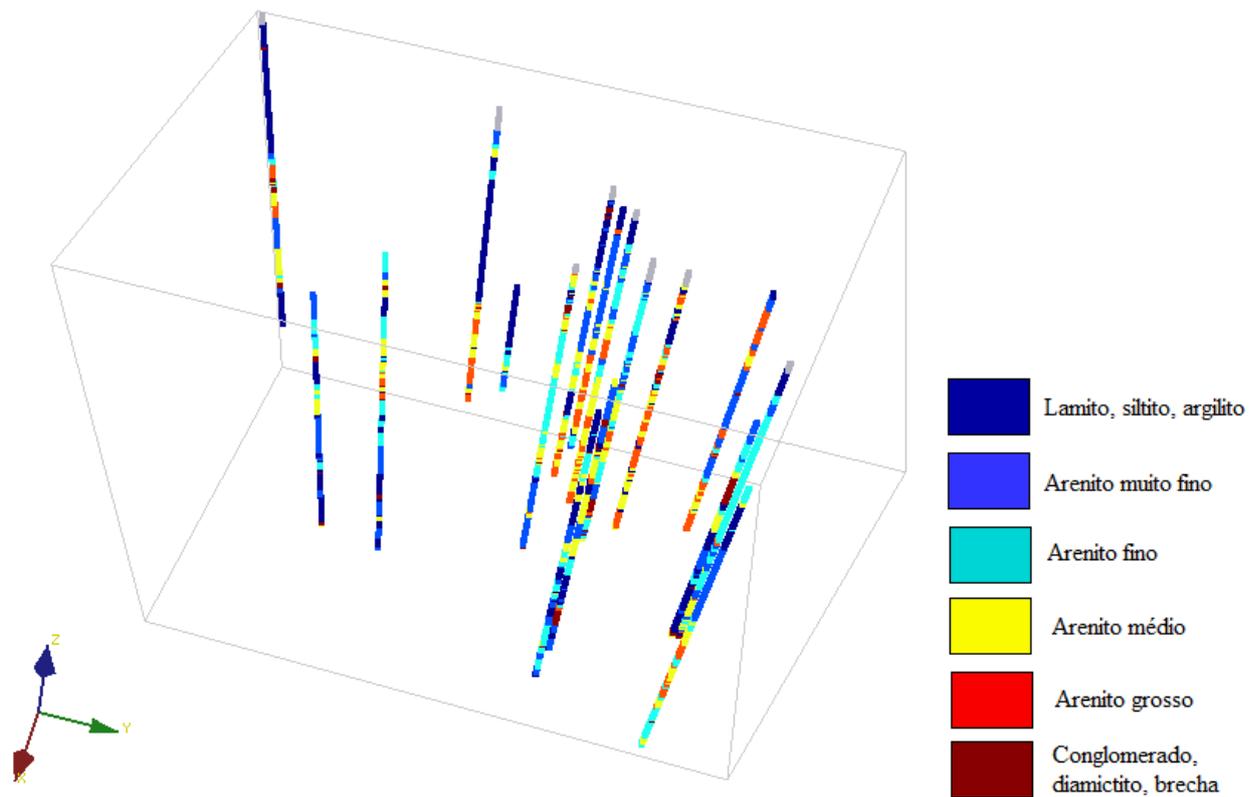


Figura 6.4: Disposição dos poços no grid, classificados de acordo com as fácies litológicas. Norte representado pelo eixo y.

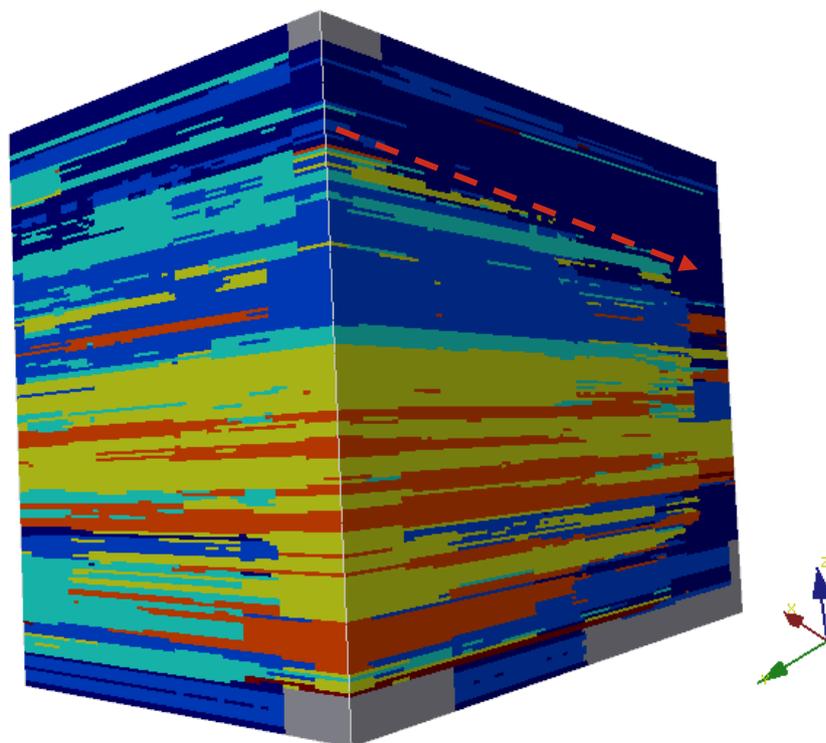


Figura 6.5: Modelo tridimensional de probabilidade de ocorrência das fácies litológicas. Nota-se no pacote superior uma rampa com aumento de sedimentos finos para sudoeste (seta). Norte representado pelo eixo y.

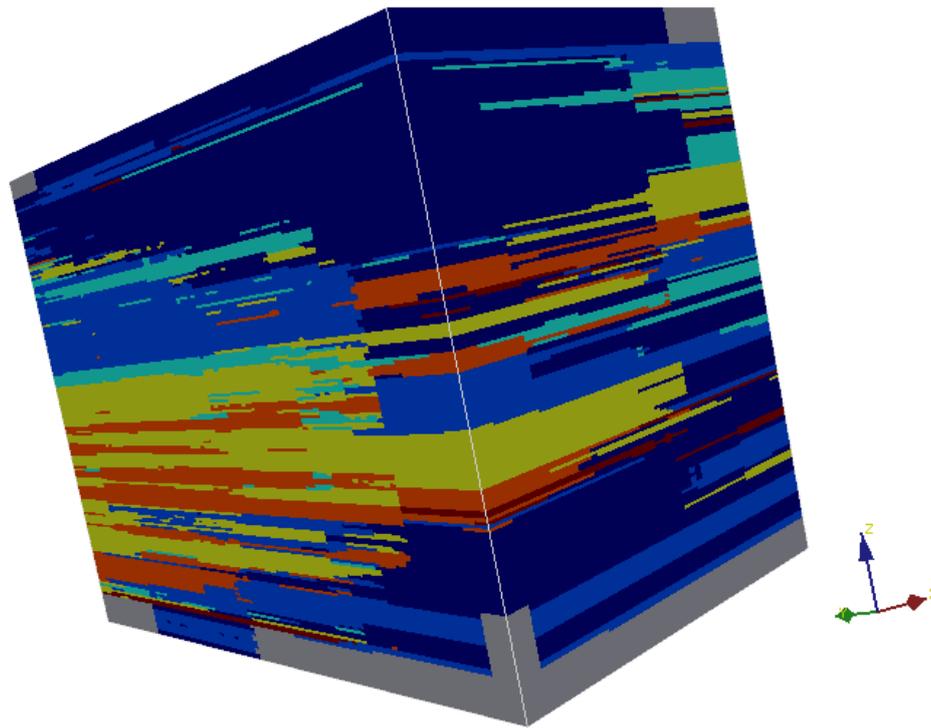


Figura 6.6: Modelo tridimensional de probabilidade de ocorrência das fácies litológicas. Visão a partir do sudoeste da área. Norte representado pelo eixo y.

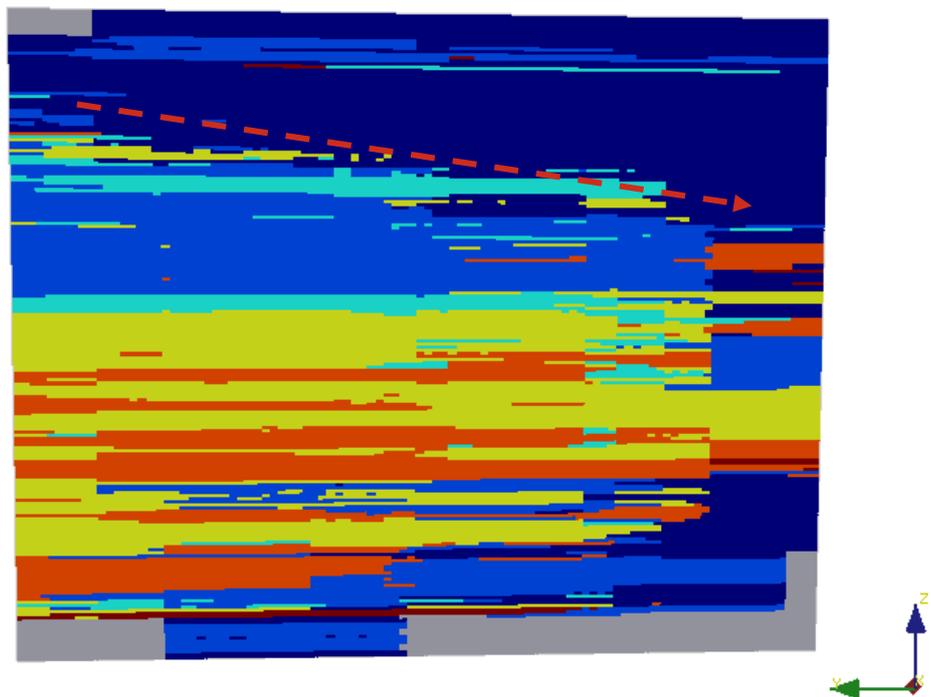


Figura 6.7: Seção horizontal do modelo tridimensional do sentido norte-sul. Norte representado pelo eixo y.

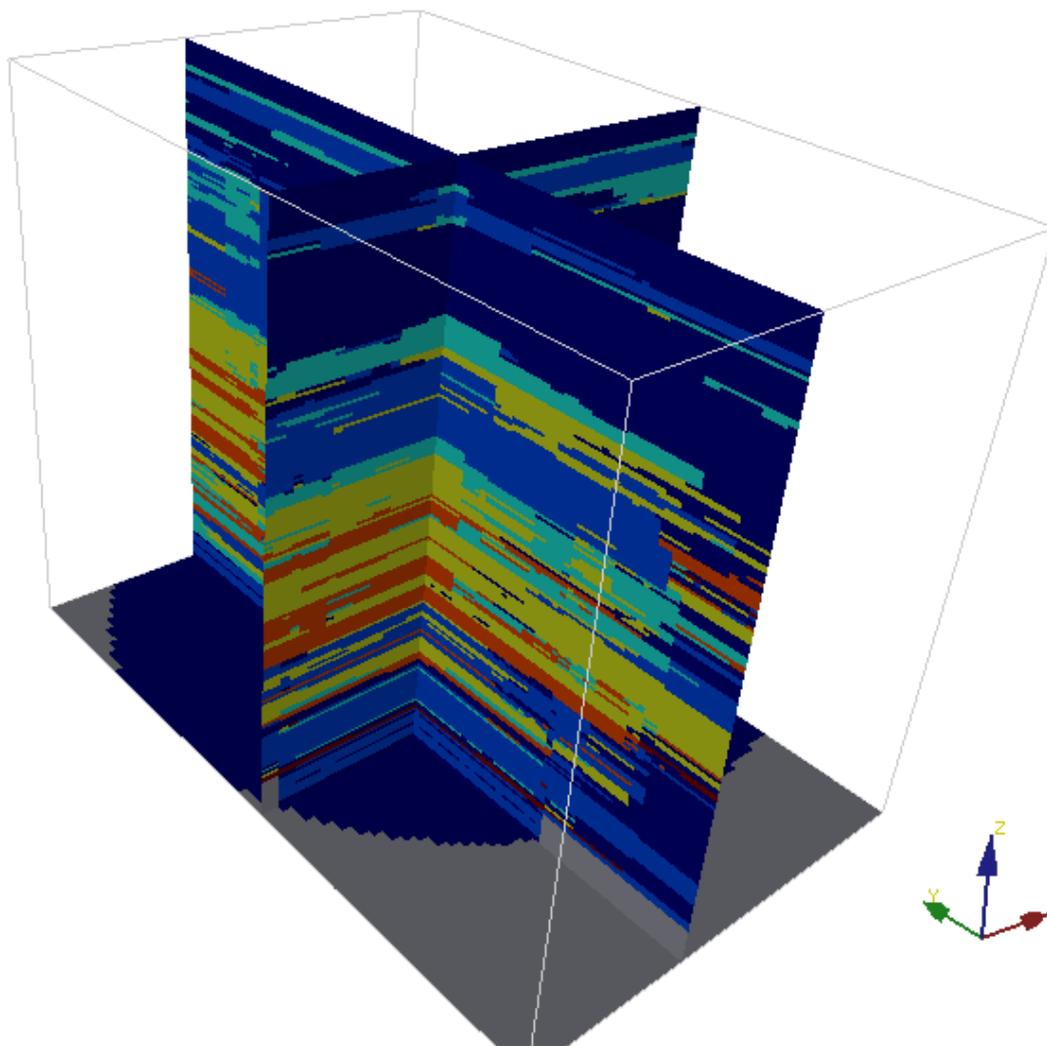


Figura 6.8: Seções verticais do modelo tridimensional. Norte representado pelo eixo y.

Através do modelo tridimensional, observa-se que há um pacote de clásticos grossos na parte inferior, formado por sedimentos predominantemente arenosos, principalmente arenitos médios e grossos, e, subordinadamente, lamitos, argilitos, siltitos, arenitos finos e algumas ocorrências de diamictitos, conglomerados e brechas. Na parte superior do modelo, há predominância de sedimentos finos, lamitos, siltitos, argilitos e arenitos finos.

Esta divisão nos pacotes inferior e superior encaixa-se nas descrições de Petri & Pires (1992) para as Formações Itu e Capivari, em que a primeira é predominantemente arenosa e a segunda é predominantemente constituída por depósitos finos, representando depósitos marinhos que transgridem sobre a Formação Itu, reforçando a hipótese do afogamento da bacia no pacote superior devido ao evento transgressivo marinho ocorrido.

É possível observar também, principalmente na seção horizontal norte-sul, que há uma rampa com caimento para sul, caracterizada no modelo estratigráfico pelo aumento de sedimentos finos para sul/sudoeste. Esta visualização do aumento de sedimentos finos corrobora a paleogeografia proposta por Petri & Pires (1991), na qual a área estudada faria parte de um leque submarino em uma rampa com mergulho para sudoeste.

CONCLUSÕES

O presente trabalho buscou acrescentar informações a paleogeografia proposta para a região de Capivari e evidenciar padrões entre litologia e perfis geofísicos que podem ser utilizados na definição das propriedades das rochas. O estudo contou com a análise integrada de dados litológicos, petrográficos, geoquímicos e geofísicos.

O detalhamento das litologias por meio da petrografia evidenciou a evolução dos sedimentos no contexto de deposição e soterramento da Bacia do Paraná, gerando eventos diagenéticos como a dissolução, substituição e cimentação. A ocorrência desses eventos está condicionada às influências locais e regionais, daí a importância de individualizar o estudo dos corpos sedimentares, definindo quais fatores contribuíram ao longo do tempo para a evolução desses sedimentos.

A correlação dos perfis geofísicos com as litologias por meio de métodos estatísticos se mostrou de grande importância e utilidade na caracterização de pacotes litológicos em subsuperfície, evidenciando padrões e relações rocha-perfil que são utilizados na caracterização de reservatórios, sendo possível diferenciar rochas reservatório de rochas não reservatório.

Ainda neste contexto, a análise geoquímica contribuiu para a investigação das causas de anomalias nos padrões rocha-perfil, evidenciando processos físicos e químicos que ocorreram durante a sedimentação. As concentrações de elementos traço indicaram a deposição do poço C-IG/98 em zona costeira, com influências continentais.

Por fim, a correlação de 17 poços, por meio da krigagem indicativa, em união com os dados obtidos para o poço C-IG/98, mostraram a adequação dos modelos à paleogeografia proposta em trabalhos anteriores para a região de Capivari e Rafard. A variação litológica dos sedimentos indica que a deposição ocorreu em leque submarino na região, devido a ocorrência de sedimentos originados de fluxos de detritos, escorregamentos e deslizamentos. Os diversos tópicos estudados indicaram a existência de uma rampa pretérita de deposição, com partes emersas a nordeste e mergulho para sudoeste.

REFERÊNCIAS

- Bocardi, L. B. 2005. Petrologia e aspectos diagenéticos de arenitos reservatórios do Grupo Itararé (Carbonífero-Permiano), Bacia do Paraná. Dissertação (Mestrado) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.
- Bocardi, L.B., Rostirolla, S.P., Deguchi, M.G.F., Mancini, F. 2008. História de soterramento e diagênese em arenitos do Grupo Itararé – implicações na qualidade de reservatórios. *Rev. Bras. Geoc.*, 38:207-216.
- Bloch, S. 1994. Secondary porosity in sandstones: significance, origin, relationship to subaerial unconformities, and effect on predrill reservoir quality prediction. Reservoir quality assessment and prediction in clastic rocks. Short Course 30, Tulsa, Oklahoma, SEPM, Society for Sedimentary Geology, pp.: 137-159.
- Dickinson, W.R. 1985. Interpreting provenance relation from detrital modes of sandstones. In Zuffa, G.G. (ed.), *Provenance of Arenites: NATO ASI Series, C 148*, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 333–363.
- Felgueiras C.A, Druck S., Monteiro A.M.V. 2002. Análise espacial de superfícies: o enfoque da geoestatística por indicação. Ministério da ciência e tecnologia/ INPE, 25 p.
- Folk, R. L. 1968. *Petrology of sedimentary rocks*. Austin, TX: Hemphill, 107p.
- França, A. B. 1987. Stratigraphy, depositional environment, and reservoir analysis of the Itararé Group (Permo-Carboniferous), Paraná Basin. Brazil. Cincinnati. 188 p. (PhD Thesis, University of Cincinnati).
- França A.B. & Potter P.E. 1988. Estratigrafia, ambiente deposicional e análise de reservatório do Grupo Itararé (Permocarbonífero), Bacia do Paraná (parte 1). *Bol. Geoc. Petrobrás*, 2:147-191.
- Fúlfaro, V.J., Perinotto, A.J., Barcelos, J.H. 1991. Formação Tietê: o pós-glacial no Estado de São Paulo. In: *SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE*, 2, Atas, São Paulo, SBG, p. 397–404.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A. 1981. Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. São Paulo, v. 1. 94p.

Licht O.A.B. 1998. Prospecção Geoquímica – Princípios, Técnicas e Métodos. CPRM, Rio de Janeiro, 236 pp.

Lima, E.A.M. 2008. Avaliação da Qualidade dos Sedimentos e Prognóstico Geoquímico Ambiental da Zona Estuarina do Rio Botafogo, Pernambuco. Tese de Doutorado.

Mello, I.S.C., Cabral Júnior, M., Motta, J.F.M. 1994. Terras raras no Estado de São Paulo: avaliação da potencialidade geológica. Rev. Bras. Geoc., 24:203-222.

Milani E.J. 1997. Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana Sul-Occidental. Tese de Doutorado, IG, Univ. Federal do Rio Grande do Sul, 255p.

Nery, G. & Barros, S.B.R., 2000. Uso dos Perfis Geofísicos na definição de Ambientes Depositionais. VI Congresso Internacional Integrado da ABAS / ALSUD e IAH – Fortaleza, Ceará.

Paula Neto, F.J.S. 1988. Variação da Eletroresistividade com o Teor de Óleo dos Folhelhos da Formação Irati. São Paulo. 32 p. (Trabalho de Graduação 2, Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo).

Petri, S. 1992. Litofácies e Significado Paleoambiental dos Sedimentos Itararé na Região Capivari-Rafard, Estado de São Paulo. Revista do Instituto Geológico, IG-SMA, SP, 13(1):7-30.

Petri, S. & Pires, F. A. 1992. O Subgrupo Itararé (Permocarbonífero) na região do Médio Tietê, Estado de São Paulo. Revista Brasileira de Geociências, SBG, São Paulo, 22(3): 301-310.

Petri, S.; Mendonça, C. A.; Bologna, M. S.; Coutinho, J. M. V.; Vieira, P. C. & Botelho, P. F. 1996a. Correlação estratigráfica de poços para captação de água subterrânea na região

Capivari/Rafard, SP: Descrições litológicas macroscópicas, microscópicas e perfis geofísicos. Revista Brasileira de Geociências, SBG, São Paulo, 26(1): 25-34.

Petri, S.; Viera, P. C.; Oda, G. H.; Botelho, P. F. 1996b. O Subgrupo Itararé, permocarbonífero da região do médio Tietê, Estado de São Paulo: Estudos em subsuperfície. Revista do Instituto Geológico. São Paulo, 17:63-78.

Pires, F.A. & Petri, S. 1991. O Subgrupo Itararé na região Capivari-Rafard, Estado de São Paulo. In: SIMP. REG. GEOL. SUDESTE, 2. São Paulo, 1991. Atas... São Paulo, SBG/NSP. p. 391-396.

Rabe, C. Araújo, E. M. P.; Gaggiotti, K. V. B. Fontoura, S. A. B. da. 2003. Caracterização de um folhelho da bacia de campos a partir de perfilagem de poços e ensaios de laboratório. 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás.

Rider, M. 2000. The geological interpretation of well logs. (Second Edition) Sutherland, Scotland: Rider-French Consulting Ltd. 280 p.

Rosa, H. 2006. Estudo de Caracterização de Eletrofácies por meio de Perfis Geofísicos de poços e de Amostras de Testemunho Utilizando Estatística Multivariada. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campina. 230 pp. . Tese (Doutorado).

Saad, A. R. 1977. Estratigrafia do Subgrupo Itararé no centro e sul do Estado de São Paulo. São Paulo, Instituto de Geociências/USP, 107p. (Dissertação de mestrado).

Sallun Filho, W. ; Sallun, A. E. M. ; Teixeira, A. L. ; Negri, F. A., Azevedo Sobrinho, J. M. 2009. Geologia de Subsuperfície do Estado de São Paulo: 75 Anos de Levantamentos do Instituto geológico (1932-2007). 1. ed. São Paulo: Instituto Geológico/SAM-SP. v. único. 2738 p.

Sancevero S.S. 2007. Estudo de aplicação de métodos quantitativos em dados sísmicos no processo de caracterização integrada de reservatórios. Tese de doutorado em Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 220p.

Sanchetta, A. C. 2010. Reconhecimento E Classificação De Fácies Geológicas Através da Análise De Componentes Independentes, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. 94 p. Dissertação de Mestrado.

Schlumberger. 1987. Log Interpretation Principles/Applications, Houston, Texas.

Serra, O. 1986. Fundamentals of well-log interpretation - 2. The interpretation of logging data, developments in petroleum science (15B), Elsevier Science Publishers B.V. 684p.

Tucker M.E. 2001. Sedimentary petrology. 3^o ed., Blackwell Science, 262 pp.

Vidal, A.C. Estudo hidrogeológico do Aquífero Tubarão na área de afloramento da porção central do Estado de São Paulo. Rio Claro, 2002. 109 p. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.

Vidal, A.C.; Kiang, C.; Petri, S.; Azevedo Sobrinho, J.M.. Análise Petrográfica e Petrofísica do poço C-IG-98, Município de Capivari, SP.. Revista Brasileira de Geociências, v. 36, p. 195-202, 2006.

Zalán, P.V., Wolff, S., Astolfi, M.A.M., Vieira, I.S., Conceição, J.C.J., Appi, V.T., Neto, E.V.S., Cerqueira, J. R., Marques, A. 1990. The Paraná Basin, Brazil. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, Bulletin. Memoir 51:681-708.

Wu, F. T. 1989. Proveniência das rochas arenosas do Subgrupo Itararé no sul do Estado de São Paulo. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, USP, São Paulo, 165p.

Wu, F.T.; Chang, M.R.C.; & Landi, P.M.B. 1991. Proveniência das rochas arenosas do Subgrupo Itararé em termos de ambiente tectônico no sul do Estado de São Paulo. Revista Brasileira de Geociências, SBG, São Paulo, 21(2): 127-137.

Sites:

Laboratório de análise de minerais e rochas
<http://www.lamir.ufpr.br/index.php?option=com_content&view=article&id=14&Itemid=6>
Acesso em: 10/11/2011.

ANEXO 1

Rotina para a preparação dos dados litológicos dos 17 poços, visando padronizar as profundidades em passos de 0,25m para o carregamento no software SgeMS:

```
Sub Macro1()  
Macro1 Macro  
ct = 0  
a = 1  
For zz = 1 To 2000  
For i = 3 To 100  
topo = Worksheets("plan1").Cells(i, 1)  
base = Worksheets("plan1").Cells(i, 2)  
lito = Worksheets("plan1").Cells(i, 3)  
If ct > topo And ct <= base Then  
Worksheets("plan2").Cells(a, 1) = Worksheets("plan1").Cells(1, 1)  
Worksheets("plan2").Cells(a, 2) = Worksheets("plan1").Cells(1, 3)  
Worksheets("plan2").Cells(a, 4) = ct  
Worksheets("plan2").Cells(a, 3) = Worksheets("plan1").Cells(1, 4)  
Worksheets("plan2").Cells(a, 5) = lito  
a = a + 1  
GoTo 10  
End If  
Next i  
10  
ct = ct + 0.25  
Next zz  
End Sub
```

Rotina para a preparação dos perfis vetorizados de Raios Gama dos poços C-IG/93, R-IG/94 e R-IG/95, visando padronizar as profundidades em passos de 0,25m para o carregamento no software SgeMS:

```
Sub Macro2()
lin1 = 3
lin2 = 1
cont = 0.25
While Worksheets("Planilha1").Cells(lin1, 1) > cont
    Worksheets("Planilha2").Cells(lin2, 1) = cont
    Worksheets("Planilha2").Cells(lin2, 2) = Worksheets("Planilha1").Cells(lin1, 2)
    cont = cont + 0.25
    lin2 = lin2 + 1
Wend
While cont < Worksheets("Planilha1").Cells(1, 4)
    While cont > Worksheets("Planilha1").Cells(lin1, 1)
        lin1 = lin1 + 1
    Wend
    If cont = Worksheets("Planilha1").Cells(lin1, 1) Then
        Worksheets("Planilha2").Cells(lin2, 1) = cont
        Worksheets("Planilha2").Cells(lin2, 2) = Worksheets("Planilha1").Cells(lin1, 2)
    Else
        Worksheets("Planilha2").Cells(lin2, 1) = cont
        Worksheets("Planilha2").Cells(lin2, 2) = (Worksheets("Planilha1").Cells(lin1 - 1, 2) +
Worksheets("Planilha1").Cells(lin1, 2)) / 2
    End If
    cont = cont + 0.25
    lin2 = lin2 + 1
Wend

Worksheets("Planilha2").Cells(lin2, 1) = cont
Worksheets("Planilha2").Cells(lin2, 2) = Worksheets("Planilha1").Cells(lin1 + 1, 2)
End Sub
```

Rotina da krigagem indicativa, visando selecionar no grid quais as fácies com maior probabilidade de ocorrência em cada célula, mantendo a porcentagem encontrada nos testemunhos:

```
Sub Macro1()  
Dim IntervaloClass As String  
Dim DaLinha As Long  
  
MarcaOrdem  
  
Retorno = Define(9, 1000008, 1, 0) '1000008 'Rotula TODOS os dados em uma das Fácies  
Retorno = Classifica("A9:I1000008", "A1") 'Classifica usando a coluna A1 como 3º critério  
QtdTotal = Contar 'Verifica qtd e percentual de cada uma das Fácies  
  
If Worksheets("plan1").Cells(5, 10) > (0.2158 * QtdTotal) Then 'Se percentual de 1 superior a  
21,58% reclassifica  
    DaLinha = 9 + (0.2158 * QtdTotal) 'Percentual do 1 * Total de dados considerado  
    Retorno = Define(DaLinha, 1000008, 2, 1)  
    IntervaloClass = "A" + Trim(Str(Int(DaLinha))) + ":I1000008"  
    Retorno = Classifica(IntervaloClass, "B1")  
    Contar  
End If  
  
If Worksheets("plan1").Cells(5, 11) > (0.2195 * QtdTotal) Then  
    DaLinha = DaLinha + (0.2195 * QtdTotal)  
    Retorno = Define(DaLinha, 1000008, 3, 1)  
    IntervaloClass = "A" + Trim(Str(Int(DaLinha))) + ":I1000008"  
    Retorno = Classifica(IntervaloClass, "C1")  
    Contar  
End If  
  
If Worksheets("plan1").Cells(5, 12) > (0.1978 * QtdTotal) Then  
    DaLinha = DaLinha + (0.1978 * QtdTotal)  
    Retorno = Define(DaLinha, 1000008, 4, 1)  
    IntervaloClass = "A" + Trim(Str(Int(DaLinha))) + ":I1000008"  
    Retorno = Classifica(IntervaloClass, "D1")  
    Contar  
End If  
  
If Worksheets("plan1").Cells(5, 13) > (0.2028 * QtdTotal) Then  
    DaLinha = DaLinha + (0.2028 * QtdTotal)  
    Retorno = Define(DaLinha, 1000008, 5, 1)
```

```

IntervaloClass = "A" + Trim(Str(Int(DaLinha))) + ":I1000008"
Retorno = Classifica(IntervaloClass, "E1")
Contar
End If

RetornaOrdemOriginal

End Sub

Function MarcaOrdem()
Dim Linha As Long
For Linha = 9 To 1000008
    Worksheets("plan1").Cells(Linha, 9) = Linha - 8
Next
End Function

Function RetornaOrdemOriginal()
ActiveWorkbook.Worksheets("plan1").Sort.SortFields.Clear
ActiveWorkbook.Worksheets("plan1").Sort.SortFields.Add Key:=Range("I1"),
SortOn:=xlSortOnValues, Order:=xlAscending, DataOption:=xlSortNormal
With ActiveWorkbook.Worksheets("plan1").Sort
    .SetRange Range("A9:I1000008")
    .Header = xlNo
    .MatchCase = False
    .Orientation = xlTopToBottom
    .SortMethod = xlPinYin
    .Apply
End With
End Function

Function Classifica(Intervalo As String, Coluna As String)
ActiveWorkbook.Worksheets("plan1").Sort.SortFields.Clear
ActiveWorkbook.Worksheets("plan1").Sort.SortFields.Add Key:=Range("G1"),
SortOn:=xlSortOnValues, Order:=xlAscending, DataOption:=xlSortNormal
ActiveWorkbook.Worksheets("plan1").Sort.SortFields.Add Key:=Range("H1"),
SortOn:=xlSortOnValues, Order:=xlAscending, DataOption:=xlSortNormal
ActiveWorkbook.Worksheets("plan1").Sort.SortFields.Add Key:=Range(Coluna),
SortOn:=xlSortOnValues, Order:=xlDescending, DataOption:=xlSortNormal
With ActiveWorkbook.Worksheets("plan1").Sort
    .SetRange Range(Intervalo)
    .Header = xlNo
    .MatchCase = False
    .Orientation = xlTopToBottom

```

```

.SortMethod = xlPinYin
.Apply
End With
End Function

```

```

Function Define(LinInicial, LinFinal, ColInicial, Marcador As Integer)

```

```

    Dim Lin, Col, MaiorColuna As Integer
    Dim MaiorValor As Double

```

```

    For Lin = LinInicial To LinFinal

```

```

        If ColInicial = 2 And Worksheets("plan1").Cells(Lin, 7) <> 1 Then Exit For
        If ColInicial = 3 And Worksheets("plan1").Cells(Lin, 7) <> 2 Then Exit For
        If ColInicial = 4 And Worksheets("plan1").Cells(Lin, 7) <> 3 Then Exit For
        If ColInicial = 5 And Worksheets("plan1").Cells(Lin, 7) <> 4 Then Exit For

```

```

        MaiorValor = Worksheets("plan1").Cells(Lin, ColInicial)
        MaiorColuna = ColInicial

```

```

        For Col = ColInicial + 1 To 6

```

```

            If MaiorValor < Worksheets("plan1").Cells(Lin, Col) Then
                MaiorValor = Worksheets("plan1").Cells(Lin, Col)
                MaiorColuna = Col

```

```

            End If

```

```

        Next Col

```

```

        If MaiorValor <> -9999 Then

```

```

            Worksheets("plan1").Cells(Lin, 7) = MaiorColuna
            Worksheets("plan1").Cells(Lin, 8) = Marcador

```

```

        Else

```

```

            Worksheets("plan1").Cells(Lin, 7) = "9999"

```

```

        End If

```

```

    Next Lin

```

```

End Function

```

```

Function Contar() As Long

```

```

    Dim Tipo(7) As Long

```

```

    For Lin = 9 To 1000008

```

```

        If Worksheets("plan1").Cells(Lin, 7) = 1 Then

```

```

            Tipo(0) = Tipo(0) + 1

```

```

        Else

```

```

            If Worksheets("plan1").Cells(Lin, 7) = 2 Then

```

```

    Tipo(1) = Tipo(1) + 1
Else
    If Worksheets("plan1").Cells(Lin, 7) = 3 Then
        Tipo(2) = Tipo(2) + 1
    Else
        If Worksheets("plan1").Cells(Lin, 7) = 4 Then
            Tipo(3) = Tipo(3) + 1
        Else
            If Worksheets("plan1").Cells(Lin, 7) = 5 Then
                Tipo(4) = Tipo(4) + 1
            Else
                If Worksheets("plan1").Cells(Lin, 7) = 6 Then
                    Tipo(5) = Tipo(5) + 1
                Else
                    If Worksheets("plan1").Cells(Lin, 7) = 9999 Then
                        Tipo(6) = Tipo(6) + 1
                    End If
                End If
            End If
        End If
    End If
End If
End If
End If
End If
End If
End If
Next

Worksheets("plan1").Cells(5, 10) = Tipo(0)
Worksheets("plan1").Cells(5, 11) = Tipo(1)
Worksheets("plan1").Cells(5, 12) = Tipo(2)
Worksheets("plan1").Cells(5, 13) = Tipo(3)
Worksheets("plan1").Cells(5, 14) = Tipo(4)
Worksheets("plan1").Cells(5, 15) = Tipo(5)
Worksheets("plan1").Cells(5, 16) = Tipo(6)

Contar = Tipo(0) + Tipo(1) + Tipo(2) + Tipo(3) + Tipo(4) + Tipo(5)
End Function

```