

4 ANÁLISE FACIOLÓGICA, PALINOLÓGICA E GEOQUÍMICA DOS SEDIMENTOS AFLORANTES

Neste capítulo serão apresentados os afloramentos estudados ao longo da área de pesquisa, correspondentes às Formações Urucutuca e Rio Doce.

4.1 Análises Sedimentológica e Estratigráfica

4.1.1 Formação Urucutuca

A Formação Urucutuca é alvo de diferentes pesquisas devido ao interesse exploratório despertado por suas fácies turbidíticas que afloram na porção semiexumada do Cânion de Almada, na região de Sambaituba, ao nordeste de Ilhéus.

D'Avila et al. (2004) descrevem o cânion como um conduto submarino de origem tectônica associado à reativação de antigas falhas do embasamento (NE- SW) durante o Cretáceo (VALERIANO et al., 2003 apud JESUS, 2004), que condicionaram a erosão subaérea e captação de sistemas fluviais. O cânion evoluiu desde o continente pela repetida passagem de correntes de turbidez hiperpicnais num ambiente marinho raso que controlou a deposição dos sedimentos da Formação Urucutuca.

4.1.1.1 Descrição de Fácies

Fácies folhelho cinza

Os folhelhos são cinza-escuros ou pretos, com boa fissilidade, geralmente quebradiços, possuem níveis ricos em fragmento de material terrestre com baixo grau de bioturbação.

No ponto 01, situado na região de Sambaituba, está representado o corte transversal de um pacote arenoso com 6m de espessura, com um delineamento de canais arenosos. Na base do afloramento observa-se o contato erosivo de arenitos grossos sobre os folhelhos cinza escuros. A seção inicia-se na base com corpos de paraconglomerado com matriz lamosa, com seixos e blocos deformados por *slumps*, seguidos de um pacote de canais. É frequente a presença de fragmentos de vegetais superiores nos topos das camadas, associados a folhelho.

Com base nas características de canais turbidíticos discutidas por D'Avila et al. (2004) para o afloramento descrito acima, decidiu-se fazer uma avaliação geoquímica dos folhelhos desta localidade (ver subcapítulo 4.2). Os folhelhos são cinza escuros ou pretos, com boa físsilidade, geralmente quebradiços, possuindo níveis ricos de fragmentos de material terrestre com baixo grau de bioturbação.

Fácies arenosas

Os arenitos finos a muito finos ocorrem micáceos sem estratificação visível, exceto ligeiramente ondulas; de cor preta, seleção regular. Em algumas situações as camadas de arenitos mergulham radialmente (Figura 21), com eixos praticamente perpendiculares entre si ($185^{\circ}/15^{\circ}$ e $0^{\circ}/30^{\circ}$). Esses sedimentos associados à Formação Urucutuca encontram-se em contato discordante sobre o embasamento cristalino fortemente intrudido por diques de diabásico.

Estas fácies foram descritas no afloramento Ponto 03, encontrando-se 6 km ao sul da cidade de Ilhéus, Praia de Curupe (Barra de Cururupe) na borda norte do Alto de Olivença (Ponto 4). O afloramento posiciona-se na zona intermaré, portanto exigiu o planejamento da visita para o final da maré vazante. Este afloramento foi considerado neste estudo como a Formação Urucutuca, uma vez que os sedimentos progradam na direção da bacia, diretamente sobre o embasamento.

Carvalho (1965) descreve esse afloramento como o andar Alagoas, Formação Taipus-Mirim (Albo-Aptiano), estratigraficamente abaixo da Formação Urucutuca. Por outro lado, o mapa geológico elaborado pelo Serviço Geológico do Brasil-CPRM define esses sedimentos como depósitos recentes indiferenciados. Tal fato sugere a necessidade de uma revisão estratigráfica a partir dos dados de campo levantados neste trabalho.



Figura 21 – Aspecto do afloramento, no Ponto 03, apresentando camada de coloração escura e mergulho radial.

Os diques de diabásio com direção N70E podem ter uma origem provavelmente associada aos complexos de Royal Chalotte e Abrolhos. Os mesmos provocam um metamorfismo de contato na sequência sedimentar, segundo Netto e Sanches (1991). O embasamento apresenta uma textura ofiolítica, com piroxênios muito alterados pela frequente ação de ondas. Algumas faces do diabásico encontram-se muito alteradas exibindo textura esferulítica.



Figura 22 – Dique de diabásio: a) Dique de diabásio, observando-se a alteração. b) Observa-se dique controlado pela direção das fraturas (N70E).

O contato entre os arenitos e o embasamento é discordante. Como observado em linhas sísmicas, esse contato está bem definido em subsuperfície. Por outro lado, indícios de campo, tais como fraturamento bem definido, sugerem que esta formação foi afetada por tectonismo recente. O basculamento das camadas, mostrando mergulho para sudeste, indica espessamento dos sedimentos nessa direção.

Especula-se que os arenitos de coloração preta nas embocaduras do rio Cururupe estejam impregnados de óleo. Assim, as suspeitas de óleo levaram à coleta de amostras que foram encaminhadas para análises geoquímicas (isótopos e biomarcadores), cujos resultados serão discutidos no capítulo 5.

O fato desta formação e, especialmente, os sedimentos aflorantes estarem afetados por movimentos tectônicos torna o estudo da Formação Urucutuca sob o ponto de vista exploratório ainda mais importante, tendo em vista as potencialidades desta unidade para a formação de traçamentos estratigráfico-estruturais.

4.1.2 Formação Rio Doce

Na praia de Cururupe, ocorrem alguns afloramentos de folhelhos pretos e arenitos, cujas feições despertaram interesse, uma vez que eles são comumente descritos na literatura como depósitos recentes ou pertencentes ao Grupo Barreiras. Em função da importância dos mesmos para o entendimento das possíveis exsudações de óleo na região, uma revisão estratigráfica, com ajuda de análises geoquímicas (teores de COT e biomarcadores) e de resultados palinológicos das amostras coletadas permitiu fazer uma descrição detalhada desta formação.

Tendo como foco a realização de uma descrição estratigráfica dos folhelhos pretos observados no litoral da área de estudo, procedeu-se o levantamento das seções estratigráficas na porção sul da bacia de Almada. Esses afloramentos correspondem aos arenitos posicionados em frente ao aeroporto da cidade de Ilhéus, localizados em afloramentos junto à foz do rio Cururupe. Além desses, foram descritos também pacotes de siltitos e folhelhos paralelos ao litoral entre o Alto de Olivença até o município de Una.

Os perfis realizados correspondem a pontos de campo. O trabalho foi focado na definição das principais fácies com suas propriedades litológicas e estruturas sedimentares. Cada um dos perfis estratigráficos está posicionado no mapa da área de estudo. As amostras coletadas para as análises geoquímicas são apresentadas com o símbolo “LALM” e estão marcados nos perfis estratigráficos com os respectivos teores de COT.

4.1.2.1 Caracterização sedimentológica

As fácies deposicionais que foram identificadas nas seções correspondentes estão baseadas nas descrições de quatro afloramentos. Com base nas informações faciológicas foi possível gerar um modelo de associação de fácies que melhor representasse a unidade estudada. Esta interpretação, por sua vez, serve de base para o modelo estratigráfico do ambiente deposicional, que será discutido adiante.

Ao sul da Bacia de Almada, no afloramento do Ponto 02, situado em frente à pista do aeroporto da cidade de Ilhéus (Praia Pontal), observam-se finas camadas de até 30 cm de espessura, tabulares, apresentando estratificações cruzadas de baixo ângulo e acanalada. Em relação a seus aspectos composicionais, estas fácies são constituídas por grãos predominantemente siliciclástico, representados por quartzo e fragmentos de rocha mal selecionados. Não se observaram bioclastos.

Os demais afloramentos localizam-se no lado oeste da BA001, constituídos por sucessões de areia grossa a média, argilas e folhelhos pretos, cujos ciclos deposicionais são marcados por arranjos granocrescentes ascendentes nas seções, com camadas dos folhelhos pretos na base do ciclo. Os mesmos foram caracterizados a partir dos três perfis estratigráficos nos Pontos 05, 06 e 07.

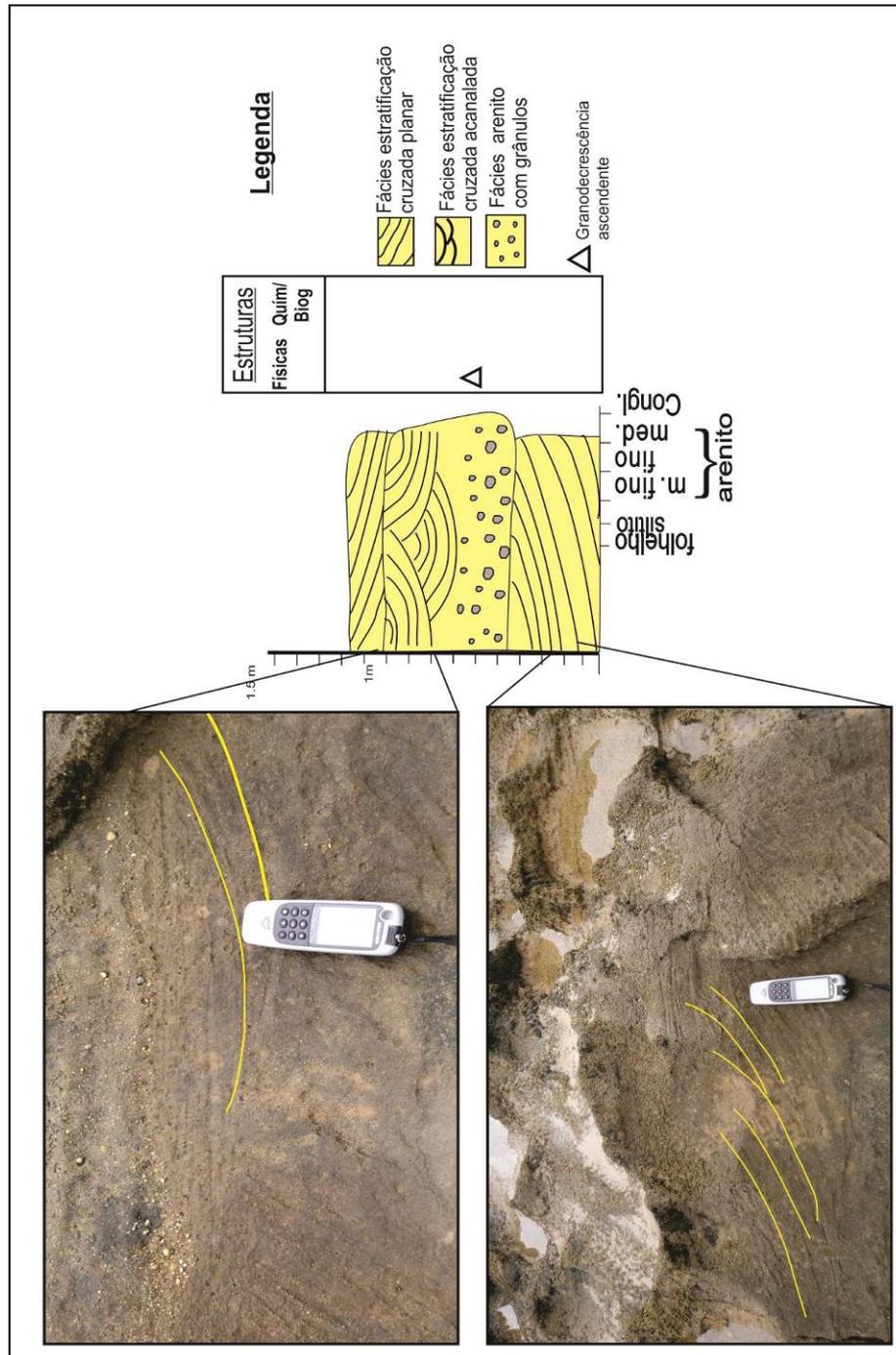


Figura 23 – Perfil estratigráfico da Formação Rio Doce, Ponto 02, Praia Pontal (frente da pista do aeroporto da cidade de Ilhéus).

No ponto 05, situado junto da Pousada Beira do Mar a 10 km na direção sul de Ilhéus, observa-se uma sucessão de argila com coloração vermelha intercalada com pequenas lentes de arenito grosso, seguido de camadas de folhelhos argilosos cinza inconsolidados com estruturas de fluidização e finas camadas lenticulares de areia fina (Figura 24). Para o topo do afloramento observa-se uma sucessão de areia muito grossa granodecrescente para o topo com estratificação cruzada de baixo ângulo até ligeiramente paralela, intercalada com pacotes de argilito síltico.

O afloramento do Ponto 06 está localizado no areal Jarumeira, a cerca de 3 km ao sul do Ponto 05, estando posicionado em frente da praia de Carurupe. Na base do afloramento observa-se arenito grosso com grânulos, seguido de folhelho papiráceo com alto teor de enxofre na sua superfície, intercalados com arenito grosso com estratificação sigmoidal e com estrutura de carga, indicando uma variação de energia num ambiente distal, e entrada de material mais grosso para o sistema (Figura 25).

O afloramento denominado Ponto 07 está localizado em frente à praia na Ilha do Desejo, a cerca de 13 km do município de Una na direção sudoeste. Observam-se ciclos granodecrescentes ascendentes, em geral iniciados na base por arenito médio com estratificação cruzada e sucedidos verticalmente por arenito com estratificação cruzada de baixo ângulo e arenito maciço. Intercalam-se também neste pacote corpos de arenito com grânulos sem estratificação visível e níveis de argilito, estes compondo estratos isolados ou constituindo lentes delgadas em arenito médio. Esta sucessão de fácies representa condições de maior energia como resposta de ação de maré formando barras com geometrias sigmoidais.

Para o topo do afloramento um importante nível de folhelho carbonoso caracteriza condições de alto influxo de matéria orgânica num ambiente subaquoso de baixa energia. Tais características sugerem ambiente de planície de maré. Esta sucessão é seguida pela presença de uma camada de arenito feldspático e argila com pequenas lentes de areia (Figura 26).

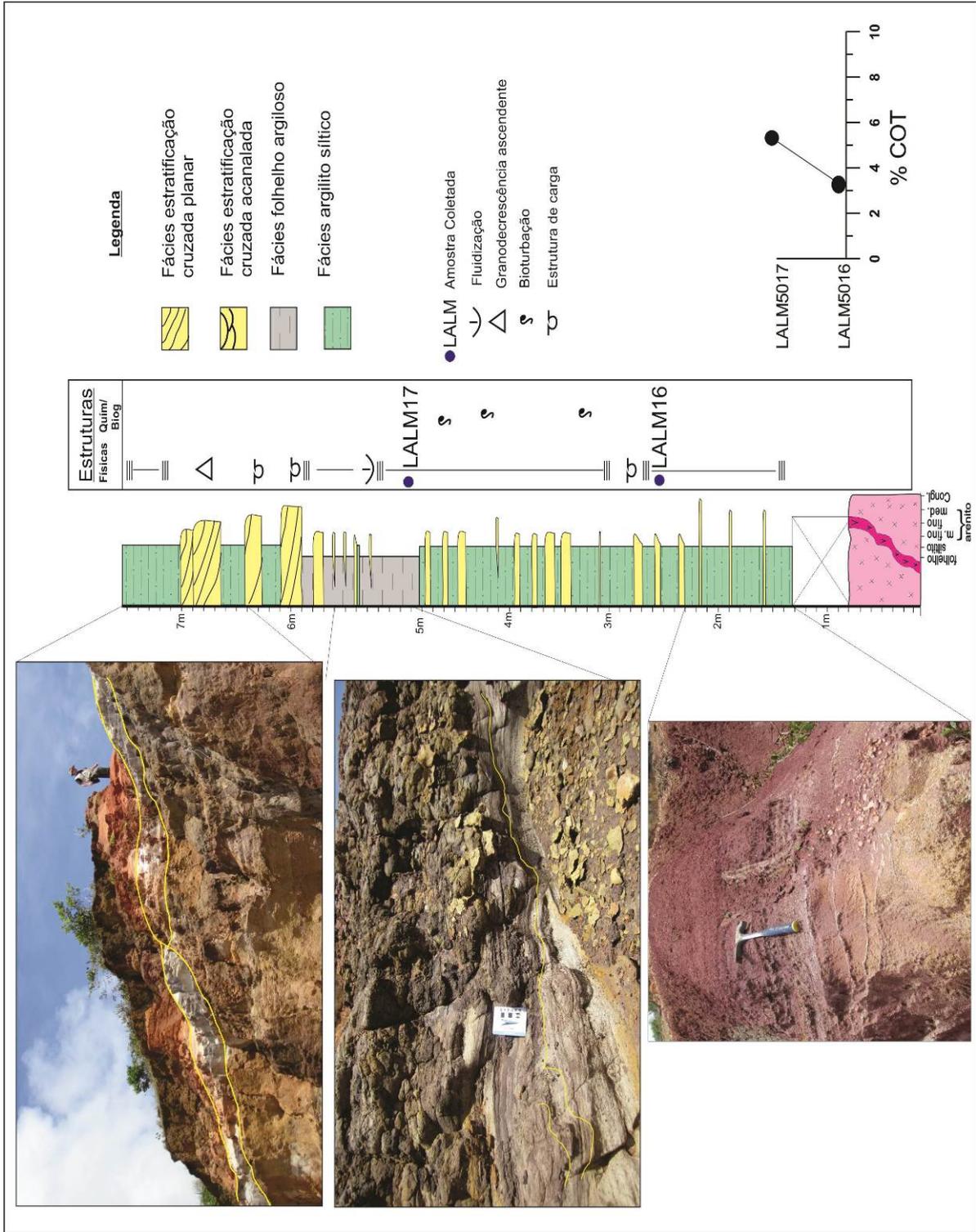


Figura 24 – Perfil estratigráfico, Ponto 05, da Formação Rio Doce.

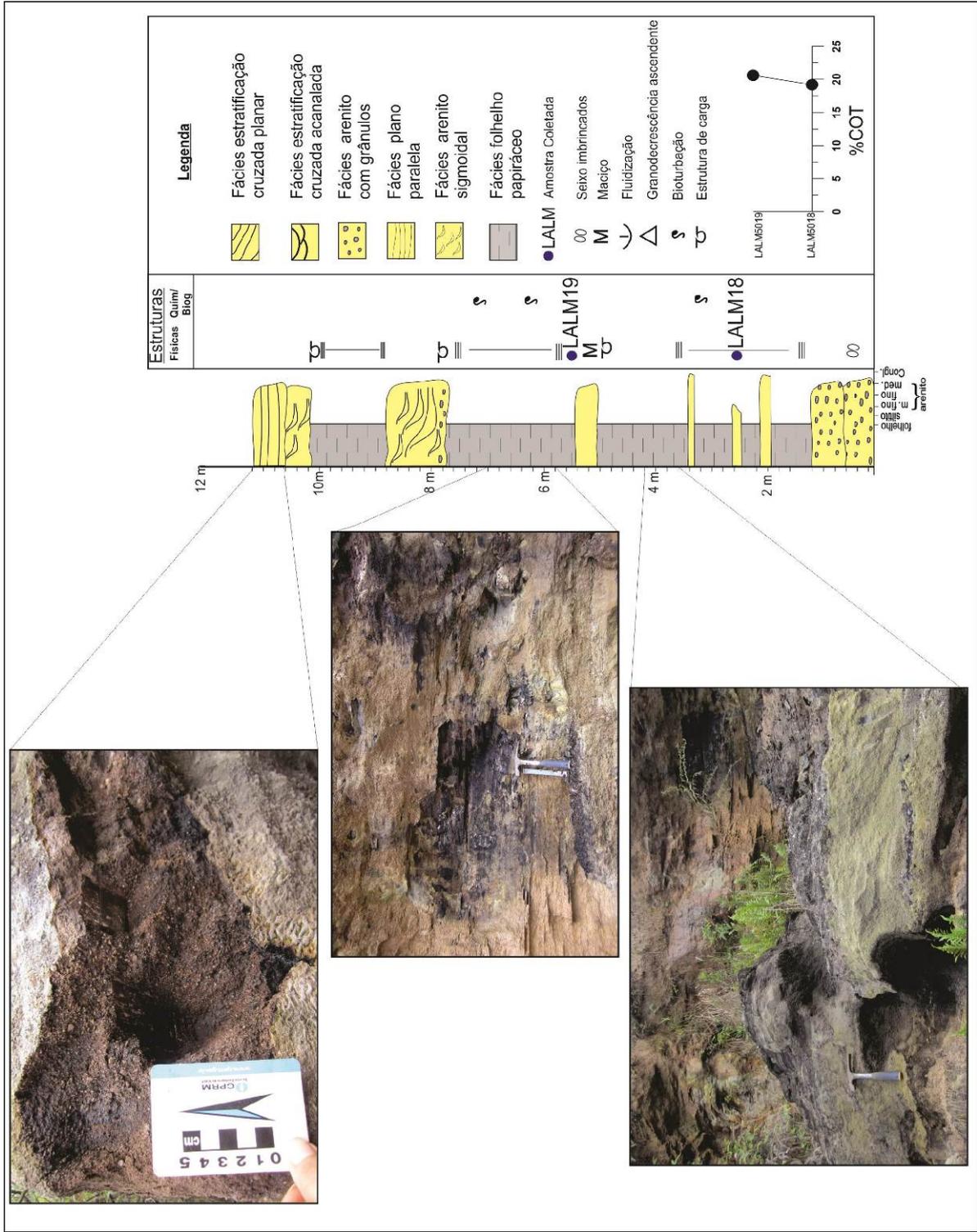


Figura 25 – Perfil estratigráfico, Ponto 06, da Formação Rio Doce.

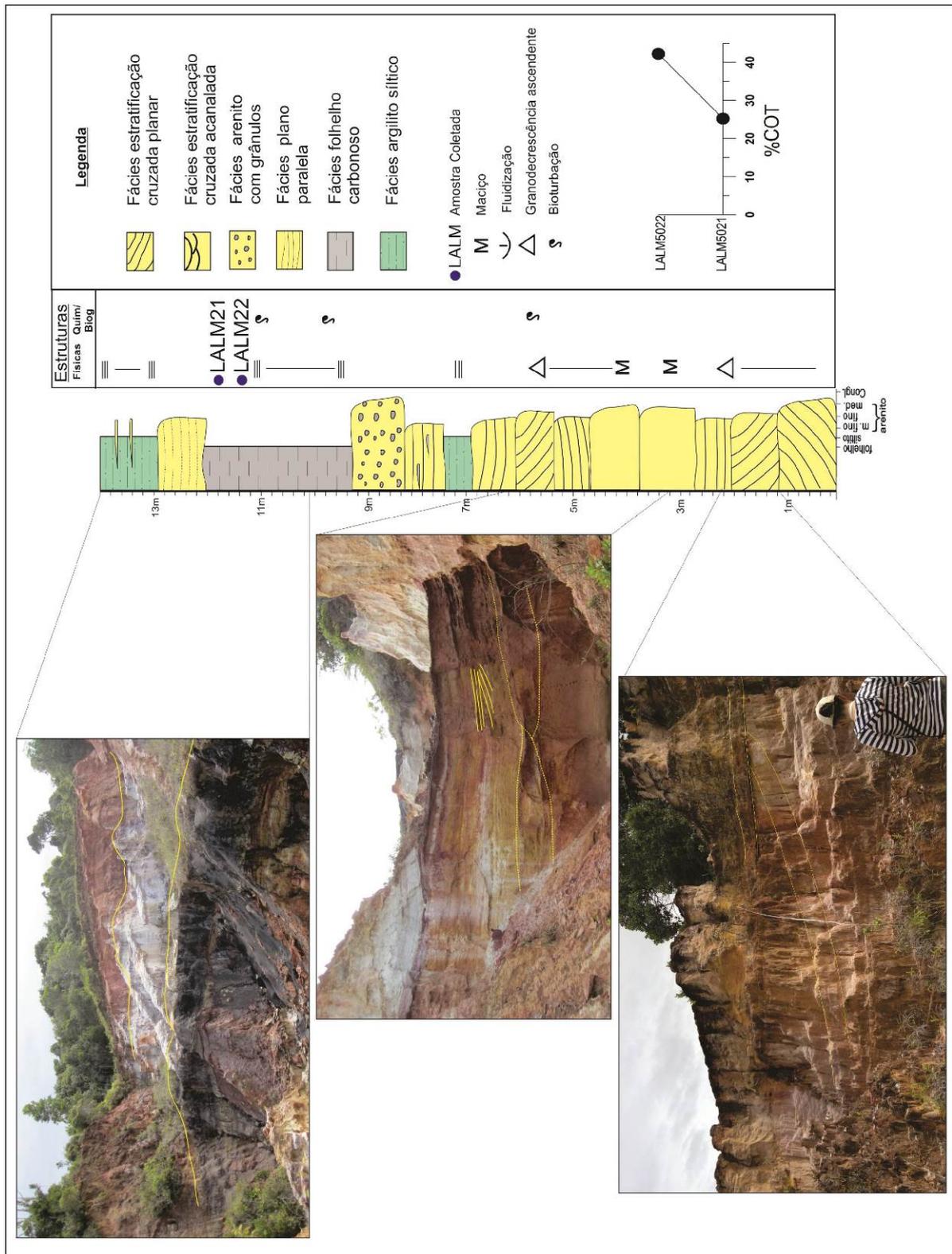


Figura 26 – Perfil estratigráfico, Ponto 07, da Formação Rio Doce.

4.1.2.2 Descrição de Fácies

Fácies Arenito com estratificação cruzada

Esta fácies é constituída por camadas de arenito grosso a médio de seleção moderada, com geometrias tabulares. Os contatos inferiores das camadas são retos. A ocorrência de estratos cruzados com paleocorrentes bidirecionais aponta para a influência de processos de maré.

Na porção inferior do Ponto 07, representado no perfil estratigráfico, são observados arenitos de granulometria média com estratificação cruzada. As medidas de paleocorrentes nestas estratificações cruzadas indicam um padrão de correntes bidirecionais (fluxos para NW e ENE). Tais estratos são aqui interpretados como registro de barras de maré, representando geometrias verticalmente contíguas que se desenvolveram abaixo do nível de maré baixa como corpos arenosos paralelos e alongados na direção da corrente de maré. Neste contexto, a corrente NW (dominante) corresponde à corrente de vazante.

Fácies Arenito com laminação plano-paralela

Arenito médio a fino de boa seleção granulométrica, esbranquiçado, localmente cinza claro, com grânulos angulares, apresentando ocasionalmente pequenas lentes de lama. Em geral, as camadas possuem geometria tabular. Os estratos com laminação plano-paralela são constituídos por lâminas ou níveis delgados, marcados por gradação normal. As estruturas presentes nestas fácies são formadas em condições de baixa energia, produto de fluxos oscilatórios.

Na porção inferior da coluna estratigráfica do Ponto 05 observa-se a estratificação de baixo ângulo a quase planar, provavelmente gerada pela combinação de fluxo oscilatório e unidirecional. Esta fácies é interpretada como registro da migração de barras em um contexto de planície de maré. No referido ponto observa-se uma fácies conglomerática intercalada aos depósitos do baixo ângulo, com deposição provavelmente associada a movimentos rápidos de massa de sedimentos devido a uma momentânea instabilidade da bacia estuarina.

Fácies Arenito com estratificação acanalada

Ocorrem arenitos grossos, amarelados, mal selecionados, apresentando estratificação cruzada acanalada e presença de níveis de seixos quartzosos na base, dispostos em arranjos granodecrescentes. As características desta fácies sugerem uma deposição associada a canais de maré.

No Ponto 02 também se observam corpos de arenitos médios com estratificação cruzada acanalada, intercalados com estratos de arenito médio com estratificação cruzada planar. Na base da seção observa-se um predomínio, na fração cascalhosa dos arenitos, de grãos com tamanho grânulo e seixo. A variação granulométrica nos arenitos (de médio a grosso) reflete a presença de maior energia por entrada de material fluvial. As estruturas esféricas e concêntricas observadas nas superfícies das camadas são produto do intemperismo recente, pela ação dos ventos e ondas. Essas camadas apresentam mergulho suave, em direção ao mar paralelas da linha de costa, que pode ser considerado como um indicador do nível do mar.

Fácies Arenito Sigmoidal

Esta fácies é caracterizada por arenito grosso, ocasionalmente apresentando seixos dispersos, mal selecionado, friável, feldspático, de coloração cinza escuro a preto, ou, por vezes, amarelado, com estratificação sigmoidal. Seus estratos apresentam geometria de lobos, com espessuras médias de 40 a 60 cm, que exibem granodecrescência ascendente.

Os lobos sigmoidais são nitidamente observados na porção superior da coluna estratigráfica do Ponto 06. Estes constituem-se ocasionalmente por arenito muito grosso, ou com grânulos imbricados, mal selecionado, com geometrias de 2 a 4 m de extensão. Nessa posição estratigráfica estes lobos estão em contato abrupto com fácies pelíticas, evidenciando uma passagem brusca de energia, com chegada de material grosso ao sistema. Estas fácies depositaram-se na região de maior energia na região intermaré, próximo ao nível de maré baixa, *ebb tidal delta*.



Figura 27 – Afloramento no Ponto 6 apresentado sigmóides.

Na Figura 27 observam-se corpos de arenito médio com geometrias sigmoidais que ocorrem preenchendo uma forma de leito arenosa, em camadas delimitadas por superfícies que, por vezes, truncam a base. Este elemento tem 15m de extensão e 2,5 m de espessura.

Fácies Arenito maciço

Arenitos de granulometria fina a grossa, maciços, mal selecionados, podendo conter grânulos de quartzo dispersos. Ocorrem como camadas tabulares ou lenticulares de 0,5 m de espessura, e até alguns metros de extensão. As camadas maciças por vezes podem apresentar base erosiva.

Esta fácies é observada no Ponto 07, na parte média da seção geológica. Desta forma, as camadas maciças são interpretadas como fluxos de massa hiperconcentrados gerados durante períodos de fortes enxurradas.

Fácies Arenito grosso com grânulos

Arenitos grossos, com grânulos e seixos, mal selecionados, de coloração marrom-esbranquiçada, com estratificação cruzada de baixo ângulo, dispostos em camadas canalizadas. Foram interpretados como registro da variação de descarga de um sistema fluvial, depositados em condições de mais alta energia em topos de barras. Observados no afloramento Ponto 06.

A presença de clastos imbricados sugere um transporte por carga trativa em condições de alta energia em canais fluviais, refletindo o aporte de material fluvial mais grosso por variação de descarga de um sistema fluvial num sistema estuarino com influência de maré.

Fácies Argilito avermelhado

Argilito avermelhado a variegado com incipiente laminação em direção o topo. Presença frequente de lentes conglomeráticas e seixos, ocasionalmente lentes de arenito fino. Esta fácies foi depositada em um ambiente subaquoso de baixa energia que apresentava variações periódicas de condições energéticas típicas de ambiente supramaré.

Fácies Folhelho cinza

Folhelho siltico-argiloso intercalado com camadas delgadas ou lâminas de arenito. Os mesmos são cinza, ligeiramente escuros ou esbranquiçados, bioturbados, com incipiente estratificação laminar e *wavy*, estruturas de fluidização e níveis superficiais de calcrete no topo. Alternam cores marrom-amareladas com pequenas lentes de arenito fino.

Feições de escorregamento e fluidizações denotam atuação de processos rápidos de sedimentação. A presença de estruturas de fluidização nas seções é decorrente de uma rápida deposição em um ambiente subaquoso.

Na porção inferior do Ponto 05 (Figura25) foram interpretados como processos de sedimentação de argila e matéria orgânica algálica e terrestre em ambiente subaquoso anóxico/dixósico. As alternâncias de lentes de arenito sugerem variações de energia relacionadas às correntes de maré, que em áreas intramaré superior produzem depósitos rítmicos de granulometria variável. As camadas de arenito muito fino com ligeiras marcas onduladas e lâminas de pelito podem ser atribuídas a um domínio misto (fluvial/maré) do estuário na zona de intermaré pouco profunda. A presença de níveis de calcrete sugerem episódios de mínima excursão de maré que marcaria exposições subaéreas.

Fácies folhelho papiráceo

Folhelho papiráceo, bem laminado, preto, com restos de vegetais, com presença de bioturbação, alto teor de enxofre na superfície e teores elevados de COT entre 18 e 20%. Esta fácies é resposta da sedimentação de pelitos com matéria orgânica algálica e terrestre em ambiente subaquoso anóxico num ambiente marinho plataformal.

Fácies folhelho carbonoso

O Folhelho betuminoso, preto carbonoso, com pouca presença de bioturbação, apresenta coloração amarela na superfície pelo teor de enxofre. Os altos teores de COT, superiores a 20%, sugerem uma sedimentação de pelitos com matéria orgânica terrestre em ambiente subaquoso anóxico num ambiente de pântano.

No Ponto 07, os folhelhos desta fácies possuem teores elevadíssimos de COT em torno de até 35%. Deve ser destacado que a mesma fácies de folhelho no ponto 06, localizado a uma distância de 30 km, apresenta valores bem abaixo de COT, em torno de 18%. Uma explicação para este fato poderia ser que estes folhelhos foram depositados em ambientes ligeiramente distintos. Os folhelhos mais carbonosos, com maiores teores de COT, formariam em um ambiente com maior aporte de matéria orgânica num ambiente raso restrito, onde pode ocorrer uma menor circulação de água, aumentando a taxa de anoxia e favorecendo maior preservação; o que sugere um ambiente de pântano salobro. Já os folhelhos com menores teores de COT depositaram-se num ambiente raso aberto o com maior circulação de água, o que indica condições de planície de maré correspondente no Ponto 06.

4.1.2.3 Ambiente Depositional

Os sistemas costeiros são áreas em que atuam vários mecanismos de distribuição e deposição de sedimentos, tanto ligados à atividade de ondas, como à atividades de marés, que determinam as propriedades das fácies e a geometria dos corpos sedimentares (DALRYMPLE et al., 2006).

A figura 28 ilustra o esquema adotado neste trabalho para a definição do ambiente deposicional das fácies identificadas. A interpretação, análise e estudo paleoambiental das associações de fácies identificadas seguem a proposta de Walker e Plint (1992) para ambientes de estuário dominado por maré.

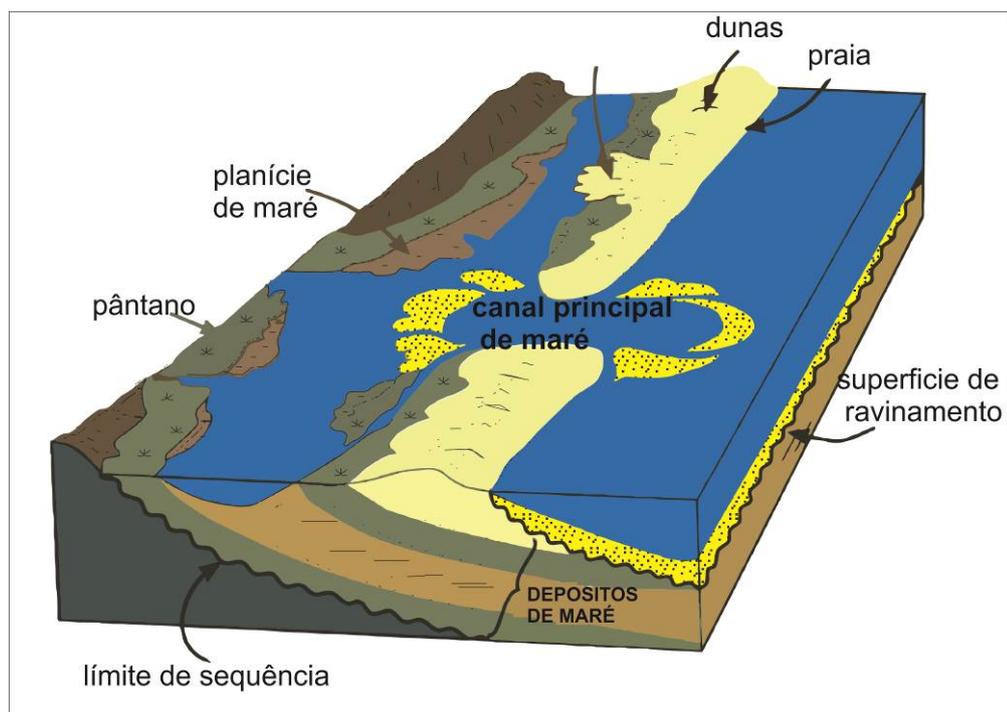


Figura 28 – Bloco diagrama ilustrativo dos vários subambientes durante uma transgressão no sistema de ilha barreira. Apesar do registro de depósitos de maré, o ambiente é também afetado por onda.

Fonte: REINSON, 1992 apud DALRYMPLE e CHOI, 2006.

Nos depósitos associados à atividade das marés são constantemente observados elementos como a presença de pelitos que cobrem as marcas onduladas, arenitos com estratificações cruzadas e intercalações de lâminas de sedimentos finos (estruturas tipo *tidal bundle*), camadas com marcas onduladas e camadas com espessuras de poucos milímetros até alguns decímetros de pelitos, alternadas com arenitos.

As planícies de maré formam longas faixas na linha de costa, sendo mais desenvolvidas em regimes de macromaré e em costas lamosas de baixo gradiente. São divididas em duas zonas principais: supramaré, acima do nível da maré alta, e intermaré, compreendida entre os níveis máximos de maré alta e baixa. Os canais estuarinos, por sua vez, ficam normalmente na zona de inframaré (DELLA FAVERA, 2001). As fácies sedimentares em ambientes rasos permitem identificar variações relativas do nível do mar ocorridas num intervalo de tempo.

Os componentes dinâmicos para sedimentação de estuários são controlados pela variação do nível do mar e a relação de tempo da entrada de sedimentos, pois esses são resultantes de uma transgressão como condição necessária para a formação de estuários. Entende-se que os estuários normalmente são implantados no início da transgressão e continuam depositando sedimento até a superfície máxima de inundação (BOYD et al., 2006).

O melhor desenvolvimento dos estuários ao longo do tempo dar-se-á, preferencialmente, nos tratos transgressivos e de mar alto, pois, ao serem analisados dentro da dinâmica de sedimentação costeira, terão papel fundamental na caracterização das rochas decorrentes das variações cíclicas do nível do mar. As recorrências verticais das barras estuarinas com sedimentos finos marinhos marginais ajudaram a estabelecer as superfícies-chaves nos afloramentos Ponto 05 e 06.

4.1.2.4 Palinologia

Embora a palinologia não tenha sido contemplada nos objetivos iniciais desta dissertação, o seu uso tem sido utilizado com sucesso nos estudos biocronoestratigráficos de rochas sedimentares.

Neste sentido, as amostras correspondentes aos folhelhos papiráceos da Formação Rio Doce foram encaminhadas para especialista em palinologia do Meso-Cenozoico, com o objetivo da datação desta formação.

4.1.2.4.1 Análise e interpretação dos resultados

A confecção de três lâminas palinológicas coletadas no Ponto 06 foi feita no Laboratório de Palinomacerais da FGEL-UERJ. A quantificação e os estudos de taxonomia dos palinomorfos foram do mérito da Dr^a Luzia Antonioli (Departamento de Paleontologia e Estratigrafia – DEPA/FGEL/UERJ). Coube ao autor desta dissertação a integração destes resultados.

- Palinoflora identificada

A palinoflora é composta por palinomorfos continentais, tais como Algas, Fungos, Briófitas, Pteridófitas, Gimnospermas e Angiospermas. Entretanto, predomina a associação dos grãos de pólen de Angiospermas, particularmente os grãos de pólen tricolpados e, em menor proporção, os monocolpados. Fazem-se também presentes os palinomorfos marinhos, principalmente palinoforaminíferos (Figura 29).

- Resíduo orgânico

O resíduo orgânico é dominado por elementos de origem continental, principalmente de matéria orgânica lenhosa, indicando forte contribuição alóctone e evidenciando uma maior aproximação à linha de costa, em condições de relativa energia de deposição para esse material. Praticamente não contém matéria orgânica amorfa (Figura 29)



Figura 29 – Fotomicrografias de espécies selecionadas do intervalo estudado (as identificações são seguidas do número de lâmina). 1. *Deltoidospora adriennis*; 2. *Laevigatosporites tibuensis*; 3. *?Araucariacites sp*; 4. *Verrucatosporites usmensis*; 5. *Retimonocolpites sp*; 6, 11. *Monoporopollenites annulatus*; 7, 8. *Psilatricolpites sp1*; 9, 10. *Silatricolpites sp2*; 12 e 13. *Psilatricolpites divisus*; 14,15. *?Parsonsidites sp*; 16. *Tricolporopollenites edmundii*; 17. *Retimonocolpites* cf. *R. maximus*; 18. *Zonocostites sp*; 19. *Tetracolporopollenites transversalis*; 20. *Ilexpollenites sp*; (continua).



Continuação – Fotomicrografias de espécies seleccionadas do intervalo estudado (as identificações são seguidas do número de lâmina). 1,2. *Mauritiidites franciscoi*; 3,6. *Psilatricolpites crassus*; 4,5. *Brevitricolporado sp*; 7,8. *Multiareolites formosus*; 9. *Bombacacidites clarus*; 10. *Psilatricolporites sp*; 11. *Algae cf. Balmeela sp*; 12. Palinoforaminífero; 13. *Callinothallus sp*; 14. *Multicellaesporites sp*.

4.1.2.4.2 Ambiente:

A presença de Palinoforaminíferos aliada a raras algas e à presença significativa de palinomorfos continentais junto com material orgânico lenhoso indicam uma sedimentação num ambiente marinho raso, costeiro ou mesmo lagunar, com uma forte influência de aporte continental.

4.1.2.4.3 Idade

A presença das espécies: *Psilatricolporites crassus*, *Multiareolites formosus*, *Deltoidospora adriennis*, *Retimonocolpites* cf. *R. maximus*, e *Psilatricolpites divisus*, na palinoflora identificada, asseguram que os estratos que os contém foram depositados no Mioceno.

4.1.2.5 Modelo estratigráfico

Para construir um modelo de distribuição horizontal dos elementos descritos e reconstruir as características deposicionais do sistema que gerou a Formação Rio Doce, foram buscados critérios que pudessem distinguir a proximidade e distalidade em relação à linha de costa. O modelo produzido pressupõe que na sucessão estudada (300 m de seção linear) não existem variações substanciais do sistema deposicional. Os três afloramentos descritos distribuem-se de modo bastante uniforme na área estudada, sugerindo certa continuidade do sistema deposicional, por uma extensão de 50 km. Nas seções as estruturas sedimentares indicam dominante atividade de maré.

Pelas feições sedimentares observadas a partir das colunas estratigráficas, e por sua associação com as demais fácies, interpretou-se, para esta associação, um predomínio no perfil de inframaré/intermaré. Um ponto relevante sobre estes intervalos argilosos é definir o grau da influência marinha e com isto estabelecer a relação de pulsos transgressivo-regressivos. Para isto, utilizou-se as informações palinológicas nos níveis dos folhelhos com altos teores de COT, para serem posteriormente integradas a uma análise conjunta da estratigrafia de sequências.

A superfície transgressiva foi definida na base dos folhelhos papiráceos, marinhos marginais (Ponto 6), e coincidente com as interpretações palinológicas. Os mesmos associam-se aos pulsos de afogamento provocados pelos períodos de subida do nível do mar. Evoluem para condições marinhas marginais tendo continuidade lateral nos folhelhos cinza (Ponto 05), em direção ao norte da bacia. Esses folhelhos são sobrepostos por camadas de material síltico depositadas em subambiente de planície de maré com feições de exposições subaéreas (calcretes). Os arenitos médios a grossos são associados a um ambiente deposicional de barras de maré que são marcados com sequências granocrescentes para o topo devido à progradação de fácies arenosas pela ação de maré. A presença de níveis de folhelho carbonoso (COT de até 40%) na parte superior do afloramento Ponto 07 sugere condições paleoambientais de laguna interna salobra, com predominância de influxo de matéria orgânica terrestre.

A interpretação feita para o afloramento da Praia Pontal, Ponto 02, indica que a deposição ocorre em condições mais proximais associadas à dinâmica dos canais alimentadores do sistema estuarino.

A partir da correlação dos afloramentos estudados, observa-se que os mesmos estariam representados na porção mais superior da Formação Rio Doce, depositada no Mioceno segundo as análises palinológicas. A deposição ocorreu dentro de uma progressiva tendência de raseamento, no contexto de um trato de sistemas de mar alto, onde teriam-se desenvolvido espessos pacotes de argilitos sílticos de água rasa, intercalados com barras arenosas em um contexto estuarino.

Baseando-se nestes critérios sedimentológicos foi construído um modelo hipotético de sedimentação costeira, para a área estudada a partir da correlação dos afloramentos, como mostrado na Figura 30, que é caracterizado pela influência de maré.

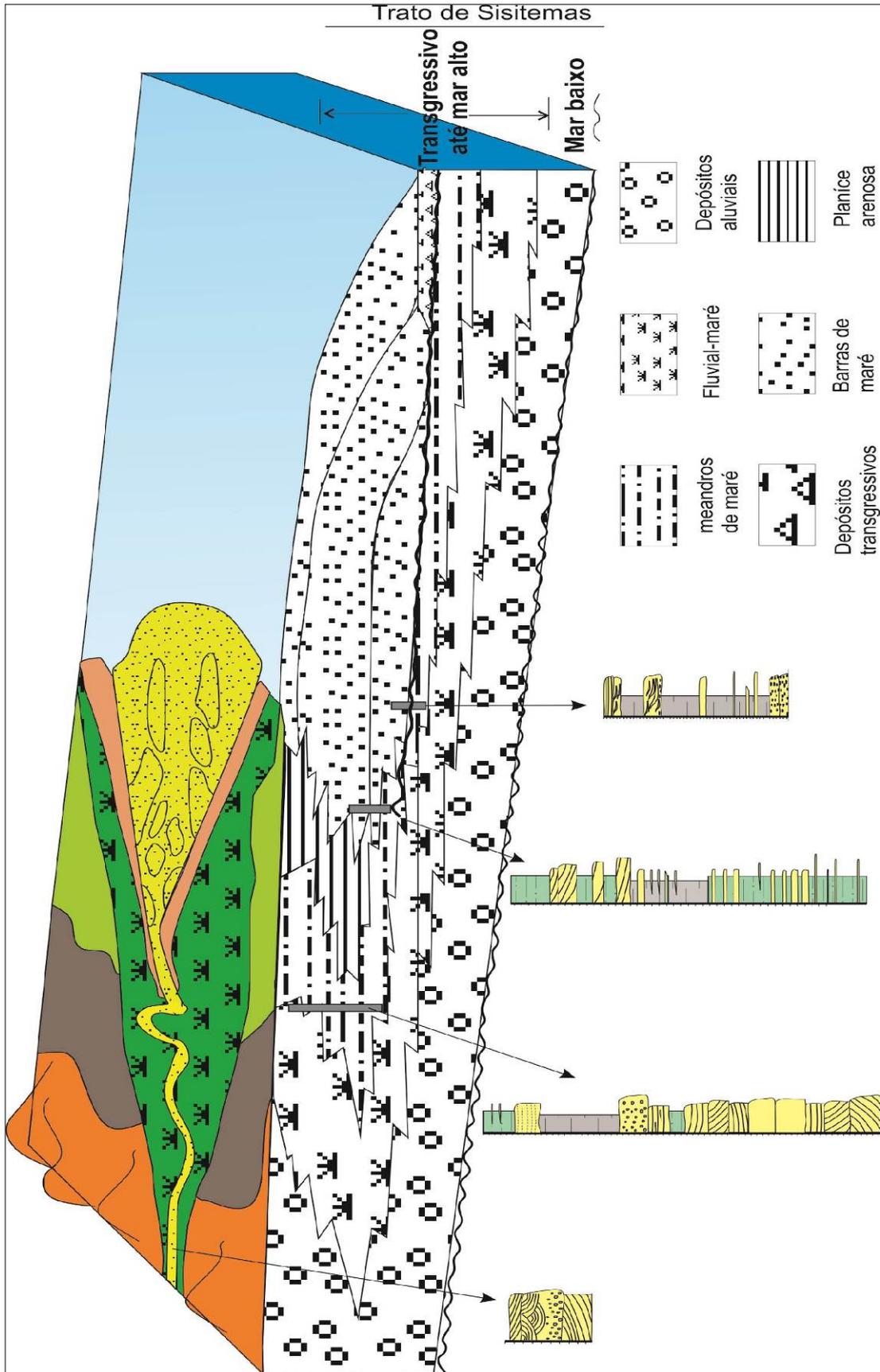


Figura 30 – Corte esquemático ao longo do eixo de um estuário dominado por maré, a partir dos perfis de campo para a formação Rio Doce.

Fonte: Modificado de DALRYMPLE et al., 1992.

Na literatura diversos autores descrevem uma transgressão marinha do Eomioceno-Mesomioceno (no intervalo Aquitaniano – Serravaliano), que seria a responsável pela acumulação de uma grande quantidade de sedimentos nas áreas hoje emersas, segundo Arai (2002), essa transgressão foi datada especificamente num afloramento em Comandatuba (Bahia). O referido autor descreve associações palinológicas cuja amplitude estratigráfica estende-se do Oligoceno ao Mioceno Médio.

Na área mapeada, encontram-se principalmente depósitos de arenito médio a grosso com seixos, além de arenitos e arenitos argilosos pouco consolidados. Morfológicamente, esta unidade apresenta um relevo ondulado, com colinas de topo convexo a tabular, com altitudes que variam de cerca de 50 metros, nas porções mais litorâneas, a cerca de 100m na borda sul do Alto de Olivença. De acordo com Domingues et al. (2008), estas altitudes médias são compatíveis com as estimativas do nível do mar eustático no Mioceno Médio-Inferior que alcançou um máximo entre 25 e 100 metros acima do nível atual. Já Arai (2006) sugere que após este evento transgressivo, transcorreu uma continuada descida do nível eustático desde o Mioceno Médio até o Quaternário.

No entanto, os autores citados anteriormente concluem que tanto as evidências da transgressão como as da regressão marcam o sistema Formação Barreiras, sendo que as primeiras incursões marinhas delimitam o grupo Barreiras inferior e um evento erosivo limita o sistema Barreiras superior, depositado no Plioceno. Porém, os dados analisados neste trabalho reforçam uma idade miocênica para os sedimentos aflorantes, associado à Formação Rio Doce pelas evidências sedimentológicas e estratigráficas já discutidas anteriormente.

A caracterização destes sedimentos como Formação Rio Doce é sugerida por evidências de diferentes métodos geológicos, sobretudo pelo contexto deposicional na atual região *offshore* da bacia.

Depósitos anteriormente considerados como fluviais, aqui são reinterpretados como depósitos de estuário dominados pela ação das marés, em função das fácies e das geometrias presentes. Contudo, a tectônica recente local e regional nas Bacias de Almada e Jequitinhonha pode ter desempenhado um papel importante na configuração, devido a que os afloramentos encontram-se em cotas entre os 20- 50 metros.

4.2 Análises Geoquímicas dos folhelhos das formações Urucutuca e Rio Doce

Uma rocha geradora de petróleo é qualquer uma que tenha sido capaz de gerar petróleo (TISSOT e WELTE, 1984). A capacidade da rocha fonte para gerar petróleo depende da quantidade (COT), qualidade e maturidade térmica da matéria orgânica (HUNTT, 1996). A análise de pirólise Rock Eval é uma das técnicas mais aceitas e frequentemente usadas para determinar o potencial de geração e a maturação termal da matéria orgânica (PETERS, 1986).

Os folhelhos das formações Urucutuca e Rio Doce foram analisados geoquimicamente para se avaliar suas perspectivas como possíveis rochas geradoras, bem como auxiliar nas interpretações paleoambientais. Portanto, foram estudados o tipo de matéria orgânica e a evolução térmica dos níveis de folhelhos aflorantes destas formações, usando dados de carbono orgânico total (COT), enxofre (S), resíduo insolúvel (R.I), isótopos de carbono e biomarcadores.

4.2.1 Formação Urucutuca

4.2.1.1 COT, S e RI

Os folhelhos da Formação Urucutuca coletados no Ponto 01 representam o alvo da avaliação do potencial gerador desta unidade. Os baixos teores de COT de 0,58% não atingem o valor mínimo para uma rocha ser considerada adequada a uma possível geração de hidrocarbonetos, sendo esse inferior a 1% (TISSOT e WELTE, 1984). Os teores de enxofre (0,33%) e resíduo insolúvel (88%) indicam um ambiente com sedimentação predominantemente siliciclástica.

Os folhelhos da formação Urucutuca, correspondentes às feições aflorantes dentro do cânion exumado de Almada apresentam valores de $\delta^{13}\text{C}$ em torno de -27,34‰, característicos de um ambiente marinho restrito.

4.2.1.2 Biomarcadores

O betume extraído dessas fácies apresenta maior proporção de alcanos lineares de alto peso molecular (C_{25} , C_{27} , C_{29} , C_{31}) e uma forte imparidade com predominância de C_{29} e C_{31} , o que pressupõe uma contribuição de vegetais terrestres (TISSOT e WELTE 1984). Esta afirmação também tem suporte nas altas proporções de norhopanos ($C_{29}\alpha\beta$), trisnorhopanos ($C_{27}Tm$ $17\alpha(H)$), e moretanos ($C_{27}(17\beta)$, $C_{31}\beta\alpha$) (RODRIGUES, 2004).

As abundâncias relativas dos esteranos $C_{27}\alpha\alpha\alpha R$ ligeiramente dominantes em relação aos esteranos $C_{29}\alpha\alpha\alpha R$ e $C_{28}\alpha\alpha\alpha R$ sugerem uma contribuição de fitoplâncton marinho (CZOCHANSKA et al., 1979 apud PETERS e MOLDOWAN, 1993) (Figura 31). A relação Hopano/Esterano (0,92) inferior a 1,0 é típica de matéria orgânica de origem marinha, com contribuição de plâncton e algas bentônicas (MOLDOWAN, 1985). No entanto, a alta proporção do esterano C_{29} também indica um aporte importante de plantas terrestres, em concordância com o descrito no primeiro parágrafo.

A baixa razão dos hopanos $C_{27}Ts/Tm$, $C_{31}(S/R)$, e a alta proporção de hopanos $\beta\alpha$ e $\beta\beta$, confirmam a baixa evolução térmica desta formação (MOLDOWAN e SEIFERT, 1985). Os baixos valores da relação esteranos C_{29} $\alpha\alpha\alpha$ ($20S/20R$) colocados na equação de Sofer et al. (1993) sugerem valores da refletância da vitrinita (R_o) de 0,3, ou seja, na zona imatura.

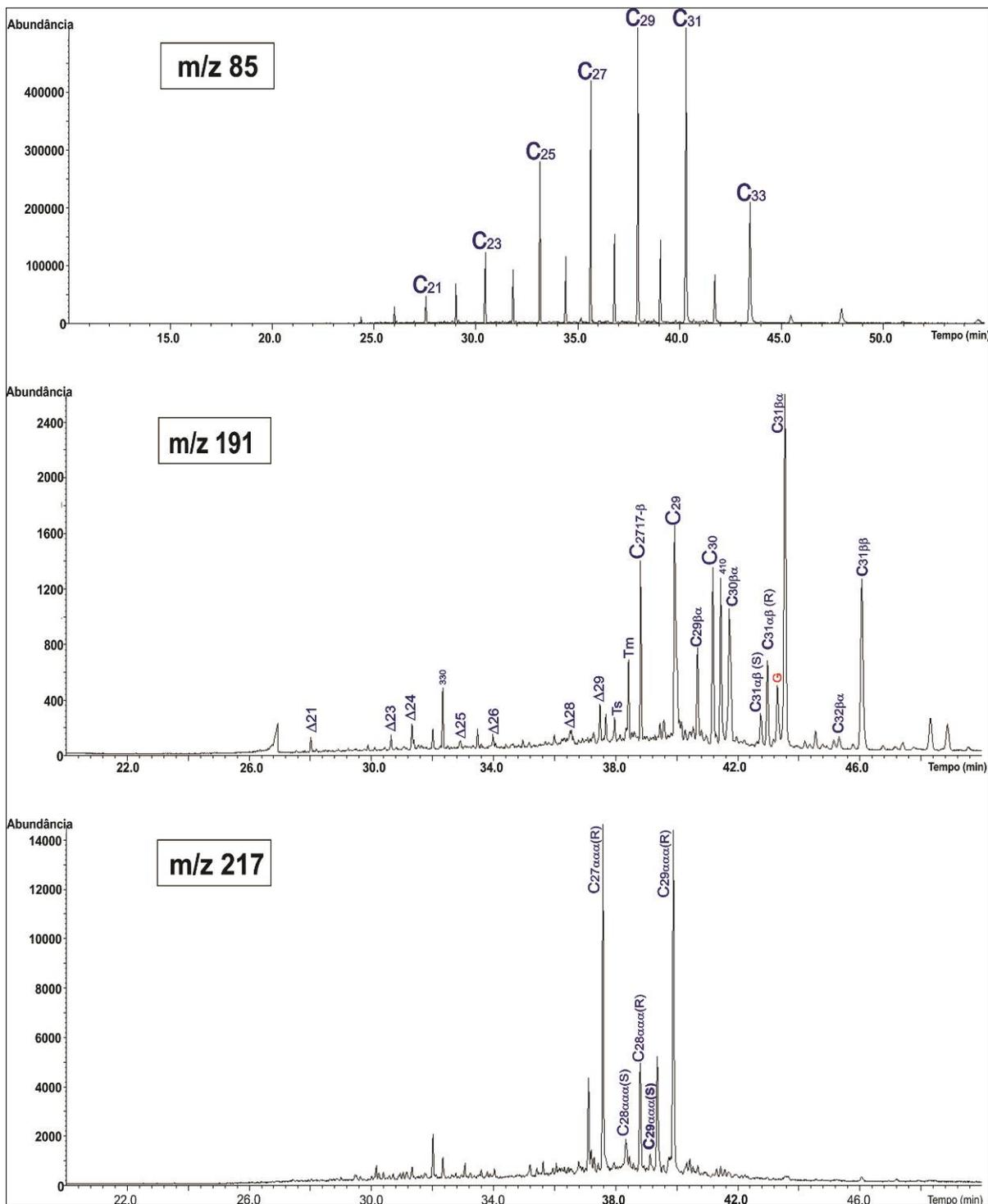


Figura 31 – Fragmentogramas m/z 85, 191 e 217 da amostra LALM44 da formação Urucutuca. nC= alcanos normais; Δ= terpanos tríclicos, G=gamacerano.

4.2.2 Formação Rio Doce

No caso da Formação Rio Doce também foram analisadas as fácies pelíticas. Todas as amostras coletadas apresentam COT acima de 4%. Os teores elevados estão no contexto deposicional estuarino da associação faciológica de Folhelhos cinza, folhelhos papiráceos e folhelhos carbonosos.

A variação dos níveis pelíticos descritos nos afloramentos permite diferenciar claramente as três fácies de acordo com parâmetros geoquímicos de teores de carbono, pirólise Rock Eval e biomarcadores, que serão descritos a seguir.

Utilizando-se os dados dos índices de hidrogênio (IH) e de oxigênio (IO) e aplicando-os num diagrama do tipo “Van Krevelen” (Figura 32), foi possível diferenciar que a matéria orgânica se comporta preferencialmente como tipo IV, ou seja, uma matéria orgânica terrestre oxidada, com exceção das amostras coletadas no ponto LALM07.

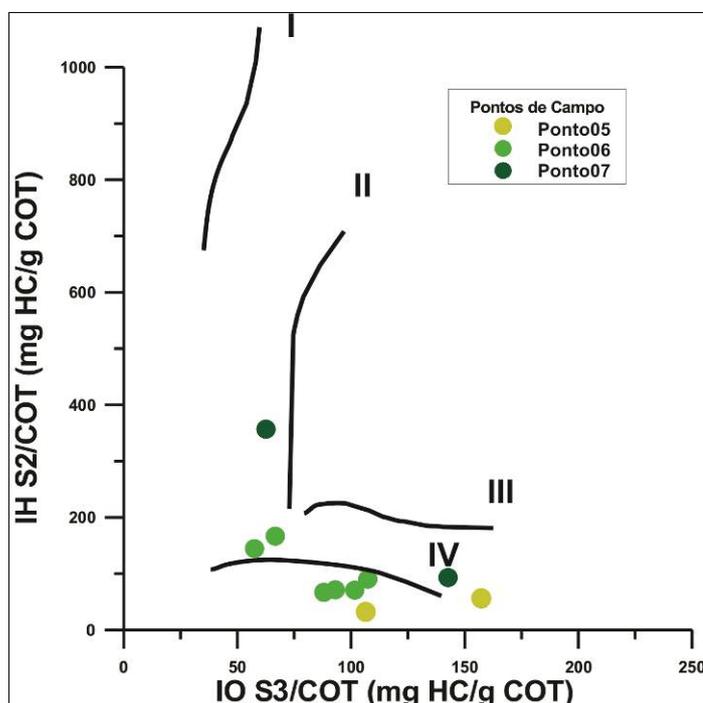


Figura 32 – Diagrama Tipo “Van Krevelen” mostrando a distribuição dos pontos de campo para a Formação Rio Doce.

4.2.2.1 Fácies folhelho cinza (Ponto 05)

4.2.2.1.1 COT, S, RI

A fácies de folhelho cinza, com resíduo insolúvel de 96%, indica uma sedimentação essencialmente siliciclástica caracterizada por teores relativamente mais baixos de carbono orgânico total, entre 4 e 6%, e baixos teores de enxofre total (<0.7%). Os valores muito baixos de S₂ (<2 mg HC/ g rocha) e índice de Hidrogênio inferior a 50 mg HC/g COT, caracterizam uma predominância de matéria orgânica tipo IV, altamente oxidada e sem potencial para geração de hidrocarbonetos.

4.2.2.1.2 Biomarcadores

Nota-se a presença de alcanos lineares de alto peso molecular (C₂₇, C₂₉ e C₃₁) (Figura 33) e com alto grau de imparidade, o que pressupõe uma contribuição predominante de matéria orgânica de origem terrestre (BRAY e EVANS, 1961).

A alta proporção dos biomarcadores como o C₂₇ (Tm), C₂₇ (17β) e C₃₁ (αβ) entre os terpanos e a predominância do esterano C₂₉ αααR também são parâmetros sugestivos de contribuição de matéria orgânica terrestre.

A predominância de compostos insaturados (picos com massa de 368, 396 e 410) com relação aos compostos saturados, a abundância relativamente maior dos moretanos, com a predominância dos epímeros R sobre o S, a razão dos terpanos C₃₁ αβ (S/R) com valores inferiores a um, assim como a maior proporção do esterano C₂₉ αααR, com valores de Ro equivalente entre 0,49 - 0,41, constituem parâmetros que evidenciam a baixa maturação térmica da matéria orgânica (Figura 33).

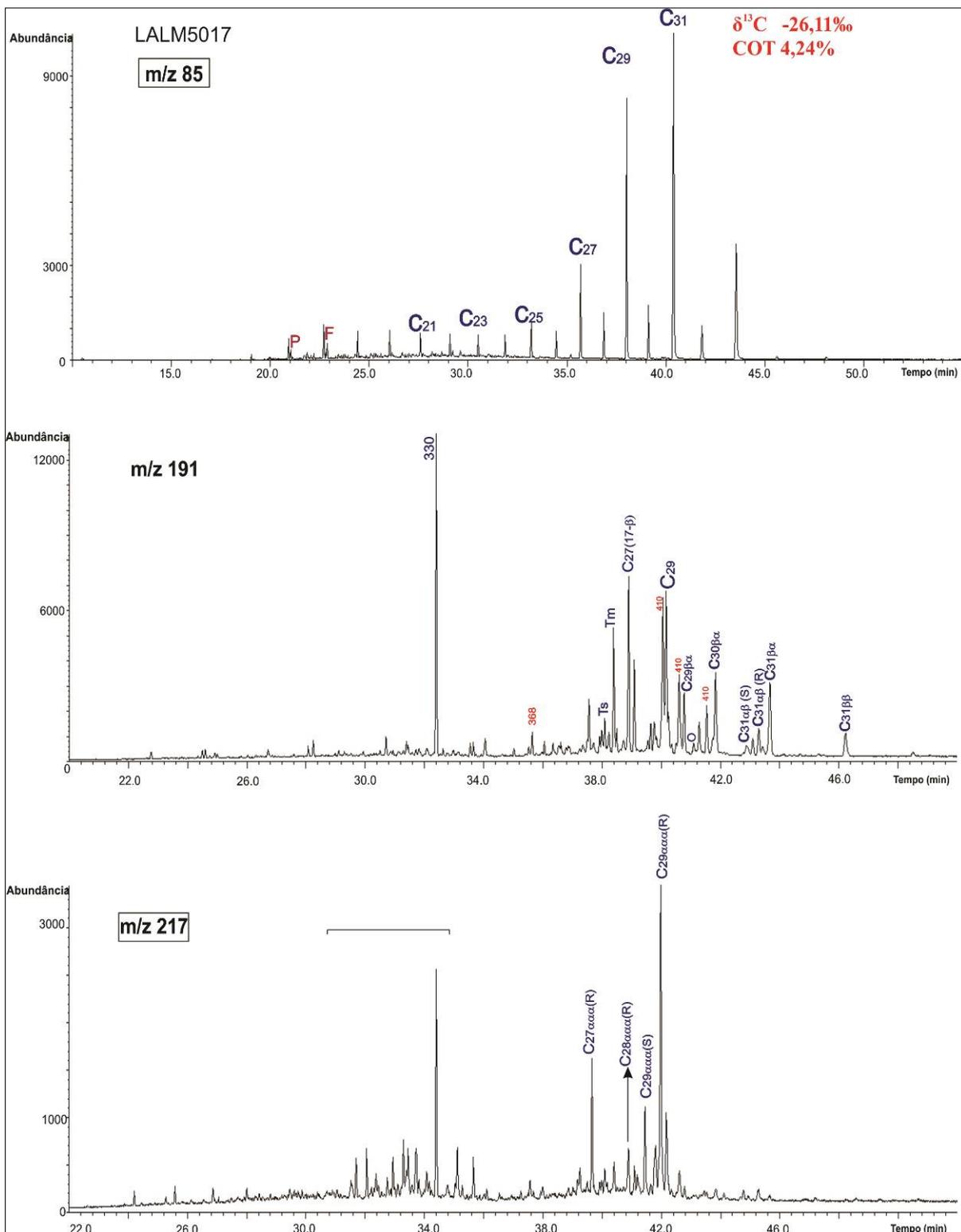


Figura 33 – Fragmentogramas m/z 85, 191 e 217 da amostra 5017, fácies folhelho cinza. nC= alcanos normais; F= fitano, P=pristano, Δ = terpanos tricíclicos, G=gamacerano, O=oleano.

4.2.2.2 Folhelhos Papiráceos (Ponto 06)

4.2.2.2.1 COT, S e RI

Os folhelhos laminados, com fissilidade bem desenvolvida, mostram teores de COT que variam entre 12 e 22,6% e resíduo insolúvel superior a 90%, indicando uma sedimentação silicilástica. Apresentam manchas amareladas irregulares e forte odor de enxofre, com teores que oscilam entre 11 e 16%. Os folhelhos pretos apresentam valores de S_2 maiores que 10 mg HC/ g rocha e índice de hidrogênio entre 70 e 166 mg HC/g COT, o que revela um baixo potencial para geração de óleo (Figura 32).

O crescimento dos teores de carbono orgânico e enxofre total da unidade anterior para esta unidade caracteriza o trato de sistema transgressivo, melhorando as condições de preservação da matéria orgânica, conforme mostrado pelos valores mais elevados do índice de hidrogênio.

4.2.2.2.2 Biomarcadores

O perfil m/z 85 exibe a presença de alcanos de baixo peso molecular (C_{17} - C_{22}), mas predominam os alcanos de alto peso molecular (C_{25} , C_{27} - C_{29}). A maior proporção de alcanos lineares de alto peso molecular (C_{25} , C_{27} , C_{29}), o predomínio de norhopano (C_{29} $\alpha\beta$) sobre o hopano ($C_{30}\alpha\beta$), a alta concentração do trisnorhopano $C_{27}(17\beta)$ e 18α -Oleanano, juntamente com a predominância do esterano C_{29} $\alpha\alpha\alpha R$, indicam a importância do aporte de vegetais terrestres na composição da matéria orgânica (Figura 34).

As altas abundâncias relativas de compostos termicamente pouco resistentes, C_{27} - 17β , $C_{29}\beta\alpha$, C_{30} $\beta\alpha$ e a predominância do epímero 22R correspondente aos hopanos estendidos C_{31} , juntamente com os baixos valores da razão (S/R) do $C_{29}\alpha\alpha\alpha$ esterano (0,06 – 0,09) confirmam uma matéria orgânica imatura (Figura 34).

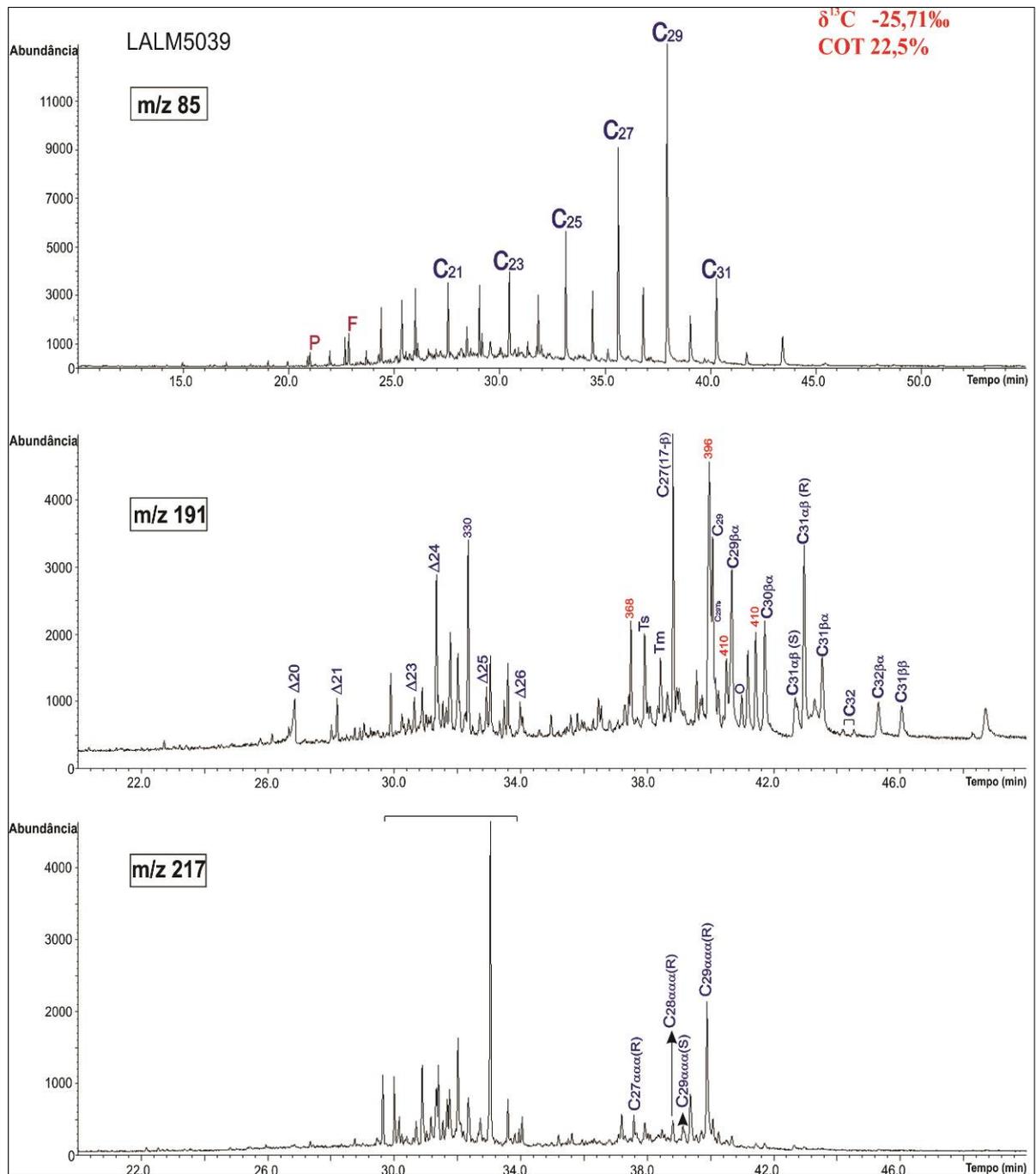


Figura 34 – Fragmentogramas m/z 85, 191 e 217 da amostra 5039, fácies folhelhos pairáceos. nC= alcanos normais; F=fitano, P=pristano, Δ= terpanos tríciclicos, G=gamacerano, O=oleano.

Uma das principais características que permitem caracterizar a idade da rocha geradora de petróleo é o biomarcador biológico diagnóstico de aporte terrestre, especificamente a ocorrência de $18\alpha(H)$ Oleanano (Figura 35), presente na maioria das amostras da Formação Rio Doce. Esse composto foi inicialmente encontrado em óleo proveniente do delta do Niger (Nigéria), onde diversos autores relacionaram sua origem aos precursores de plantas terrestres da família das angiospermas (EKWEOZOR et al., 1987). Estas plantas surgiram no Cretáceo, mas o seu maior desenvolvimento ocorreu no Terciário. Assim, os óleos ou extratos orgânicos com este composto relacionam-se, predominantemente, às bacias terciárias em ambientes deltaicos (BROOKS, 1986) ou a rochas e óleos do Terciário e Neocretáceo (PETERS et al., 2005).

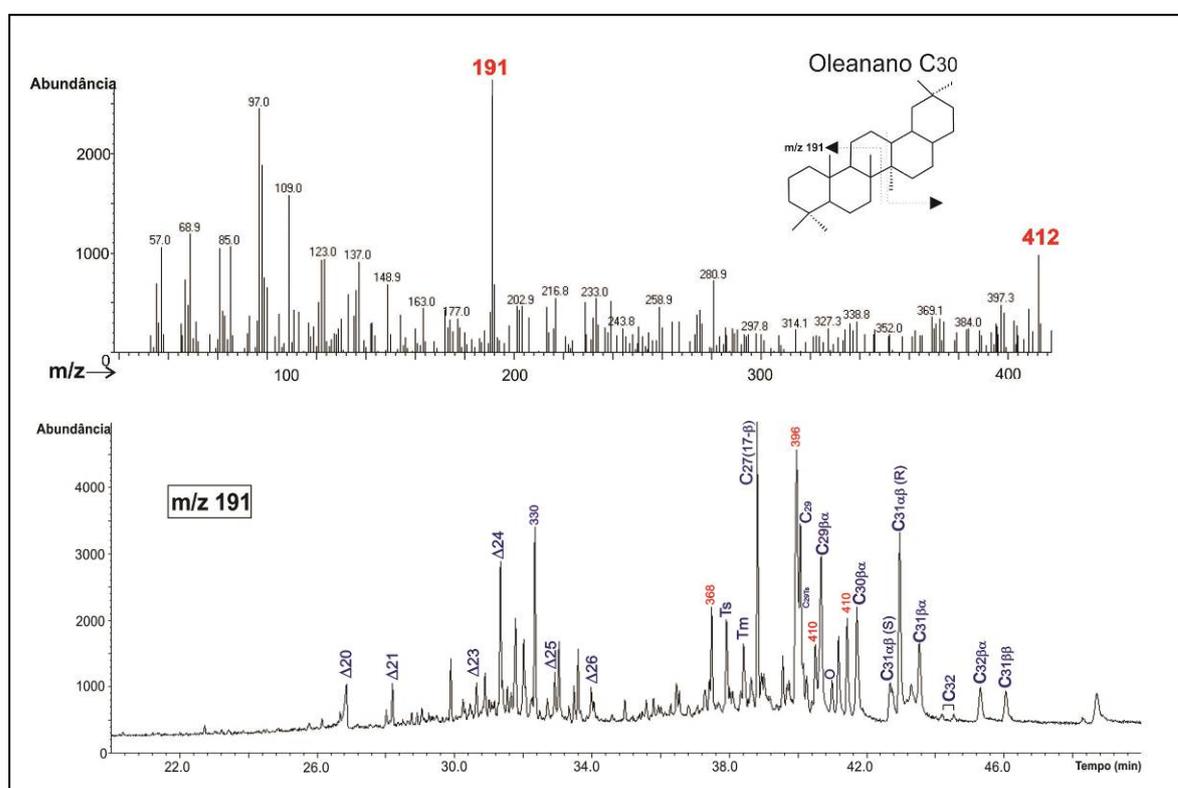


Figura 35 – Cromatograma m/z 191 mostra os terpanos tricíclicos e tetracíclicos da amostra LALM5039, em detalhe Oleanano C30 e seu espectro de massa.

4.2.2.3 Folhelhos Carbonosos (Ponto 07)

As amostras foram coletadas na parte superior do afloramento Ponto 07.

4.2.2.3.1 COT, S e RI

Os valores de COT para estas amostras são bastante variáveis, entre 22% e 38%, e são superiores aos constatados nos folhelhos papiráceos do ponto 06. A amostra LALM5022, com valores máximos de S_2 de 137mg HC/g rocha e índice de Hidrogênio em torno de 300 HC/g COT, pode ser considerada como apresentando excelente potencial gerador para gás e condensado (Figura 34)

4.2.2.3.2 Biomarcadores

A maior proporção de alcanos lineares de alto peso molecular (C_{27} , C_{29} , C_{31}) pressupõe uma maior contribuição de matéria orgânica de origem terrestre, concordante com os valores do índice de hidrogênio de 300 mg HC/g Rocha.

A alta abundância dos moretanos, $C_{27}(17\beta)$, $C_{30}\beta\alpha$, $C_{27}(Tm)$, a predominância do C_{29} esterano, a relação Hopano/Esterano superior a quatro e a presença, embora em baixas proporções de Oleanano, podem ser considerados indicadores de uma matéria orgânica de origem terrestre (CONNAN, 1986; RODRIGUES, 2004), que comparada com os folhelhos papiráceos, indicariam deposição principalmente de matéria orgânica terrestre (PETERS e MALDOWAN et al., 1993).

O predomínio de compostos insaturados no fragmentograma (m/z 191) relativos aos terpanos, correspondentes a massas 410, 396 e 368 (Figura 36), bem como as altas proporções de moretanos, constituem evidências da baixa maturação térmica da matéria orgânica. A predominância dos epímeros R sobre a S, nos hopanos estendidos $C_{31}(\alpha\beta R)$, (Figura 36) e o $C_{29} \alpha\alpha\alpha 20R$ sobre o $C_{29} \alpha\alpha\alpha S$ entre os esteranos, confirmam a baixa evolução térmica da matéria orgânica.

Os dados de maturação térmica sugerem que os folhelhos carbonosos possuem menor grau de maturação térmica que as fácies de folhelhos papiráceos (Ponto 06); concordante com sua posição estratigráfica acima deles.

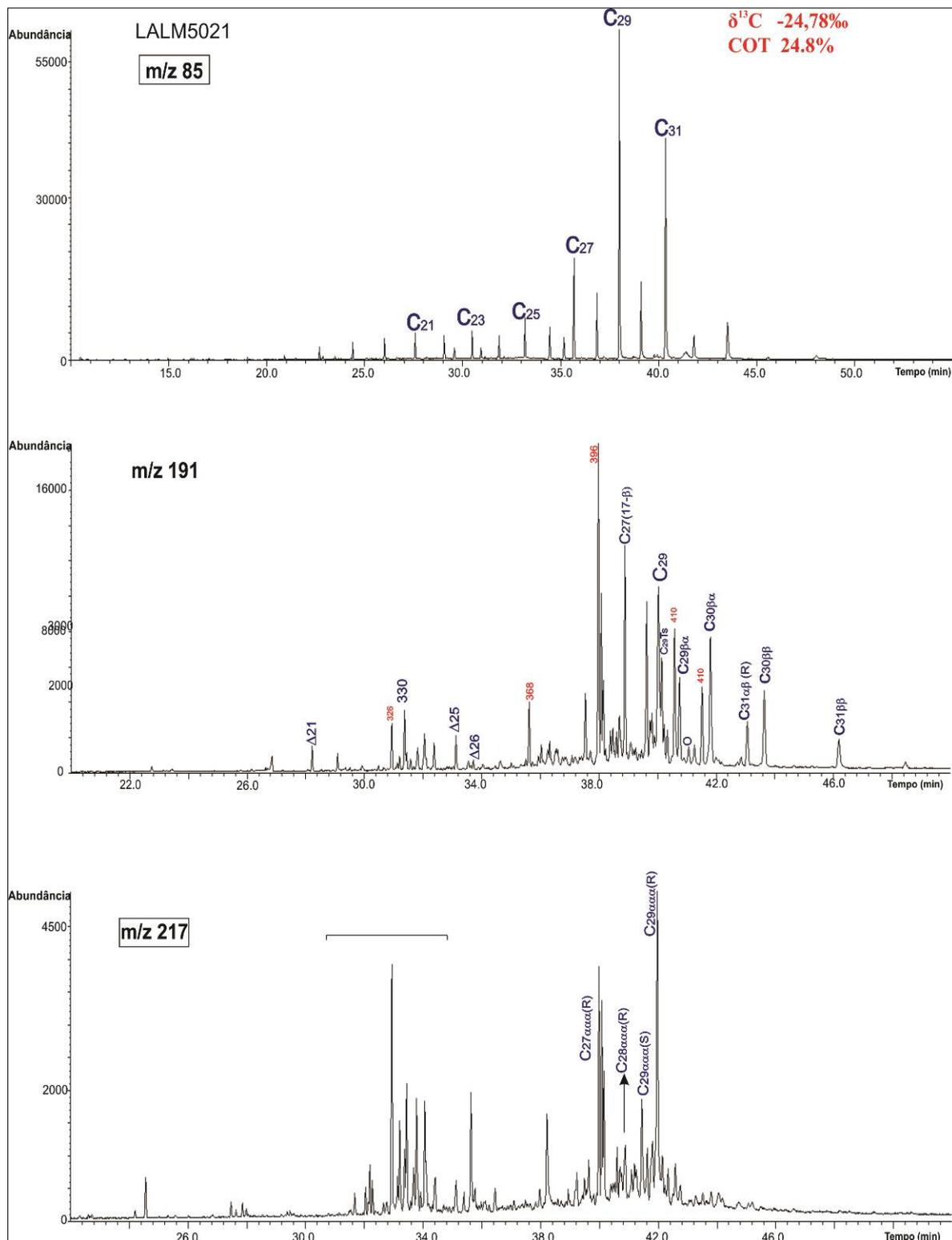


Figura 36 – Fragmentogramas m/z 85, 191 e 217 da amostra LALM5021, fácies folhelhos carbonosos. nCn= alcanos normais; F=fitano, P=pristano, Δ= terpanos tríclicos, G=gamacerano, O=oleano.