

# Projeto Ressurgência: processos geoquímicos e oceanográficos no limite entre as bacias de Campos e Santos

*Upwelling Project: oceanographic and geochemical process in the boundary between Campos and Santos basins*

Ana Luiza Spadano Albuquerque | André Luiz Belém | Rodrigo Costa Portilho-Ramos | Ursula Mendoza | Cátia Fernandes Barbosa

## resumo

A Região Costeira de Cabo Frio é caracterizada por peculiaridades geomorfológicas e hidrodinâmicas que contribuem para a complexidade dos processos sedimentares na plataforma. Dentre as peculiaridades da região, destaca-se a ocorrência de um depósito lamoso. Este depósito constitui o principal objeto de estudo do Projeto Ressurgência, que visa estabelecer modelos de produção, transformação, acumulação e transporte de material orgânico através de uma abordagem em multiescalas temporais. A caracterização geofísica demonstrou ecocaracteres com feições distintas em diferentes partes da plataforma, confirmando a complexidade na formação deste depósito. Ecocaracteres interpretados como *beach-rock* e como paleolagunas demonstram o potencial da região como análogo moderno. A análise de processos geoquímicos na interface

água-sedimento mostrou que os sedimentos na plataforma são essencialmente subóxicos, com a sulfato redução dominando as reações de oxirredução a partir de poucos centímetros abaixo da superfície. A formação de minerais estáveis de enxofre (pirita) em diferentes graus e tipo de cristalização também sugere múltiplos processos. O modelo de sedimentação mostra duas fases: a primeira controlada pelas variações no nível do mar e a segunda pela dinâmica oceanográfica. Em concordância com o modelo de sedimentação, o registro paleoceanográfico regional descreve duas fases de produtividade, sendo a condição atual iniciada em torno de 3.000 anos. Acoplado aos registros sedimentares, a dinâmica oceanográfica condiciona e modula o papel da plataforma como acumulador e/ou exportador de material para o talude, contribuindo com sedimentos para as bacias de Campos e/ou Santos.

**Palavras-chave:** processos geoquímicos | paleoceanografia | Cabo Frio

## abstract

*The Continental Shelf off Cabo Frio, RJ - Brazil is characterized by geomorphological and hydrodynamic peculiarities that contribute to the complexity of the sedimentary processes along this area of the platform. One of the groundbreaking findings in the "Projeto Ressurgência" (Upwelling Project) is the description of continental shelf mud deposition. The Upwelling Project aims to establish models of production, transformation, accumulation and transport of organic material in multiple timescales. An initial geophysical survey showed different features along the shelf, including beachrock, paleolagoons, stratified and chaotic eco-characters, confirming the potential of this region as being a modern analogue of the ancient carbon rich depositional material. Geochemical processes in sediment-water interface showed essentially suboxic conditions, dominated by sulfate reduction reactions a few centimeters below the surface. Stable sulfur minerals, such as pyrite, were found showing differing degrees and types of crystallization. Geochronological models revealed two distinct sedimentation periods, the first directly influenced by sea level changes and the second driven by the oceanographic dynamic. In agreement with the regional sedimentation model, the paleoceanographic record describes two productivity phases, the current have begun at approximately 3.000 years cal BP. Coupled with the sedimentary record the oceanographic dynamic drivers the character of the shelf on accumulation and/or exportation of material to the continental slope, contributing with sediments to Campos and Santos basins.*

*(Expanded abstract available at the end of the paper).*

**Keywords:** geochemical processes | paleoceanography | Cabo Frio

## introdução e objetivos

A principal e singular característica do litoral fluminense, em especial na Região de Cabo Frio, é a mudança de orientação da linha de costa e dimensões da plataforma continental adjacente. O Alto de Cabo Frio define o limite estrutural entre as bacias de Campos e Santos. A orientação E-W ao longo dos quase 120km de costa, desde o município do Rio de Janeiro, se altera bruscamente para SW-NE a partir de Arraial do Cabo. A existência dos sistemas lagunares costeiros formados pelas variações no nível médio do mar durante o Quaternário na porção oeste, a série de charneiras e um litoral de falésias esculpidas a leste evidenciam a interseção entre os macrocompartimentos da Bacia de Campos ao Norte e da Bacia de Santos ao Sul (Muehe e Valentini, 1998). Essa mudança na linha de costa no limite entre as duas bacias é marcada pela presença de uma fácies sedimentar de lama presente desde a Ilha de Cabo Frio até as profundidades limites da plataforma continental. A dinâmica oceanográfica nesta região da costa brasileira é bastante discutida (Valentin, 1984; Knoppers, 1990; Castelão e Barth, 2006), sendo caracterizada pelo afloramento de águas frias da Água Central do Atlântico Sul (ACAS). Esta ressurgência ocorre próximo à zona costeira, onde a isoterma de 18°C pode ser encontrada na superfície e também sobre a plataforma continental até seus limites neríticos, onde penetra até as camadas superiores da zona eufótica. A ressurgência nesta região da costa brasileira tem sido atribuída a quatro fatores principais: (1) a mudança brusca da orientação da costa e conseqüentemente alteração da geometria da plataforma continental adjacente; (2) o regime de ventos na região e sobre a plataforma, com foco sobre a divergência do vento na região; (3) a mudança sazonal no eixo da Corrente do Brasil (CB), que se desvia durante o verão e permite a entrada de volumes significativamente maiores da ACAS sobre a plataforma e (4) a presença de vórtices ciclônicos sobre a plataforma. Estes fatores, especialmente os fatores (2), (3) e (4), podem ainda ser fortemente perturbados por eventos climáticos, como os do tipo El Niño por exemplo, os quais ainda causam drásticas modificações na circulação atmosférica sobre a América do Sul. A configuração da plataforma continental na Região de Cabo Frio desde o último nível do mar baixo, com uma mudança de extensão e orientação geográfica do seu limite nerítico (fig. 1) e associada à dinâmica da CB que, por continuidade, tende

a manter seu fluxo orientado NE-SE, levam a uma alta incidência de vórtices e meandros na região. Estes processos integrados favorecem a intrusão de águas mais frias e ricas em nutrientes nas camadas superiores, induzindo a produtividade local e, conseqüentemente, um fluxo vertical de matéria mais acentuado, o que pode explicar em parte o acúmulo de lama rica em matéria orgânica, tornando a região um verdadeiro laboratório natural para o estudo de processos biogeoquímicos modulados pela variabilidade oceanográfica.

Neste sentido, o objetivo do Projeto Ressurgência é estabelecer modelos que expliquem a produção, a transformação e a acumulação de matéria orgânica na plataforma continental na Região de Cabo Frio, buscando nas interconexões entre a atmosfera, o oceano e o continente o entendimento dos processos e a gênese dos registros sedimentares em multiescalas temporais (escala sinótica, plurianual, secular e milenar). Para tal, este artigo pretende ilustrar aspectos relevantes da sedimentologia, da geoquímica e da circulação oceânica integrados, bem como estabelecer modelos conceituais para processos geoquímicos e oceanográficos para a região.

## levantamento geofísico e amostragem sedimentar

O primeiro foco científico do Projeto Ressurgência foi conhecer a estruturação sedimentar da porção superficial da plataforma continental na Região de Cabo Frio com a identificação da espessura e características sísmicas dos depósitos. Assim, o Projeto Ressurgência foi iniciado com levantamento batimétrico (ecobatímetro multifeixe - Simrad EM3000 *Dual Head*) de varredura sonar (Sonar Klein, série 5000 com dupla frequência 100/500kHz) e sísmico (*Geopulse Geoacustics System* 3,5kHz) da região. Esta pesquisa em alta resolução espacial abrangeu uma área total de 680km<sup>2</sup>, sendo 42 linhas espaçadas de 1.500m entre si e com comprimento variando entre 3km e 21km, navegadas na direção NE-SW e duas linhas com comprimentos de 30km e 35km, navegadas na direção SE-NW.

O fundo marinho na área estudada possui uma morfologia plano-inclinada com valores menores que 0,5° no sentido SW, típicos de plataforma e profundidades variando entre 74m no extremo norte e 132m

na parte sul da área. No aspecto sedimentar, a espessura da camada de lama superior variou entre 1m e 21m, com as maiores espessuras observadas ao longo de uma faixa de 7km de largura, que atravessa toda a área mapeada na direção NE-SW. Nesta faixa, os valores de espessura variaram entre 7m e 21m, com os valores máximos sendo observados no extremo norte da área (fig. 1). Estas características geofísicas corroboram as observações realizadas por Artusi (2004) e Simões (2007), em levantamento similar no limite oeste da Região de Cabo Frio, correspondente ao trecho de plataforma continental entre Cabo Frio e a Baía de Guanabara.

A identificação e a análise espacial dos ecocaracteres foram usadas como base para determinação dos pontos de coleta de sedimentos, tendo por objetivo a amostragem e caracterização de ambientes sedimentares distintos. Assim, com base no levantamento geofísico, foram selecionados quatro pontos para coleta de testemunhos longos (*kullenberg*) e 13 pontos para coleta de colunas sedimentares curtas (*box-core*). As colunas sedimentares longas recuperaram entre 3,5m e 5,8m, enquanto as colunas curtas recuperaram 30cm em média (fig. 1).

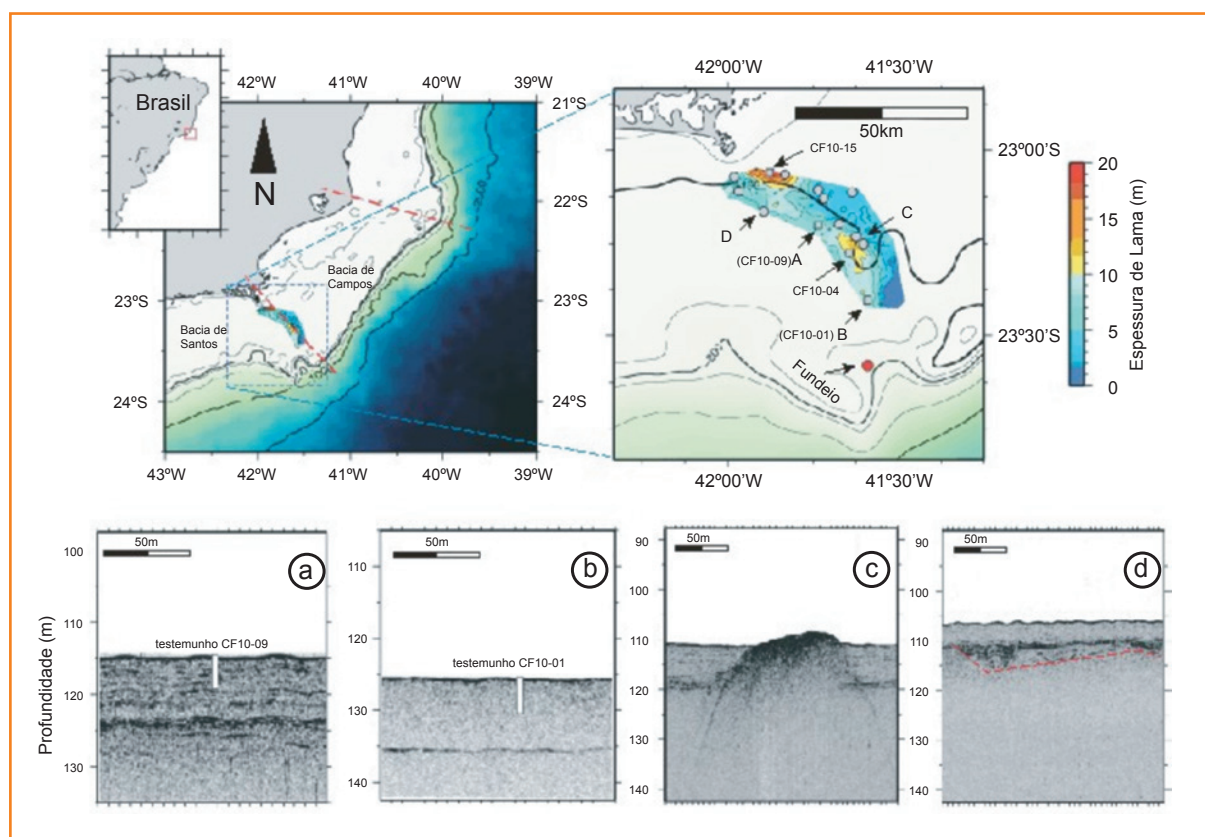
A análise dos registros sísmicos identificou no corpo de lama quatro ecocaracteres principais. Um deles foi observado na porção mediana da área de estudo onde se localiza o testemunho CF10-09 (fig. 1a) e, similarmente, o testemunho CF10-04. Este ecocaracter é descrito por uma sequência de refletores paralelos de subsuperfície até 120m de profundidade e está associado aos sedimentos lamosos com idade entre 6.000 e 7.000 anos cal AP. Um outro ecocaracter de interesse foi observado no extremo distal da plataforma, especificamente onde o testemunho CF10-01 (fig. 1b) está posicionado. Este ecocaracter pode ser definido como uma sequência caótica para transparente sem refletores óbvios. De maneira similar, o testemunho CF10-15 na porção proximal também apresenta as mesmas características sísmicas. Este ecocaracter está associado a sedimentos compostos por lama-arenosa com idades que englobam todo o Holoceno no testemunho distal. Esta pouca variação nos padrões de fácies encontrado nestas porções da área de estudo sugere uma deposição em condições mais protegidas. Assim, na porção mais proximal da costa, a lama de plataforma derivada da drenagem continental (por exemplo oriundo da ação da pluma costeira e contribuição do Rio Paraíba do Sul) pode desenvolver grandes acumulações em áreas de energia quase zero, adjacente à Búzios e Cabo Frio (Viana *et al.* 1998).

### Figura 1

Mapa de localização da área de estudo nos limites das bacias de Campos e Santos e a delimitação do corpo de lama sobre a plataforma. As setas indicam as posições relativas de (a) sequência de refletores paralelos, (b) sequência caótica e transparente, (c) *Beach-rock* e (d) sequência de refletores irregulares.

### Figure 1

Map of the study area in the limit boundaries of Campos and Santos basins, and the delimitation of the mud field on the continental shelf. The arrows indicate the relative positions of (a) sequence of parallel reflectors, (b) chaotic sequence and transparent, (c) *Beach-rock* and (d) irregular sequence of reflectors.



As características sedimentares da plataforma permitiram registrar a sedimentação do nível do mar baixo desde o início do Holoceno, conforme sugere a presença de areia na base dos perfis com idades superiores à 7.000 anos cal AP. A hipótese de uma plataforma dominada por ondas é reforçada pela geofísica e características sedimentológicas dos testemunhos analisados. Neste contexto, uma feição linear de aproximadamente 6km de comprimento, orientada NW-SE e com relevo relativo da ordem de 2m, foi observada nos registros sísmicos na porção central da plataforma na isóbata de 110m (fig. 1c). Sua disposição no ecocaracter indica que se estende até o refletor correspondente ao fundo da fácies de lama mostrando uma espessura de 11m. Estruturas de represamento de sedimento semelhantes às identificadas como *beach-rocks* neste projeto, com centenas de metros de comprimento e até 5m de altura, foram igualmente encontradas na plataforma externa na Bacia de Campos, limite norte da área de estudo por Viana *et al.* (1998), similares ainda aos alinhamentos carbonáticos descritos por Della Giustina (2006). Na porção interna da plataforma, em especial entre 60m e 80m, foram identificadas feições de ecocaracteres que formam sequências de refletores irregulares, muitas vezes com contornos de bacias, os quais foram

identificados como registros de paleolagunas (fig. 1d). Estas feições paleolagunares afogadas na plataforma podem oferecer importantes informações relativas à dinâmica deposicional de ambientes costeiros, como ocorre atualmente com as lagunas emersas. Artusi e Figueiredo (2007) relatam a presença de paleocanais paralelos à batimetria (60-80m) no limite sul com a Bacia de Santos. Assim sendo, é necessário um aprofundamento da análise geofísica destas feições para melhor definição de sua gênese e mapeamento.

## processos diagenéticos

Em média, 25% a 50% da produção primária atinge o fundo marinho em zonas costeiras e destes, 20% a 90% são remineralizados nos sedimentos superficiais da plataforma continental (Henrichs e Reeburgh, 1987). Neste processo geoquímico, o papel da redução na concentração de oxigênio na interface água-sedimento na preservação da matéria orgânica tem sido largamente debatido (Demaison, 1991). Na interface água-sedimento, a remineralização ocorre em um complexo gradiente redox, onde a matéria orgânica é alterada ou



destruída através da oxidação, associada à respectiva reação de redução principalmente de sulfato, manganês e ferro, controlados pela atividade microbiana em condições subóxicas a anóxicas.

Desta forma, para entender os processos de oxirredução que alteram a qualidade da matéria orgânica que atinge os sedimentos na Região de Cabo Frio, foram coletados quatro testemunhos curtos distribuídos ao longo de um gradiente batimétrico, entre 80m e 140m (fig. 2). Nos sedimentos, foram medidos *in situ* o pH e o potencial redox (Eh) (*Dual pH Technology - IQ Scientific Instruments*) e determinados os teores de ferro pirítico, ferro reativo, enxofre total (ST) (Analisador Elemental), enxofre volátil ácido (FeS - *Acid Volatile Sulfur - AVS*) e enxofre reduzido pelo cromo ( $S_0 + FeS_2$  - *Chromium Reducible Sulfur - CRS*). A determinação dos isótopos do enxofre ( $\delta^{34}S$ ) (C-irmMS) no sulfato, a caracterização da morfologia dos minerais estáveis de enxofre Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e o cálculo do grau de piritização (*Degree of Pyritization - DOP*) foram também realizados na matriz sedimentar. A água intersticial foi coletada pelo sistema Rhyzon SMS de 10cm de comprimento e as amostras foram fixadas sob atmosfera de nitrogênio e acondicionadas a 4°C. Um volume de 8mL a 10mL de água intersticial

foi obtido na resolução mínima de 1cm. Os teores de ferro, manganês (ICP-MS) e sulfato foram determinados, enquanto o teor de cloreto (ODP, 1991) foi determinado para a correção do  $SO_4^{2-}$ .

Com base nas energias livres da sequência de reações de oxirredução durante a degradação da matéria orgânica, foi elaborado um modelo conceitual que ilustra os processos de diagênese da área de estudo e caracteriza dois padrões. O primeiro padrão identificado, caracterizado por sedimentos subóxicos estratificados em duas subzonas, foi verificado no testemunho proximal e nos testemunhos coletados na porção média da plataforma (figs. 2a, 2b e 2c). Um segundo padrão, caracterizado por um gradiente óxico-subóxico, foi observado apenas no testemunho distal (fig. 2d).

Nos testemunhos que apresentam sedimentos subóxicos (figs. 2a, 2b e 2c), a subzona superior apresenta característica de pH neutro (Eh = 1mV a -18mV, pH = 6,97 a 7,32), abrangendo uma faixa entre 2cm e 4cm com altos teores de Fe e Mn, indicando que a degradação de matéria orgânica por óxidos e hidróxidos ( $MnO_2$  e  $FeOOH$ ) é o processo dominante. Na subzona inferior, o Eh diminui e o pH torna-se levemente básico (Eh = -3mV a -36mV, pH = 7,04 a 7,60). Esta subzona é caracterizada pelo decréscimo de Mn,

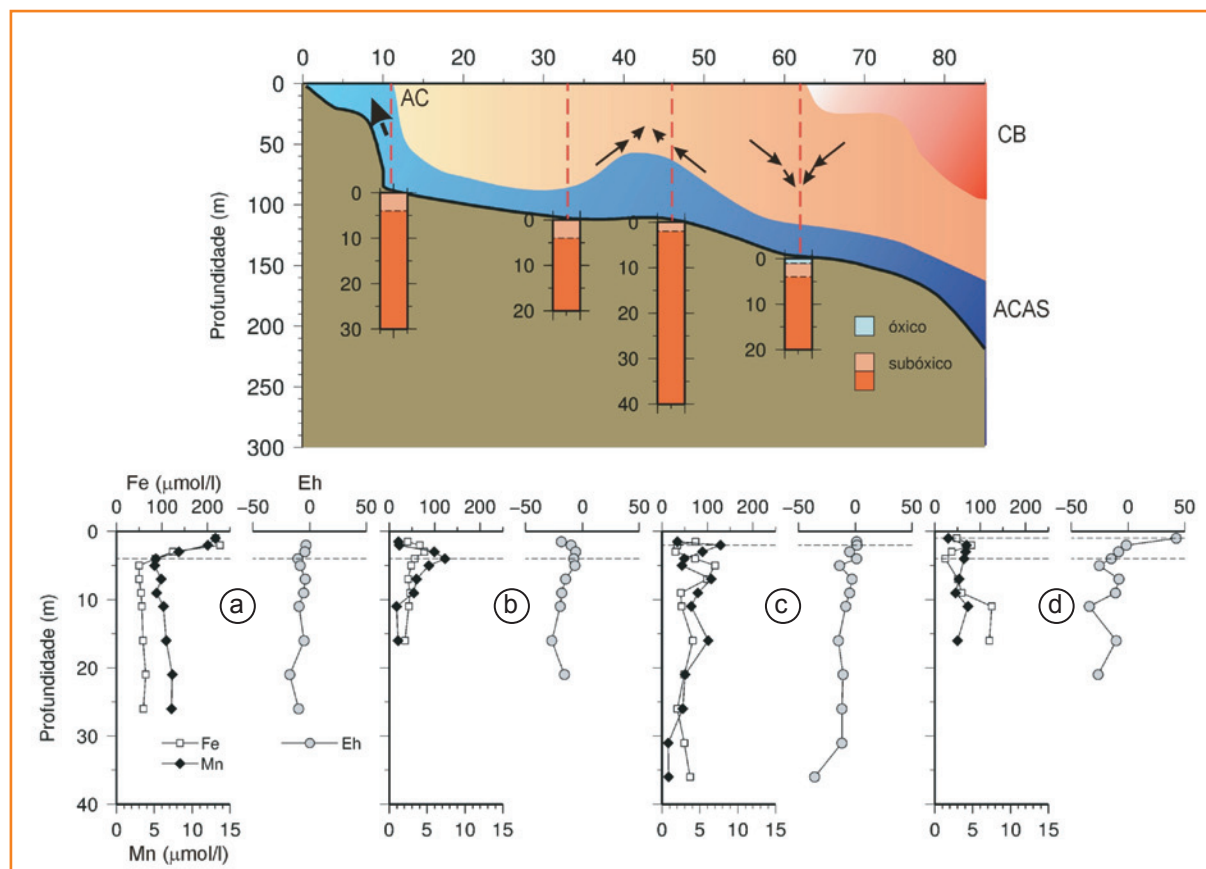


Figura 2

Modelo conceitual dos processos de diagênese ao longo do gradiente batimétrico em Cabo Frio, considerando o impacto do oxigênio nos sedimentos estudados. Os gráficos a, b, c e d mostram as variações verticais de Fe, Mn e o potencial redox Eh para os quatro testemunhos indicados no modelo e discutidos no texto.

Figure 2

Conceptual model of diagenetic processes along the depth gradient in Cabo Frio, considering the impact of oxygen in the sediments studied. Figures a, b, c and d show the vertical changes of Fe, Mn and redox potential Eh for the four cores represented in the model and discussed in the text.

sugerindo que o Mn(II) formaria óxido-hidróxidos de manganês. Nesta subzona, a pouca variação dos valores de Eh é refletida na baixa transformação redox do Fe(II), sugerindo a presença de complexos de Fe(III) mais estáveis.

No testemunho distal (fig. 2d), a zona óxica e ácida (Eh = 42mV, pH= 6,29) na interface água-sedimento representa os primeiros 2cm. Nesta camada, foram observados baixos teores de Fe e Mn dissolvido, os quais se encontram provavelmente na forma de MnO<sub>2</sub> e FeOOH associados ao fosfato. Na zona subóxica, a subzona superior apresenta pH neutro (Eh = -1,7mV a -15mV, pH = 7,04 a 7,25) e se caracteriza por uma brusca diminuição do Eh, correspondendo a um aumento dos teores de Fe e Mn e sugerindo a solubilização de MnO<sub>2</sub> e FeOOH. Na subzona inferior, levemente básica (Eh = -8mV a -26mV, pH = 7,13 a 7,58), os processos de oxidação da matéria orgânica são dominados pela redução do FeOOH, os quais tiveram continuidade da subzona superior, favorecendo a dissolução destes óxido-hidróxidos e promovendo as condições de equilíbrio para a formação de pirita (FeS<sub>2</sub>), como sugerido por Law *et al.* (2009).

O aumento da concentração de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> na interface óxica-subóxica (2cm) determinada no testemunho distal (fig. 2d) indicou o limite de sua percolação, antes de sua redução e formação de

sulfetos. Esta condição foi corroborada pelo decréscimo do  $\delta^{34}\text{S}_{\text{sulfato}}$  no limite entre estas camadas e posterior aumento na subzona inferior, indicando o uso discreto do SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> comoceptor de elétrons nas atividades microbianas (Böttcher *et al.*, 1998) (fig. 3a). Entretanto, a faixa de +20,6ppm e +22ppm encontrada em Cabo Frio está próxima aos valores da água do mar, indicando um baixo fracionamento. Por outro lado, o aumento do Fe pirítico e do DOP com a profundidade demonstram a disponibilidade de Fe reativo para a formação de sulfetos de ferro estáveis (figs. 3b e 3c). O aumento na concentração de enxofre total, que passa de 0,05% a 0,35% ao longo do perfil, mostra que o enxofre encontra-se disponível para processos de sulfidização de metais, como proposto por Ferdelman *et al.* (1999) (fig. 3c). Dentre os sulfetos estáveis, o FeS<sub>2</sub> foi constatado pelo consistente aumento do CRS (CRS= S<sup>0</sup> + FeS<sub>2</sub>) ao longo do perfil. O sinal não detectado do monossulfeto de ferro solúvel (AVS= Fe + H<sub>2</sub>S) corrobora o fato do Fe reduzido ter sido efetivamente complexado pelo S, formando fases de FeS sólidas, incluindo a pirita.

A observação da estrutura morfológica da pirita mostrou a presença de grãos de pirita minuta, cristais octaédricos e framboides (<100µm), o que é consistente com a proposição de múltiplos processos diagenéticos ligados desde a formação de precursores até minerais cristalinos de pirita (Wilkin *et al.*, 1996) (figs. 3d, 3e e 3f).

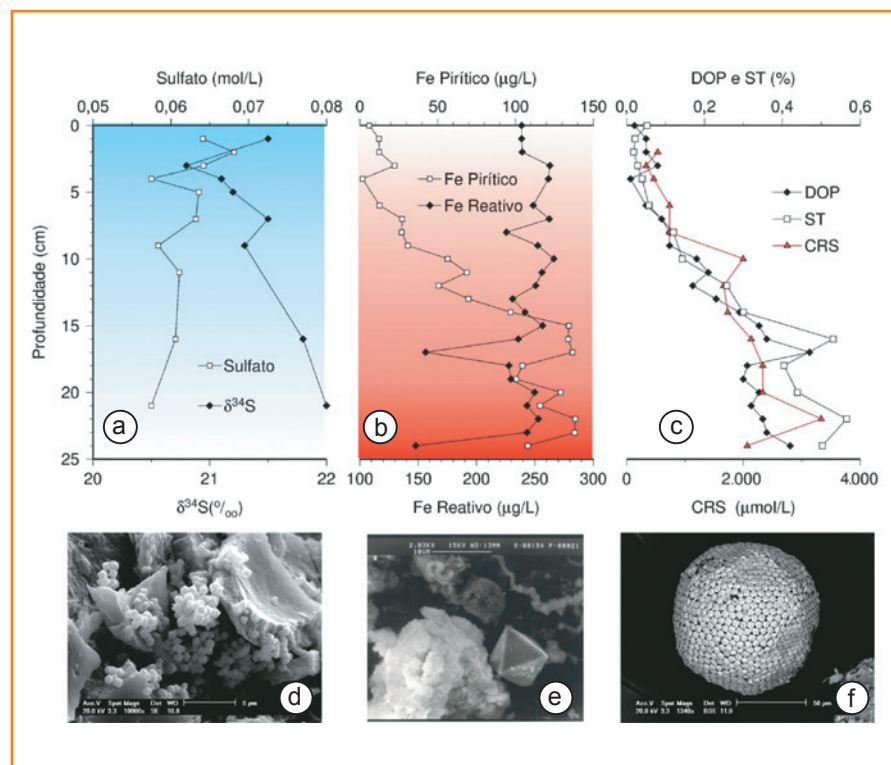
Os resultados apresentados aqui nos permitem sugerir um modelo conceitual, conectando a oceanografia da plataforma continental na região aos processos geoquímicos na interface água-sedimento (fig. 2). Considerando a temperatura, que modula a cinética das reações mediadas por microrganismos e o conteúdo de oxigênio dissolvido presente nas massas d'água, é possível inferir que a sequência vertical das reações de oxirredução reflita o estado médio da circulação. Neste contexto, o testemunho distal (fig. 2), situado em uma área de intensa atividade de vórtices e meandros da CB conforme demonstrado no item 6, é o único perfil que apresenta condições óxicas na interface água-sedimento. Por outro lado, os testemunhos da porção mediana da plataforma (figs. 2a, 2b e 2c) não apresentaram camada óxica. O testemunho proximal está sob influência direta da área da ressurgência costeira e, dessa forma, mais suscetível aos processos deposicionais resultantes da drenagem continental.

Figura 3

Variações verticais de (a) isótopos do enxofre ( $\delta^{34}\text{S}$ ) no sulfato, (b) teores de ferro pirítico e ferro reativo e (c) grau de piritização (DOP), enxofre total (ST) e enxofre reduzido pelo cromo (CRS), além da caracterização da morfologia dos minerais estáveis de enxofre por Microscopia Eletrônica de Varredura (micrografias d, e, f).

Figure 3

Vertical Variations of (a) of sulfur isotopes ( $\delta^{34}\text{S}$ ) in sulfate, (b) levels of reactive iron and iron pyrites and (c) degree of pyritization (DOP), total sulfur (TS) and reduced sulfur compounds by chromium (CRS), and characterizing the morphology of stable sulfur minerals by scanning electron microscopy (micrographs d, e, f).



# taxas de sedimentação e acumulação na plataforma continental

A evolução sedimentar das plataformas continentais no final do Quaternário é resultante da interação entre múltiplos fatores, tais como as mudanças no nível do mar e as alterações nas condições oceanográficas. Estas interações se traduzem em padrões de disposição de sedimentos espacialmente e temporalmente irregulares, compondo mosaicos (Mahiques *et al.*, 2010). Aliado a isto, as plataformas continentais exercem o papel fundamental de mediar as transferências de materiais continentais e oceânicos. Como já mencionado anteriormente, a plataforma continental na Região de Cabo Frio apresenta características peculiares do ponto de vista geomorfológico e hidrodinâmico. Um estudo prévio (Andrade, 2008), baseado em testemunho retirado da fácies lama de Cabo Frio, demonstrou teores de carbono orgânico total variando entre 1% e 3%, o que demonstra o potencial de acumulação de sedimentos orgânicos nesta plataforma. Baseando-se nisto, a determinação de modelos de idade para os sedimentos e o entendimento dos padrões de sedimentação na plataforma ao final do Pleistoceno e todo o Holoceno são fundamentais para a compreensão da capacidade da região em receber, produzir, acumular, transformar e proporcionar o *bypass* do material orgânico para a bacia oceânica adjacente.

Um modelo geocronológico regional foi elaborado com base em 82 datações <sup>14</sup>C AMS em matriz orgânica de sedimentos de 17 testemunhos (*box-cores* e *kullenbergs*) coletados ao largo da plataforma continental de Cabo Frio (fig. 4). Como ressaltado, em função da importância das variações do nível do mar do final do Quaternário para a evolução das feições sedimentares da plataforma continental, o modelo geocronológico regional para Cabo Frio foi confrontado com uma curva de variação do nível médio do mar, construída através de uma composição de dados globais e regionais (figs. 4a e 4b).

Quatro fases de sedimentação foram observadas ao longo dos últimos 15.000 anos (figs. 4a e 4b) com taxas de sedimentação e idades distintas:

- fase sedimentar I; máxima regressão (15.000 a 10.000 anos cal AP) esta fase foi registrada por sedimentos da base de um único perfil,

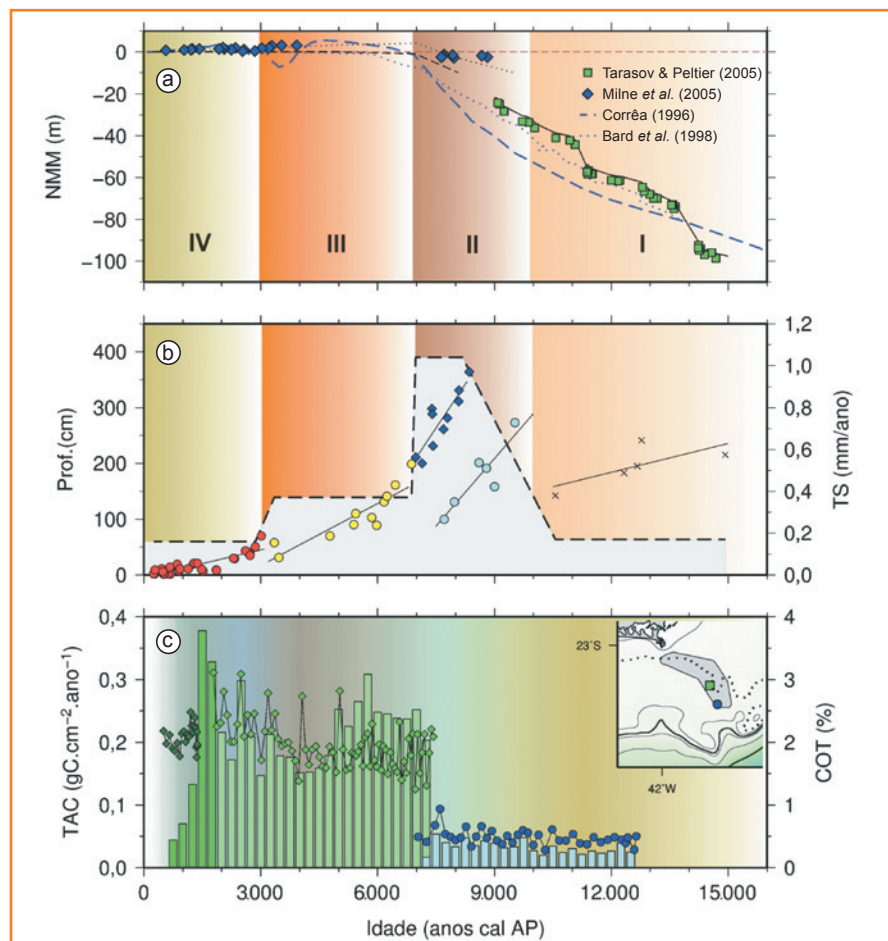


Figura 4

(a) Curvas de variação do nível do mar nos últimos 16 mil anos cal AP, com base em modelos globais e levantamentos regionais, (b) modelo geocronológico regional elaborado com base em 82 datações <sup>14</sup>C AMS e (c) estimativa das taxas de acumulação de carbono orgânico (TAC) e Carbono Orgânico Total (COT) nos últimos 13 mil anos cal AP.

Figure 4

(a) Curves of sea level changes over the past 16.000 years cal BP, based on global and regional models, (b) regional geochronological model developed based on 82 AMS <sup>14</sup>C dating and (c) estimation of accumulation rates organic carbon (TAC) and Total Organic Carbon (COT) in the last 13.000 years cal BP.

localizado na porção média da plataforma. A natureza mais grossa dos sedimentos, associada à presença de grandes fragmentos de conchas, indica um ambiente costeiro durante nível de mar baixo, variando entre -100m e -50m (Corrêa, 1996). A taxa de sedimentação média nesta fase foi de 0,17mm.ano<sup>-1</sup>;

- fase sedimentar II; Transicional (10.000 a 7.000 anos cal AP) esta fase foi registrada em sedimentos de quatro testemunhos, localizados tanto na porção distal quanto proximal da plataforma. Em termos texturais, os sedimentos nesta fase também se caracterizam como areia grossa a média, passando a silte arenoso e sem presença de fragmentos de conchas. Uma peculiaridade desta fase é o aumento brusco e acentuado das taxas de sedimentação em relação à fase anterior, o que parece estar relacionado aos efeitos da transição entre as condições de máxima regressão e transgressão do Holoceno, quando o nível do mar variou entre -50m e +6m (Corrêa, 1996). As diferenças nas feições sedimentares



na plataforma interna e externa são marcadas por taxas de sedimentação média de 1,05mm e 0,8mm.ano<sup>-1</sup>, respectivamente. No entanto, é importante notar que, a despeito das diferenças nas taxas de sedimentação entre os ambientes costeiro e pelágico, existe uma consistência significativa entre os padrões registrados indicado pela semelhança na inclinação das retas dos modelos de distribuição de idades;

- fase sedimentar III; Holoceno Médio (7.000 a 3.000 anos cal AP) esta fase foi registrada em cinco testemunhos longos distribuídos ao longo da fácies lama. Esta fase é caracterizada pela deposição de sedimentos argilosos com baixos teores de areia fina, mostrando uma mudança em relação à textura dos sedimentos da fase anterior. A mudança entre as fases sedimentares II e III foi indicada pelo decréscimo nas taxas de sedimentação, as quais passam a apresentar um valor médio de 0,37mm.ano<sup>-1</sup>. Os sedimentos desta fase marcam o fim do controle eustático do nível do mar e o início do controle da circulação sobre os processos sedimentares. Desta forma, os processos que modulam a subida da ACAS e sua relação com a dinâmica de vórtices sobre a plataforma nesta fase constituem o principal fator condicionador dos padrões sedimentares. A reconstituição paleoceanográfica da região baseada na abundância relativa de foraminíferos planctônicos *G.ruber* e *G.bulloides* indica que o volume de ACAS presente sobre a plataforma não foi tão importante nesta fase, o que ocasionou uma baixa produtividade durante este período. No entanto, apesar da baixa produtividade inferida, a taxa de sedimentação média estimada para esta fase se manteve relativamente alta, em especial quando comparada ao Holoceno Superior;
- fase sedimentar VI; Holoceno Superior (3.000 anos cal AP ao atual) esta fase foi registrada nos cinco testemunhos longos e em 12 curtos estudados, distribuídos ao longo da fácies lama. Os sedimentos depositados nesta fase apresentam textura semelhante à da fase anterior, enquanto a reconstituição paleoceanográfica mostra que o volume de ACAS sobre a plataforma veio aumentando desde o fim da Fase III (fig. 4b), favorecendo a ressurgência nesta fase e, conseqüentemente, elevando a produtividade.

Paradoxalmente, concomitante ao aumento na produtividade devido ao fortalecimento da ressurgência da ACAS, a taxa de sedimentação média diminuiu drasticamente nesta fase, atingindo o menor valor de todo perfil, com valor de acumulação de sedimentos de 0,16mm.ano<sup>-1</sup>.

Pelo menos duas hipóteses podem ser levantadas na tentativa de explicar o paradoxo da sedimentação: (1) intensificação dos processos microbiais na coluna d'água, favorecidos por redes tróficas com múltiplos caminhos de fluxo de energia (Crespo *et al.*, 2011) e (2) aumento da advecção sobre a plataforma que seria responsável pela exportação de grande parte do material produzido para o talude. Os dados obtidos pelo fundeio instalado na plataforma externa pelo Projeto Ressurgência serão fundamentais para o esclarecimento deste paradoxo.

Considerando a dinâmica sedimentar ao longo dos últimos 15.000 anos, o potencial de acúmulo de matéria orgânica na plataforma da Região de Cabo Frio foi avaliado em testemunhos coletados das porções média e distal da plataforma. A variação na taxa de acumulação de carbono orgânico (TAC) mostrou que durante as fases em que as variações do nível do mar exerceram papel preponderante sobre a sedimentação (fases I e II) a TAC foi baixa, da ordem de 0,05 gCO.m<sup>-2</sup>.ano<sup>-1</sup>. Por outro lado, nas fases em que o controle oceanográfico modulou a sedimentação, a TAC foi cerca de cinco vezes maior, apresentando cerca de 0,25 gCO.m<sup>-2</sup>.ano<sup>-1</sup>. Considerando um depósito lamoso com extensão de 700km<sup>2</sup> e as TAC apresentadas, foi possível realizar uma estimativa preliminar do potencial de acumulação de carbono orgânico sobre a plataforma, como cerca de 360 milhões de toneladas de carbono acumulados ao longo dos últimos 18.000 anos. Estes resultados, embora preliminares, demonstram a importância deste setor da plataforma continental brasileira, tanto como acumulador quanto exportador de matéria orgânica.

## paleoceanografia regional no Quaternário Superior

Foraminíferos planctônicos são fortemente associados a fatores ambientais tais como salinidade,



temperatura, nutrientes, luz e estratificação da coluna d'água e, por isso, têm sido largamente utilizados como *proxies* em paleoceanografia (Ravelo *et al.*, 1990). A espécie *Globigerina bulloides* é típica de águas frias e rica em nutrientes e é encontrada em regiões temperadas e áreas de ressurgência (Chiessi *et al.*, 2007). Por isso, essa espécie é abundante na Região de Cabo Frio, devido à presença de águas frias e nutritivas relacionada à ressurgência da ACAS na zona eufótica da plataforma. Por sua vez, a espécie *Globigerinoides ruber* habita regiões tropicais e oligotróficas (Boltovskoy *et al.*, 1996), sendo transportada para a Região de Cabo Frio pela CB. O uso da abundância relativa de ambas as espécies, assim como de sua razão (Gr/Gb), tem se mostrado uma valiosa ferramenta em estudos de reconstituição paleoceanográfica (Conan *et al.*, 2002). Altos valores da razão Gr/Gb indicam períodos de influência de águas quentes e oligotróficas, enquanto altos valores indicam períodos de influencia de águas frias e ricas em nutrientes. As espécies de foraminíferos *Globigerinoides ruber* e *Globigerina bulloides* são abundantes nos sedimentos de Cabo Frio, representando cerca de 50% da abundância absoluta (Souto *et al.*, 2011). As anomalias da razão Gr/Gb registradas no testemunho mais distal da plataforma de Cabo Frio mostram valores negativos entre 13.000 e cerca de 6.000 anos cal AP, passando para positivos entre 6.000 e 2.000 anos cal AP, retornando para valores negativos após 2.000 anos cal AP.

Considerando-se a evolução sedimentar da plataforma ao longo do tempo estudado, as variações eustáticas do nível do mar condicionaram prioritariamente os processos sedimentares entre o final do Pleistoceno e 7.000 anos cal AP. A partir de 7.000 anos cal AP, quando o controle oceanográfico tornou-se preponderante, as anomalias Gr/Gb tenderam a valores positivos, atingindo seu máximo no Holoceno Médio. Esta condição sugere uma fase com forte presença das águas tropicais sobre a plataforma e aproximação do núcleo da CB, a qual teria influenciado a estratificação da coluna d'água, dificultando a penetração da ACAS na zona eufótica, reduzindo a produtividade local durante esse intervalo de tempo. A partir de 3.000 anos cal AP, os valores da anomalia Gr/Gb tendem a se tornar negativos, indicando que o padrão oceanográfico atual teve início neste período. Além disto, a tendência a valores negativos sugere a penetração da ACAS com maior intensidade na plataforma e/ou maior frequência na zona eufótica, gerando uma camada de mistura favorável ao aumento da produtividade primária.

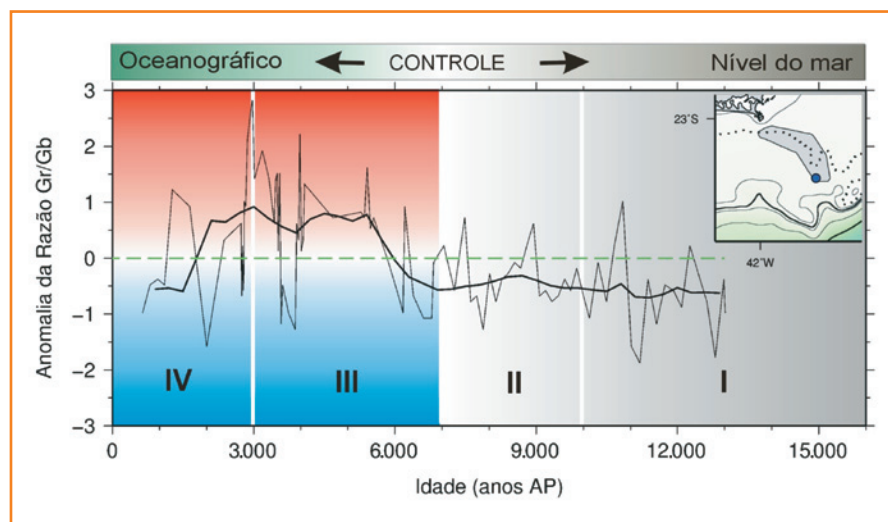


Figura 5

Varição da anomalia da razão Gr/Gb registrada no testemunho mais distal da plataforma de Cabo Frio nos últimos 13 mil anos cal AP.

Figure 5

Variation of anomaly ratio Gr / Gb recorded in the distal core in the shelf of Cabo Frio in the last 13.000 years cal BP.

O padrão de variabilidade da ressurgência reconstituído através da anomalia da razão Gr/Gb é corroborado pela análise de *downscaling* regional dos resultados de modelos climáticos globais (Braconnot *et al.*, 2007), o que mostra uma evidente alteração no rotacional dos ventos. Estas alterações no campo superficial dos ventos condicionam a competência em manter a ACAS sobre a plataforma na região durante o Holoceno, desfavorecendo a presença da ACAS durante o Holoceno Médio e favorecendo ao longo do Holoceno Superior (Projeto Ressurgência - Grupo I: Interações atmosfera-oceano; comunicação verbal).

## dinâmica oceanográfica moderna

A dinâmica oceanográfica associada aos fluxos verticais e horizontais de materiais na coluna d'água pode ser considerada o análogo moderno dos processos descritos nos itens anteriores, que condicionaram a deposição ao longo do final do Pleistoceno-Holoceno. A hidrodinâmica de mesoescala do Oceano Atlântico Sul não variou significativamente desde o final do Oligoceno/início do Mioceno (Wright, 1991), o que permite que os processos observados durante o Quaternário possam ser extrapolados para o passado, conforme proposto por Vianna *et al.* (1998). A compreensão desta dinâmica é a chave para correlacionar a variabilidade temporal dos parâmetros analisados nos testemunhos e os eventos climáticos no passado.

Para o conhecimento do análogo moderno, o Projeto Ressurgência utiliza uma linha de fundeio instalada na plataforma continental, cerca de 42 milhas a

sudeste de Cabo Frio na posição 23°S 36' e 041°O 34' e a uma profundidade aproximada de 142m (fig. 5). A linha de fundeio se estende do assoalho oceânico até aproximadamente 30m abaixo da superfície, evitando assim a interferência com o tráfego de embarcações na região. É composta por: (1) uma bóia de subsuperfície com um rastreador ARGOS, (2) duas armadilhas de sedimento tipo Parflux Mark 8-13 (McLane Labs), dotadas com carrossel de 13 garrafas de 250mL de capacidade total cada, instaladas a 50m e 100m de profundidade respectivamente; (3) dois correntômetros acústicos Nortek Aquadopp 400KHz posicionados a 75m, orientados para cima e para baixo, respectivamente, a fim de perfilar toda a coluna d'água; (4) um CTD Plus V2 / AML a 110m e (5) um conjunto de 21 sensores de temperatura (TibdiT v2 - Onset Comp.), sendo um a cada 5m em média, instalados diretamente sobre o cabo guia a cada 5m e todo o conjunto ancorado no fundo marinho com uma poita de 1,5ton. Os períodos de amostragem ocorreram de 11/11/2010 à 09/02/2011 (fundeio 1), 15/03/2011 à 14/06/2011 (fundeio 2), 20/07/2011 à 29/11/2011 (fundeio 3) e 02/12/2011 à 12/04/2012 (fundeio 4), respectivamente.

Além dos dados físicos contínuos recuperados pelos fundeios, as duas armadilhas de sedimento posicionadas na base da camada de mistura (~50m) e próximas ao fundo (~100m), respectivamente, forneceram um quadro bastante claro dos fluxos verticais de material na região. Cada garrafa da armadilha é preenchida com formol a 4% em solução hipersalina e permanece aberta por períodos que variaram entre três a sete dias. Na recuperação do fundeio, cada garrafa é dividida em

quatro alíquotas previamente filtradas em malha de 1.000µm e sequencialmente em 500µm para a retirada de organismos nadadores. Posteriormente, as análises realizadas são: alíquota 1 - determinação do fluxo de material em deposição, dos conteúdos de carbono e nitrogênio e de seus respectivos isótopos; alíquota 2 - para determinação do conteúdo de metais; alíquota 3 - para caracterização e determinação de moléculas orgânicas e alíquota 4 - para análise das assembleias planctônicas, incluindo fito e zooplâncton, pelotas fecais e ainda *picking* de foraminíferos planctônicos para análise de  $\delta^{18}O$  e a razão Mg/Ca.

Este esforço amostral da biologia e geoquímica do material em processo de sedimentação na área de estudo é somado à obtenção dos dados físicos compostos de (1) dados de corrente integrados a cada 3m da coluna d'água em intervalos de 1 hora, (2) dados de temperatura a cada 5m obtidos a cada 15min e (3) dados secundários de fontes externas, tais como vento, obtido do programa *Advanced Scatterometer* (Ascat) e temperatura superficial/clorofila, obtida através dos satélites TERRA e AQUA.

Os fenômenos físicos oceânicos em diferentes escalas de tempo e espaço, atuando concomitantemente, levam às inhomogeneidades na estratificação da coluna d'água e no posicionamento vertical das diferentes massas d'água, a depender de suas propriedades termodinâmicas (temperatura e salinidade) e seu movimento (componentes da velocidade e da superfície).

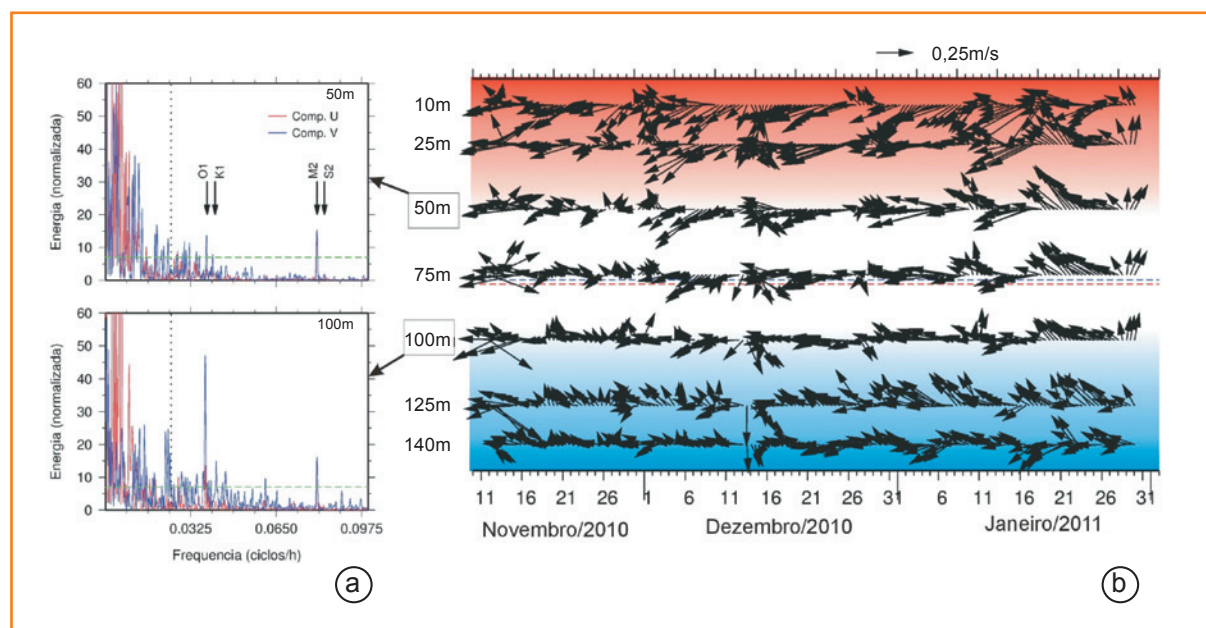
Pela proximidade com a quebra de plataforma, o ponto de fundeio apresenta um forte sinal de corrente, influenciado pela banda de maré conforme pode ser

Figura 6

(a) Análise espectral das componentes u e v nas profundidades de 50m e 100m obtidas pelos correntômetros no fundeio 1. A linha pontilhada representa o limite da banda subinercial (frequências maiores que 1/40 ciclos por hora). As setas indicam os períodos das componentes de maré M2, S2, O1 e K1. (b) Vetores de corrente nas profundidades indicadas durante o fundeio 1.

Figure 6

(a) Spectral analysis of the u and v components in the depths of 50m and 100m obtained by deploy 01. The dotted line represents the limit of the sub-inertial band (frequencies greater than 1/40 cycles per hour). The arrows indicate the periods of the tidal components M2, S2, O1 and K1. (b) Current vectors at the depths indicated during the deploy 01.

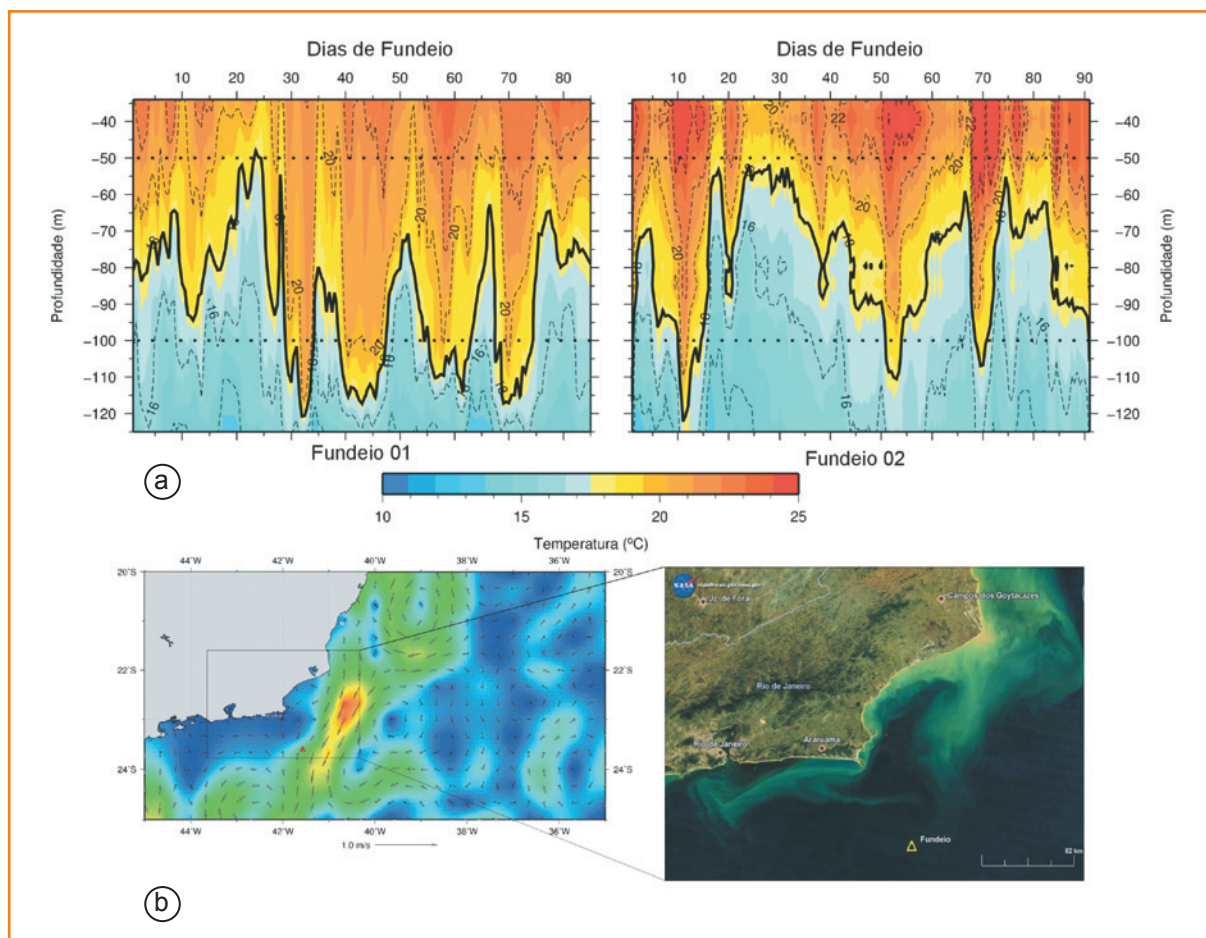


observado no periodograma da figura 6. Os vetores de corrente (neste exemplo referentes ao fundeio 1) mostram ainda um sinal na banda inercial, possivelmente devido à passagem de sistemas frontais, em períodos que variaram entre 5 a 13 dias. É importante salientar que o sinal de corrente também mostra respostas significativas associadas a processos com períodos mais longos (vórtices e meandros da CB, com período maior que 15 dias), ambos influenciando as correntes até camadas mais profundas. Em determinados momentos, as velocidades nas camadas inferiores atingiram valores de até 30cm/s em direção ao talude, similares em magnitude aos encontrados por Viana *et al.* (1998) na Baía de Campos.

Durante os dois períodos de fundeio analisados, a coluna d'água parece responder notadamente de forma diferenciada à forçante atmosférica na camada superior, com períodos de incursões significativas da isoterma de 18°C até 50m de profundidade aproximadamente. Cabe ainda ressaltar que por alguns períodos específicos, a presença de vórtices quentes massivos levou águas com temperaturas de 20-22°C até praticamente à base da coluna d'água (fig. 7a).

Castelão e Barth (2006) demonstram a importância do rotacional do vento na Região Oceânica de Cabo Frio, fator este determinante para as incursões da ACAS dentro da camada eufótica. De forma similar no passado, este mecanismo pode ter influenciado significativamente os padrões de deposição na área de estudo, conforme observado pelas anomalias da razão Gr/Gb. Em contrapartida, as incursões de vórtices quentes oriundos do meandramento da CB na borda da plataforma mostram um quadro sinótico regional bastante variável em janelas temporais da ordem de 3-5 dias (fig. 7a). Um exemplo é a intensa atividade de vórtices na plataforma conforme mostram os dados do programa Oscar/NOOA na figura 7b e seu impacto observado na banda visível de uma imagem do sensor Modis no mesmo período, mostrando o dramático contraste entre as águas costeiras com altos teores de particulados em suspensão e as águas oceânicas.

Os dados preliminares das armadilhas dos fundeios 1 e 2 mostram que as condições oceanográficas afetam de forma direta o fluxo vertical de material na coluna d'água. A distribuição do material particulado e do fluxo total de massa (FTM) pode ser classificada em dois



**Figura 7**  
(a) Dados dos sensores de temperatura para os fundeios 1 e 2. (b) Imagem do programa Oscar/NOOA mostrando a distribuição espacial do fluxo superficial, bem como a coerência com o padrão observado em uma imagem True Color do sensor Modis.

**Figure 7**  
(a) Temperature data for mooring deploys 1 and 2. (b) Image of the Oscar/NOOA program showing the spatial distribution of surface currents, as well as the consistency with the pattern observed in a True Color image of Modis sensor.



cenários: o primeiro, caracterizado por alto fluxo de partículas (de  $5\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$  a  $13\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ ), associadas a períodos com águas mais quentes na camada superficial e o segundo grupo caracterizado por um baixo aporte de partículas (de  $0,2\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$  a  $0,9\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ ). Os maiores valores de FTM e as maiores quantidades de material particulado se alternaram entre as armadilhas de fundo e de superfície, principalmente associadas à presença (menor fluxo) ou ausência (maior fluxo) da isoterma de  $18^\circ\text{C}$  próximo da base da camada de mistura. De forma preliminar, os resultados das armadilhas para o fundeio 3 mostram a mesma variabilidade encontrada nos fundeios 1 e 2. A área externa da plataforma em Cabo Frio é o ponto de expansão do fluxo da CB, o que reduz significativamente a sua velocidade e gera um movimento rotatório que contribui para a geração de vórtices, quadro comparável àquele descrito por Viana *et al.* (1998) para a Bacia de Campos.

De modo a verificar a correlação entre o fluxo vertical de partículas nas armadilhas e o residual horizontal de correntes, as velocidades obtidas pelos dois ADPs foram integradas nos intervalos de três dias correspondentes ao tempo de abertura de cada garrafa das armadilhas de sedimento para profundidades escolhidas

do fundeio 1. A posição do fundeio relativo ao talude é levemente desviada do plano perpendicular (*cross shelf*) e paralelo (*along shelf*). Para este cálculo, o plano referencial horizontal foi rotacionado com o ângulo do eixo *along shelf*, definido como  $40^\circ$  no sentido horário a partir do norte geográfico.

Os resultados indicam que a componente *along shelf*, variando entre  $0\text{m/s}$  e  $0,25\text{m/s}$  de residual médio negativo (indicando o sentido NE-SO de fluxo residual), foi dominante durante os períodos amostrados, com exceção de momentos curtos quando o residual positivo indica fluxo SO-NE, associados à “invasão” de vórtices ciclônicos sobre a plataforma, com sua borda oeste sobre o ponto de fundeio (fig. 8). De forma correlata, os fluxos residuais da corrente no sentido *cross shelf* variaram entre  $-0,3\text{m/s}$  e  $0\text{m/s}$  com exceção dos períodos correspondentes à entrada preferencial de água na plataforma associados a passagens frontais.

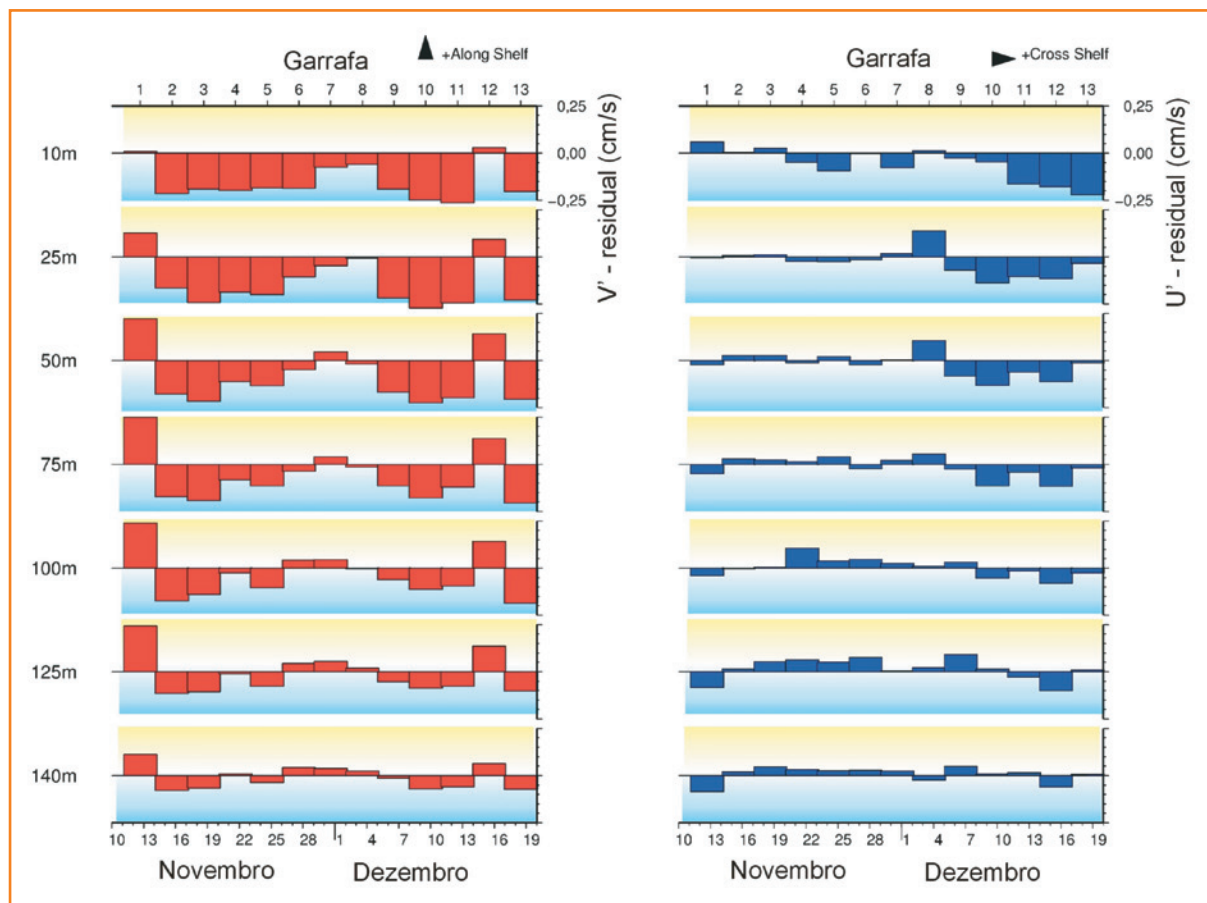
Embora sejam dados preliminares, os levantamentos oceanográficos realizados até agora indicam o forte controle da dinâmica da CB sobre os padrões de sedimentação (vertical) e transporte (horizontal), permitindo sugerir um modelo conceitual moderno. Sem sombra de dúvida, a interação entre as correntes

Figura 8

Fluxos residuais *along shelf* e *cross shelf* calculados para o fundeio 1. Os números na parte superior de 1 a 13 marcam os períodos de integração de cada garrafa da armadilha de sedimento.

Figure 8

Residual *along shelf* and *cross shelf* flows calculated for the mooring deploy 01. The numbers 1 to 13 in the top of each graphic mark the periods of integration of each bottle in the sediment traps.





de maré e a borda da CB é o fenômeno oceanográfico principal no limite da plataforma continental na área de junção das bacias de Campos e Santos. A distribuição das massas d'água na região está bem estabelecida pelos inúmeros levantamentos oceanográficos realizados até o momento, embora as vias de fluxo da ACAS sobre a plataforma ainda não são totalmente conhecidas. O gradiente topográfico observado na plataforma continental ao largo de Cabo Frio, ainda dentro dos limites da Bacia de Campos, sugere que núcleos alongados da ACAS fluam em direção sul e estejam sempre presentes na plataforma. Na altura de Cabo Frio, a ação do vento e a mudança de orientação da costa promovem a ocorrência da ressurgência costeira, com seus limites físicos bem delimitados na faixa de 5-10km da costa. Já em direção ao talude, o controle da ressurgência (aqui definida pela subida da isoterma de 18°C dentro da zona eufótica) passa a ser realizado pela intensa atividade de vórtices e meandros associados ao rotacional do vento e condicionando a estrutura vertical da coluna d'água e estrutura trófica, resultando nos fluxos de massa observados.

As alterações climáticas desde o último glacial influenciaram a dinâmica das massas de água atuantes na região. Os fatores oceanográficos físicos, como o posicionamento dinâmico da CB, o volume da ACAS e sua influência sobre a plataforma, a atividade de vórtices e meandros, foram significativos para a sedimentação e marcadores biogeoquímicos no registro da paleoceanografia regional desde o final do último máximo glacial.

## conclusões

A natureza abrangente, interdisciplinar e multiescala temporal do Projeto Ressurgência foi enfatizada nos dados apresentados. Esta abordagem permite interpretações dos principais processos geoquímicos à luz da variabilidade paleoceanográfica. Os resultados apresentados confirmam importantes aspectos peculiares da Região de Cabo Frio. A dinâmica deposicional foi controlada pelas variações do nível do mar que dominaram a região até 7,0 ka atrás e, a partir daí, a dinâmica oceanográfica regional modulou os diversos processos na plataforma. Dentre os processos essencialmente controlados pela oceanografia, a diagênese recente na interface água-sedimento sofre ação direta das massas d'água, as quais alteram tanto a concentração de oxigênio no contato com o sedimento quanto

a disponibilidade de matéria orgânica que atinge o fundo. Neste sentido, esta dinâmica oceanográfica também condiciona a capacidade de acúmulo de carbono na plataforma e, principalmente, a competência de exportar a matéria orgânica produzida na zona costeira para o talude, contribuindo assim para as bacias de Campos e/ou Santos.

Os resultados preliminares apresentados reafirmam o potencial oferecido pela Região de Cabo Frio para o estudo de processos atuais e paleoambientes recentes, que servem como análogos para a modelagem de processos em outros períodos geológicos fundamentais para a exploração dos recursos naturais.

## agradecimentos

Os autores manifestam seus agradecimentos a toda equipe do Projeto Ressurgência, aos estudantes de iniciação científica, mestrandos, doutorandos, pós-doutorandos, pessoal técnico-administrativo e aos pesquisadores colaboradores pelo empenho na coleta do material e produção dos dados apresentados neste artigo. Ao Programa de Geoquímica Ambiental da Universidade Federal Fluminense (UFF) pelo apoio aos pós-graduandos do projeto. Aos Profs. Arthur Ayres e Alberto Figueiredo do Laboratório de Geologia Marinha da Universidade Federal Fluminense (Lagemar/UFF) pelo apoio na análise geofísica. Aos Drs. Michael Boettcher (IOW-Alemanha) e Philip Meyers (Univ. Michigan, EUA) pelas discussões científicas ao longo do andamento do projeto. Ao Dr. Christian Sanders (Depto. de Geoquímica, UFF) pela revisão no inglês. À Rede Temática de Geoquímica/Petrobras pelo suporte financeiro.

## referências bibliográficas

ALLER, R. C. Experimental studies of changes produced by deposit feeders on pore water, sediment and overlying water chemistry. **American Journal of Science**, New Haven, v. 278, n. 9, p. 1185-1234, Nov. 1978.

ANDRADE, M. M. **Paleoprodutividade costeira da região de Cabo Frio, Rio de Janeiro, ao longo dos últimos 13.000 anos cal AP**. 2008. 275 f. Tese

(Doutorado) – Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2008.

ARTUSI, L. **Geologia, geomorfologia e sismoestratigrafia rasa da plataforma continental ao largo da laguna de Araruama - RJ**. 2004. 91 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2004.

ARTUSI, L.; FIGUEIREDO JR, A. G. Sismoestratigrafia rasa da plataforma continental de Cabo Frio - Araruama - RJ. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v. 25, p. 7-6, 2007. Suplemento 1.

BARD, E.; ARNOLD, M.; HAMELIN, B.; TISNERAT-LABORDE, N.; CABIOCH, G. Radiocarbon calibration by means of mass spectrometric  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  and  $^{14}\text{C}$  ages of corals: an updated data base including samples from Barbados, Mururoa and Tahiti. **Radiocarbon**, New Haven, v. 40, n. 3, p. 1085-1092, 1998.

BLAIR, N. E.; LEITHOLD, E. L.; ALLER, R. C. From bedrock to burial: the evolution of particulate organic carbon across coupled watershed-continental margin systems. **Marine Chemistry**, Amsterdam, v. 92, n. 1-4, p. 141-156, Dec. 2004.

BOLTOVSKOY, E.; BOLTOVSKOY, D.; CORREA, N.; BRANDINI, F. Planktic foraminifera from the southwestern Atlantic ( $30^{\circ}$ - $60^{\circ}\text{S}$ ): species-specific patterns in the upper 50m. **Marine Micropaleontology**, Amsterdam, v. 28, n. 1, p. 53-72, May 1996.

BÖTTCHER, M. E.; BRUMSACK, H. J.; DE LANGE, G. J. Sulfate reduction and related stable isotope ( $^{34}\text{S}$ ,  $^{18}\text{O}$ ) variations in interstitial waters from the eastern Mediterranean. **Proceedings of Ocean Drilling Program**, Texas, v. 160, Science Results, p. 365-373, 1988.

BRACONNOT, P.; OTTO-BLIESNER, B.; HARRISON, S.; JOUSSAUME, S.; PETERSCHMITT, J. Y.; ABE-OUCHI, A.; CRUCIFIX, M.; DRIESSCHAERT, E.; FICHEFET, T.; HEWITT, C. D.; KAGEYAMA, M.; KITO, A.; LOUTRE, M.F.; MARTI, O.; MERKEL, U.; RAMSTEIN, G.; VALDES, P.; WEBER, S.L.; YU, Y.; ZHAO, Y. Results of PMIP2 coupled simulations of the mid-Holocene and Last Glacial Maximum. Part 2: Feedbacks with emphasis on the location of the ITCZ and mid- and high latitudes heat budget. **Climate of the Past**, Göttingen, v. 3, n. 2, p. 279-296, 2007.

CASTELÃO, R. M.; BARTH, J. A. Upwelling around Cabo Frio, Brazil: the importance of wind stress curl. **Geophysical Research Letters**, Washington, DC, v. 33, n. 3, Feb. 2006.

CHIESSI, C. M.; ULRICH, S.; MULITZA, S.; PATZOLD, J.; WEFER, G. Signature of the Brazil-Malvinas Confluence (Argentine Basin) in the isotopic composition of planktonic foraminifera from surface sediments. **Marine Micropaleontology**, Amsterdam, v. 64, n. 1-2, p. 52-66, June 2007.

CRESPO, B. G.; ESPINOZA-GONZÁLEZ, O.; TEIXEIRA, I.G.; CASTRO, C.G.; FIGUEIRAS, F.G. Possible mixotrophy of pigmented nanoflagellates: microbial plankton biomass, primary production and phytoplankton growth in the NW Iberian upwelling in spring. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, New York, v. 94, n. 2, p. 172-181, Aug. 2011.

CONAN, S. M. H.; IVANOVA, E. M.; BRUMMER, G. J. A.. Quantifying carbonate dissolution and calibration of foraminiferal dissolution indices in the Somali Basin. **Marine Geology**, Amsterdam, v. 182, n. 3-4, p. 325-349, Apr. 2002.

CORRÊA, I. C. S. Les variations du niveau de la mer durant les derniers 17.500 ans BP: L'exemple de la plateforme continentale du Rio Grande do Sul-Brésil. **Marine Geology**, Amsterdam, v. 130, n. 1-2, p. 163-178, Feb. 1996.

DEMAISON, G. J. Anoxia versus productivity: what controls the formation of organic-carbon-rich sediments and sedimentary rocks? Discussion. **AAPG Bulletin**, Tulsa, v. 75, n. 3, p. 499-501, Mar. 1991.

DELLA GIUSTINA, I. **Sedimentação Carbonática de Algas Vermelhas Coralináceas da Plataforma Continental da Baía de Campos: um Modelo Carbonático Análogo Para O Terciário**. 2006. 120 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Rio Grande do Sul, 2006.

FERDELMAN, T.; FOSSING, H.; NEUMANN, K.; SCHULZ, H. D. Sulfate reduction in surface sediments of the southwest Atlantic continental margin between  $15^{\circ}38'\text{S}$  and  $27^{\circ}57'\text{S}$  (Angola and Namibia). **Limnology and Oceanography**, Texas, v. 44, n. 3, p. 650-661, May 1999.

- FROELICH, P. N.; KLINKHAMMER, G. P.; BENDER, M. L.; LUEDTKE, N. A.; HEATH, G. R.; CULLEN, D.; DAUPHIN, P. Early oxidation of organic matter in pelagic sediments of the Eastern Equatorial Atlantic: suboxic diagenesis. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, New York, v. 43, n. 7, p. 1075-1090, July 1979.
- GIESKES, J. M.; GAMO, T.; BRUMSACK, H. **Chemical methods for interstitial water analysis aboard Joides resolution**. Texas: Ocean Drilling Program, Texas A & M University, 1991. 60 p. (Technical Note, v. 15).
- HENRICHS, S. M.; REEBURGH, W. S. Anaerobic mineralization of marine sediment organic matter: Rates and the role of anaerobic processes in the oceanic carbon economy. **Geomicrobiology Journal**, New York, v. 5, n. 3-4, p. 191-237, 1987.
- JAHNKE, R. A.; JACKSON, G.A. The spatial distribution of sea floor oxygen consumption in the Atlantic and Pacific Ocean. In: ROWE, E. T.; PARIENT, V. (Ed.) **Deep-sea food chains and the global carbon cycle**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1992. p. 295-307.
- JORGENSEN, B. B. Process at the sediment-water interface. In: BOLIN, B.; COOK, R. B. (Ed.). **The major biogeochemical cycles and their interactions**. New York: Wiley, 1983. p. 477-509.
- HENDRIK LANTZSCH, H.; HANEBUTH, T. J. J.; BENDER, V. B. Holocene evolution of mud depocentres on a high-energy, low-accumulation shelf (NW Iberia). **Quaternary Research**, New York, v. 72, n. 3, p. 325-336, Nov. 2009.
- KNOPPERS, B.; CARNEIRO, M.; MENDOZA, U.; BALZER, W. Nutrients and suspended matter. In: EKAU, W.; KNOPPERS, B. (Comp.) **Joint Oceanographic Projects JOPS-II: cruise report and first results: sedimentation processes and productivity in the continental shelf waters off East and Northeast Brazil**. Bremen: Center for Tropical Marine Ecology, 1996. p. 12 -18.
- LAW, G.; SHIMMIELD, T. M.; SHIMMIELD, G. B.; COWIE, G. L.; BREUER, E. R.; HARVEY, S. M. Manganese, iron and sulfur cycling on the Pakistan margin. **Deep Sea Research II**, Oxford, v. 56, n. 6-7, p. 305-323, Mar. 2009.
- LEITHOLD, E. L.; PERKEY, D. W.; BLAIR, N. E.; CREAMER, T. N. Sedimentation and carbon burial on the northern California continental shelf: the signatures of land-use change. **Continental Shelf Research**, Oxford, v. 25, n. 3, p. 349-371, Feb. 2005.
- LESUEUR, P.; JOUANNEAU, J. M.; BOUST, D.; TASTET, J. P.; WEBER, O. Sedimentation rates and fluxes in the continental shelf mud fields in the Bay of Biscay (France). **Continental Shelf Research**, Oxford, v. 21, n. 13-14, p. 1383-1401, Aug. 2001.
- MAHIQUES, M. M.; DA SILVEIRA, I. C. A.; MELLO E SOUSA, S. H.; RODRIGUES, M. Post-LGM sedimentation on the outer shelf-upper slope of the northernmost part of the São Paulo Bight, southeastern Brazil. **Marine Geology**, Amsterdam, v. 181, n. 4, p. 387-400, Mar. 2002.
- MAHIQUES, M. M.; DA SILVEIRA, I. C. A.; MELLO E SOUSA, S. H.; FURTADO, V. V.; TESSLER, M. G.; TOLEDO, F. A. L.; BURONE, L.; FIGUEIRA, R. C. L.; KLEIN, D. A.; MARTINS, C. C.; ALVES, D. P. V. The southern Brazilian shelf: general characteristics, quaternary evolution and sediment distribution. **Brazilian Journal of Oceanography**, São Paulo, v. 58, p. 25-34, 2010. Special Issue PGGM.
- MILNE, G. A.; LONG, A. J.; BASSETT, S. E. Modelling Holocene relative sea-level observations from the Caribbean and South America. **Quaternary Science Review**, Oxford, v. 24, n. 10-11, p. 1183-1202, May 2005.
- MONTEIRO, P. M. S.; NELSON, G.; VAN DER PLAS, A.; MABILLE, E.; BAILEY, G. W.; KLINGELHOEFFER, E. Internal tide-shelf topography interactions as a forcing factor governing the large-scale distribution and burial fluxes of particulate organic matter (POM) in the Benguela upwelling system. **Continental Shelf Research**, Oxford, v. 25, n. 15, p. 1864-1876, Sept. 2005.
- MUEHE, D.; VALENTINI, E. **O Litoral do estado Rio de Janeiro: uma caracterização físico-ambiental**. Rio de Janeiro: FEMAR, 1998. p. 123.
- PICKARD, G. L.; EMERY, W. J. **Descriptive Physical Oceanography**. 5. ed. Oxford: Pergamon Press, 1990. 320 p.
- RAVELO, A. C.; FAIRBANKS, R. G.; PHILANDER, S. G. H. Reconstructing tropical Atlantic hydrography using planktonic foraminifera and an ocean model.

- Paleoceanography**, Washington, DC, v. 5, n. 3, p. 409-431, June 1990.
- SCHMIDT, F.; HINRICHS, K. U.; ELVERT, M. Sources, transport, and partitioning of organic matter at a highly dynamic continental margin. **Marine Chemistry**, Amsterdam, v. 118, n. 1-2, p. 37-55, Jan. 2010.
- SIMÕES, I. C. V. P. **Aplicação da batimetria multifeixe para definição da morfologia detalhada do fundo marinho ao largo da laguna de Araruama e Arraial do Cabo RJ**. 2007. 127 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2007.
- SOMMERFIELD, C. K.; LEE, H. J. Magnitude and variability of Holocene sediment accumulation in Santa Monica Bay, California. **Marine Environmental Research**, Barking, v. 56, n. 1-2, p. 151-176, July/Aug. 2003.
- SOUTO, D. D.; LESSA, D. V. O.; ALBUQUERQUE, A. L. S.; SIFEDDINE, A.; TURCQ, B. J.; BARBOSA, C. F. Marine sediments from southeastern Brazilian continental shelf: a 1200 year Record of upwelling productivity. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, Amsterdam, v. 299, n. 1-2, p. 49-55, Jan. 2011.
- STUMM, W.; MORGAN, J. J. **Aquatic chemistry, chemical equilibria and rates in natural waters**. New York: Wiley, 1996. 1022 p.
- SUNDBY, B. Transient state diagenesis in continental margin muds. **Marine Chemistry**, Amsterdam, v. 102, n. 1-2, p. 2-12, Nov. 2006.
- TARASOV, L.; PELTIER, W. R. Arctic freshwater forcing of the Younger Dryas cold reversal. **Nature**, New York, v. 435, n. 7042, p. 662-665, June 2005.
- TURCQ, B.; MARTIN, L.; FLEXOR, J. M.; SUGUIO, K.; PIERRE, C.; TASAYACO-ORTEGA, L. Origin and evolution of the quaternary coastal plain between Guaratiba and Cabo Frio State of Rio de Janeiro, Brasil. In: KNOPPERS, B., BIDONE, E. D., ABRÃO, J. J. (Ed.). **Environmental Geochemistry of Coastal Lagoons systems, Rio de Janeiro, Brazil**. Rio de Janeiro: FINEP, 1999. p. 25-46. (Série Geoquímica Ambiental, v. 6).
- VALENTIN, J. L. Analyse des paramètres hydrobiologiques dans la remontée de Cabo Frio (Brésil). **Marine Biology**, Berlin, v. 82, n. 3, p. 259-276, Sept. 1984.
- VIANA, A. R.; FAUGÈRES, J. C.; KOWSMANN, R. O.; LIMA, J. A. M.; CADDAAH, L. F. G. Hydrology, morphology and sedimentology of the Campos continental margin, offshore Brazil. **Sedimentary Geology**, Amsterdam, v. 115, n. 1-4, p. 133-157, Jan. 1998.
- WILKIN, R. T.; BARNES, H. L.; BRANTLEY, S. L. The size distribution of framboidal pyrite in modern sediments: An indicator of redox conditions. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, Oxford, v. 60, n. 20, p. 3897-3912, Oct. 1996.
- YANG, S.; TANG, M.; YIM, W. W. S.; ZONG, Y.; HUANG, G.; SWITZER, A. D.; SAITO, Y. Burial of organic carbon in Holocene sediments of the Zhujiang (Pearl River) and Changjiang (Yangtze River) estuaries. **Marine Chemistry**, Amsterdam, v. 123, n. 1-4, p. 1-10, Jan. 2011.



## expanded abstract

The continental shelf off Cabo Frio is characterized by geomorphological and hydrodynamic peculiarities that contribute to the complexity of the sedimentary processes along this system. Oceanographic dynamics in this region of the Brazilian coast is marked by the upwelling of cold South Atlantic Central Water (ACAS), both near the coastal zone and over the continental shelf. One of the principal objectives in the "Projeto Ressurgência" (Upwelling Project) is to establish specific models to explain the processes of production and accumulation of organic matter on the continental shelf. The approach used in this study is based on the interconnections between the atmosphere, ocean and continent. The *modus operandi* for the sedimentary record is carried out in multi-timescales (synoptic scale, multi-secular and millennial). This work aims to illustrate relevant aspects of lithostratigraphic changes, geochemical processes and oceanographic circulation, including paleoceanography, in order to produce conceptual models that have taken place throughout the region.

The initial focus of the project was to identify the composition of mud deposits, as well as characterizing seismic features on the Cabo Frio shelf. The shelf area is typical of a submerged coastal plain with gentle seaward inclination and subdued topographic relief. The mud deposit thickness varied between 1m and 21m. Spatial analysis of eco-characters was used as the basis for determining the sediment sampling sites. We collected long-cores (Kullenberg) in four stations and in thirteen stations for relatively short-cores (box-core). The sediment cores recovery were between 3.5m and 5.8m, while the short-cores were on average 30cm in length (fig. 1). Seismic eco-characters showed distinct features along the shelf. Structures identified as "beach-rocks", presented hundreds of meters length and up to 5m height. The "beach-rocks" were found on the shelf and may represent lithified intertidal sediments. Irregular reflectors, often showing watershed boundaries, were identified as submersed palaeolagoons.

In order to understand the early organic matter diagenesis in the sediment-water interface, four short-cores collected from a bathymetric gradient were studied for this purpose. The sediments were suboxic as increased concentrations of  $\text{SO}_4^{2-}$  in the sediments indicate the limit of percolation before its reduction to form sulfides. Sulfur isotope ratio of sulfate range between +20.8ppm and +22ppm, which are comparable to those found in the upwelling system of Peru-Chile

(Böning et al. 2004). Pyrite morphological structures found along the study region indicate the presence of pyrite-minute, framboidal and octahedral crystals (<100 $\mu\text{m}$ ), which reflect multiple formation processes. Initial results suggest a conceptual model integrating the regional oceanographic patterns with geochemical processes along the sediment-water interface (fig. 2).

Based on 82 AMS  $^{14}\text{C}$  dating on 17 sediments cores we describe lithostratigraphic changes in the sedimentary model for the study region during the past 15,000 years (figs. 4a and 4b): Sedimentary Phase I - Maximum Regression: coarse sediments associated with large shell fragments indicative of a shoreline environment during this period of maximum regression. Sedimentation rate at this phase was 0.17mm yr<sup>-1</sup>; Sedimentary Phase II - Transitional: sediments are coarse sand to silt-clay along this phase, without shell fragments. Sedimentation rates rose substantially, which may be related to the effects of the transition between the maximum regression and the Holocene transgression stage; Sedimentary Phase III - Middle Holocene: clay sediments with low fine sand content characterize this phase. Sedimentation rates slowed down considerably to 0.37mm yr<sup>-1</sup>. The sediments of this phase mark the end of sea level control and the beginning of oceanographical control over the sedimentary processes; Sediment Phase IV - Upper Holocene: sediments in this phase show similar texture to the previous phase, however the sedimentation rate decreased dramatically, being lower than any other phase along the entire profile (0.16mm yr<sup>-1</sup>).

The depositional setting over the late Pleistocene-Holocene could be determined by the vertical and horizontal particle transport and flux through the water column. In this scenario, the oceanographic surveys conducted by the current project indicate a direct influence of the Brazil Current (BC) on the sedimentation patterns (vertical) and transport (horizontal). The interaction between tidal currents and the edge of the BC is a significant oceanographic feature, of which the junction area between Campos and Santos has a strong influence on the regional upwelling (i.e. vertical position of the isotherm 18°C within the euphotic zone). The upwelling is brought about by intense vortices and the intricacies associated with the rotational wind, conditioning the vertical structure of the water column and trophic structure. These processes play a significant role in the production of organic matter. The sites of the phenomena described in this work likely varied within the proximities of the continental shelf throughout the Holocene, though evidence suggests shifts in the upwelling regions were limited.

## autores



**Ana Luiza Spadano Albuquerque**  
Universidade Federal Fluminense (UFF)  
Programa de Geoquímica Ambiental

[analui@geoq.uff.br](mailto:analui@geoq.uff.br)

**Ana Luiza Spadano Albuquerque** é professora associada do Departamento de Geoquímica da Universidade Federal Fluminense (UFF). Vem atuando na área de geoquímica ambiental aplicada à reconstituição paleoceanográfica/paleoambiental. Orientou diversas dissertações de mestrado e teses de doutorado no tema, como também coordena projetos de pesquisa nesta área.



**André Luiz Belém**  
Universidade Federal Fluminense (UFF)  
Departamento de Geoquímica

[andre\\_belem@geoq.uff.br](mailto:andre_belem@geoq.uff.br)

**André Luiz Belém** é graduado em Oceanologia pela Fundação Universidade do Rio Grande (FURG) e Doutor em Oceanografia Física pelo *Alfred-Wegener Institute/University of Bremen*, Alemanha. Trabalha como Gerente de Operações *Offshore* no Projeto Ressurgência e também como co-orientador no Programa de Pós-graduação em Geoquímica Ambiental da Universidade Federal Fluminense (UFF), com foco em dinâmica dos oceanos e paleo-oceanografia.



**Rodrigo Costa Portilho-Ramos**  
Universidade Federal Fluminense (UFF)  
Departamento de Geoquímica

[rcpramos@yahoo.com.br](mailto:rcpramos@yahoo.com.br)

**Rodrigo Costa Portilho-Ramos** é graduado em Ciências Biológicas e Doutor em Geociências

(Geoquímica) pela Universidade Federal Fluminense (UFF). É pesquisador da UFF, com foco nos temas paleoceanografia do Atlântico Sul, foraminíferos planctônicos e paleoclimatologia.



**Ursula Mendoza**  
Universidade Federal Fluminense (UFF)  
Departamento de Geoquímica

[ursmendoza@geoq.uff.br](mailto:ursmendoza@geoq.uff.br)

**Ursula Mendoza** é graduada em Ciências Biológicas pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e doutorou-se em Ciências Naturais (Biogeoquímica) pela Universidade de Bremen, Alemanha. É gerente de Química Orgânica do Projeto Ressurgência. Sua área de expertise se concentra em biogeoquímica com ênfase em nutrientes da interface continente-oceano e na especiação do enxofre em ambientes anóxicos.



**Cátia Fernandes Barbosa**  
Universidade Federal Fluminense (UFF)  
Departamento de Geoquímica

[catia@geoq.uff.br](mailto:catia@geoq.uff.br)

**Cátia Fernandes Barbosa** é professora associada I do Departamento de Geoquímica da Universidade Federal Fluminense (UFF). Possui mestrado e doutorado em Geociências (Geologia Sedimentar) pela Universidade de São Paulo (USP). Tem experiência na área de oceanografia geológica e nas ciências do sistema Terra-Oceano, com ênfase em interação entre os Organismos Marinhos e os Parâmetros Ambientais, atuando principalmente nos seguintes temas: sedimentologia, foraminíferos e paleoceanografia, bacias de Campos e Santos, margem continental interna e externa e recifes de coral.