

MODELO DE CIRCULAÇÃO DE ÁGUAS METEÓRICAS NAS BACIAS DA MARGEM CONTINENTAL BRASILEIRA

MODEL OF THE CIRCULATION OF METEORIC WATER IN BASINS OF THE BRAZILIAN CONTINENTAL MARGIN

Justo Camejo Ferreira¹

RESUMO - Óleos biodegradados ocorrem nas bacias da margem continental brasileira a até grandes distâncias da linha de costa e a até grandes profundidades. Para explicar este fato, de grande importância exploratória, foi estabelecido um modelo de circulação hidrodinâmica de águas meteóricas nessas bacias. A água meteórica transportou as bactérias que degradaram o petróleo, bem como o oxigênio e os nutrientes exigidos por esses organismos. A infiltração dessas águas ocorreu durante os períodos de rebaixamento do nível do mar, em particular no Pleistoceno. O modelo foi comprovado por meio de análises iônicas e isotópicas de águas recuperadas em teste de formação e de produção.

(Originals recebidos em 23.10.91).

ABSTRACT - Biodegraded oils are found in basins of Brazilian continental margin even at great distances from the present coast and at great depths. Since this phenomenon is of substantial relevance for exploration purposes, a model of the hydrodynamic circulation of meteoric water in these basins was designed and tested. According to the model, meteoric water transported both the bacteria responsible for degrading the petroleum as well as the oxygen and nutrients needed by these organisms. Infiltration of the water took place during sea-level lowstands, especially in the Pleistocene. The model was proved through ionic and isotopic analyses of water recovered during drillstem and production tests.

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

1 - INTRODUÇÃO

A presença de óleos pesados nas bacias da margem continental brasileira tem intrigado geólogos e geoquímicos da PETROBRÁS, pelo fato de esses óleos ocorrerem, muitas vezes, em circunstâncias difíceis de serem explicadas convencionalmente. Óleos pesados (entre 14 e 20 °API) podem ser óleos imaturos, resultantes de uma geração precoce, ou óleos alterados bioquimicamente pelas bactérias aeróbicas. Entretanto, o grande volume de óleo pesado encontrado em certas áreas e as evidências geoquímicas depõem contra a hipótese de se tratar de óleo imaturo. Por outro lado, óleos pesados são encontrados em até grandes profundidades e distâncias da linha de costa atual e, na maioria das vezes, associados a águas muito salgadas - o que, aparentemente, exclui a possibili-

dade de alteração bacteriana. As bactérias aeróbicas necessitam de oxigênio e dos nutrientes transportados pela água meteórica desde a superfície.

Figueiredo *et al.* (1983), estudando a Bacia de Campos, optaram pela alteração bacteriana para explicar os óleos pesados encontrados em algumas áreas. Os autores aventaram a possibilidade de a influência da água meteórica poder ter-se estendido às partes mais distantes da costa, no passado. De acordo com Meister (1984), os óleos pesados seriam, também, resultantes de alteração bacteriana. Por outro lado, Trindade *et al.* (1987) obtiveram evidências geoquímicas de alteração acarretada por bactérias. Medeiros (1988) concluiu tratar-se de alteração por bactérias anaeróbicas, devido ao fato de não encontrar evidências de infiltração de águas meteóricas em horizontes profundos. Soldan *et al.* (1990), entretanto, estu-

¹ - Setor de Geoquímica (SEGEO), Divisão de Exploração (DIVEX), Centro de Pesquisas (CENPES), Cidade Universitária, Quadra 7, Ilha do Fundão, CEP 21949-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

dando 62 amostras de óleo dessa bacia, concluíram tratar-se de alteração por bactérias aeróbicas.

Essa interpretação se baseou não apenas nas características físico-químicas dos óleos, mas, também, em alterações a níveis moleculares, constatadas nos biomarcadores biológicos.

Para a alteração do petróleo nos reservatórios, é condição *sine qua non* a presença de água meteórica em circulação hidrodinâmica. Entretanto, os reservatórios onde são encontrados os óleos alterados geralmente não contêm, nos dias atuais, água meteórica ou influência evidente de água doce.

A água meteórica pode penetrar nos reservatórios por percolação direta ou através de planos de acamamento, superfícies de discordância, falhas ou fraturas. Águas desse tipo contêm oxigênio e gás carbônico em solução. O oxigênio reage com os sulfetos produzindo sulfatos. O gás carbônico, por sua vez, participa de reações nas quais são produzidos bicarbonatos e carbonatos. A presença de sulfatos, bicarbonatos e carbonatos nas águas das formações indica que, pelo menos, parte da água proveio da superfície. Esta água pode estar relacionada com a superfície atual do solo, refletir uma mistura de água do solo com água das formações ou estar ligada a uma superfície de erosão hoje soterrada e, no passado, exposta à chuva.

A água meteórica carrega consigo as bactérias responsáveis pela alteração do petróleo nos reservatórios. Além disso, propicia o oxigênio e os nutrientes necessários ao metabolismo desses organismos (fig. 1).

Para explicar a alteração bioquímica dos óleos, pode ser aventada a hipótese de que as águas meteóricas penetraram profundamente e a grandes distâncias costa afora em determinadas épocas do passado. Essas águas, posteriormente, teriam sido substituídas por águas de compactação ou salinizadas por intermédio de reações com a rocha hospedeira. Para alicerçar esta hipótese em fatos concretos, é necessário, primeiramente, demonstrar que a água meteórica pode penetrar a grandes profundidades nas bacias sedimentares e se estender a grandes distâncias costa afora, e, em segundo lugar, estabelecer um modelo de circulação de águas que não entre em conflito com dados já devidamente comprovados. Para se atingirem esses objetivos, serão utilizados argumentos baseados em estudos de hidrogeologia, hidrogeoquímica e hidrodinâmica.

2 - CIRCULAÇÃO DE ÁGUA NAS BACIAS SEDIMENTARES

2.1 - O Presente é a Chave do Passado

As partículas de água se movem desde o lençol freático até o ponto de descarga em trajetórias curvas, resultantes do compromisso entre a tendência da água de se dirigir para os pontos de menor potencial e a atração da gravidade, conforme pode ser visto na figura 2.

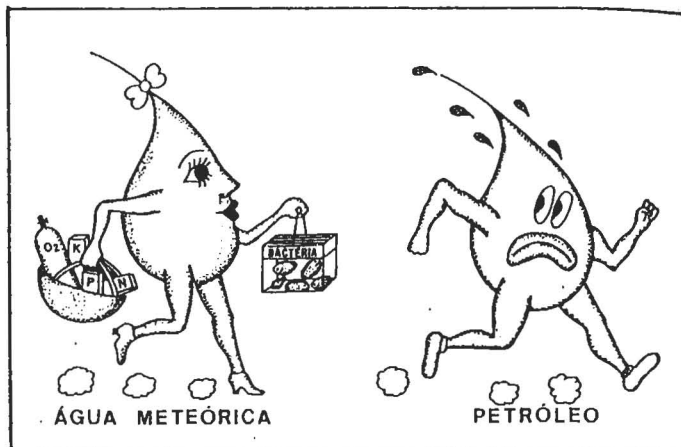


Fig. 1 - A água meteórica transporta para os reservatórios geológicos bactérias que degradam petróleo, bem como o oxigênio e os nutrientes necessários ao metabolismo desses organismos.

Fig. 1 - Both the bacteria that degrade petroleum as well as the oxygen and nutrients essential to the metabolism of these organisms are transported to geological reservoirs by meteoric water.

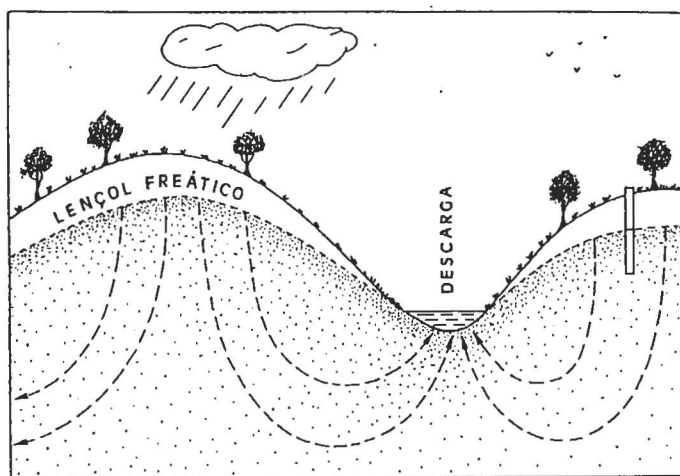


Fig. 2 - As partículas de água se movem desde o lençol freático até o ponto de descarga em trajetórias curvas.

Fig. 2 - Water particles follow curved paths as they move from the water table to the discharge area.

De acordo com Galloway (1987), a praia seria tipicamente a área de maior descarga dos aquíferos de água doce. Esta informação é complementada por Bateman (1958), que diz o seguinte: "Para os não familiarizados com a água subterrânea, parece impossível obter um suprimento de água doce de areias próximas à praia. Este não é o caso. A água que cai na parte terrestre flutua no topo e força para baixo a água salgada por uma quantidade proporcional à altura do lençol freático acima do nível do mar. Esta, segundo a fórmula de Herzberg, é $h = t(g-1)$, sendo h a profundidade da água doce abaixo do nível do lençol freático, t a altura do nível do lençol freático acima do nível do mar, g a densidade da água salgada e 1 a densidade da água doce. Assim, se a densidade da água do mar é de 1,025, então $h = 40 t$. Isto significa que em Long Island, por exemplo, se o lençol freático se encontra a 20 pés acima do nível do mar, existe água doce até 800 pés abaixo do nível do mar (fig. 3).

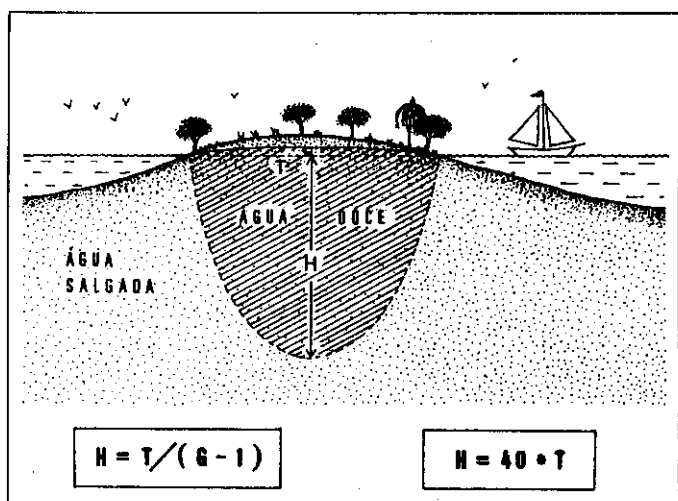


Fig. 3 - Numa ilha oceânica, a água doce pode penetrar e circular até uma profundidade considerável, de acordo com a fórmula de Herzberg.
 Fig. 3 - On an oceanic island, fresh water can penetrate and circulate down to a considerable depth, according to Herzberg's formula.

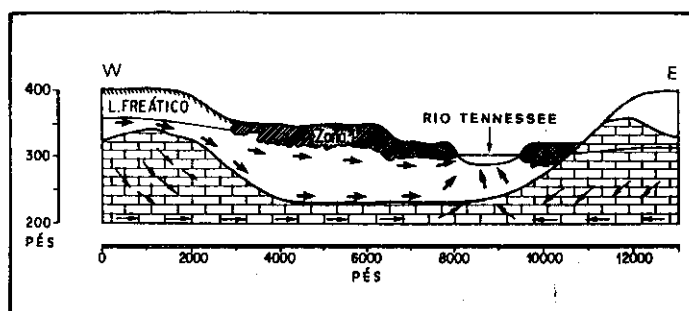


Fig. 4 - Circulação da água subterrânea em direção ao rio Tennessee, no Kentucky, EUA (adaptada de Bateman, 1958).
 Fig. 4 - Circulation of underground water towards the Tennessee River, Kentucky, USA (adapted from Bateman, 1958).

Debret (1985), em "Viagem pitoresca e histórica ao Brasil", no início do século, assim descreveu o abastecimento de água de seu navio durante a viagem, conforme se confere na tradução de Milliet: "Depois de um mês de navegação, a 22 de fevereiro de 1816, vimos as ilhas de Cabo Verde e aportamos na primeira possessão portuguesa, a Ilha de Maio, pequeníssima na verdade, mas importante por suas salinas, muito conhecidas e continuamente visitadas pelos americanos do norte. Aí ancoramos para renovar nossas reservas de água. A operação foi tão rápida quanto simples: nossos marinheiros, não encontrando em terra nem fonte nem nascentes abundantes, pararam na praia e cavaram um buraco de dois a três pés de largura e igual profundidade, no qual colocaram um tonel sem tampa, bocal comum nesses poços improvisados. Embora colocado no meio da areia salgada, encontramos no dia seguinte uma água esbranquiçada, ligeiramente salobra, mas cuja abundância bastou para o nosso abastecimento". Esta descrição demonstra que os navegadores do passado já conheciam o fenômeno enfatizado por Galloway (1987) e Bateman (1958).

Se existe uma barreira de permeabilidade entre o ponto de entrada da água (recarga) e o ponto de descarga, a água procura atingir o ponto de descarga através de qualquer meio permeável disponível, podendo alcançar as profundidades previstas pela fórmula de Herzberg. Um bom exemplo do que foi dito encontra-se em Bateman (1958), que mostra a circulação da água subterrânea em direção à barragem do rio Tennessee, em Kentucky, nos EUA (fig. 4). Nesta figura, as flechas indicam a direção do fluxo da água, a qual alimenta a barragem por baixo. Deve-se observar que, devido à barreira de permeabilidade e à diferença de nível entre a área de recarga e a de descarga (represa), a água penetra profundamente no pacote sedimentar, circulando, inclusive, na seção carbonática, através de fraturas que a água meteórica tende a aumentar devido à presença do ácido carbônico nela contido.

No caso de uma bacia de margem passiva, com formações permeáveis aflorantes no continente e com restrição ao fluxo lateral até o ponto de descarga, a água meteórica poderá penetrar profundamente na bacia e se estender a distâncias consideráveis costa afora, podendo ressurgir no fundo do mar sob a forma de fontes submarinas (fig.5).

Em diversas partes do mundo têm sido observadas fontes de água doce no fundo do mar, algumas vezes a grandes profundidades e distâncias da linha de costa. Exemplos clássicos são as da Flórida, Geórgia e Carolina do Sul. Na figura 6, mostram-se as principais fontes de água doce conhecidas nessa área da costa leste dos EUA. A fonte "E" está localizada a 30 km costa afora. A água da fonte "B" sai de um "poço" com 37 m de profundidade abaixo do fundo do mar, que, na área, tem lâmina d'água de 17 m. Para explicar esta fonte, localizada a 3,2 km a leste da praia Crescent, Stringfield e Cooper (1951) aventaram a hipótese de se tratar de efeito do rebaixamento do nível do mar durante o Pleistoceno. Aparentemente, esta é a primeira referência na literatura especializada em que a infiltração de águas meteóricas a grandes distâncias e profundidades sob o mar é atribuída às variações do nível do mar. "Na plataforma exposta", dizem os referidos autores, "a infiltração de águas meteóricas pode ter criado canais de comunicação, os quais, subsequente, serviram de sítio de vazamento quando a água salgada novamente cobriu a plataforma".

Manhein (1967) previu a possibilidade de descarga de água doce a distâncias muito maiores do que as das fontes conhecidas, tendo em vista o fato de que afloramentos de aquíferos portadores de água doce parecem estar presentes no talude da Flórida-Hatteras. "Recentemente", diz esse autor, "as perfurações JOIDES na plataforma e no talude continental da Flórida revelaram a existência de águas doce e salobra em pacotes sedimentares situados a até 120 km da costa". O autor também apresenta uma fotografia, a qual mostra água doce jorrando de um poço situado em lâmina d'água de 130 m.

Uma descoberta notável efetuada pelo submarino de águas profundas Aluminaut, em 1966, aumentou o interesse no fluxo de água doce a partir do continente. Quando transitava sobre o platô Blake, ao largo da Geórgia e

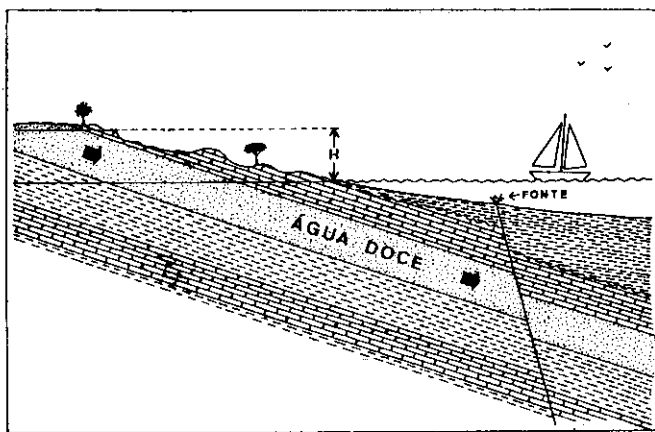


Fig. 5 - Circulação de águas numa bacia da margem continental com desnível piezométrico e restrição lateral ao fluxo.

Fig. 5 - Circulation of water in a continental margin basin that displays a piezometric head and lateral containment of flow.

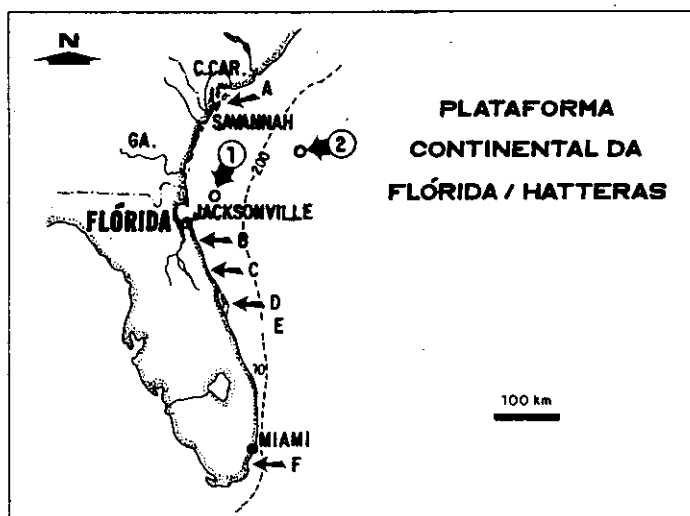


Fig. 6 - Localização de fontes submarinas na Flórida, Carolina do Sul e Geórgia (adaptada de Manheim, 1967).

Fig. 6 - Location map, subsea springs in Florida, South Carolina, and Georgia (adapted from Manheim, 1967).

Carolina do Norte, o submarino de 80 t subitamente perdeu cerca de meia tonelada de flutuação quando passava sobre uma depressão de 50 m de profundidade.

A lâmina d'água no local é de 510 m e se encontra a 200 km da costa. A temperatura da água é de 10 °C, em contraste com a temperatura de 12,5 °C nas águas da área. De acordo com Manheim (1967), a perda de flutuação somente pode ser explicada por um fluxo de água substancialmente menos salgada do que a água do mar. Esse autor também chama a atenção para o papel do rebaixamento do nível do mar: "A importância das mudanças no desnível piezométrico (*head*) que acompanham o rebaixamento do nível do mar deve ser enfatizada. Por exemplo, 50 m adicionais permitiriam a descarga da água doce a profundidades de 2 000 m abaixo dos pontos atuais de descarga".

Um excelente exemplo da grande distância que a água doce pode penetrar sob o mar e depois ressurgir sob a forma de fontes submarinas encontra-se em Clark (1947).

"Faz alguns séculos", diz o autor, "que os pescadores da Islândia que andam em alto mar vêm tirando água potável diretamente do oceano. A explicação do fato é simples: longe, bem longe do litoral da ilha, a grande profundidade, as fontes submarinas lançam água doce em pleno oceano. Torna-se assim fácil, para quem anda no oceano, ir numa canoa a remos até a "fonte" e mergulhar um balde preso a uma corda naquela massa de água doce que borbulha no fundo do oceano".

2.2 - Infiltração de Águas Meteóricas no Passado

Pelo que foi discutido no item anterior, pode-se concluir que, sob condições adequadas, a água meteórica pode penetrar a grandes profundidades e se estender a distâncias consideráveis a partir das bordas das bacias marginais. Ora, se o fato ocorre nos dias atuais, certamente ocorreu no passado, de acordo com o princípio do Uniformitarismo. Na verdade, tal fato está bem documentado na literatura especializada.

De acordo com Gauthier *et al.* (1985), "evidências recentes baseadas em análises isotópicas indicam, em certas bacias sedimentares, percolação a até 10 km de profundidade". Bethke *et al.* (1988) afirmam que águas relativamente doces são encontradas algumas vezes em pacotes permeáveis situados a vários quilômetros de profundidade. Esses autores também informam que análises isotópicas têm indicado que muitas salmouras profundas são águas meteóricas que aumentaram a salinidade com o correr do tempo.

Referências a águas doces ou pouco mineralizadas a grandes profundidades são também encontradas na literatura soviética recente. Larichev (1988), por exemplo, observou o fato na área a leste de Mangyshlack. "Aqui", diz o autor, "a profundidades de até 4 500 m, são encontradas águas alcalinas cuja mineralização varia de 1,1 até 83,4 g/l". "A existência de água doce nos horizontes profundos corresponde a anomalias hidrodinâmicas", conclui o autor.

Bethke *et al.* (1988) simularam em supercomputadores a infiltração de águas meteóricas na bacia da Costa do Golfo. Nas condições atuais, verificaram que o relevo da planície costeira é suficiente para forçar a água doce a 1 ou 2 km de profundidade, por meio dos aquíferos do Eoceno, Oligoceno e Mioceno. O fluxo de água se estende, costa afora, por dezenas de quilômetros em pacotes sedimentares. "A extensão calculada para a infiltração de águas meteóricas", relatam os autores, "está de acordo com a distribuição de salinidades observada nas águas da Costa do Golfo". Os autores também simularam as condições ocorridas antes e após o rebaixamento do nível do mar, ocorrido há 31 milhões de anos (Oligoceno). "O rebaixamento do nível do mar aumentou o relevo topográfico e expôs a maior parte da planície costeira à precipitação meteórica, numa época em que pressões anormais resultantes da compactação dos sedimentos eram menos intensas do que atualmente. Como resultado, a água meteórica se estendeu, mais profundamente e a maior distância, em direção ao centro da bacia. Estes resultados concordam

com os estudos mineralógicos e isotópicos de alterações diagenéticas, que mostram maior invasão de águas meteóricas nos aquíferos profundos no passado”.

Galloway (1987) estudou a circulação de águas meteóricas nas formações Frio/Catahoula da província costeira do Texas (Costa do Golfo), nos EUA. A circulação ativa de águas meteóricas se estende a até 1,5 km de profundidade, fato indicado pela baixa salinidade e composição das águas. De acordo com o autor, dados de geoquímica indicam influência de águas meteóricas a até 2 km de profundidade nas partes média e superior da planície costeira, conforme evidenciado pela alteração de óleos por bactérias aeróbicas.

Ferreira (1989), estudando as águas de baixa salinidade encontradas na costa norte brasileira a grandes profundidades, concluiu, baseado em critérios hidroquímicos, tratar-se de águas meteóricas que invadiram tanto os sedimentos da seção *rift* como os da seção marinha. (É oportuno lembrar que, num dos poços da área, a elevada resistividade da água de baixa salinidade encontrada a cerca de 5 000 m de profundidade, aliada à presença de indícios de óleo, criou a expectativa de que um campo gigante fora descoberto, o que, infelizmente, não se confirmou). Na costa norte brasileira, a invasão de águas meteóricas também está evidenciada pela profunda alteração dos óleos encontrados na seção marinha do pacote sedimentar.

Outro bom exemplo de circulação profunda de águas meteóricas, pela semelhança que apresenta com a costa norte brasileira, é mostrado por Kuttan *et al.* (1985) e se refere ao influxo de águas meteóricas na Bacia de Gippsland, na Austrália. A infiltração se deu no Grupo Latrobe, estendendo-se até a profundidade de 4 000 m. “Acredita-se que a água doce é água meteórica que penetrou no Latrobe através de uma área soerguida e exposta da extensão terrestre da Bacia de Gippsland”, afirmam os autores. Eles não se referem, no entanto, a alterações bioquímicas nos óleos, fato esperado numa bacia invadida pela água meteórica. Burns *et al.* (1987), entretanto, publicaram um trabalho descrevendo profunda biodegradação na área. É oportuno observar que a biodegradação não se limita à zona de água doce.

“No presente”, dizem os autores, “os poços Kahaway 1 (1 433,7 m), Tuna 4 (1 499,5 m) e Kipper (1 437,7 m) têm óleo em reservatórios sem água doce, e, no entanto, os cromatogramas mostram os efeitos da biodegradação”. Os autores explicam o porquê de os óleos associados a reservatórios com água salgada se encontrarem biodegradados: “Pode ter sido maior o influxo de água doce durante um período anterior de rebaixamento do nível do mar, o que acarretou um aumento do desnível piezométrico (*head*) e, conseqüentemente, uma expansão da zona de água doce”.

No delta do Níger, no leste da África, óleos pesados são encontrados em reservatórios mais rasos, e óleos leves nos reservatórios profundos. Existem evidências de que os óleos mais rasos foram degradados por bactérias. A transição de óleo pesado para óleo leve é geralmente abrupta, ocorrendo numa temperatura de reservatório en-

tre 150 e 180 °F (70 - 80 °C). A água meteórica penetrou a até 7 000 pés (cerca de 2 200 m), o que é difícil de explicar, haja vista que nenhuma zona óbvia de descarga foi observada. Esses fatos, entretanto, podem ser tentativamente explicados à luz do que foi discutido anteriormente. A infiltração de águas meteóricas deve ter ocorrido durante os últimos rebaixamentos do nível do mar. A linha abrupta entre os óleos degradados e não-degradados é função da temperatura: as bactérias não resistem a temperaturas superiores à faixa de 70 - 80 °C por muito tempo (o fato foi também constatado por Ferreira (1988) na plataforma do Pará/Maranhão). É também fato conhecido que, em alguns campos, o óleo degradado está associado à água salgada. Este fato pode ser explicado pela substituição da água doce invasora por água salgada resultante da compactação dos sedimentos, num período posterior ao do rebaixamento do nível do mar.

2.3 – A Plataforma Continental e as Variações do Nível do Mar

A plataforma continental, como é conhecida hoje, foi criada durante a última glaciação. De acordo com Gowen (1970), trata-se de “um presente da última idade do gelo”.

Emery (1969) afirma que as plataformas continentais são alternadamente expostas e afogadas, à medida que as geleiras continentais avançam e retraem-se. De acordo com esse autor, “... talvez o período mais dramático na história das plataformas continentais tenha sido o de 1 M.a. do Pleistoceno. No ponto máximo, as geleiras parecem ter sido tão extensas que armazenaram água suficiente para acarretar um rebaixamento do nível do mar da ordem de 150m abaixo do nível atual. Quatro rebaixamentos maiores foram causados pelas glaciações principais, com flutuações menores causadas por flutuações climáticas e de volume de gelo”.

Os fatos relativos à última glaciação estão muito bem documentados e datados. Ainda de acordo com Emery (1969), datação de carbono 14 foi obtida em mais de 50 amostras de material de água doce da plataforma leste dos Estados Unidos. O material inclui turfa, oólitos (que somente se formam em águas rasas, mornas e agitadas) e conchas de ostras e outros moluscos (que vivem em águas com apenas alguns metros de profundidade, mas que foram encontrados em águas de até 130 m de profundidade). Com base nestes e em outros dados, Emery (1969) construiu uma curva mostrando a variação do nível do mar nos últimos 35 000 anos. De acordo com essa curva, o nível do mar se encontrava, há 35 000 anos, próximo ao atual. Há 15 000 anos, o nível do mar tinha sido rebaixado em 130 m ou mais. A partir daí, o nível subiu rapidamente até 5 m abaixo do nível atual. Nos últimos 5 000 anos, a subida prosseguiu lentamente até ser atingido o nível encontrado nos dias atuais. “Homens primitivos da cultura Clóvis apareceram na América do Norte há 12.000 anos, quando o nível do mar ainda estava muito baixo. [...] Não é razoável supor que esses homens viveram nas florestas que existiam onde é hoje a plataforma continental?”, pergunta o autor.

Deevey (1949) apresenta um mapa paleogeográfico do Pleistoceno mostrando a Inglaterra ligada ao continente europeu.

"Do banco Dogger e outros lugares do Mar do Norte, de profundidades de até 162 pés, têm sido dragados depósitos de turfa. Ora, a turfa é um depósito de água doce [...], fato confirmado pela descoberta de fósseis...", informa aquele autor. "No outro lado do mundo", continua, "nas Filipinas, existem três ilhas (Negros, Paunay e Masbate) situadas numa plataforma de 160 pés de profundidade. No Pleistoceno, essas ilhas formavam uma única, de acordo com estudos biogeográficos".

Lauber (1959) descreve uma ponte terrestre entre a Sibéria e o Alasca, pela qual seres humanos migraram para a América do Norte, no Pleistoceno. Esta ponte foi originada pelo rebaixamento do nível do mar naquela época.

Pelo que foi dito e discutido, as variações do nível do mar são responsáveis pelo mecanismo de circulação de águas meteóricas, conseqüentemente, ocasionando a biodegradação do petróleo, *water washing* e oxidação dos hidrocarbonetos nas bacias da margem continental. Essas variações acarretam desníveis piezométricos (*head*) capazes de levar a água meteórica a profundidades e distâncias consideráveis. O rebaixamento de 150 m durante a glaciação mais recente, teoricamente, poderia levar água doce a até 6 000 m de profundidade e a grande distância costa afora. Os exemplos mostrados tiveram por objetivo ilustrar de forma convincente este fato.

Por que a ênfase no Pleistoceno? Em primeiro lugar porque os repetidos avanços e retrações das glaciações parecem ser um fenômeno especificamente restrito a este período. Além disso, de acordo com Öpik (1952), durante um período de aproximadamente 200 M. a., não houve praticamente nenhum gelo na superfície da Terra. Mesmo os pólos estavam livres e gozavam de um clima temperado ou frio-temperado. Em segundo lugar, porque as glaciações pleistocênicas estão muito bem documentadas e datadas, o que permite, inclusive, avaliações quantitativas quanto à distância e profundidade da invasão da água meteórica.

Evidentemente existem outros mecanismos causadores de rebaixamento do nível do mar. Aliás, em certos períodos, como no Oligoceno, o desnível foi muito maior do que o documentado para as glaciações quaternárias.

3 – MODELO DE CIRCULAÇÃO DE ÁGUAS NAS BACIAS DA MARGEM CONTINENTAL

Na figura 7, mostra-se, esquematicamente, o modelo de circulação de águas nas bacias da margem continental brasileira.

Em "A", está representada a situação durante a glaciação pleistocênica mais recente, quando o nível do mar foi rebaixado cerca de 150 m. Nessas condições, toda a plataforma foi exposta à infiltração de águas meteóricas, principalmente através das fácies arenosas proximais. A plataforma carbonática e os folhelhos criaram certa restrição ao fluxo lateral das águas meteóricas, originando, assim, um desnível (*head*) entre a área de recarga e a área

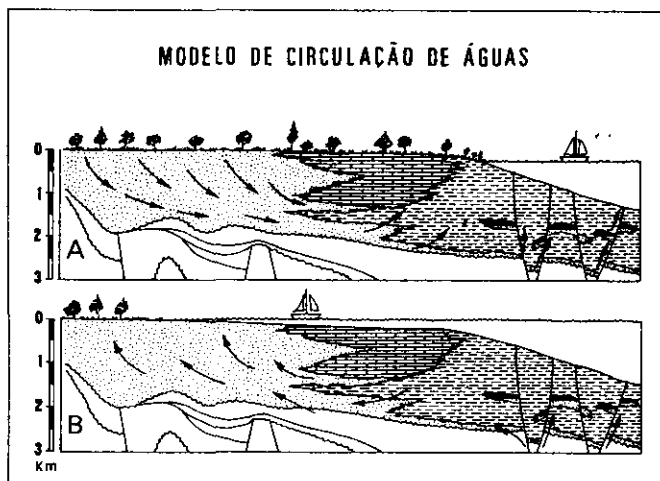


Fig. 7 - Modelo de circulação de águas nas bacias da margem continental brasileira.

Fig. 7 - Model of circulation of meteoric water in basins of the Brazilian continental margin.

de descarga (nível do mar). Assim sendo, foram criadas condições para a água meteórica penetrar profundamente e se estender a até grandes distâncias bacia adentro. A infiltração da água meteórica se processou através de todos os meios permeáveis disponíveis: rochas-reservatório, falhas, fraturas, planos de acamamento, superfícies de discordância, etc. Muito provavelmente a água infiltrante descarregou sob o mar, através de falhas e fraturas, dando origem a fontes submarinas.

Considerando que a água meteórica transporta bactérias aeróbicas até às acumulações petrolíferas, bem como os nutrientes exigidos pelo metabolismo desses organismos, é de se esperar em óleos biodegradados nessas bacias. Podem ser imaginadas diversas situações. O óleo pode ter migrado para um reservatório contendo óleo biodegradado num ciclo anterior, misturando-se com este e preenchendo totalmente o reservatório. Neste caso, a biodegradação praticamente cessa, pois as bactérias vivem não no óleo, mas na água. Entretanto, se o preenchimento foi incompleto, a biodegradação prossegue, porém restrita ao contato óleo-água. Se o reservatório foi preenchido totalmente por óleo antes da incursão da água meteórica, ele não pode ser alterado.

Parte do óleo pode ser alterado "em trânsito" no reservatório ou nos dutos de migração (falhas, fraturas, superfícies de erosão). Assim sendo, sob condições hidrodinâmicas, dificilmente os óleos escapariam de biodegradação em menor ou maior grau.

Com a elevação do nível do mar, conforme está mostrado em "B", no final da glaciação foi eliminada a restrição ao fluxo lateral entre a área de recarga e a de descarga (que agora é a praia). Neste caso, a água meteórica não pode mais penetrar na bacia, ocorrendo refluxo e, conseqüentemente, mistura de águas meteóricas já infiltradas com águas salgadas de compactação. Óleo novo não-biodegradado tem oportunidade de migrar para os reservatórios, misturando-se com óleos biodegradados

num ciclo anterior ou, se a migração se processa por outros dutos para reservatórios ainda virgens, pode originar acumulações de óleo não-biodegradado.

O refluxo atual da água é posto em evidência pela grande variação da salinidade das águas testadas a profundidades semelhantes. Critérios hidroquímicos permitiram comprovar a mistura de águas meteóricas com águas conatas.

Os rebaixamentos do nível do mar foram numerosos no tempo geológico representado pelo pacote sedimentar das bacias da margem continental brasileira. Assim sendo, o ciclo descrito pode ter se repetido várias vezes. Por outro lado, a eficiência dos dutos certamente variou no decorrer do tempo geológico, afetando a eficiência da migração de óleo e gás, a circulação de águas meteóricas e o processo de biodegradação. Como conseqüência, é de se esperar, nas bacias da margem continental, reservatórios com óleos profundamente biodegradados, reservatórios com óleos não-biodegradados misturados com óleos biodegradados, e óleos não-biodegradados. Todos esses casos já foram constatados.

4 - COMPROVAÇÃO DO MODELO

O modelo aqui proposto foi comprovado por meio de análises iônicas de águas coletadas em diversas bacias da margem continental brasileira e por análises isotópicas.

Águas dos tipos sulfato-sódicas e bicarbonato-sódicas de Sulin (1946) foram encontradas a até grandes distâncias e profundidades nas bacias da margem continental brasileira. Essas águas são encontradas em zonas com forte influência de águas meteóricas, sendo denominadas pelos soviéticos como "zonas de livre intercâmbio de águas".

À medida que as águas das formações se movem na subsuperfície, seus íons em solução têm a tendência a trocas com os íons das rochas hospedeiras. O *Index of Base Exchange (I.B.E.)* é usado para indicar a razão entre os íons trocados e os mesmos íons como eles existiam originalmente. As águas conatas (contemporâneas aos sedimentos) geralmente possuem IBE > 1,29 e razão rCl / rNa > 1,17. "As águas com IBE negativo", diz Collins (1971), "são águas meteóricas que se infiltraram em sedimentos marinhos". Muitas das águas analisadas se apresentam com IBE negativo e razão rNa / rCl < 1,17, comprovando a infiltração de águas meteóricas a até grandes profundidades e distância da linha de costa atual.

Muitas das amostras também apresentaram salinidades muito baixas para as profundidades onde foram amostradas, bem como elevados teores de sulfatos e bicarbonatos. Estes fatos são também evidências de infiltração de águas meteóricas.

A infiltração de águas meteóricas nas bacias da margem continental brasileira foi também comprovada com a utilização dos isótopos estáveis de oxigênio e hidrogênio. De acordo com o modelo apresentado, aquelas bacias foram periodicamente invadidas pelas águas meteóricas. Ferreira (1988) recomendou a utilização de isótopos estáveis de hidrogênio e oxigênio para comprovação da infiltração dessas águas. Foi selecionada a Bacia de

Campos, na qual haviam sido reconhecidos óleos com os mais diversos graus de biodegradação (Soldan *et al.* 1990), para a comprovação isotópica.

Inicialmente, foi estabelecido um programa de coleta de amostras de águas superficiais para o estabelecimento da linha evolutiva da água meteórica. Deveriam ser coletadas amostras de água de todas as lagoas da região, bem como em poços rasos para água, considerados por Friedman *et al.* (1984) como as melhores fontes para a obtenção de dados isotópicos representativos da água meteórica atual. A amostragem foi efetuada pelo DESUD/DINTER/SECAM. Efetuou-se também um levantamento de todas as amostras de água de subsuperfície disponíveis no CENPES. Estas amostras, num total de 16, também foram utilizadas na investigação. As análises foram efetuadas no Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), Piracicaba, São Paulo.

O hidrogênio apresenta átomos de três espécies (fig. 8): hidrogênio comum, deutério e trítio (ou trício). Cerca de 99,98% do hidrogênio encontrado na natureza é constituído simplesmente de um próton no núcleo e um elétron de valência circulando em seu redor. Cerca de 0,02% do hidrogênio, entretanto, apresenta um nêutron no núcleo, além do próton. Trata-se do isótopo conhecido como deutério (D ou ^2H). A terceira espécie, extremamente rara, contém dois nêutrons e um próton no núcleo, e é denominada trítio ou trício (^3H). Este isótopo é radioativo.

O oxigênio também apresenta três isótopos (^{16}O , ^{17}O e ^{18}O), conforme está mostrado na figura 8. Predomina amplamente o isótopo ^{16}O , com proporção de 99,96%. Segue-se o ^{18}O , com 0,20% e, finalmente, o ^{17}O , com a baixa proporção de 0,04%.

As análises isotópicas indicam se a amostra é mais rica em deutério ou em oxigênio ^{18}O do que o padrão

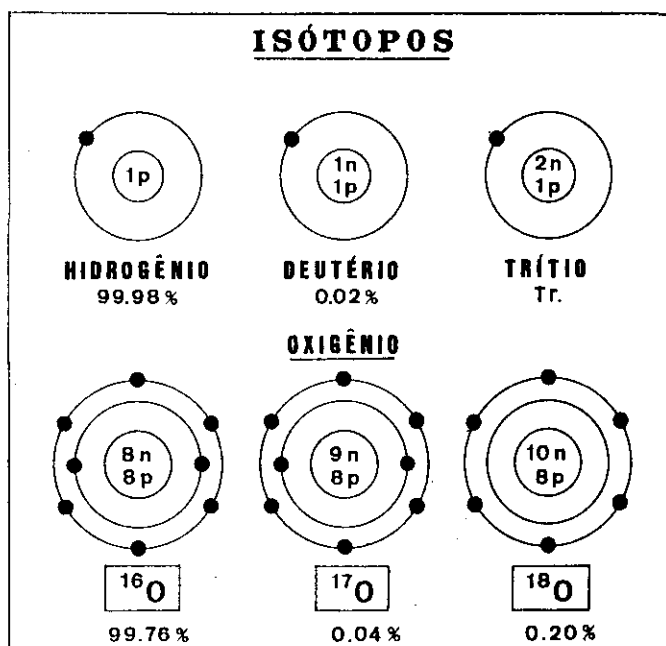


Fig. 8 - Isótopos do oxigênio e do hidrogênio e sua abundância em termos percentuais na natureza.

Fig. 8 - Oxygen and hydrogen isotopes and their abundance in nature (in percent).

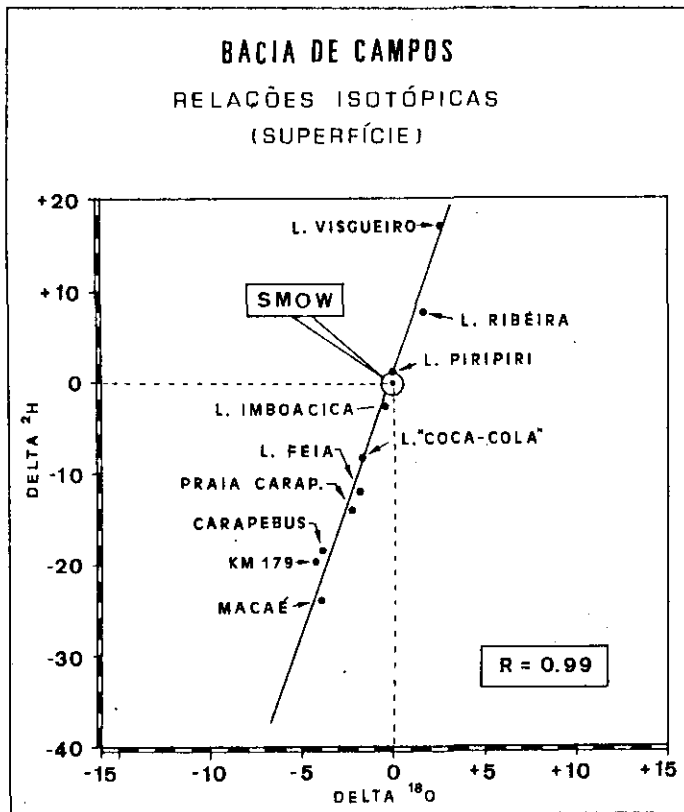


Fig. 9 - Análises isotópicas de águas superficiais nas imediações da Bacia de Campos.

Fig.9 - Isotopic analyses of superficial water in the vicinity of the Campos Basin.

Standard Mean Ocean Water (SMOW), isto é, padrão de água oceânica média. Valores positivos significam que a amostra é mais rica em determinado isótopo do que o padrão, e valores negativos, que é mais pobre.

É oportuno observar que as relações isotópicas originais da água meteórica não são preservadas nas bacias sedimentares. As alterações isotópicas são devidas principalmente a : trocas isotópicas entre a água e os minerais das rochas; formação de minerais autigênicos; filtração através dos folhelhos; e mistura de águas de diferentes origens. As variações são diferentes para cada bacia pelo fato de resultarem de fatores diferentes ou agindo de forma mais ou menos intensa.

Os resultados isotópicos das amostras superficiais foram plotados na figura 9 com as devidas identificações. Observar que foi definida com grande precisão a linha evolutiva da água meteórica (coeficiente de correlação $r = 0,99$). Os resultados das análises das amostras de subsuperfície encontram-se na figura 10. Foi obtido um *trend* muito bem definido (coeficiente de correlação $r = 0,81$).

Observa-se, na figura 10, que o eixo central do *trend* (reta ajustada matematicamente aos pontos) não inclui o SMOW. Além disso, a direção do eixo é em direção à linha global de evolução da água meteórica, a qual é interceptada num ponto cujos valores isotópicos são mais negativos do que os da água meteórica atual da figura 9. Estes fatos

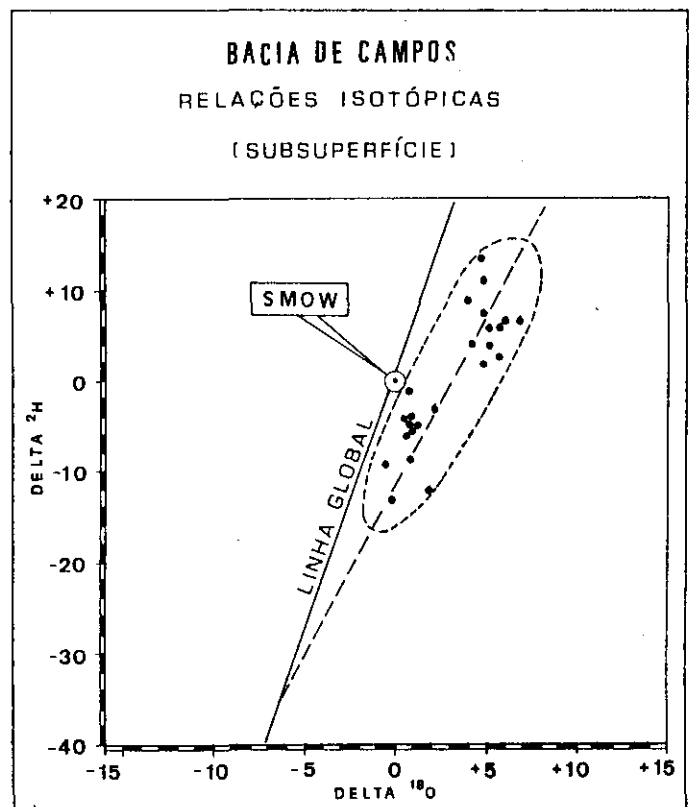


Fig. 10 - Análises isotópicas de águas recuperadas da subsuperfície na Bacia de Campos. Essas análises confirmam a invasão de águas meteóricas na bacia.

Fig. 10 - Isotopic analyses of water recovered from the subsurface of the Campos Basin, confirming invasion of meteoric water.

indicam que houve realmente infiltração de águas meteóricas na Bacia de Campos, mas essa infiltração ocorreu no passado, quando o clima da região era mais frio do que o atual.

5 - CONCLUSÕES

- Foi estabelecido um modelo de circulação de águas nas bacias da margem continental brasileira, visando a explicar a biodegradação de petróleo a grandes profundidades e a grandes distâncias da linha de costa atual.
- A biodegradação foi resultante da infiltração de águas meteóricas durante os períodos de rebaixamento do nível do mar.
- A água meteórica não somente transportou as bactérias, mas também o oxigênio e os nutrientes necessários ao metabolismo desses organismos.
- A infiltração de águas meteóricas foi comprovada pelas análises iônicas (teores elevados de sulfato e bicarbonatos), tipos de água (bicarbonatos e sulfato-sódicas), índice de troca de bases (IBE negativo) e razões iônicas ($rNa / rCl < 1, 17$).
- Comprovou-se também infiltração de águas meteóricas pelas análises isotópicas de hidrogênio e oxigênio.

AGRADECIMENTOS

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram de alguma forma para esta investigação, em particular ao Químico Ana Lúcia Soldan e ao Geólogo José R. Cerqueira, do CENPES /DIVEX, bem como ao Químico Tikae Takaki, também do CENPES/DIVEX, a qual providenciou as análises isotópicas junto ao CENA. Ao Geólogo Osvaldo B. da Silva, do DESUD/DINTER, que coordenou a amostragem para análises isotópicas, e aos técnicos do DEPEX que contribuíram com críticas e sugestões. Agradecimentos especiais são devidos a Izabel Camejo, pelas ilustrações que acompanham este artigo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BATEMAN, A.M. *Economic mineral deposits*. 2. ed. New York: Wiley, 1958. 816 p.
- BETHKE, C.M. *et al.* Supercomputer analysis of sedimentary basins. *Science*, Washington, v. 239, n. 1, p. 261-267, 1988.
- BURNS B.J. *et al.* Gippsland terrestrial oils: recognition of compositional variations due to maturity and biodegradation effects. *Australian Petroleum Exploration Association Journal*, [s.l.], v.27, n. 1, p. 73-84, 1987.
- CLARK, B. Islândia, terra de fogo e gelo. *Seleções do Readers Digest*, [s.l.], v. 12, n. 69, p. 64-87, 1947.
- COLLINS, A.G. Geochemical methods of exploration for petroleum and natural gas. In: COLLINS, A.G. *Geochemistry of oil field waters*. Amsterdam: Elsevier, 1971.
- DEBRET, J.B. *Viagem pitoresca e histórica ao Brasil*. São Paulo: Círculo do Livro, 1985. Tradução de Sérgio Milliet.
- DEEVEY, E.S. Living records of the ice ages. *Scientific American*, New York, v.180, n.5, p. 48-51, 1949. (Scientific American Offprint, 834)
- DICKEY, P.A. Patterns of chemical composition in deep subsurface waters. *AAPG Bulletin*, Tulsa, v-50, n. 11, p. 2472-2478, 1986.
- EMERY, K.O. *The continental shelves: the ocean-pt. IV*, San Francisco: Freeman, 1969.
- FERREIRA, J.C. *Águas de baixa salinidade na plataforma do Pará/ Maranhão e Bacia de Cassiporé: origem, implicações exploratórias*. Rio de Janeiro: PETROBRÁS/CENPES/DIVEX, 1989. 53 p. (Relatório CENPES, 1005).
- FIGUEIREDO, A.M.F. *et al.* *Fatores que controlam a ocorrência de hidrocarbonetos na Bacia de Campos (com ênfase nos arenitos turbidíticos)*. Rio de Janeiro: PETROBRÁS/CENPES, 1983. 67 p. Relatório interno.
- FRIEDMAN, J. *et al.* The variation of the deuterium content of natural waters in the hydrologic cycle. *Review of Geophysics*, [s.l.], n.2, p. 177-224, 1964.
- GALLOWAY, W.E. *et al.* Hydrogeologic regimes of sandstone diagenesis. *AAPG Clastic Diagenesis*, [s.l.], p. 3-13, 1987 (Memoir, 37).
- GAUTHIER, D.L. *et al.* *Relationships of organic matter and mineral diagenesis*. Midland, Tx: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1985. 279 p. p. 233-272 (SEPM Short Course, n. 17)
- GOWEN, R.C. *Frontiers of the sea. The history of oceanographic exploration*. New York: Bantam Books, 1970.
- KUTTAN, K. *et al.* Fresh water influx in the Gippsland Basin: impact of formation evolution, hydrocarbon volumes and hydrocarbon migration. *Australian Petroleum Exploration Association Journal*, [s.l.], v. 26, p. 242-249, 1985.
- LARICHEV, V.V. Formation of hydrochemical anomalies in the pre-jurassic complex of southern Mangyshyak. *Geological Neft Gasa*, [s.l.], v.8, p. 44-47, 1988.
- LAUBER, P. *A idade do gelo*. Rio Janeiro: PETROBRÁS/CENPES, 1959.
- MANHEIM, F.T. Evidence for submarine discharge of water on the Atlantic continental slope of southern United States, and suggestions for further studies. *Transactions, Academic of sciences*, New York, section II, v. 29, p. 839-853, 1967.
- MEDEIROS, L.A. *Estudos das águas de formação da Bacia de Campos*. Macaé, R.J: PETROBRÁS/DESUD/DIRGEL, 1988. Relatório interno.
- MEISTER, E.M. Geology of petroleum in Campos Basin, Brazil. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, Tulsa, v. 68, n.4, p. 506, 1984.
- ÖPIK, E.J. The ice ages. *The Irish Astronomical Journal*, [s.l.], v. 2, n.3, p. 71-84, 1952.
- SOLDAN, A.L., CERQUEIRA, J.R., FERREIRA, J.C., SCARTON, J.C. *et al.* *Aspectos relativos ao habitat do óleo dos campos de Marlim e Albacora, Bacia de Campos*. Rio de Janeiro: PETROBRÁS/CENPES/DIVEX, 112 p. Relatório único.
- STRINGFIELD, V. T., COOPER, J. R. Geologic and hydrologic features of an artesian submarine spring east of Flórida. *Flórida Geol. Surv. Rept. Invest.*, n.7, pt.2, 1951.
- SULIN, N. A. *Waters of oil reservoir in the system of natural waters*. Moscow: Gastptekhizdat, 1946.
- TRINDADE L.A.F. *et al.* *Estudo da migração secundária de hidrocarbonetos nas áreas dos campos de Albacora e Marlim, Bacia de Campos*. Rio de Janeiro: PETROBRÁS/CENPES/DEPEX, 1987. 24 p.

EXPANDED ABSTRACT

PETROBRÁS geologists and geochemists have been intrigued by the presence of heavy oils in the basins of the Brazilian continental margin because these oils are often found even at great depths and distances from the present coastline. Specialists have reached a consensus that the oils were biodegraded by aerobic bacteria. This unusual phenomenon of major exploratory relevance

was investigated through modeling of the hydrodynamic circulation of water in these basins. According to the model, the basins were periodically invaded by meteoric water during sea-level lowstands, especially in the Pleistocene. Meteoric water infiltrated mainly through proximal sandy facies when the sea-level was low. The carbonate platform and shales limited the lateral flow of

water to some extent, thereby producing a hydraulic head between the recharging and discharging areas and enabling meteoric water to penetrate to great depths and reach far into the basin. The model is supported by ionic, isotopic and hydrochemical analyses. Evidence of deep infiltration of meteoric water was detected throughout the basins under study: bicarbonate and sodium sulfate waters; negative index of base exchange (IBE); rCl/rNa

ratio < 1.17; low salinity; large variations in salinity at equal depths; and isotopic evolution towards the global trend of meteoric water. In the particular case of the Campos Basin, isotopic analyses not only pointed to the invasion of meteoric water in the past but also indicated that the infiltration of this water occurred during a period when the climate was colder than at present.