

O IMPACTO DO RIO DA PRATA

Os habitantes da região costeira que se estende da província de Buenos Aires, na Argentina, a Rio Grande, no sul do Brasil, sabem que a água do mar é quase 10°C mais quente em janeiro que em julho. Um observador mais atento notaria também mudanças de cor na sua superfície em diferentes épocas do ano. Para explicar tais observações, especula-se sobre a existência de freqüentes incursões de água fria oriundas da corrente das Malvinas. Neste artigo são apresentadas evidências que sugerem que as alterações mais importantes ao longo de uma faixa costeira de aproximadamente 1.000 km se devem à influência variável das águas que o rio da Prata derrama no oceano Atlântico.

Alberto R. Piola

Faculdade de Ciências Exatas e Naturais, Universidade de Buenos Aires

Osmar O. Möller Jr.

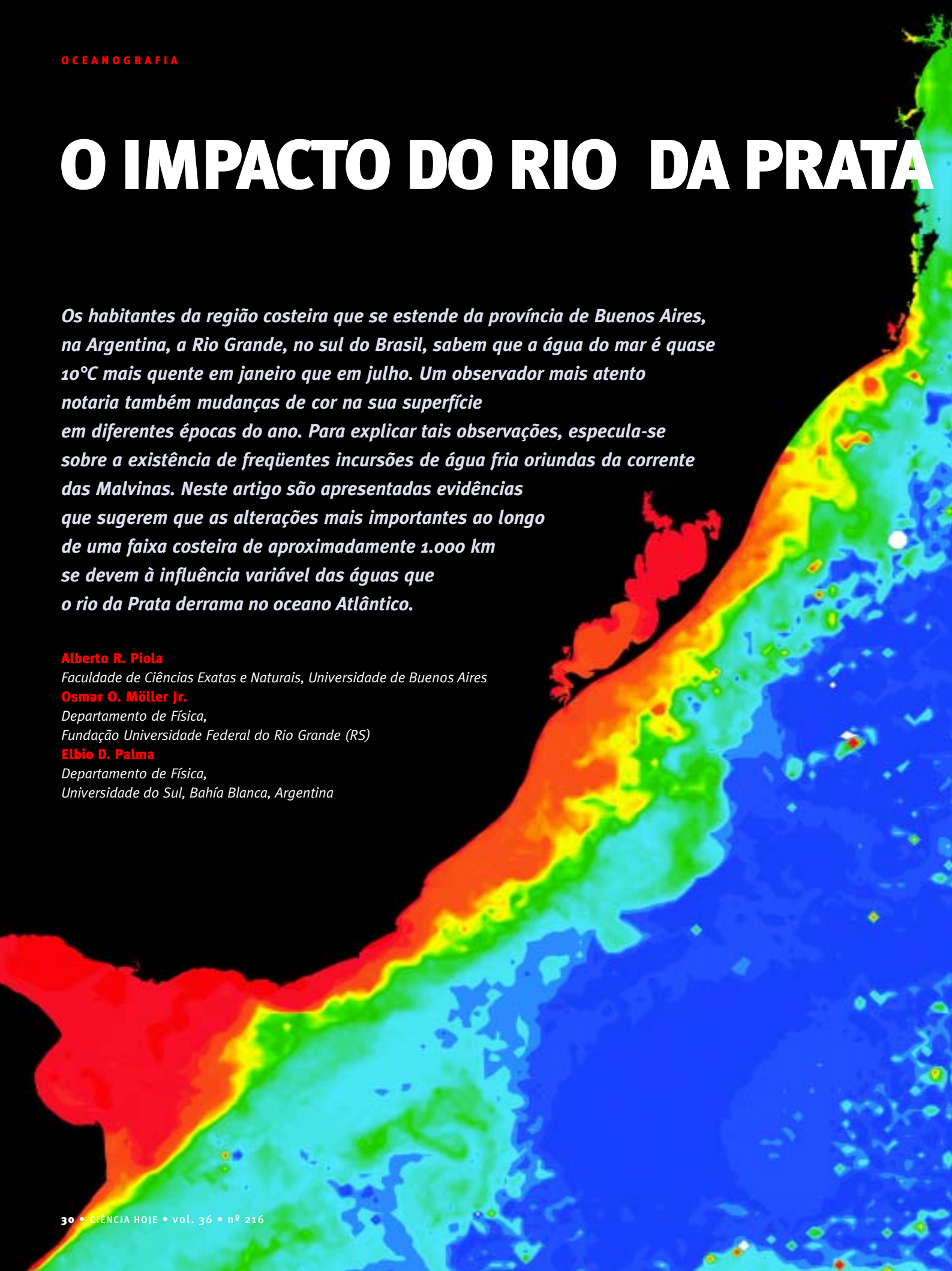
Departamento de Física,

Fundação Universidade Federal do Rio Grande (RS)

Elbio D. Palma

Departamento de Física,

Universidade do Sul, Bahía Blanca, Argentina



NO OCEANO ATLÂNTICO *

* Este artigo foi originalmente publicado na revista argentina *Ciencia Hoy*, vol. 14, nº 82 (agosto-setembro de 2004).

O que acontece com a água do rio quando ela chega ao oceano?

Os rios causam impacto no oceano de diferentes formas e têm influência sobre suas características físicas, químicas e biológicas. O alcance da água resultante do contato do rio com o oceano determina as condições ambientais da zona costeira e dos seres vivos que a habitam. As características do estuário, onde as águas de origem continental encontram as vastas águas oceânicas, foram descritas no artigo 'O estuário do Prata: onde o rio se encontra com o mar', publicado em *Ciencia Hoy* nº 73. A influência do Prata se manifesta também a grandes distâncias do estuário, e esse é o objeto do presente artigo. A presença esporádica de espécies subantárticas e pingüins em praias brasileiras sugere a influência de uma corrente fria vinda do sul. Poderiam essas correntes ter alguma relação com o rio da Prata?

Os rios despejam no mar água doce e grande quantidade de elementos de origem continental, razão pela qual causam forte impacto na zona costeira. A água do rio contém baixa concentração de sais dissolvidos, o que definimos como salinidade. Longe da costa, a salinidade do oceano varia entre 34 e 38 gramas de sal por quilo de água. Mas perto da foz de grandes rios, onde as águas de origem continental se misturam às do mar, a salinidade é consideravelmente menor, alcançando valores inferiores a 20. A água de baixa salinidade resultante dessa mistura também tem menor densidade que a água do mar, formando uma camada relativamente fina e produzindo o que chamamos de estratificação vertical. Aqui chamaremos de 'pluma' à área de influência das águas do rio, cuja salinidade é menor que a da água oceânica circundante. Nessa região, os ventos arrastam as águas superficiais e são a principal fonte de energia para misturar vertical-

mente as águas diluídas e a água do mar. Na zona costeira, a descarga de água doce proveniente dos rios cria a estratificação vertical, enquanto a mistura vertical produzida pelo vento – e, em menor medida, pela maré – a destrói.

Entre outros elementos, os rios levam nutrientes para o mar, inclusive fertilizantes empregados em atividades agrícolas, como nitratos e fosfatos. No mar, a baixa concentração de nutrientes costuma limitar o crescimento de algas marinhas microscópicas em suspensão na água (que compõem o fitoplâncton). Conseqüentemente, a maior disponibilidade de nutrientes levados pelos rios às zonas costeiras costuma estimular o desenvolvimento da vida marinha.

A cada segundo, o rio da Prata despeja em média 22 mil m³ de água de origem continental no Atlântico sul, proveniente da bacia dos rios Paraná/Paraguai e Uruguai, a segunda em extensão na América do Sul (após a do rio Amazonas) e a quarta do mundo. A bacia do Prata abrange cerca de 3 milhões e 100 mil km², que incluem áreas remotas, como as nascentes do rio Pilcomayo, no noroeste boliviano, na cordilheira Central, e as serras a nordeste de Brasília, que estão a mais de 2.500 km de sua foz. A serra do Mar, próxima à costa do Sudeste brasileiro, impede o fluxo direto das águas de chuva até o oceano, que vertem então para a bacia do Prata. As águas dos rios Tietê e Pinheiros, por exemplo, que cortam a cidade de São Paulo, situada a menos de 50 km do Atlântico, correm mais de 2.800 km para alcançar o oceano, logo depois de chegar ao rio da Prata.

As águas diluídas pela descarga do rio da Prata na plataforma continental causam forte impacto no ecossistema marinho. Por exemplo, a abundância de certas espécies de fitoplâncton e de larvas de

Imagem de satélite da área de influência do rio da Prata e das lagoas dos Patos e Mirim

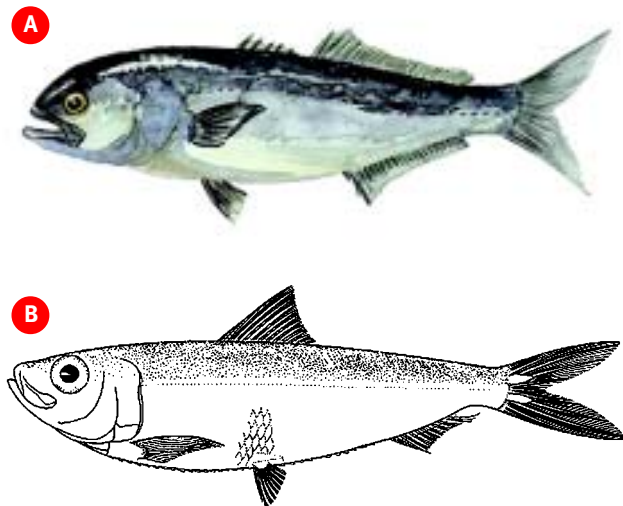
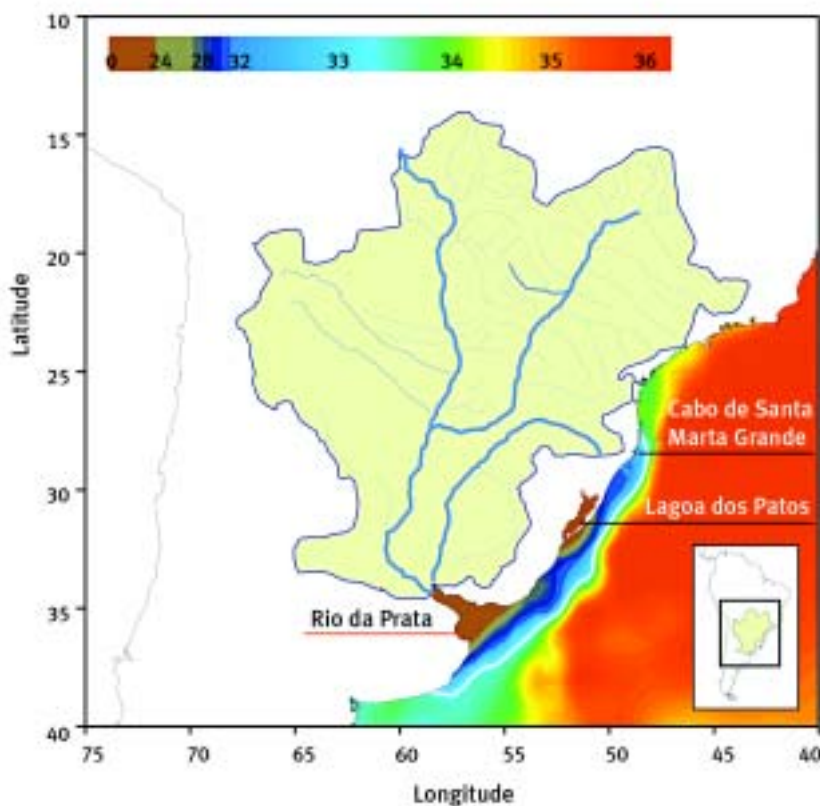


Figura 1. Enchova (*Pomatomus saltatrix*) (A), a mais importante espécie em volume de captura no sul do Brasil, e sardinha (*Sardinella brasiliensis*) (B), abundante em águas costeiras de baixa salinidade

enchova (*Pomatomus saltatrix*), a espécie mais importante em termos de volume de captura no sul do Brasil, está ligada à presença de águas diluídas na região costeira e apresenta variações relacionadas com sua distribuição espacial (figura 1).

Nos anos em que as águas costeiras de baixa salinidade são mais abundantes, observa-se na plataforma continental do sul do Brasil sensível aumento da captura da sardinha (*Sardinella brasiliensis*). Embora as águas continentais modifiquem bastante tanto a estratificação vertical quanto as correntes e as características químicas e biológicas da zona costeira, os mecanismos aí envolvidos ainda não são bem conhecidos.

Durante o outono e o inverno, quando predominam ventos de sudoeste, as águas de baixa salinidade provocadas pela descarga continental do Prata se estendem por uma faixa estreita ao longo da costa uruguaia e do sul do Brasil, até o norte da ilha de Florianópolis, localizada a mais de 1.200 km do estuário (figura 2). Excepcionalmente podem chegar até o litoral paulista. Por outro lado, na primavera e no verão a faixa costeira se retrai até a latitude de Rio Grande, nas proximidades da entrada da lagoa dos Patos. Nessa época do ano as águas de baixa salinidade se estendem até o leste, além do talude continental sul-americano, onde se misturam às águas superficiais das correntes do Brasil e das Malvinas. Sensores de satélites capazes de quantificar os sedimentos em suspensão arrastados pelos rios e o florescimento do fitoplâncton associados ao aporte de nutrientes confirmam essas marcantes oscilações sazonais das águas costeiras. Entre 1998 e 2002, as médias para os meses de julho revelam uma importante penetração de águas de origem continental em uma estreita faixa litorânea ao longo da costa do Uruguai e do sul do Brasil (figura 3). Por outro lado, em janeiro a área de influência do rio se concentra na região do estuário, e a faixa costeira se retrai consideravelmente. Essas mudanças na distribuição das águas diluídas alteram as condições ambientais da costa.



Por que a 'pluma' do rio da Prata varia?

Três principais fatores determinam a distribuição de águas diluídas na foz de um rio no oceano: 1) a rotação da Terra produz a força denominada Coriolis, que, no hemisfério Sul, desvia as águas para a esquerda da foz; 2) o vento que atua diretamente sobre a camada superficial transfere a es-

Figura 2. Bacia do rio da Prata, com seus principais tributários, e distribuição superficial da salinidade no inverno. A escala de cores indica os valores de salinidade no oceano. Note-se o trecho de baixa salinidade (tons azuis) que se estende do estuário do Prata ao longo da costa uruguaia e brasileira

ta parte de sua energia; 3) a vazão do rio define a quantidade de água doce disponível para a mistura com as águas oceânicas. Em geral, os dois últimos fatores apresentam variações temporais que alteram a distribuição das águas diluídas. Na área de influência do rio da Prata, o vento predominante varia de acordo com a época do ano, soprando de nordeste no verão e de sudoeste no inverno. Essas variações do vento seriam as principais responsáveis pelas mudanças sazonais observadas na distribuição das águas diluídas descrita anteriormente.

A descarga fluvial do rio da Prata também apresenta flutuações significativas, e essas variações não têm um caráter sazonal bem definido. De março a agosto de 1983 e de abril a maio de 1998, foram registradas as vazões mais intensas do século 20. Nesses períodos a descarga média superou 60 mil m³ por segundo, quase três vezes o valor médio da vazão observada nos últimos 50 anos. Em contraste, em maio de 1978 e entre dezembro de 1999 e janeiro de 2000, a vazão do Prata foi inferior a 12 mil m³ por segundo, isto é, só a quinta parte dos volumes mais altos alcançados. Vários estudos feitos na última década levam a concluir que a descarga fluvial do rio Paraná, o principal tributário do Prata, apresenta variações associadas ao 'El Niño', fenômeno climático que tem origem no Pacífico sul e afeta grande parte da Terra. Nos anos de 'El Niño' ocorrem importantes alterações nos padrões climáticos 'normais', como secas e grandes inundações em diversos pontos do planeta. Nesses períodos, aumentam as precipitações na bacia do Prata e, conseqüentemente, a vazão do rio. Os fenômenos de 'El Niño' mais intensos ocorreram nos anos de 1982-1983 e de 1997-1998, precisamente aqueles em que a descarga fluvial do Prata foi máxima.

Ainda não conhecemos bem de que forma esses importantes

aumentos da vazão do Prata afetam as condições ambientais das águas costeiras. Em teoria, nos anos de vazão elevada, graças à maior disponibilidade de água doce, se produziria uma importante alteração do ecossistema costeiro em razão do aumento da extensão das águas de baixa salinidade. Conseqüentemente, em épocas de grandes vazões, como as observadas nos anos de 'El Niño', a salinidade superficial no litoral sul do Brasil deveria diminuir. Mas os dados históricos disponíveis indicam que a extensão de águas diluídas por influência do rio da Prata não aumenta nesses períodos; ao contrário, diminui. Por exemplo, a salinidade superficial da área próxima ao cabo de Santa Marta Grande (SC), onde as variações sazonais de salinidade são máximas, é maior nos anos de 'El Niño', associados à vazão elevada, do que nos anos de vazão baixa, correspondentes à fase oposta do 'El Niño', denominada 'La Niña'.

Esse comportamento aparentemente contraditório se deveria ao fato de que na bacia do Prata, nos períodos de grandes descargas fluviais, o vento de nordeste sopra com maior frequência e intensidade na zona costeira. Diante dos efeitos produzidos pela rotação da Terra, o vento nordeste atua afastando as águas de baixa salinidade da região costeira para o oceano aberto e substituindo-as por águas mais profundas e de maior salinidade. Portanto, independentemente da época do ano, a situação nos períodos de vazão elevada é similar à observada no verão. O aumento das chuvas na região ▶

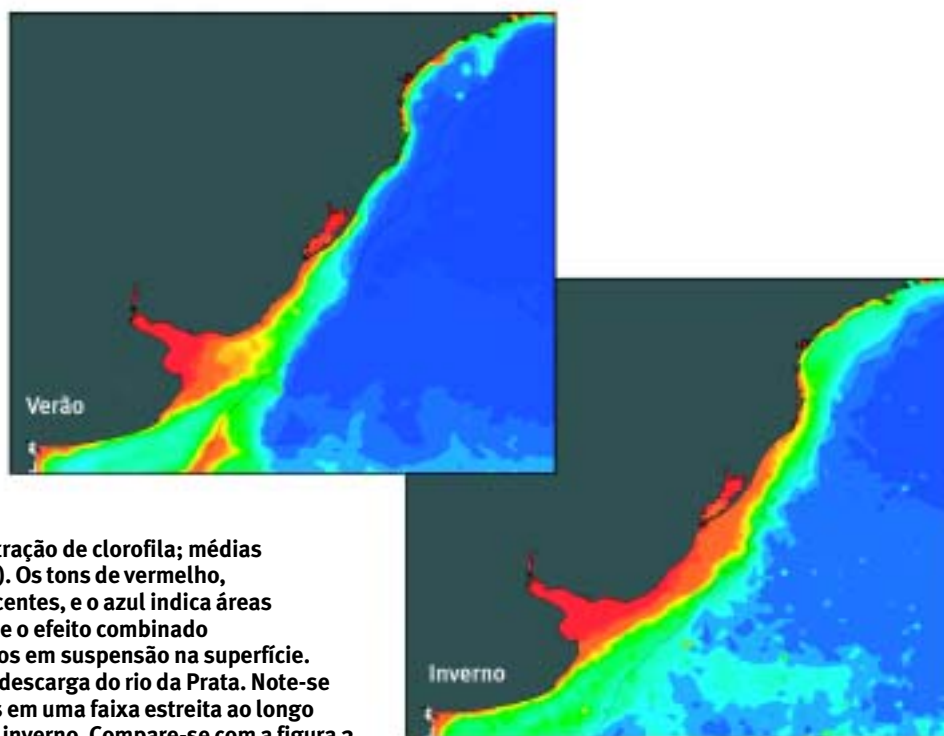


Figura 3. Imagens de satélite de concentração de clorofila; médias de janeiro (à esquerda) e julho (à direita). Os tons de vermelho, amarelo e verde indicam valores decrescentes, e o azul indica áreas de menor concentração. A variável reflete o efeito combinado da concentração de clorofila e sedimentos em suspensão na superfície. Os valores máximos estão associados à descarga do rio da Prata. Note-se a penetração de concentrações elevadas em uma faixa estreita ao longo das costas do Uruguai e sul do Brasil no inverno. Compare-se com a figura 2

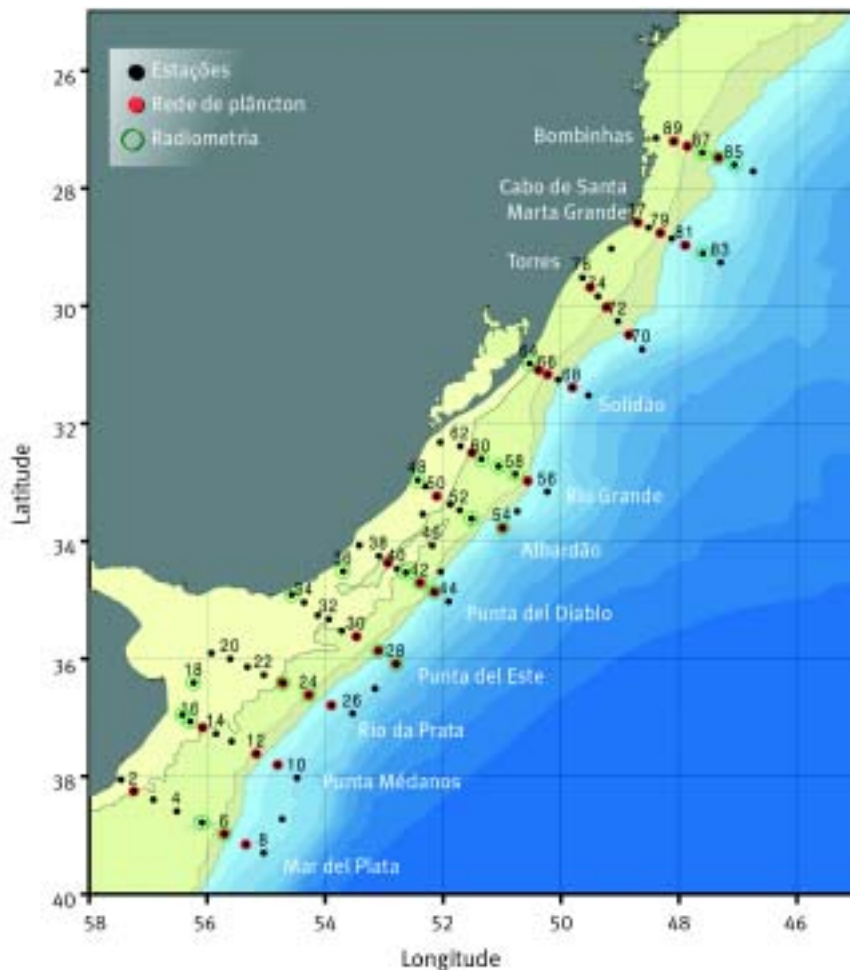


Figura 4. Atividades realizadas a bordo do barco oceanográfico Antares em fevereiro de 2004

tebrados típicos de ambientes litorâneos da Patagônia. Por sua vez, a água subtropical de plataforma, diluída pela mistura com águas do rio da Prata, ocupa a extensa plataforma brasileira ao sul de Cabo Frio. Essa frente poderia também ser uma barreira para a distribuição de espécies, limitando a extensão geográfica tanto de espécies subantárticas quanto de subtropicais. Mas as observações biológicas nessa região são escassas e não conclusivas. A frente se estende para o sul, da área costeira ao norte de Rio Grande até a borda do talude continental.

Situação no inverno de 2003 e no verão de 2004

A falta de observações na área de transição se deve em parte ao fato de esta estar localizada perto da fronteira oceânica

entre o Uruguai e o Brasil. Como historicamente a maioria dos estudos feitos por esses países envolve apenas suas águas territoriais, eles não oferecem uma descrição adequada da zona de transição. Com o objetivo de determinar a variabilidade do impacto do rio da Prata no ecossistema da plataforma continental e avaliar os efeitos das variações do vento e a descarga continental, uma equipe internacional de cientistas de várias áreas elaborou um ambicioso projeto de investigação que inclui a realização de campanhas oceanográficas multidisciplinares, levantamentos aéreos de salinidade e um conjunto de modelos que simulam numericamente as correntes oceânicas da região. A meta é estudar as variações sazonais da 'pluma' de água de baixa salinidade e da frente subtropical de plataforma e seu impacto na circulação e nos processos químicos e biológicos na plataforma continental sul-americana.

Em agosto de 2003 e fevereiro de 2004 foram realizadas duas campanhas a bordo dos barcos oceanográficos Puerto Deseado e Antares, respectivamente, e dois levantamentos aéreos de salinidade, que envolveram mais de 1.500 km ao longo da costa entre Mar del Plata (Argentina) e Itajaí (Bra-

subtropical da América do Sul, que inclui a bacia do Prata, se deve, entre outros fatores, à maior frequência de ventos de nordeste, que trazem mais umidade do que nos períodos de vento e vazão 'normais'. Os ventos de nordeste predominantes se estenderiam também à região costeira, limitando assim a extensão das águas de baixa salinidade até o norte. O mesmo padrão de ventos que provoca chuvas intensas na bacia do Prata e aumento da vazão do rio limitaria a penetração de águas de baixa salinidade até o norte, ao longo da costa sul-americana.

Estudos recentes mostram que sob a camada superficial, ocupada por águas de baixa salinidade, ocorre uma transição abrupta entre águas quentes e de alta salinidade, de origem subtropical, e águas relativamente frias, de origem subantártica. Essa transição denomina-se 'frente subtropical de plataforma'. As águas frias ocupam a quase totalidade da coluna de água na plataforma continental patagônica e no litoral da província de Buenos Aires, à exceção da área de influência do rio da Prata. É por isso que, em profundidades de 100 m, no mar em frente à província de Buenos Aires, vivem moluscos, equinodermos e outros inver-

FOTO OSMAR MÖLLER

sil). Durante essas campanhas foram cobertas 174 estações oceanográficas em 11 seções transversais à costa (figura 4). Em cada estação, onde o barco se detém para fazer observações, foram medidas a temperatura, salinidade, turbidez e a concentração de oxigênio dissolvido e de nutrientes. Foram feitas também observações da radiação solar incidente e da radiação emitida pela superfície do mar, além da coleta de 120 amostras do fundo para análise de organismos que vivem nos sedimentos marinhos e são sensíveis a mudanças ambientais (figura 5). Em algumas estações foram coletadas amostras de plâncton por meio de varreduras verticais e horizontais com o auxílio de vários tipos de rede (figura 6).

Essas observações ilustram bem as dramáticas variações sazonais das águas de baixa salinidade na zona costeira. Por exemplo, no inverno de 2003 vestígios de águas do Prata, misturadas às águas da plataforma continental, se estenderam para além dos 26°S, superando o limite entre os estados de Santa Catarina e Paraná. Por outro lado, em fevereiro de 2004 não se registrou qualquer sinal de águas do Prata além de Rio Grande. A região onde ocorrem as maiores variações sazonais de salinidade superficial (figura 7) envolve uma faixa costeira de mais de 800 km de comprimento e largura média superior a 100 km. A figura 8 mostra que no inverno as águas menos salinas (salinidade < 28) se estendem por mais de 500 km ao longo da costa do Uruguai e sul do Brasil, da entrada do rio da Prata até depois de Rio Grande. Por outro lado, no verão essas águas se localizam em frente à entrada do rio, estendem-se a sudeste, até uns 250 km de Mar del Plata, e alcançam mais de 160 km a leste do cabo Polônio. Mas no inverno não há sinais do rio da Prata em frente a Mar del Plata, e a 'pluma'



Figura 5. Draga para coleta de amostras de sedimentos marinhos

de água diluída alcança apenas uns 50 km de largura defronte à costa uruguaia.

No outono e inverno de 2003 a descarga fluvial do Prata oscilou entre 13.200 m³ e 16.100 m³ por segundo, muito abaixo dos valores típicos, e no verão de 2004 oscilou entre 16.200 m³ e 25.400 m³ por segundo. Isso significa que as mudanças de vazão não parecem poder justificar as grandes variações na distribuição das águas do Prata. Em agosto de 2003, intensos ventos de sudoeste contribuíram para a propagação de água diluída na direção nordeste. Por outro lado, em fevereiro de 2004 os ventos sopraram a partir do nordeste e empurraram as águas do Prata para sudoeste. As novas observações confirmam a hipótese de que o vento tem influência decisiva nas variações sazonais da 'pluma' do Prata. ▶

A E C - FOTOS OSMAR MÖLLER; B - FOTO JOSÉ MUELBERT

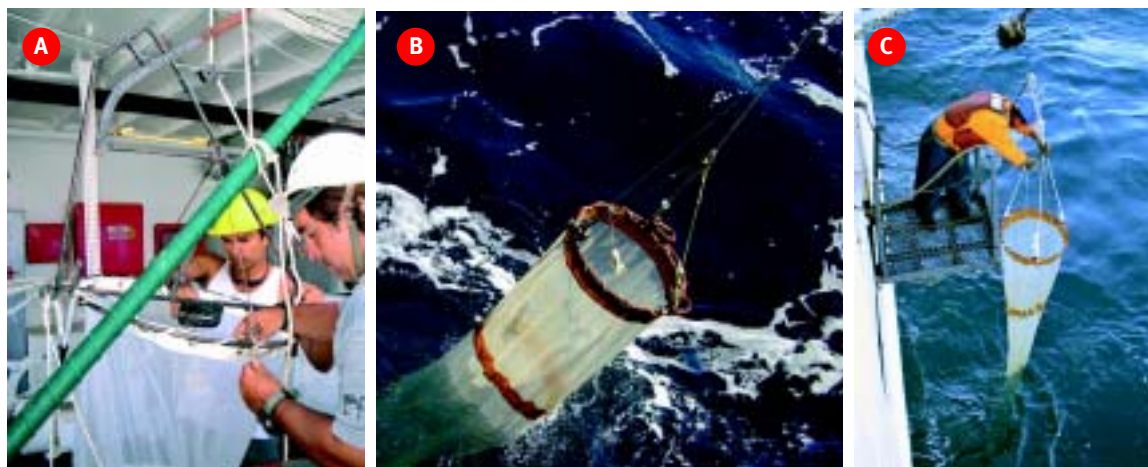


Figura 6. Redes para coleta de organismos planctônicos: preparação de uma rede de plâncton (A); rede de plâncton de arrasto horizontal (B); lançamento de rede para captura de organismos (C)

Figura 7. Operação de CTD, equipamento utilizado para colher amostras de água e medir temperatura e salinidade



Simulações numéricas

Com o objetivo de compreender em profundidade as complexas interações entre as variações do vento e a vazão e avaliar o efeito de outros fatores, como topografia do fundo marinho, marés e processos de mistura de águas do rio com águas oceânicas, também estão sendo feitas simulações das correntes que atingem a região. Elas se baseiam em modelos matemáticos que permitem determinar a velocidade e as propriedades da água em

função de leis físicas, como a segunda lei de Newton, a conservação de massa, o calor e a salinidade. Os modelos requerem também a especificação dos valores das variáveis nas bordas do domínio e das condições iniciais. Como não é possível encontrar uma solução analítica para as equações que descrevem a evolução temporal dos campos de velocidade, temperatura e salinidade, empregam-se métodos numéricos para solucioná-las. A mesma estratégia é utilizada, por exemplo, para estimar as condições da atmosfera e fazer prognósticos meteorológicos. Em nossas aplicações, recorremos a um modelo desenvolvido na Universidade de Princeton, Estados Unidos, no final da década de 1980, que foi adaptado à região costeira do leste da América do Sul.

A figura 9 mostra a distribuição superficial de salinidade média no inverno produzida a partir de uma dessas simulações. Nesse caso, aplicamos a média dos caudais do rio da Prata e da lagoa dos Patos e a média dos ventos de inverno, determinadas pelo Centro Europeu de Prognóstico a Médio Prazo. A distribuição da salinidade sugerida pelo modelo apresenta feições muito próximas da realidade. As áreas de maior salinidade correspondem à corrente do Brasil (salinidade > 36), que flui para o sul, proveniente de regiões de alta taxa de evaporação no Atlântico subtropical, situada além do limite norte do nosso modelo. A corrente das

Malvinas flui para o norte, com valores médios de salinidade de aproximadamente 34. Na plataforma continental, o traço mais evidente é a descarga do rio da Prata, que forma a faixa costeira de baixa salinidade a qual, vai além do cabo de Santa Marta Grande (salinidade < 33,5). A simulação de verão, por outro lado, mostra que a pluma das águas do rio da Prata desloca-se para o sul, apenas ultrapassando a foz da lagoa dos Patos, no sul do Brasil, o que está de acordo

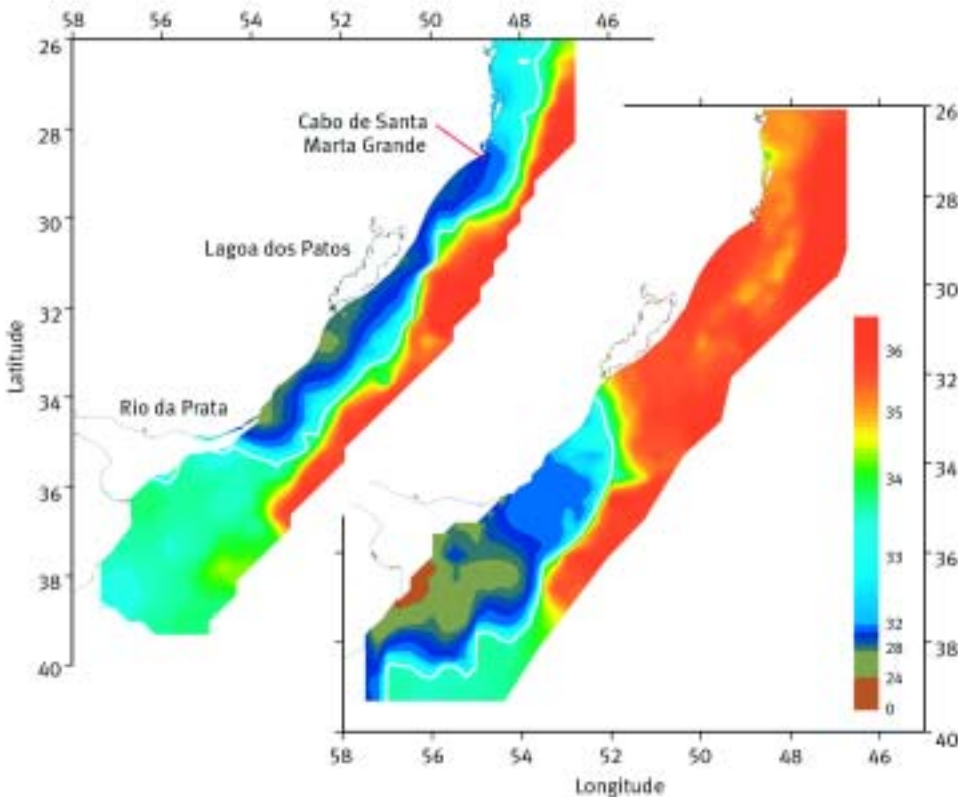


Figura 8. Salinidade superficial nas áreas de influência do rio da Prata em agosto de 2003 (à esquerda) e fevereiro de 2004 (à direita). As águas de menor salinidade são indicadas pelas cores marrom e azul (ver escala de cores à direita). Note-se que, no inverno, a extensão das águas diluídas pelo rio da Prata vai além de 26°S

FOTO CARLOS BALESTINI

FOTO JOSÉ MUELBERT

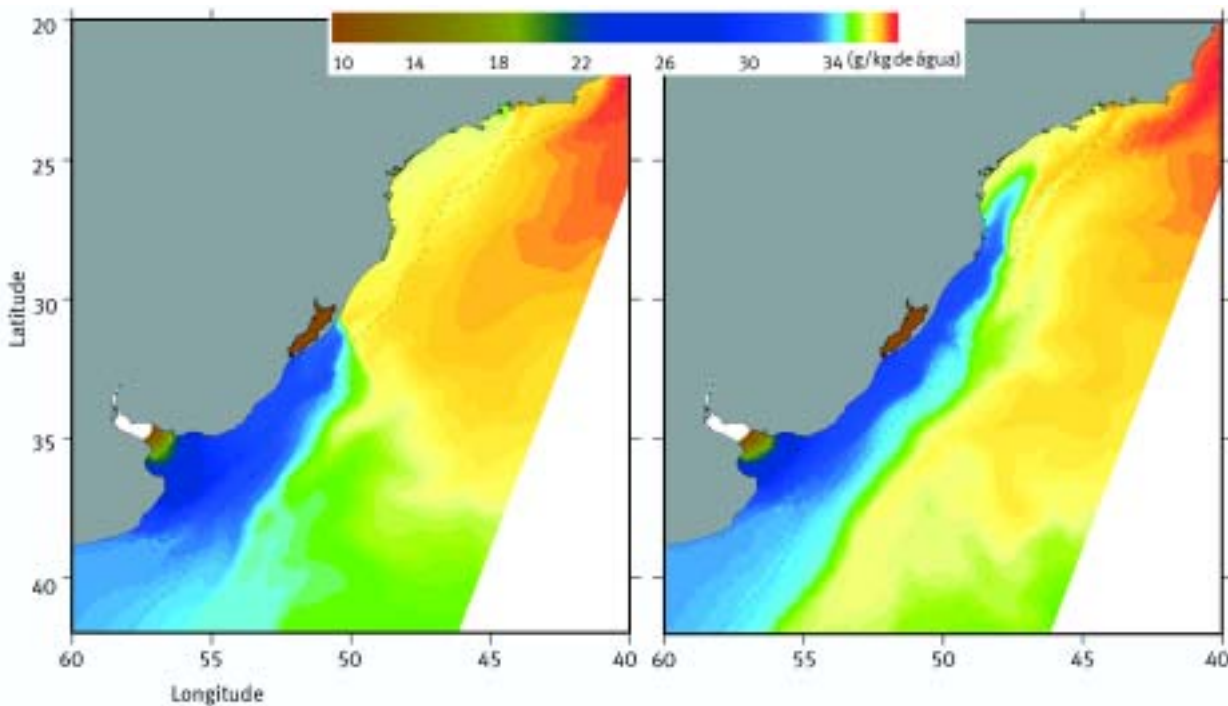


Figura 9. Salinidade de superfície simulada pelo modelo desenvolvido na Universidade de Princeton para uma vazão do rio da Prata igual a 20.000 m³/s e ventos típicos de janeiro (à esquerda) e julho (à direita)

com as observações de salinidade típicas dessa época do ano. Embora essas simulações numéricas reproduzam os traços mais notáveis do campo de salinidade na plataforma continental, os modelos não estão corretamente calibrados a ponto de autorizar prognósticos do ambiente oceânico costeiro a partir dos dados de vento e vazão do rio.

Próximos passos

Os modelos numéricos e as novas observações confirmam algumas hipóteses sobre o papel das flutuações da intensidade e direção dos ventos e a vazão de água doce na distribuição de águas de baixa salinidade na plataforma continental, seja em escala sazonal ou interanual. Mas as correntes oceânicas respondem a variações do vento em espaços de tempo muito curtos, de apenas alguns dias. Tendo em vista que o vento também varia em poucos dias, é provável que ocorram variações significativas das correntes superficiais nessa escala temporal. Nossos estudos se voltaram para a compreensão das variações das correntes e para a distribuição de águas de origem continental em escala sazonal. Agora, devemos nos voltar para o estudo de escalas temporais mais curtas. Como se altera a distribuição de salinidade e de nutrientes

quando ocorre um temporal na região? Um evento desse tipo pode alterar significativamente os padrões sazonais médios?

Há muitas evidências de que a distribuição do fitoplâncton, base da cadeia alimentar marinha, varia segundo as condições de estratificação da água e segundo a disponibilidade de nutrientes, indispensáveis ao seu desenvolvimento e diretamente ligados à presença de águas diluídas. Mas a relação entre as condições ambientais e os níveis mais altos da cadeia alimentar, geralmente ocupados por espécies de maior interesse comercial, é mais complexa e ainda mal compreendida. É importante investigar também como as modificações no ambiente costeiro afetam os organismos vivos.

Os estudos apresentados neste artigo foram financiados pelo Instituto Interamericano de Investigação da Mudança Global, pela Oficina de Investigações Navais (Estados Unidos), pela Agência Nacional de Promoção Científica e Tecnológica da Argentina, pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (do Brasil), pelas universidades de Buenos Aires e Nacional do Sul (Argentina), pelas marinhas de Brasil e Argentina e pela Força Aérea do Uruguai. As imagens de satélite foram tomadas durante a execução do Projeto SeaWiFS, do Goddard Space Flight Center (NASA, Estados Unidos), e processadas por Sílvia Romero.

SUGESTÕES PARA LEITURA

- FRAMIÑAN, M.B.; ETALA, M.P.; ACHA, E.M.; GUERRERO, R.A.; LASTA, C.A. & BROWN, O.B. 'Physical characteristics and processes of the Río de la Plata Estuary', in PERILLO, G.M. & PINO-QUIVIRA, M. (eds.). *Estuaries of South America. Their geomorphology and dynamics*. Berlin, Springer-Verlag, pp. 161-194, 1999.
- GUERRERO, R.A.; LASTA, C.A.; ACHA, E.M.; MIANZAN, H.W. & FRAMIÑAN, M.B. *Atlas hidrográfico del Río de la Plata*. Comisión Administradora del Río de la Plata, Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero, Buenos Aires y Montevideo, 1997.
- PALMA, E.D.; MATANO, R.P. & PIOLA, A.R. 'Three dimensional barotropic response of the southwestern Atlantic shelf circulation to tidal and wind forcing', *Journal of Geophysical Research*, nº 109, 2004.
- PIOLA, A.R.; CAMPOS, E.J.D.; MÖLLER, O.O. JR.; CHARO, M. & MARTINEZ, C. 'Subtropical shelf front off eastern South America', *Journal of Geophysical Research*, 105: 6.566-6.578, 2000.