

Características ambientais do Baixo São Francisco (AL/SE): efeitos de barragens no transporte de materiais na interface continente-oceano

Paulo Ricardo Petter Medeiros^{1*}
 Manoel Messias dos Santos¹
 Geórgenes Hilário Cavalcante²
 Weber Friederichs Landim De Souza³
 Wilson Francisco da Silva⁴

¹Instituto de Geografia, Desenvolvimento e Meio Ambiente Laboratório de Ciências do Mar da Universidade Federal de Alagoas (UFAL) – Maceió (AL), Brasil.

²Instituto de Ciências Atmosféricas (ICAT) da UFAL – Maceió (AL), Brasil.

³Laboratório de Análises Químicas e Ambientais do Instituto Nacional de Tecnologia (INT) – Rio de Janeiro (RJ), Brasil.

⁴Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos do Centro Tecnológico (CTEC) da UFAL – Maceió (AL), Brasil.

*Autor correspondente:
 paulopetter_@hotmail.com

Resumo

Os rios têm importância vital na geoquímica global, pois são importantes agentes transportadores de sedimentos e nutrientes para os oceanos. Entretanto, existem diversas atividades humanas que alteram esse transporte natural, dentre as quais se destaca a construção de barragens. A bacia hidrográfica do Rio São Francisco possuía área de 639.000 km². O Rio São Francisco possui importância regional dos pontos de vista ecológico, econômico e social. Atualmente, é prioritariamente usado para a geração de energia hidroelétrica. Este artigo objetivou realizar revisão bibliográfica relacionada ao impacto de barragens, com ênfase no Rio São Francisco. A construção de barragens provocou alterações de padrões naturais de vazão, reduzindo a sua magnitude e variabilidade sazonal e interanual. Sofreu também grande redução da carga de material particulado em suspensão e de nutrientes. A carga de nitrogênio inorgânico dissolvido de 4,1x10³ toneladas/ano é 17 vezes menor do que no período anterior à construção das barragens em cascata. A carga de sílica dissolvida de 448x10³ toneladas/ano é 31% menor em relação a estudos anteriores. A alteração dos padrões naturais de vazão modificou os padrões de deslocamento da cunha salina do estuário, que atualmente tende a ser relativamente estacionária. A redução do fluxo de nutrientes à região costeira intensificou suas condições oligotróficas.

Palavras-chave: Rio São Francisco, barragens, impactos.

Abstract

Rivers has vital importance in global geochemical, are important transporters agents of sediment and nutrients into the oceans. However, there are many human activities that alter this natural transport, among which stands out the construction of dams. The watershed of the São Francisco River area has 639,000 km². Currently, the São Francisco river is mainly used for hydropower generation. The purpose of this article is to review the literature related to the impact of dams, with emphasis on the São Francisco River. The construction of dams has caused changes in natural patterns of flow, reducing its magnitude and seasonal and interannual variability. He also suffered big load reduction of suspended particulate matter and nutrients. The load of dissolved inorganic nitrogen of 4.1x10³ metric tons/year, is 17 times smaller than the period prior to construction of dams in cascade. The load of dissolved silica of 448x10³ tons/year is 31% lower compared to previous studies. Changing patterns of altered natural flow patterns of displacement of saline wedge estuary, which currently tends to be relatively stationary. The reduced flow of nutrients to the coastal region, intensified their oligotrophic conditions.

Keywords: nutrients, dams, São Francisco River (Brazil).

1. INTRODUÇÃO

Os rios constituem-se agentes vitais dentro do ciclo hidrológico global, visto que transportam materiais resultantes de processos naturais do intemperismo continental das atividades humanas. Segundo Vörösmarty *et al.* (1997), o transporte de sedimentos dos continentes é uma característica fundamental da geologia e biogeoquímica de nosso planeta. De uma forma geral, os rios contribuem com aproximadamente 70% do aporte total mundial de sedimentos para o oceano.

A contribuição sedimentar dos rios pode variar com mudanças climáticas, erosão, desmatamento e construção de barragens (Milliman 1991). Além de sedimentos, os rios transportam elementos biogênicos como nitrogênio, fósforo e sílica, tanto na forma orgânica quanto na inorgânica. Esses

elementos são essenciais para a manutenção da produtividade biológica, em condições naturais os rios são importantes.

Fatores antrópicos, como o uso do solo e a retirada da cobertura vegetal natural, dependendo de sua magnitude e intensidade, tendem a alterar a dinâmica natural de sedimentos em uma bacia e seu transporte para o ambiente fluvial. O fluxo de material também é afetado pela construção de barragens em rios (Halim 1991).

O Rio São Francisco nasce na Serra da Canastra, no Estado de Minas Gerais, e desloca-se em grande parte no semiárido do Nordeste. Apresenta importância regional dos pontos de vista ecológico, econômico e social. Atualmente, é prioritariamente usado para a geração de energia hidroelétrica.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados e informações apresentados e discutidos neste artigo resultam de revisão da literatura. Este estudo objetivou criar uma síntese de conhecimento relacionado a impactos gerais de barragens, com foco no Rio São Francisco. Os im-

pactos discutidos são principalmente associados a alterações nas condições naturais da vazão, transporte de sedimentos, transporte de nutrientes e alteração de padrões naturais de salinidade no estuário.

2.1. Área de estudo

2.1.1. Geografia e clima da bacia hidrográfica

O Rio São Francisco tem suas nascentes no Estado de Minas Gerais e desemboca no Oceano Atlântico, na divisa entre os Estados de Sergipe e Alagoas (Figura 1). Seu comprimento é de 2.863 km, sendo que a área da bacia hidrográfica é de 639.219 km², o que a caracteriza como a mais extensa bacia hidrográfica exclusivamente

brasileira (7,5% do território nacional). Essa bacia é dividida em diferentes compartimentos fisiográficos e regimes climáticos. Tradicionalmente, subdivide-se em Alto, Médio, Submédio e Baixo São Francisco (Figura 1). De acordo com Bernardes (1951), o clima na bacia hidrográfica varia de tropical úmido a semiárido.

2.1.2. Geologia e geomorfologia do Submédio e Baixo São Francisco

A bacia é composta pelo Cretáceo, Terciário (Formação Barreiras) e Quaternário Deltáico. A Formação Barreiras, constituindo-se de tabuleiros, integra a maior parte do Submédio e Baixo São Francisco. A planície fluviomarina do Baixo São Francisco ocorre desde a cidade de Penedo (AL) — a 80 km da costa até o litoral — e é constituída de

superfícies planas, praticamente sem desníveis acentuados, formadas por sedimentos recentes, aluvionares, dunas eólicas e praias (Braz Filho 1980). No delta (A=800 km²) e na base dos tabuleiros encontram-se terraços marinhos Pleistocênicos, para o norte e nordeste destacam-se tabuleiros da Formação Barreiras (Dominguez 1996).



Figura 1

Subdivisões da bacia do Rio São Francisco.

Fonte: www.ana.gov.br.

2.1.3. Vegetação e uso do solo do Submédio e Baixo São Francisco

A vegetação predominante é a caatinga. A área total de caatinga densa, caatinga aberta e caatinga degradada corresponde a 24,58% da área total. A Mata Atlântica preservada e a Mata Atlântica degradada correspondem a 5,72% da área total. A vegetação de restingas corresponde

a 1,12%; a vegetação ciliar a 0,45%; a cobertura vegetal herbácea a 0,25%; o mangue a 0,13%; e o solo exposto a 0,04%. As áreas antropizadas com agricultura, pastagem e urbanização local correspondem em torno de 65,79% da área total (www.ana.gov.br).

2.1.4. A interface continente-oceano: ambientes estuarinos

O acoplamento (Figura 2) entre os quatro grandes compartimentos globais (litosfera, atmosfera, hidrosfera e biosfera) é a mais importante característica da interface continente-oceano e sua zona costeira (Crossland *et al.* 2005, Knoppers *et al.* 2009, Souza *et al.* 2011).

A interface continente-oceano/zona costeira representa um dos sítios principais que controlam o fluxo e o destino de água e matéria dos ciclos globais. Inclui o sistema de drenagem fluvial e a margem oceânica, com os estuários, as águas costeiras e as frentes oceânicas sobre a plataforma e/ou talude continental (IGBP-Loicz 1993).

Segundo Cameron e Pritchard (1963), “estuário é um corpo de água costeiro semi-fechado que apresenta uma livre conexão com o oceano aberto, no qual ocorre diluição da água marinha, pela água doce originada da drenagem continental”. Dessa forma, estuários são ambientes de transição

localizados na interface continente-oceano formados na embocadura de rios e lagunas.

Em condições naturais, os estuários são biologicamente mais produtivos do que os rios e o oceano adjacente, por apresentarem altas concentrações de nutrientes que estimulam a produção primária. São também locais de desova, crescimento, alimentação e refúgio para espécies marinhas e de água doce, além de espécies tipicamente estuarinas.

A grande maioria dos estuários atuais tem origem no afogamento dos vales dos rios ou reentrâncias costeiras, retrabalhamento de sedimentos ou deslocamento de geleiras. Esses processos ocorreram durante o mais recente período de elevação do nível do mar, subsequente ao último período glacial.

A conexão entre o Rio São Francisco e o Oceano Atlântico localiza-se na região dos Estados de Alagoas e Ser-

gipe, caracterizando um ambiente estuarino, sendo do ponto de vista geomorfológico um vale de rio inundado (Figura 4).

Sistemas estuarinos exportam detritos e nutrientes para águas costeiras e servem como áreas de lazer e recreação. Durante milhares de anos, diversas civilizações humanas têm vivido e prosperado em estuários ou próximos a estes. A existência e a taxa de atividade de comunidades biológicas em estuários e outros ecossistemas são largamente funções de processos físicos e químicos que transportam e transformam matéria para os organismos e também entre eles (Kemp 1987).

A química de águas estuarinas é dependente da composição da água doce, da água do mar, processos físicos, químicos e biológicos na zona de mistura. Os processos químicos, concentrações de determinados elementos e especiação apresentam diversos mecanismos reguladores, os quais variam em diversas escalas temporais e espaciais (Cloern & Nichols 1985). Em condições de maior aporte de água doce, ocorre o incremento de materiais transportados pelo rio, como elementos biogênicos (N, P, Si), material em suspensão, ácidos húmicos, dentre outros.

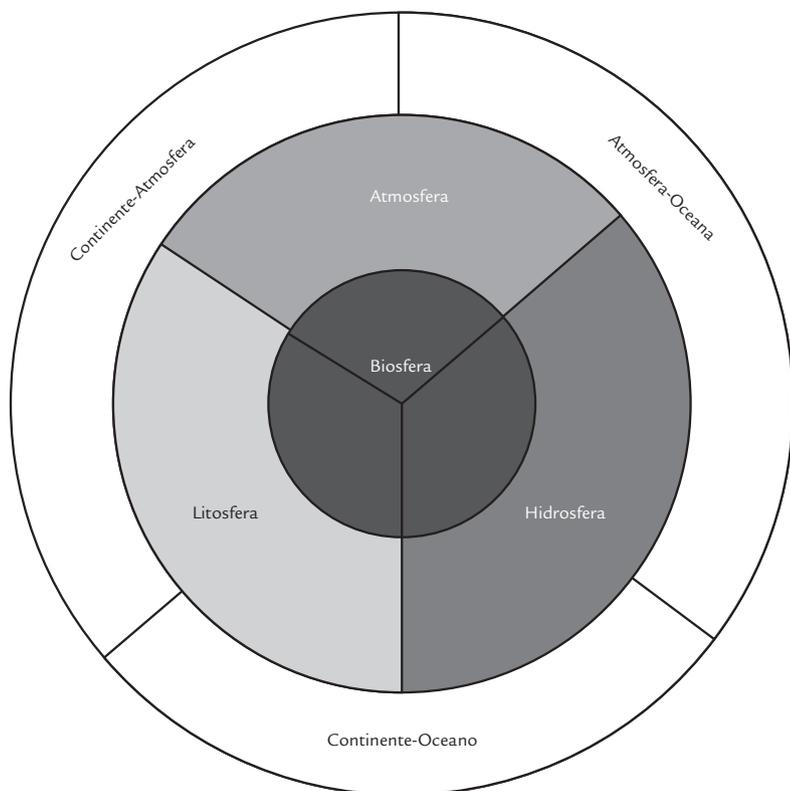


Figura 2
Diagrama do acoplamento dos principais compartimentos globais e a interface continente-oceano.

Fontes: Crossland *et al.* 2005, Souza *et al.* (2011).

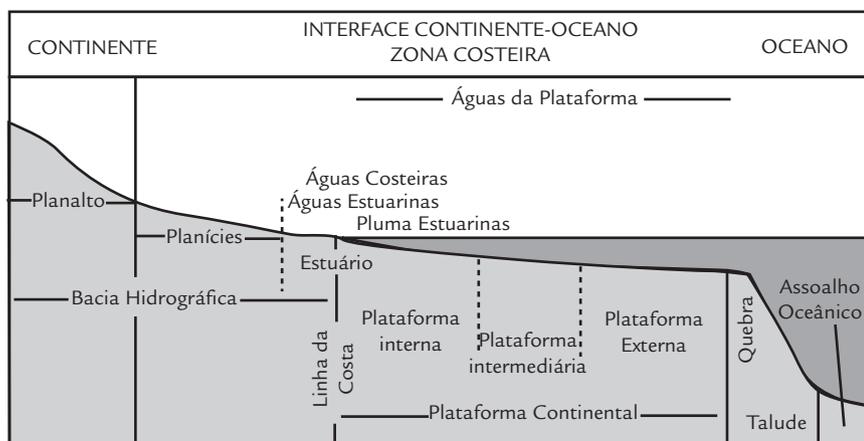


Figura 3
Caracterização da interface continente-oceano/zona costeira.
Fontes: Loicz (1993), Souza *et al.* (2011).

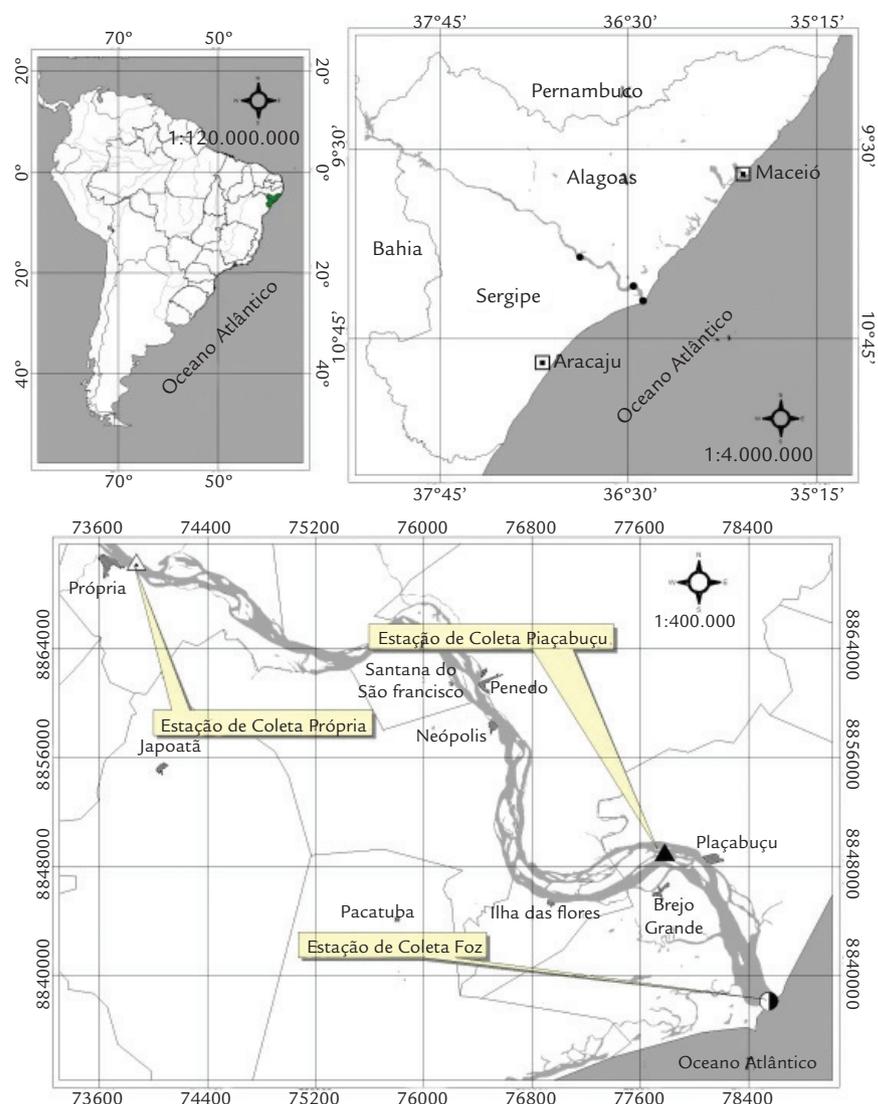


Figura 4
Destaque da região estuarina do Rio
São Francisco.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Barragens e impactos

3.1.1. Evolução temporal de barragens e impactos gerais

A construção de barragens destina-se a diversos usos, dentre os quais se destacam a geração de energia elétrica e o abastecimento de água.

No século passado existiu um rápido incremento na construção de grandes barragens (altura igual ou maior que 15 metros). A partir de 1949, em torno de 5.000 grandes barragens, com diversas finalidades, foram construídas em $\frac{3}{4}$ dos países industrializados. O período de crescimento econômico que se seguiu após a Segunda Guerra mostrou uma fenomenal elevação na taxa global de construção de barragens. Somente entre 1975 e 1980, foram construídas 5.000 grandes barragens.

Até o final do século 20, em torno de 45.000 grandes

barragens, em mais de 140 países, haviam sido construídas. O país que possui maior número de grandes barragens é a China, com 22.000, seguida dos EUA, com 6.575, Índia (4.291), Japão (2.675), Espanha (1.196), Canadá (793), Coreia do Sul (765), Turquia (625), e Brasil, com 594 grandes barragens (WCD 2000). Os reservatórios apresentam uma área global 400.000 km², com uma expansão anual de 3,5%.

As características químicas e físicas das águas de rios, bem como o fluxo de matérias para o oceano, foram originalmente controladas por fatores naturais.

Atualmente, as bacias de drenagem de praticamente todos os rios mundiais sofrem em menor ou maior escala influência antrópica. Essas pressões antrópicas têm progres-

sivamente aumentado, alcançando um patamar em que os sistemas de drenagem não podem ser mais definidos somente pelas relações climáticas e morfológicas naturais (Souza & Knoppers 2003). Dentre essas alterações destacam-se: urbanização, atividades agropecuárias, retirada de cobertura vegetal e instalação de barragens. A construção de barragens altera primeiramente o meio físico, reduzindo e estabilizando a vazão, e cria também ambientes de baixa hidrodinâmica.

A discussão sobre o impacto de barragens é de preocupação internacional (Vörösmarty *et al.* 1997, Hay 1998) e nacional (Tundisi *et al.* 1998, Knoppers *et al.* 1999, Souza *et al.* 2003).

As barragens promovem alterações físicas, químicas e biológicas na água e no sedimento, influenciando processos biogeoquímicos nos rios, estuários e ecossistemas costeiros de diversas maneiras. Outro efeito associado à instalação de represas é a modificação significativa do regime natural da descarga dos rios.

Os impactos causados por barragens em rios, estuários e região costeira são mundialmente conhecidos. Os rios Nilo, Ganges e Danúbio sofreram grande perda de recursos pesqueiros, decaimento da produtividade primária, redução da carga de nutrientes, desestabilização/erosão da linha de costa e intrusão

de água marinha nos seus deltas (Degens & Spitzky 1983, Halim 1991, Humborg *et al.* 1997). Enquanto que os deltas do Rio Volga, Mar Cáspio, Rio Don e Mar de Azov tiveram incremento da salinidade declínio da captura de peixes.

Ittekkot *et al.* (2000) destacam que a retenção de silicatos em reservatórios pode alterar a biogeoquímica marinha. Algumas barragens são responsáveis pela redução do número de espécies e consequente diminuição da biodiversidade.

As grandes barragens também são responsáveis, em alguns casos, pelo deslocamento de uma enorme quantidade de populações. Esse deslocamento provoca impactos sociais e culturais praticamente impossíveis de serem mitigados ou valorados. A WCD (2000) estima que o deslocamento físico de populações devido a grandes barragens está entre 40 a 80 milhões de pessoas. Dessa forma, fica claro que grandes barragens são responsáveis pelo maior “êxodo” na história da humanidade. No Rio São Francisco, a construção da barragem de Sobradinho provocou um deslocamento, segundo números oficiais, de 60.000 pessoas e uma área alagada de 4.214 km² (Pinguelli *et al.* 1988).

Grandes barragens apresentam também aspectos positivos, sendo que o mais evidente é a produção de energia elétrica.

3.1.2. Efeitos das barragens no Rio São Francisco

3.1.2.1. Hidrologia

A atividade de geração de energia hidroelétrica provocou grandes alterações nas condições naturais do Submédio e Baixo São Francisco (Medeiros *et al.* 2007, Medeiros *et al.* 2011), criando um sistema de cascata de barragens e reservatórios, ao longo do eixo principal do rio (Tabela 1).

As diversas barragens construídas provocaram grandes modificações nas vazões interanuais e no aporte de matéria em suspensão no Submédio e Baixo RSF (www.ana.gov.br; Medeiros *et al.* 2007). A Figura 5 apresenta uma série de vazões de 1936 a 2000, utilizando dados da estação fluviométrica da cidade de Traipú (AL). Após a conclusão da UHE (Usina Hidroelétrica) do Xingó, a vazão foi definitivamente regularizada para o patamar operacional na média de 2.060 m/s. Os picos de enchentes com vazões altas de 8.000 a 15.000 m/s, que

ocorriam naturalmente nos primeiros meses do ano (janeiro a março), foram notavelmente suavizados. A vazão atual é resultado do manejo integrado do sistema de barragens, sendo a barragem de Sobradinho a principal controladora.

Além da redução da variabilidade interanual e da magnitude da vazão (Tabela 2), o Baixo RSF sofreu drástico decréscimo na variabilidade sazonal da vazão (Figura 6). Os picos de enchentes (altas vazões) que ocorriam naturalmente nos primeiros meses do ano (janeiro a março) foram eliminados entre 1995 e 2001.

Exceções de variação dos padrões vazões regularizadas ocorrem somente em eventos climáticos esporádicos de seca e cheia (Figura 7), que ultrapassam a capacidade limite de controle das barragens (Medeiros *et al.* 2011).

UHE	Operação	Setor	Volume (km ³)	Potência (kw)
Três Marias	1952	Alto	21	387.600
P. Afonso I a IV	1955 a 1980	Submédio	0,1	180.000
Sobradinho	1980	Submédio	34	1.050.000
Itaparica	1988	Submédio	10,8	1.500.000
Moxotó	1978	Submédio	1,2	440.000
Xingó	1994	Baixo	3,8	3.000.000

Tabela 1
Principais usinas hidroelétricas, localização e volume de armazenamento das barragens no Rio São Francisco.

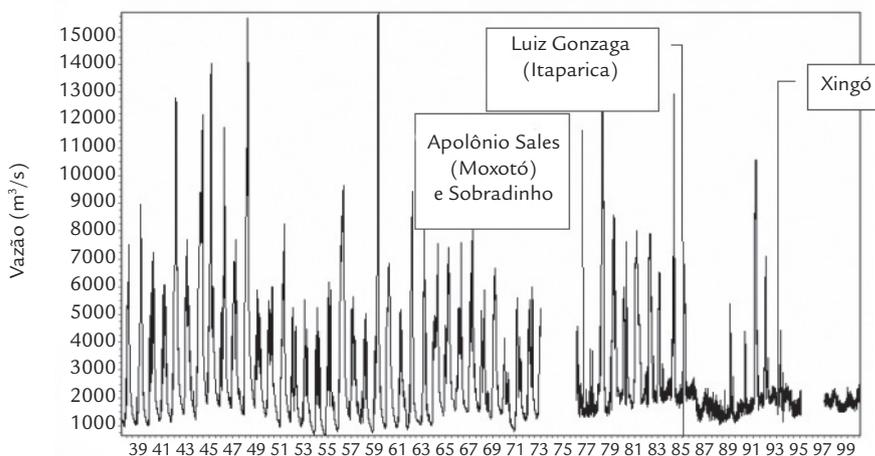


Figura 5
Vazões médias diárias da estação de Traipú (AL), no período 1936 a 2000.
Fonte: Medeiros *et al.* (2011).

Estágio	Média (m ³ /s)	Desvio-padrão (m ³ /s)	Mínimo (m ³ /s)	Máximo (m ³ /s)
1938-1973	3.010	850	1.768	5.244
1977-1985	3.136	824	1.916	4.019
1986-1994	2.204	749	1.498	3.779
1995-2001	1.760	235	1.405	1.980

Tabela 2
Média anual, desvio-padrão, mínimos e máximos da vazão da estação fluviométrica da cidade de Traipú (AL), dos quatro estágios hidrológicos identificados.
Fonte: Medeiros *et al.* 2007.

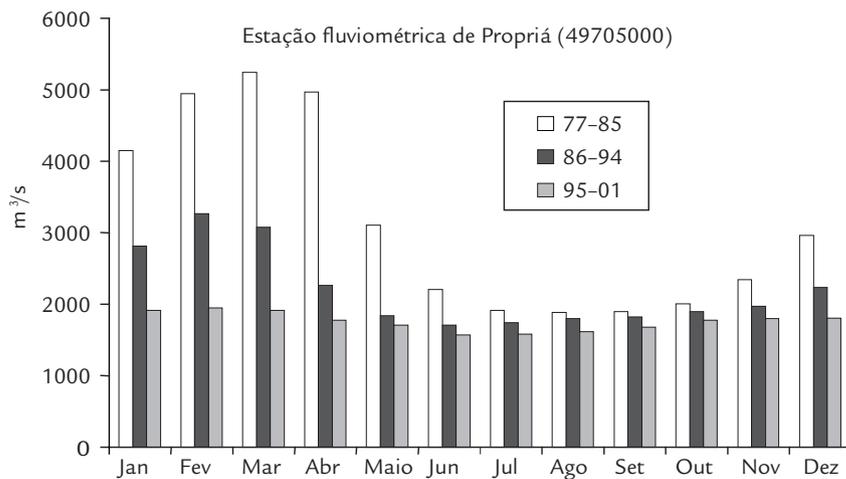


Figura 6
Variação das médias mensais da vazão da estação de Propriá (SE), referentes aos estágios identificados.
Fonte: Medeiros *et al.* (2007).

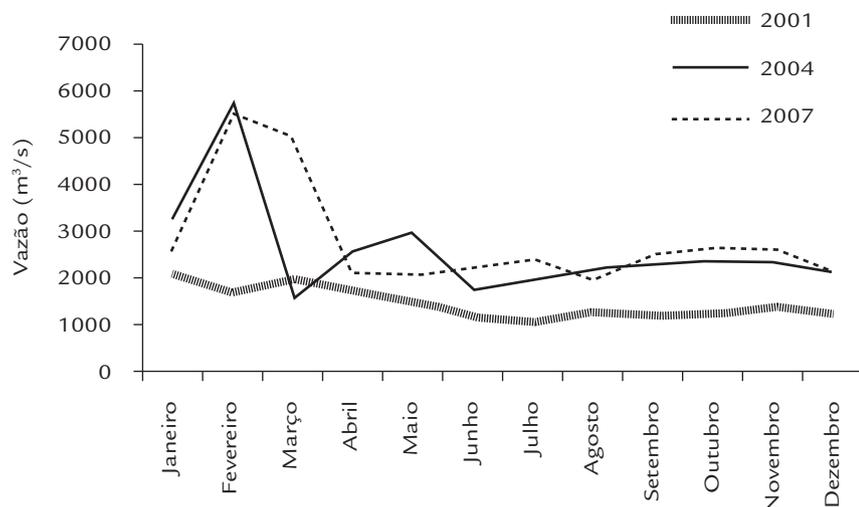


Figura 7
Vazões do Rio São Francisco durante anos 2001, 2004 e 2007 medidas na UHE do Xingó.
Fonte: Medeiros *et al.* (2011).

3.1.2.2. Transporte de material particulado em suspensão

A distribuição geográfica da precipitação nos setores fisiográficos da bacia do Rio São Francisco influi na produção de material particulado em suspensão.

Este comportamento sugere a possibilidade de vazões menores e com maior capacidade de transporte de materiais serem geradas por precipitações nas porções mais inferiores da bacia hidrográfica. Essas precipitações (Figura 8), além de incrementarem o escoamento superficial, principalmente nos setores com solos rasos e passíveis de erosão, ocorreram

no final do sistema de barragens em cascata, diminuindo, assim, a retenção de materiais e consequentemente o maior aporte em direção as porções inferiores da bacia (Medeiros *et al.* 2011).

Nessas situações, possivelmente ocorre a diminuição do tempo de residência de todo o sistema de barragens.

Quando comparados aos estudos pretéritos, em especial as determinações de Milliman (1975), os dados revelam uma drástica redução das descargas específicas (“Yield” ou rendi-

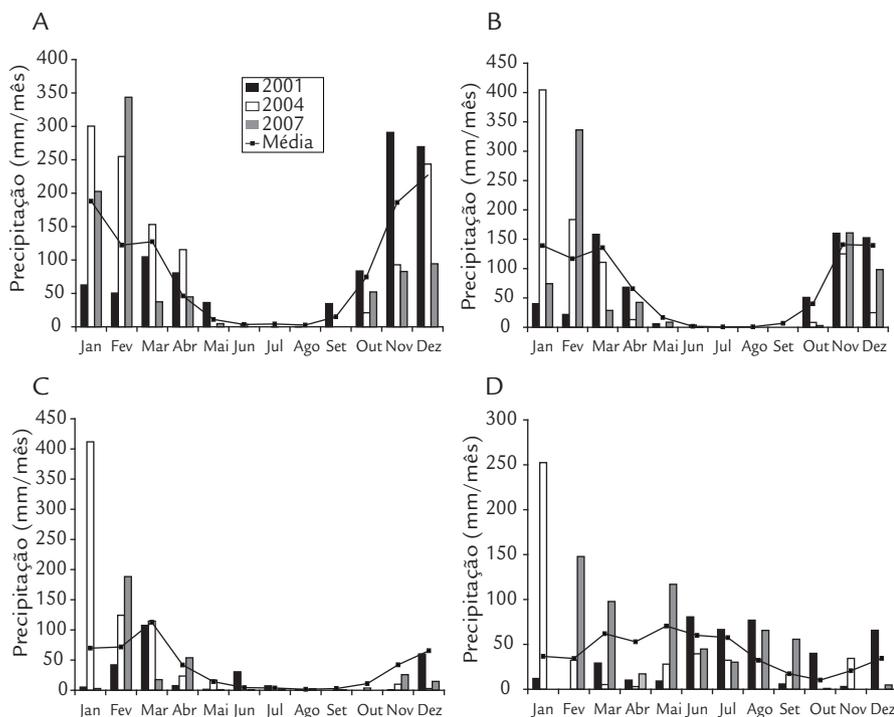


Figura 8
Distribuição mensal das chuvas nos anos de estudo e a média histórica nas estações do Alto (A), Médio (B), Submédio (C) e Baixo São Francisco (D).

mento). O rendimento (descarga específica) sofreu redução de valores em torno de 10 t/km².ano do período antes da instalação da maior parte das barragens, para valores atuais inferiores a 1 t/km².ano.

Também ocorreu a redução em torno de 50% dos valores de descarga de água doce (Tabela 2) no mesmo período, em virtude da acumulação pelos reservatórios (V=70,9 km³). Somente no evento extremo de precipitações no baixo curso, ocorrido no ano de 2004, em especial no mês de fevereiro, as descargas de água doce e material em suspensão e seus rendimentos alcançaram valores similares aos de 1975 (Tabela 3).

Bacias de drenagem de menores áreas (Tabela 3), como dos rios Magdalena (Colômbia), Pearl (China) e Chao Praya (Tailândia), apresentam proporcionalmente maiores descargas quando comparadas ao Rio São Francisco. O mesmo ocorre quando se compara os rios da Costa Leste Brasileira, como os rios Doce (ES) e Paraíba do Sul (RJ). Esse comportamento reflete o efeito de regime climático da bacia, localizada em grande parte no semiárido do Nordeste brasileiro, indicando também aumento do potencial de retenção pelas barragens de matéria oriunda dos setores mais úmidos da bacia, além da evaporação da água dos reservatórios.

Rios	Área (x10 ³ km ²)	Q (km ³ /a)	Q _s (10 ⁶ t/a)	Y (t/km ² /a)	Impactos
São Francisco 1975		97	6,0	9,4	
São Francisco 1983-1984		103	2,1	3,3	
São Francisco 1999-2000		71	0,4	0,7	
São Francisco 2001	640	47	0,2	0,3	Barragens
São Francisco 2004 (fevereiro)		66 (10)	7,7 (6,1)	12,1 (9,5)	
São Francisco 2007 (fevereiro)		95 (16)	1,1 (0,4)	1,7 (0,7)	
Paraíba do Sul	55	28	0,6	11	Erosão/ Barragens
Rio Doce	90	20	9,9	110	Erosão
Magdalena (Colômbia)	257	228	144	560	Erosão
Chao Phraya (Tailândia)	160	28	6	37,5	Barragens
Fly (Nova Guiné)	75		120	61	Erosão
Pearl (China)	450	220	40	89	Barragens

Tabela 3

Área de drenagem, descargas de água (Q), de sedimentos (Q_s) e rendimento (Y) para rios tropicais e subtropicais. Entre parênteses os valores mensais do aporte de água (km³/mês), sedimentos em suspensão (t/mês) e seu rendimento (t/km²/a).

Fonte: Medeiros *et al.* (2011).

3.1.2.3. Transporte de nutrientes (N, P, Si) e clorofila *a*

Os nutrientes inorgânicos dissolvidos sofreram reduções em seus fluxos para o oceano no período seguinte a instalações das barragens (Medeiros *et al.*, 2011). A variabilidade interanual entre os anos 2001, 2004 e 2007 se manifestou claramente nas concentrações de nutrientes, como também nas concentrações de Clorofila *a* (Tabela 4).

As concentrações de nitrogenados inorgânicos dissolvidos foram mais elevadas no ano de 2004 (Tabela 4), sendo que os anos estudados diferenciaram-se estatisticamente (p<0,05).

O aporte anual de nitrogênio inorgânico dissolvido apresentado por Santos (1993) para o ano hidrológico 1984-1985, com uma descarga fluvial de água de 100 km³, foi em torno de 69,6x10³ t/ano. Este valor é bastante superior do encontrado por Medeiros *et al.* (2011), referente ao ano de 2001, o qual foi de 4,1x10³ t/ano, com uma descarga fluvial de 52 km³. A diminuição drástica da carga de NID ocorreu em função da redução da vazão, mas também em razão das concentrações de nitrogênio inorgânico dissolvido.

A carga específica corresponde à carga anual normalizada pela área da bacia de drenagem ($t/km^2/ano$). É uma taxa importante que permite a comparação dos rendimentos entre outras bacias de drenagem, pois retira a influência do peso da área da bacia de drenagem na carga do elemento em questão (Milliman & Meade 1983).

O rendimento de nitrogênio inorgânico dissolvido de $0,006 t/km^2/ano$ (Medeiros *et al.* 2011) é extremamente baixo quando comparado ao valor de $0,11 t/km^2/ano$, calculado com os dados Santos (1993), relativo ao ano hidrológico 1984/1985. O Rio São Francisco também apresenta menor rendimento quando comparado aos rios tropicais de médio a grande porte (Tabela 5).

O rendimento atual do período pós-barragens de fósforo inorgânico dissolvido (PID) de $0,002 t/km^2/ano$ (Tabela 6) também pode ser considerado baixo, quando comparado aos demais rios tropicais de médio a grande porte, estando somente no patamar dos rios Zambezi e Tocantins. Os demais rios tropicais, tanto com bacias íngremes ou de baixo relevo, possuem cargas específicas de PID maiores, incluindo também os rios da Costa Leste (Souza *et al.* 2003).

Semelhante ao que ocorreu com as cargas de nitrogênio e fósforo, o fluxo anual de silicato também sofreu redução de 31%, após a construção do sistema de barragens em cascata (Medeiros *et al.* 2011).

As alterações físico-químicas provocadas pelas variações no tempo de residência de água e materiais e da exposição dos sedimentos dos reservatórios em cascata dificultam uma interpretação mais precisa do comportamento deste nutriente. Investigações mais aprofundadas do comportamento deste nutriente nos reservatórios e o balanço entre a assimilação e dissolução da sílica seriam necessários para a sua melhor compreensão. Em comparação aos demais rios tropicais úmidos (Tabela 7), o Rio São Francisco exibe baixa carga específica de silicato, superando apenas o Rio Zambezi, que também possui barragens.

As comparações das cargas específicas de nutrientes do Rio São Francisco com os demais rios tropicais evidenciam diferenças de relevo, tamanho, cobertura vegetal e impactos de barragens. O Rio São Francisco apresenta menores cargas específicas e fluxos de nutrientes em comparação aos demais rios tropicais, em razão da localização da cascata de barragens em região semiárida e por estar relativamente próximo a costa. A redução dos fluxos e da carga específica é governada pelo percentual da bacia controlada pelas barragens, que no Rio São Francisco alcança 96%, eliminando praticamente a capacidade da bacia a jusante das barragens recompor os fluxos tanto de água quanto nutrientes (Souza *et al.* 2003, Knoppers *et al.* 2005).

Variáveis	2001	2004	2007
N-NH ₃ ($\mu gN/L$)	29,9 \pm 32,8	46,3 \pm 39,7	10,2 \pm 8,3
N-NO ₂ ($\mu gN/L$)	1,17 \pm 1,1	6,6 \pm 3,8	2,9 \pm 1,9
N-NO ₃ ($\mu gN/L$)	66,1 \pm 60,6	181,6 \pm 166,6	44,2 \pm 68,7
P-PO ₄ ($\mu gP/L$)	4,7(\pm 4,9)	381,9 \pm 312,4	5,3 \pm 3,3
Si-SiO ₄ ($mgSi/L$)	10,3(\pm 3,1)	3,8 \pm 0,9	2,5 \pm 1,3
Clorofila ($\mu g/L$)	1,6(\pm 1,1)	1,7 \pm 1,6	1,3 \pm 0,9

Tabela 4

Média e desvio-padrão de nutrientes inorgânicos dissolvidos e clorofila *a*.

Rio	NID ($t/km^2/ano$)	Área Bacia ($10^6 km^2$)	Deflúvio Anual (km^3)	País
Madalena (*)	0,292	0,24	237	Colômbia
Purari (*)	0,220	0,03	84,13	Papua
Paraíba do Sul (**)	0,180	0,05	28	Brasil
Amazonas (*)	0,173	6,11	6,590	Brasil
Orinoco (*)	0,119	1,10	1,135	Venezuela
São Francisco (#)	0,110	0,64	100	Brasil
Tocantins (*)	0,074	0,76	372	Brasil
Zaire (*)	0,031	3,70	1,200	Zaire
Zambezi (*)	0,010	1,33	106	Moçambique
São Francisco(##)	0,006	0,64	52	Brasil

Tabela 5

Comparação das cargas específicas de NID entre rios tropicais úmidos de médio e grande porte.

Fontes: *Meybeck e Ragu (1995), **Carneiro (1998), #Santos (1993) e ##Medeiros *et al.* (2011).

Tabela 6

Comparação das cargas específicas de PID entre rios tropicais úmidos de médio e grande porte.

Fontes: *Meybeck e Ragu (1995),

**Carneiro (1998), #Medeiros et al. (2011).

Rio	PID	Área Bacia	Deflúvio Anual	País
	(t/km ² /ano)	(10 ⁶ km ²)	(km ³)	
Madalena (*)	0,121	0,24	237	Colômbia
Paraíba do Sul (**)	0,020	0,05	28	Brasil
Amazonas (*)	0,024	6,11	6,590	Brasil
Orinoco (*)	0,010	1,10	1,135	Venezuela
Zaire (*)	0,008	3,70	1,200	Zaire
Purari (*)	0,005	0,03	84,13	Papua
São Francisco (#)	0,002	6,40	52	Brasil
Zambezi (*)	0,001	1,33	106	Moçambique
Tocantins (*)	0,001	0,76	372	Brasil

Tabela 7

Comparação das cargas específicas de SiD entre rios tropicais úmidos de médio e grande porte.

Fontes: *Meybeck e Ragu (1995),

**Carneiro (1998), #Santos (1993) e

##Medeiros et al. (2011).

Rio	SiD	Área Bacia	Deflúvio Anual	País
	(t/km ² /ano)	(10 ⁶ km ²)	(km ³)	
Madalena (*)	5,942	0,24	237	Colômbia
Amazonas (*)	3,479	6,11	6,590	Brasil
Orinoco (*)	3,040	1,10	1,135	Venezuela
Tocantins (*)	2,666	0,76	372	Brasil
Zaire (*)	1,426	3,70	1,200	Zaire
São Francisco (#)	1,020	0,64	100	Brasil
São Francisco (##)	0,710	0,64	52	Brasil
Zambezi (*)	0,626	1,33	106	Moçambique

3.1.2.4. Salinidade do estuário

A salinidade é um importante fator ecológico no ambiente estuarino, em razão do estresse osmótico que provoca nos organismos. Em condições naturais, o tipo e a extensão da intrusão salina em um ambiente estuarino dependem de forçantes oceanográficas (marés, ondas, ventos), da geomorfologia do estuário e do fluxo fluvial. Segundo Cloern e Nichols (1985), a variação do fluxo fluvial é o melhor entendido componente para a variabilidade anual de ambientes estuarinos.

Em condições naturais existe uma variabilidade anual do fluxo fluvial: um período de alta vazão (estação chuvosa) e um período de baixa vazão (estação seca). Períodos de baixo fluxo fluvial favorecem a entrada de espécies marinhas no estuário com a finalidade de alimentação e reprodução, favorecem também maior distribuição geográfica de espécies estuarinas em direção a partes superiores do estuário. Essas situações são associadas a uma maior distribuição geográfica da salinidade. Em períodos de maior fluxo fluvial ocorre menor intrusão salina, ocorrendo o favorecimento a predominância de espécies límnicas, em detrimento a espécies estuarinas e marinhas.

No estuário do Rio São Francisco, a variabilidade natural associada à variação do fluxo anual de água doce do Rio

São Francisco não existe mais. A construção de barragens em cascata ao longo do curso principal do rio eliminou a variabilidade interanual. Em razão dessa perda da variabilidade anual do fluxo de água doce, a intrusão salina, na forma de cunha salina ou outra estrutura salina, está relativamente estacionária, ou seja, com pouco deslocamento horizontal (Figura 9). A intrusão salina está localizada entre a foz, até em torno de 6 km desta.

Maiores deslocamentos da cunha salina no interior do estuário somente acontecem em condições de baixa vazão. Segundo Medeiros (2003), ocorreu grande intrusão salina no mês de junho de 2001 para o interior do estuário, chegando a atingir 10 km em relação foz, com uma salinidade de 2 g/L na água de fundo. A vazão nesse período estava reduzida a 1.148 m³/s, favorecendo maior intrusão salina, mesmo em condições de maré de quadratura. Medeiros et al. (2008) classificaram o estuário do Rio São Francisco como uma cunha salina.

As vazões afluentes no rio são determinantes para a intensidade da salinidade no estuário, assim como a sua extensão a montante da foz, sendo a vazão o principal fator controlado pelo homem que determina a magnitude e extensão da cunha salina no estuário.

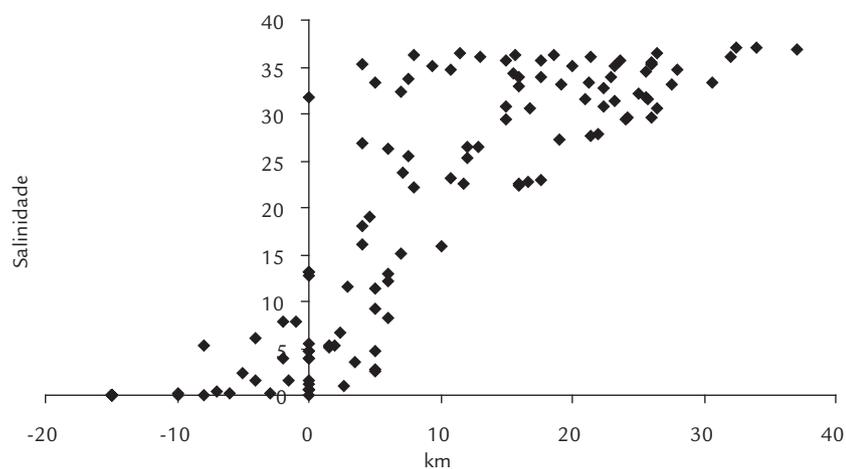


Figura 9

Comportamento da salinidade superficial em relação à distância da desembocadura.

Fonte: Medeiros (2003).

4. CONCLUSÕES

O Rio São Francisco apresenta uma série de impactos ambientais, os quais são comuns a outros rios que sofreram processos de barramento. Os impactos são mais notáveis no Baixo São Francisco, em razão das barragens em cascata a montante. O Baixo Rio São Francisco sofreu uma redução da magnitude da vazão, além da perda da pulsação sazonal e interanual.

A variabilidade da vazão somente ocorre em eventos climáticos extremos de elevadas precipitações, os quais superam a capacidade de retenção das barragens. Também ocorre em eventos de secas, quando o gerenciamento da vazão tende ainda ser mais intenso, visando maximizar a produção de energia hidroelétrica.

Concomitantemente a alterações dos padrões naturais de vazão, ocorreu diminuição do aporte de nutrientes e sedimentos em suspensão a região costeira. Isso é particularmente negativo para a região costeira, pois naturalmente a bacia do São Francisco apresenta tendência de pouca produção de materiais em relação a outras bacias com área semelhante ou mesmo menor. A presença de correntes de contorno, as quais tendem a carrear rapidamente os materiais transportados pelo rio, contribui para as condições oligotróficas da região costeira adjacente.

A estabilização da vazão mantém a intrusão salina no estuário relativamente estagnada em relação às condições naturais, somente variando em função de eventos climáticos extremos.

5. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq projetos Instituto do Milênio Estuários CNPq/MCT Proc. n° 420.050/2005-1 e CNPq INCT-TMCOcean Proc. n° 573.601/2008-9.

6. REFERÊNCIAS

- ANA. Agência Nacional de Águas. Disponível em: <http://ana.gov.br>. Acessado em 2 de set de 2011.
- Bernardes L.M.C. 1951. Notas sobre o clima da bacia do Rio São Francisco. *Revista Brasileira de Geologia*, Rio de Janeiro 13(3):473-89.
- Braz Filho P.A. 1980. Prospecto turfa (Baixo rio São Francisco). Salvador, CPRM/SUREG. (Relatório C.C. 2606/010), 27 p.
- Cameron W.M. & Pritchard D.W. 1963. Estuaries. In: *The Sea*, v. 2. New York, Ed. MN Hill, 306-24.
- Carneiro M.E. 1998. Origem, transporte e destino de matéria biogênica e hidrocarbonetos no estuário do Rio Paraíba do Sul. Tese de Doutorado. Departamento de Geoquímica, Universidade Federal Fluminense, p. 196.
- Cloern J.E. & Nichols F.H. 1985. Time scales and mechanisms of estuarine variability a synthesis from studies of San Francisco Bay. *Hidrobiologia*, 129:229-37.

- Crossland, C.J.; Kremer, H.H.; Lindeboom, H.J. (eds). 2005. Coastal Fluxes in the Anthropocene. The Land-Ocean Interactions In The Coastal Zone. Project of the International Geosphere-Biosphere Programme. Global Change - The IGBP Series, Springer, Berlin.
- Day J.W., Hall A.S., Kemp W.M., Yañez-Arancibia A. 1989. *Estuarine Ecology*. Wiley & Sons, New York, 558 p.
- Degens E.T., Kempe S. & Soliman H. 1983. Transport of carbon as minerals in major world rivers. *Geologisch- Palaontologisches Institut, Universitat Hamburg*, 55(1):2-33.
- Dominguez J.M.L. 1996. The São Francisco strandplain: a paradigm for wave-dominated deltas *In: De Batist M., Jacobs P. (Eds.). Geology of siliclastic shelf seas*. Geological Society, London. *Special Publication 117*, p. 217-234.
- Halim Y. 1991. The impact of human alterations of the hydrological cycle on ocean margins. *In: Mantoura R.F.C., Martin J.M. & Wollast R. (Eds.). Ocean Margin Processes in Global Change*. John Wiley & Sons, New York, p. 301-28.
- Hay W.W. 1998. Detrital sediment fluxes from continents to oceans. *Chemical Geology*, 145:287-23.
- Humborg C., Ittekkot V., Cociacasu A. & Bodungen B. Von. 1997. Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure. *Nature*, 386:385-88.
- IGBP-LOICZ. 1993. LOICZ Scientific Steering Committee Second Meeting. Texel, The Netherlands. LOICZ/SSC.2. Disponível em: <http://www.Loicz.org>. Acessado em 10 set 2011.
- Ittekkot V., Humborg C. & Schäfer P. 2000. Hydrological alterations and marine biogeochemistry: a silicate issue. *BioScience*, 50(9):776-82.
- Kemp W.M. Estuarine Chemistry. 1987. *In: Day J.W. et. al Estuarine Ecology*. New York, *Willey Interscience Publication*, p. 79-143.
- Knoppers B., Ekau W., Figueiredo A.G. 1999. The coast and shelf of east and northeast Brazil and material transport. *In: Bouma A.H., Knoppers B., Ekau W. (Eds.). Sedimentation processes at the East and Northeast Brazil Shelf. Geo-marine Letters*, 19(3):171-78.
- Knoppers B., De Souza W.F.L., Ekau W., Figueiredo A.G., Soares-Gomes A. 2009. A Interface Terra-Mar do Brasil. Cap. 22. *In: Pereira R.C., Soares-Gomes A. (Orgs.). Biologia Marinha*. Editora Interciência, RJ, p. 529-53.
- Medeiros P.R.P. 2003. Aporte fluvial, transformação e dispersão da matéria em suspensão e nutrientes no estuário do Rio São Francisco, após a construção da Usina Hidroelétrica do Xingó (AL/SE). Tese de Doutorado. Departamento de Geoquímica, Universidade Federal Fluminense, 184 p.
- Medeiros P.R.P., Knoppers B.A., Santos Junior R.C., Souza W.F.L. 2007. Aporte fluvial e dispersão da matéria particulada em suspensão na zona costeira do estuário do rio São Francisco (SE/AL). *Geochimica Brasiliensis*, 21(2):209-28.
- Medeiros P.R.P., Oliveira A.M., Lima E.L.R., Hernandez A.O., Silva W.F. Abordagem preliminar da intrusão salina no estuário do Rio São Francisco (AL/SE). *In: Anais do III Congresso Brasileiro de Oceanografia*, p. 1-3.
- Medeiros P.R.P., Knoppers B.A., Cavalcante G.H., De Souza W.F.L. 2011. Changes in nutrient loads (N, P and Si) in the São Francisco Estuary after the construction of dams. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 54(2):387-97.
- Medeiros P. R. P., Knoppers B., Souza W. F. L., Oliveira E.N. 2011. Aporte de material em suspensão no Baixo Rio São Francisco (SE/AL), em diferentes condições hidrológicas. *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*, 15(1):42-53.
- Meybeck M. & Ragu A. 1995. River discharges to the oceans: an assessment of suspended solids, major ions and nutrients. UNEP, 246 p.
- Milliman J.D. 1975. A Synthesis. *In: Upper continental Sedimentology*, Stuttgart, v. 4, p. 151-75.

- Milliman J.D. & Meade R.H. 1983. World-Wide Deleverly of River Sediment to the Oceans. *Journal of Geology*. 91:1-21.
- Milliman J.D. 1991. Flux and fate of fluvial sediment and water in coastal seas. In: Mantoura R.F.C., Martin J.M. & Wollast R. (Eds.). *Ocean Margin Processes in Global Change*, John Wiley & Sons, p. 60-90.
- Pingueli L., Sigaud L. & Mielnik O. 1998. Impactos de Grandes Projetos Hidroelétricos e Nucleares, São Paulo, *Marco Zero*, 199 p.
- Santos C.M.M. 1993. Geoquímica do carbono e nitrogênio orgânico particulado transportados durante um ano hidrológico (1984-1985) pelo rio São Francisco, Brasil, e transferidos ao seu estuário. Dissertação Mestrado, UFBA, 70 p.
- Souza W.L.F & Knoppers B. 2003. Fluxos de água e sedimentos a costa leste do Brasil: relações entre a tipologia e as pressões antrópicas. *Geochimica Brasiliensis*, 17(1):57-74.
- Souza W.F.L., Medeiros P.R.P., Brandini N., Knoppers B. 2011. Impactos de barragens sobre os fluxos de materiais na interface continente-oceano. *Revista Virtual de Química* 3(2): 116-28. Disponível em: <http://www.uff.br/rvq>. Acessado em 10 set 2012.
- Tundisi J.G., Matsumura-Tundisi T., E Braga. 1998. Reservoir management in South America. *World Water Developments*, 14(2):141-45.
- Vörösmarty C.J., Meybeck M., Fekete B. E. & Sharma K. 1997. The potential impact of neo-Castorization on sediment transport by the global network of rivers. In: Walling D.E. & Probst J.L. (Eds.). *Human Impact on Erosion and Sedimentation*. IAHS Press, Wallinford, p. 261-73.
- WORLD COMISSION ON DAMS (WCD). 2000. Dams and Development: a new framework for decision-making. *Thanet Press*, 399 p.