

Artigo

Impactos de Barragens sobre os Fluxos de Materiais na Interface Continente-Oceano

Souza, W. F. L.;* Medeiros, P. R. P.; Brandini, N.; Knoppers, B.

Rev. Virtual Quim., 2011, 3 (2), 116-128. Data de publicação na Web: 29 de junho de 2011

<http://www.uff.br/rvq>

Dams Impacts upon the fluxes of biogenic matter

Abstract: Dams impacts are usually associated with the formation of artificial lakes, population displacements and loss of continental habitats. However, but not less significant, are the impacts upon the fluxes of water and materials to the coastal zone with severe quantitative and qualitative alterations which may cause saline water intrusion and coastal erosion, loss of estuarine and coastal zone fertility and the alterations of regional and global biogeochemical cycles. The present article, presents a brief review on the theme by incorporating Brazilian examples addressed by the work group from the Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Transferência de Materiais Continente-Oceano (INCT-TMCOcean).

Keywords: Suspended matter; Nutrients; Reservoirs.

Resumo

Os impactos de barragens são geralmente associados aos transtornos causados pela criação do lago artificial, com o deslocamento de populações e a perda de habitats continentais. No entanto, não menos relevantes são os impactos sobre a transferência de água e materiais para a zona costeira com significativas alterações quantitativas e qualitativas que vão desde a intrusão de água salina e desestabilização da costa, passando pela perda da fertilidade dos estuários e da zona costeira até a alteração dos ciclos biogeoquímicos regionais e globais. Neste artigo é realizada uma breve revisão do tema com a utilização de exemplos nacionais de trabalhos desenvolvidos pelo grupo de trabalho do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Transferência de Materiais Continente-Oceano (INCT-TMCOcean).

Palavras-chave: Matéria em suspensão; Nutrientes; Reservatórios.



* Divisão de Química Analítica, Instituto Nacional de Tecnologia, Avenida Venezuela, 82, Sala 210, Praça Mauá, 20801-312, Rio de Janeiro-RJ, Brasil.

✉ weber.landim@int.gov.br

DOI: [10.5935/1984-6835.20110016](https://doi.org/10.5935/1984-6835.20110016)

Impactos de Barragens sobre os Fluxos de Materiais na Interface Continente-Oceano

Weber F. L. de Souza,^{a,*} Paulo R. P. de Medeiros,^b Nilva Brandini,^c Bastiaan Knoppers^c

^a Divisão de Química Analítica, Instituto Nacional de Tecnologia. Av. Venezuela 82 sala 210, Praça Mauá, Rio de Janeiro, RJ 20801-312, Brasil.

^b IGDEMA/LABMAR, Universidade Federal de Alagoas. Av. Aristeu de Andrade 452, Farol, Maceió, AL 5702-090, Brasil.

^c Departamento de Geoquímica, Universidade Federal Fluminense. Campus do Valonguinho, Outeiro de São João Batista s/n, Centro, Niterói, RJ 24020-141, Brasil.

*weber.landim@int.gov.br

Recebido em 3 de maio de 2011. Aceito para publicação em 8 de junho de 2011

1. Introdução
2. Bacias de drenagem
3. Processos naturais de retenção da matéria
4. Impactos antrópicos sobre as bacias de drenagem
5. Impactos de barragens sobre o fluxo de materiais
6. Impactos sobre os fluxos de água e sedimentos
7. Retenção e transformação de materiais
8. Fluxos de materiais em bacias impactadas por barragens
9. Conclusões

1. Introdução

O acoplamento entre os quatro grandes compartimentos globais (litosfera, atmosfera, hidrosfera e biosfera) é a mais importante característica da interface continente-oceano e sua zona costeira (Figura 1). Como resultado disto, a zona costeira se apresenta como um sistema extremamente importante sob diversos aspectos socioeconômicos e biogeoquímicos que necessitam serem melhores compreendidos e gerenciados.¹

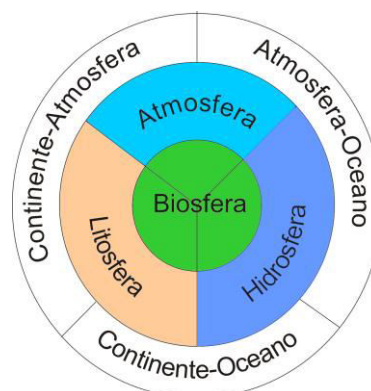


Figura 1. Diagrama do acoplamento dos principais compartimentos globais e a interface continente-oceano²

A zona costeira pode ser considerada como a

interface entre os continentes e os oceanos, que têm seus processos biogeoquímicos sustentados, principalmente, pelos aportes fluviais, pelas interações entre o compartimento pelágico (i.e coluna d'água) e bêntico (i.e sedimentos) e pelas forçantes físicas oceanográficas. 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 (Figura 2).^{3,4,5,6} As margens oceânicas compreendem aproximadamente 10% da superfície e 0.5% do volume dos oceanos⁷, mas, no entanto, sustentam de 25 a 30% da produção primária marinha global como resultado da fertilização de nutrientes por diversas fontes (atmosfera, rios, aquíferos, e ressurgências costeiras), e das interações entre o sistema pelágico e bêntico na plataforma continental.⁸⁻¹¹

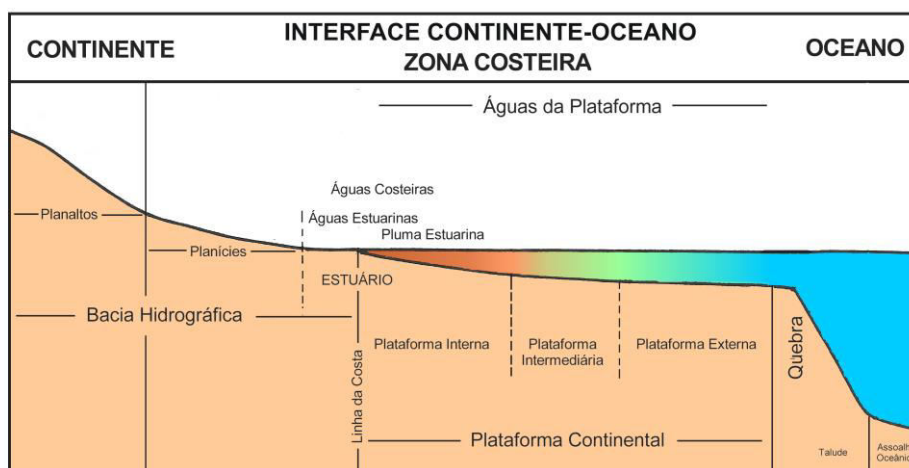


Figura 2. Caracterização da interface continente-oceano/zona costeira^{5,12}

2. Bacias de Drenagem

As bacias de drenagem ou bacias hidrográficas podem ser definidas como a área superficial drenada parcial ou totalmente por um ou por vários cursos de

água. A concentração de materiais (Figura 3) em um rio é controlada por diversos fatores naturais da bacia de drenagem, dentre os quais se destacam: a geologia, geomorfologia, pedologia, cobertura vegetal natural, uso do solo e fatores climáticos, dentre outros.

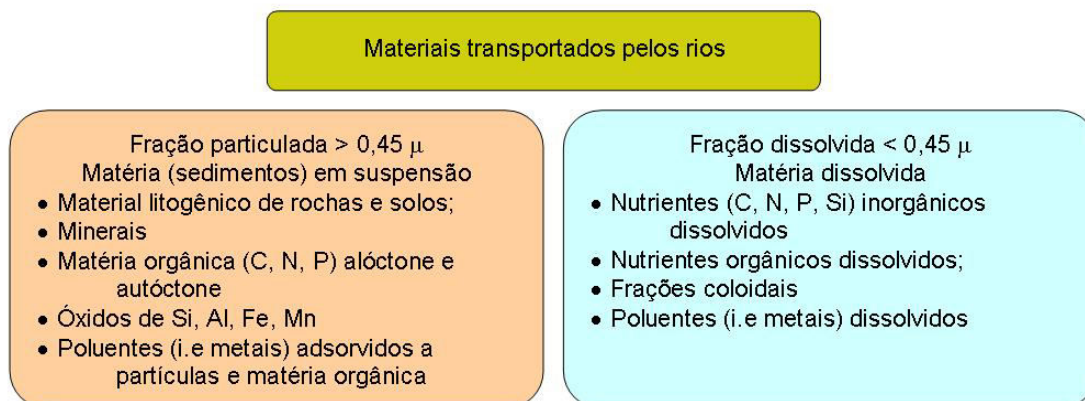


Figura 3. Definição e exemplos dos tipos de materiais transportados pelos rios. Definição operacional entre frações particuladas e dissolvidas de 0,45 μ ($1 \mu = 10^{-6} \text{ m}$)

Embora a maior parte das estimativas globais dos fluxos de materiais para a interface continente-oceano considere principalmente a contribuição dos grandes rios, o aporte somatório de pequenas e médias descargas pode, em algumas regiões, atingir impacto semelhante aos dos grandes rios, como é o caso do Sudeste da Ásia e da Oceania, ou ainda possuir importância regional como os rios da costa Leste do Brasil. Os rios com pequenas bacias de drenagem, de regiões montanhosas situadas próximas à costa, geralmente apresentam maior rendimento (fluxo ponderado pela área da bacia de drenagem). A falta de amplas planícies ao longo do curso diminui a capacidade de retenção e transformação da matéria e da água, e o material é eficientemente transportado à região jusante ao mar.^{13,14}

3. Processos naturais de retenção da matéria

O material em suspensão e o material biogênico (matéria orgânica e nutrientes (C, N e P)) de fontes terrestres são transportados ao longo de rios, lagunas, estuários e águas costeiras, até os oceanos. A maioria destes sistemas representa compartimentos acoplados, funcionando como uma sucessão de filtros, continuamente retendo e transformando material.^{10,15,16} Cada um destes compartimentos modifica a quantidade e a qualidade do material transportado. Os principais processos que determinam o grau de retenção, transformação, e exportação, são a magnitude e a pulsação do aporte, o balanço hídrico e o tempo de residência das águas do compartimento receptor, processos físico-químicos entre partículas e o material dissolvido na água e no sedimento, e a eficiência da reciclagem interna.

4. Impactos antrópicos sobre as bacias de drenagem

Diversas atividades antrópicas nas bacias de drenagem alteram a pulsação, magnitude, e a natureza do aporte de água e material transportado aos estuários e a zona costeira.^{17,18} O desmatamento, a agricultura, e a agropecuária, aumentam o escoamento superficial e o transporte de nutrientes. Quando acoplado ao uso de fertilizantes, o impacto nos rios e nos estuários é multiplicado. Estimativas revelaram, que teores de carbono e nutrientes em

rios de regiões com uso intensivo do solo, desmatamento e expansão demográfica, aumentaram de 4 a 10 vezes no último século.¹⁹⁻²¹ A eutrofização (processo que leva ao crescimento acelerado e intenso da biomassa de algas ou do fitoplâncton devido as altas concentrações de nutrientes N e P) das águas costeiras e dos mares enclausurados é fato consumado em grande parte do mundo, resultado da fertilização de nutrientes pela descarga excessiva de efluentes domésticos e agrícolas.²²⁻²⁴

Outras atividades que causam grandes impactos são obras de drenagem e barragens. A canalização e dragagem de rios aumentam a amplitude e o aporte de água, sedimentos, e nutrientes. Ao contrário, barragens retêm e transformam o material, e modificam a pulsação natural do fluxo de água e material associado, alterando a capacidade de transporte dos mesmos e podendo ainda provocar erosão à jusante. O metabolismo das comunidades estuarinas e o padrão de migração de diversas espécies que utilizam estuários como berçários, é sensivelmente alterado. Os rios Nilo e Ganges são exemplos clássicos, com grande perda de recursos pesqueiros, decaimento da produtividade primária, desestabilização da costa, e intrusão de água marinha nos seus deltas, após a construção de barragens.²⁵⁻²⁸ Nas décadas de cinquenta, sessenta e setenta, do século passado, houve grande estímulo para a construção de barragens, resultando em uma área global de reservatórios na ordem de 400.000 km², com uma expansão de $\pm 3.5\%$ por ano.^{10,13,17,25}

As pressões antrópicas têm progressivamente aumentado, alcançando um patamar em que os sistemas de drenagem não podem ser mais definidos somente pelas relações climáticas e morfológicas naturais. Fatores antrópicos, como o uso do solo, a retirada da cobertura vegetal natural e a construção de barragens, dependendo da sua magnitude e intensidade, tendem a alterar a dinâmica natural dos fluxos de materiais em uma bacia e seu transporte a interface continente-oceano.²⁹⁻³¹

5. Impactos de barragens sobre o fluxo de materiais

As pressões ambientais oriundas da construção de reservatórios atuam sobre a quantidade, qualidade e distribuição ao longo do ano no transporte de água, sedimentos em suspensão e materiais dissolvidos e particulados. As barragens retêm, alteram a pulsação natural e transformam os materiais dissolvidos e

particulados, gerando drásticas alterações no funcionamento dos ecossistemas costeiros (estuários e águas costeiras). Nos dias atuais, é cada vez mais escassa a existência de bacias de drenagem sem a influência humana e dentre estas a construção de barragens representa apenas um destes impactos. O desmatamento, a urbanização e as atividades agropecuárias apresentam impactos antagônicos aos

das barragens, aumentando a amplitude do aporte de água, sedimentos, e nutrientes, podendo resultar em maiores taxas de sedimentação, assoreamento, maiores aportes de poluentes, redução na salinidade, alteração do metabolismo e diversidade das comunidades estuarinas, e na eutrofização (Figura 4).^{10,13,17,25,26,30}

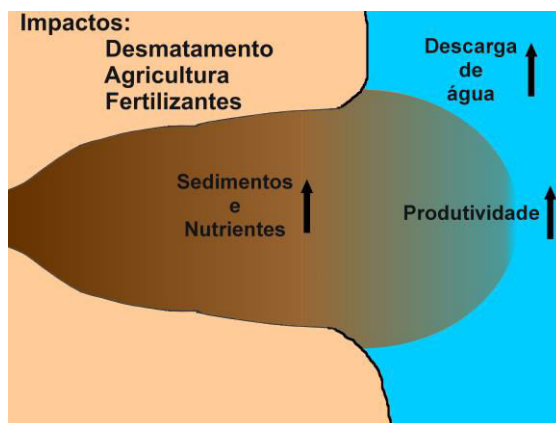


Figura 4. Diagrama conceitual dos impactos do desmatamento, da agricultura e do uso de fertilizantes sobre os fluxos de materiais à interface continente-oceano, que aumentam os fluxos de água, sedimentos em suspensão, nutrientes e a produtividade da interface continente-oceano. O aumento da produtividade e na descarga de nutrientes pode levar a eutrofização das águas costeiras

6. Impactos sobre os fluxos de água e sedimentos

A grande variedade no tipo de barragens e reservatórios, e suas estratégias operacionais de acumulação e liberação dos fluxos, introduzem uma considerável incerteza sobre as alterações no regime hidrológico e por consequência sobre a retenção de sedimentos e nutrientes.³² O lago artificial formado

pela barragem apresenta características que em princípio seriam semelhantes aos lagos naturais com seu ecossistema podendo ser associado às características climáticas, geológicas, físico-químicas e biológicas, entre outras, mas com o controle no balanço de materiais, no caso de UHE's (usinas hidroelétricas), sendo determinado principalmente pelas demandas energéticas (Figura 5).

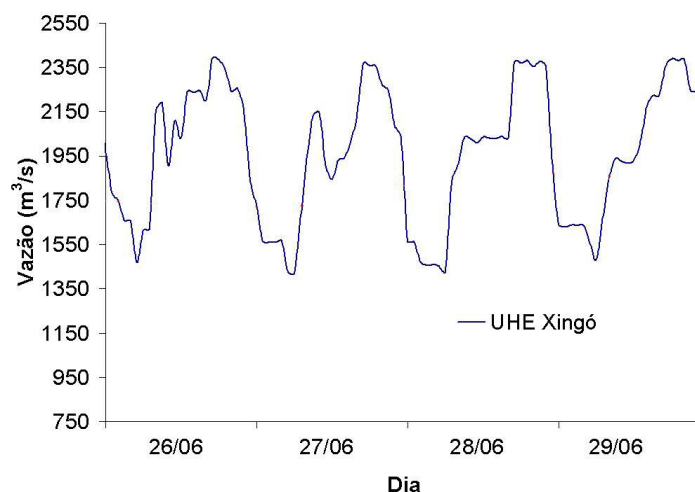


Figura 5. Vazão horária liberada pela UHE Xingó (rio São Francisco) em junho de 2000. Na figura pode-se observar a variabilidade diária superior a 700 m³/s em função da demanda de energia elétrica³³

As novas condições de fluxo introduzidas pela barragem resultam não somente na redução da quantidade de água transportada e na atenuação dos picos de descarga, mas também na alteração dos padrões diários e anuais (Figuras 5 e 6). Ao longo do dia as flutuações nos fluxos de água atendem a demanda energética da usina que em geral são consideravelmente maiores do que durante a noite ou nos finais de semana, e ao longo da temporada chuvosa ocorre à acumulação de água para utilização durante o período seco,³² padrão este também observado nas descargas de água pela UHE Xingó, no

Rio São Francisco³³ (Figura 5). Este padrão de diminuição da amplitude de vazões máximas e mínimas, da amplitude sazonal e aumento na variabilidade diária são observados em bacias de drenagem da costa Leste do Brasil (i.e Rios Doce e Paraíba do Sul) e de forma mais acentuada na bacia do rio São Francisco onde um sistema de 7 barragens em cascata provocou um dos mais acentuados exemplos do impacto de barragens em território nacional e em especial nos fluxos de água e matéria em suspensão (Figura 7).^{31,34-37}

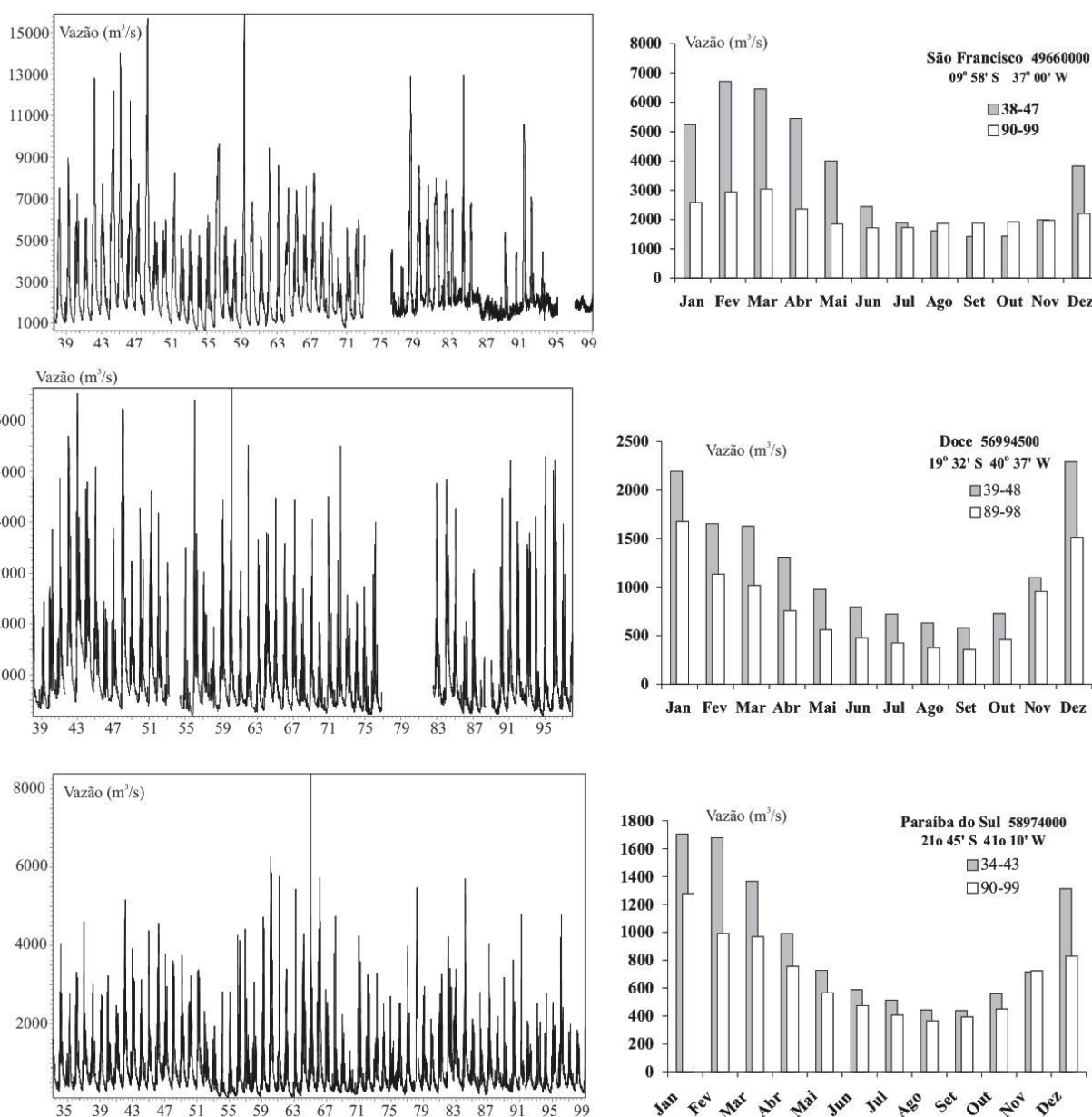


Figura 6. Vazões históricas e hidrógrafos mensais do início e fim da série temporal para os rios São Francisco, Doce e Paraíba do Sul. Nos gráficos observa-se a diminuição da amplitude das vazões e achatamento da variabilidade sazonal^{31,34}

O estabelecimento da barragem implica ainda em um desacoplamento dos fluxos de água e sedimentos em suspensão que por sua vez interagem com a morfologia do canal fluvial a jusante. A relação entre a capacidade de transporte do fluxo de água e a descarga de sedimentos do reservatório em conjunto com a relação entre a erosividade do fluxo e erodibilidade das margens determinarão as alterações que, em longo prazo, produzirão as novas condições de estabilidade (Figuras 8 e 9).³² Exemplos claros do desacoplamento do material em suspensão, retenção de sedimentos pela barragem, diminuição nos fluxos de água doce e material em suspensão, e perda da

capacidade de transporte de sedimentos em suspensão pelos rios barrados são encontrados nos rios São Francisco, Jequitinhonha e Paraíba do Sul. Estes são os mais evidentes impactos das barragens, observados pela população e pelos meios de comunicação,³⁸⁻⁴⁰ sobre os fluxos de água e material em suspensão que levam ao assoreamento da calha fluvial, desestabilização e erosão da costa que perde o equilíbrio dinâmico e sazonal entre os fluxos fluviais de suprimento de materiais e a remoção/retrabalhamento destes materiais realizado pelas forçantes oceanográficas.

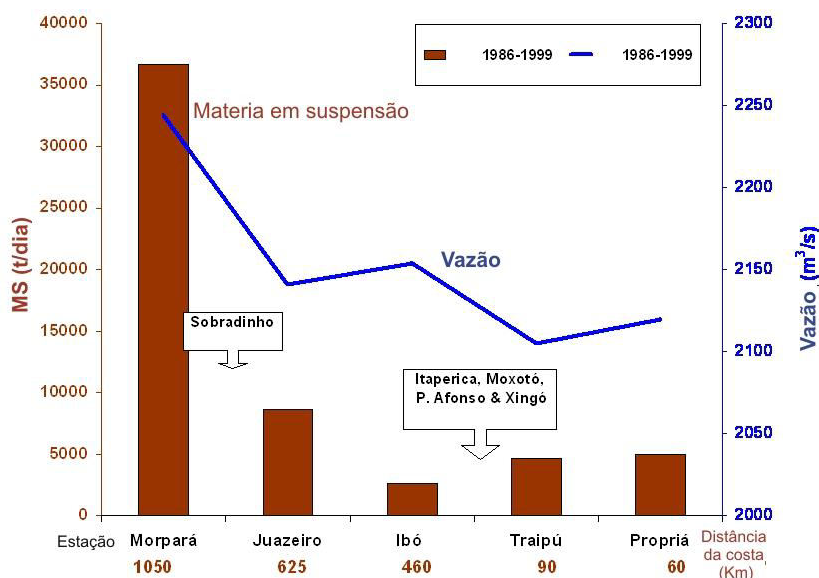


Figura 7. Decréscimo nos fluxos de água e matéria em suspensão no período de 1986-1999 entre as estações fluviométricas de Morpará (1050 Km da costa) e Própria (60 Km da costa). Observa-se a acentuada redução nos fluxos de matéria em suspensão promovida pela barragem de Sobradinho (entre Morpará e Juazeiro). Os sistemas de barragens de Itaperica à Xingó apresentam maior influência sobre os fluxos de água, neste setor a dinâmica fluvial e os processos erosivos contribuem para um ligeiro aumento nos fluxos de matéria em suspensão



Figura 8. Rio Jequitinhonha, próximo a Itapebi (BA), em setembro, esquerda, e dezembro de 2000, direita. Observa-se a elevada variabilidade sazonal nos fluxos de água e matéria em suspensão (i.e. 50 e 30000 t/d, setembro e dezembro de 2000 respectivamente) antes da construção das barragens de Irapé e Itapebi.³⁴



Figura 9. Desacoplamento do fluxo de água e material em suspensão devido à perda de energia na entrada do rio São Francisco (água turvas na parte superior - sistema lótico, com maior energia) no reservatório de Sobradinho (águas azuis na parte inferior - sistema lêntico, com baixa energia)⁴¹

O parâmetro que atua de forma mais significativa sobre as alterações nos fluxos de sedimentos em suspensão, é a eficiência de retenção (ER) do lago artificial formado pela barragem. A ER representa o percentual de retenção de matéria em suspensão promovida pela barragem, basicamente em função do desacoplamento dos fluxos de água e sedimentos, oriundo da perda de energia do fluxo, aumento do tempo de residência e consequente sedimentação de material no reservatório. Este fator é frequentemente um problema a vida útil dos reservatórios e aos ecossistemas da foz.^{29,42,43}

O estágio atual do conhecimento reconhece o papel das barragens na retenção e transformação dos materiais, resultando na modificação da pulsação natural dos fluxos de água e materiais associados. Embora as variáveis introduzidas pela ação humana, na construção de reservatórios e na alteração do uso do solo, possam causar diferentes níveis de impactos, a desestabilização da costa e a intrusão de água marinha nas planícies costeiras, estão frequentemente associados ao impacto de barragens em função da retenção dos fluxos de água e sedimentos em suspensão.^{10,13,17,25,26}

7. Retenção e transformação de materiais

As transformações que ocorrem nos reservatórios atuam de forma diferenciada em parâmetros abióticos, como os sedimentos em suspensão (Figura 7), e bióticos, como os nutrientes nitrogênio (N), fósforo (P) e sílica (Si). Enquanto os sedimentos em suspensão são, em grande parte, retidos pela

barragem, os nutrientes são alterados pela maior ciclagem e tempo de residência no lago artificial que representa um novo ecossistema. Este novo ecossistema gerado pelo homem promove modificações, através de processos físico-químicos e principalmente biológicos, na quantidade e qualidade dos fluxos de nutrientes, em especial nas razões de nutrientes (nitrogênio: fósforo: sílica), alterando o metabolismo e a diversidade das comunidades estuarinas, e de forma geral atuando na redução da produtividade primária e estoques pesqueiros.^{10,13,17,25,26,30,44} Evidências neste sentido foram observadas nos rios Paraíba dos Sul e de forma mais acentuada no rio São Francisco, onde as razões SiD:NiD (silício e nitrogênio inorgânicos dissolvidos) alcançaram valores na ordem de 100:1, ou seja empobrecidos em nitrogênio, e longe da ideal 1:1 ao crescimento e manutenção das populações de diatomáceas, que representam os principais produtores primários (base da rede trófica) no ambiente marinho (Figura 10).^{35,45}

É interessante observar que a literatura descreve em extensão, em especial em ambientes temperados, o papel das barragens na retenção de silicatos dissolvidos através da produtividade primária (produção de matéria orgânica) por diatomáceas (que possuem carapaça a base de silício) e sua sedimentação nos reservatórios como opala biogênica.^{46,47} No entanto estudos realizados na costa leste do Brasil nas diferentes bacias de drenagem impactadas por diferentes níveis de barragens, que a relação entre ao rendimento de sílica (aportes/fluxos normalizados pela área da bacia de drenagem e o *runoff* (aporte/fluxo de água normalizado pela área da bacia de drenagem) permanecem inalterado

independentemente da intensidade de barragens nas bacias.^{34,48}

A eutrofização das águas costeiras é frequentemente associada à construção de barragens pelas alterações provocadas na quantidade e qualidade de nutrientes, modificações na biodiversidade e na cadeia trófica.^{46,47,49,50} As alterações nas concentrações de nutrientes (C, N, P e Si) e da partição orgânico/inorgânico, dissolvido/particulado são promovidas nos reservatórios pela alteração de um sistema fluvial dominado pelos aportes alóctones para um sistema lacustre onde a produção de matéria orgânica

autóctone domina, alterando os ciclos biogeoquímicos dos nutrientes⁵¹. Como resultado desta acumulação de matéria nos reservatórios, a bacia à jusante tende a oligotrofia (pouco nutrido com baixas concentrações de nutrientes N e P, e baixa biomassa de algas ou fitoplâncton) devido aos baixos aportes de nutrientes. No entanto, devido ao aumento do tempo de residência e das pressões antrópicas do aporte de nutrientes, como o crescimento populacional a jusante do barramento, estes sistemas tendem a ser impactados pelo processo de eutrofização.⁵²

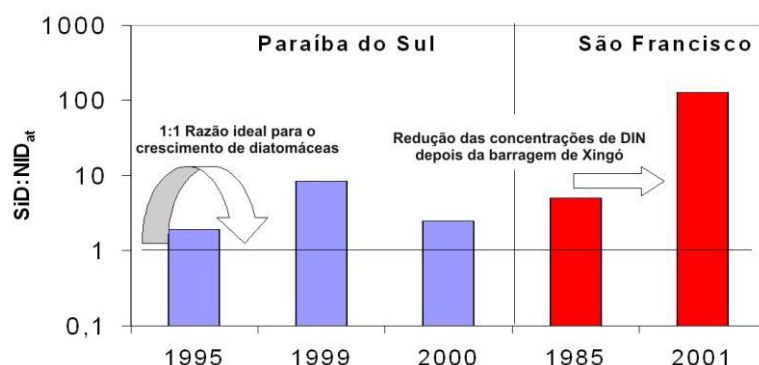


Figura 10. Razão de silício e nitrogênio inorgânicos dissolvidos (SiD:NID) em amostragens nos estuários dos rios Paraíba do Sul e São Francisco. A intensa redução dos teores de nitrogênio no rio São Francisco pode estar associada a processos de denitrificação no reservatório da UHE Xingó, cuja proximidade da costa e ausência de outras fontes significativas inviabiliza a recuperação das concentrações de NID que ocorre no rio Paraíba do Sul

Por sua vez, o comportamento dos metais em sua concentração, composição e partição são em muito influenciados pela geologia regional, mas também podem estar associados à expansão demográfica e agricultura. Os metais-traço que são usualmente associados a fontes difusas incluem o Cd, Co, Cu, Ni, Cr, Mn e Zn. Em uma escala global estes metais-traço somente ocorrem em baixas concentrações. Em escala regional concentrações elevadas destes elementos podem indicar fontes antropogênicas. As fontes difusas destes elementos podem incluir o escoamento de áreas urbanas (fonte de Ni, Pb, Zn e Cu),⁵³ enquanto a drenagem de áreas sujeitas a agricultura fertilizada são frequentemente impactadas por Cd e As.⁵⁴⁻⁵⁶ Em águas naturais os metais podem existir nas frações dissolvida, coloidal e particulada em suspensão. As proporções destas formas variam para os diferentes metais e para os diferentes sistemas como resultado de condições ambientais locais como a litologia, biota, pH e o potencial redox.^{57,58} No entanto, como resultado dos processos de adsorção/desorção as partículas finas e a matéria orgânica, floculação e coagulação de

espécies coloidais, a fração particulada é enriquecida e tende a ocorrer a acumulação nos sedimentos, onde a concentração é muito maior do que na água. Mais do que 50%, e até 99.9%, do total de metais presentes nas águas naturais está usualmente adsorvido a partículas em suspensão, o que é particularmente relevante quando da avaliação da descarga de metais em rios.⁵⁹⁻⁶¹ Desta forma, o processo de erosão fluvial e transporte, governados primordialmente pela variação da descarga de água, governam a mobilização e dispersão de metais e modificam suas concentrações através da diluição, erosão das margens e escoamento superficial enquanto os depósitos aluviais e nos reservatórios das barragens podem estocá-los.⁶² No entanto, são escassos os estudos neste sentido, necessitando de maiores estudos em especial em reservatórios localizados em área industriais, sob elevada carga de efluentes domésticos ou ainda sob intensa atividade da agricultura intensiva.

8. Fluxos de materiais em bacias impactadas por barragens

Como visualizado até o momento, as barragens podem apresentar diferentes níveis de impactos, mas

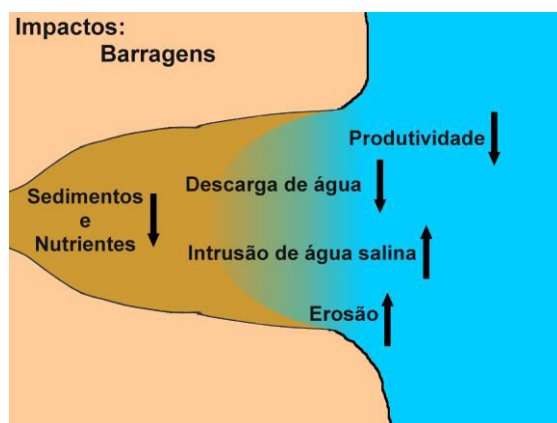


Figura 11. Diagrama conceitual dos impactos das barragens sobre os fluxos de materiais à interface continente-oceano, que diminuem os fluxos de água, sedimentos em suspensão, nutrientes e a produtividade da interface continente-oceano. A diminuição destes fluxos permite ainda o aumento da intrusão salina e da erosão costeira

São poucos os estudos nacionais sobre os fluxos de água e materiais para a zona costeira e em geral sua extensão não engloba os períodos pré e pós-barragem. Por exemplo, a Agência Nacional de Águas (ANA- <http://www.ana.gov.br>) possui um banco de dados com extensão variável, mas apenas para os grandes rios brasileiros alcança períodos desde a década de 30 do século passado. Já os dados de materiais/sedimentos em suspensão disponibilizados pela ANA, englobam, em geral não mais de uma década e de frequência máxima de quatro amostragens por ano. Já no caso dos fluxos de matéria biogênica, a maior parte dos estudos foi realizada por pesquisadores da UENF, UFF e UFAL, em especial para os rios Paraíba do Sul e São Francisco aonde maiores séries temporais vêm sendo obtidas após o período de construção das barragens.

Os dados sobre os fluxos dos principais rios da costa Leste e Nordeste do Brasil são sumarizados na Tabela 1, onde se pode observar os rios ao sul com maiores aportes de água doce e sedimentos em suspensão, e com fluxos de P e N na mesma ordem de grandeza do que o rio São Francisco. Isto se justifica pelo clima mais úmido ao Sul e pela presença de barragens mais distantes da costa em seu médio/baixo curso permitindo ainda contribuições pela bacia a jusante da barragem, ao contrário do rio

de uma forma geral reduzem a transferência e os fluxos de água, matéria em suspensão e materiais dissolvidos para a interface continente-oceano aumentando a intrusão salina, a erosão e reduzindo a produtividade das águas costeiras (Figura 11).

São Francisco que apresenta parte da bacia em clima semiárido e uma cascata de barragens com a última situada em seu baixo curso a 180 Km da costa levando a severos impactos nos fluxos de sedimentos/matéria em suspensão. Outro grande exemplo do impacto de barragens é observado no rio Jaguaribe (CE), onde o impacto das barragens associado ao clima semiárido da bacia leva a baixos fluxos de água e sedimentos em suspensão. O rio Paraíba com parte da bacia situada em clima úmido apresenta maiores fluxos em relação ao rio Jaguaribe, mas ainda inferiores aos do somatório das bacias de drenagem da costa Leste do Brasil, de mesma ordem de grandeza da bacia de drenagem.

Os estudos realizados na costa Leste do Brasil revelam ainda que os fluxos de nitrogênio, fósforo e sílica dissolvidos e o percentual de bacia interceptado pelo último barramento não revela relação aparente. Isto leva a crer que outros fatores na operação dos reservatórios (como o tempo de residência dos reservatórios) e/ou os múltiplos impactos (em especial o desmatamento e a agropecuária a jusante da barragem) possam apresentar grande influência sobre os fluxos de materiais aos ecossistemas costeiros e por consequência sobre as alterações em sua estrutura e funcionamento.⁴⁸

Tabela 1. Fluxos de água, sedimentos em suspensão e fósforo e nitrogênio inorgânicos dissolvidos (PID e NID) nos principais rios da costa Leste e Nordeste do Brasil.^{31,36,48,63} O somatório dos rios da costa Leste engloba a estimativa de 23 rios (inclusive dos rios Jequitinhonha, Doce e Paraíba do Sul). Os dados do rio Jequitinhonha se referem ao período pré- barragem de Itapebi próxima a costa em seu baixo curso

Rio	Área da bacia de Drenagem (10 ⁶ km ²)	Água (Km ³ /ano)	Sedimentos em suspensão (10 ⁶ t/ano)	DIP (10 ⁶ mol/d)	DIN (10 ⁶ mol/d)
Parnaíba	0,33	16,5	2,7		
Jaguaribe	0,07	4,4	0,0		
São Francisco	0,63	60	0,8	0,4	6,4
Σ Rios da Costa leste	0,55	137	31,6	0,6	7,9
Jequitinhonha	0,07	13,9	8,2	0,3	0,6
Doce	0,08	26,9	12,7	0,1	1,8
Paraíba do Sul	0,06	22,0	4,2	0,1	3,3

9. Conclusões

O fenômeno global de crescente construção de barragens para geração de energia hidroelétrica e abastecimento é considerado uma das atividades humanas mais impactantes das alterações hidrológicas que afetam a natureza das concentrações e fluxos de nutrientes. Embora a retenção de nutrientes seja frequentemente observada nos reservatórios das barragens, no caso do nitrogênio e fósforo pode existir uma compensação antrópica por parte dos aportes de efluentes domésticos e da agricultura (fertilizantes), em especial a jusante da barragem. A retenção de sílica nestes reservatórios, através da sedimentação de opala biogênica, é tida como um dos efeitos mais deletério das barragens sobre a estrutura e funcionamento de estuários e ambientes costeiros, devido à ausência de uma compensação natural ou antrópica de suas concentrações e fluxos. Estudos sobre as mudanças na composição do aporte fluvial de nutrientes de rios à costa evidenciaram a presença de modificações da biodiversidade do plâncton e da rede trófica em função deste tipo de impacto.

Estudos pretéritos e em andamento, revelam a dificuldade em identificar as fontes das alterações em bacias sujeitas a múltiplos impactos, por vezes antagonicos, como os dos rios da bacia do Atlântico Leste. Mesmo quando do estudo de bacias de drenagem com a origem dos impactos bem definidos, como o caso do baixo rio São Francisco (SE/AL), influenciado pela Barragem da UHE Xingó, outros fatores como a variabilidade climática, a dinâmica do reservatório, o aumento relativo da contribuição dos efluentes e os requisitos operacionais da usina

hidroelétrica, representam complicadores na avaliação dos impactos observados. No entanto, um dos fatores que parece ser primordial aos impactos a zona costeira e ecossistemas associados é a capacidade de recuperação dos fluxos na bacia de drenagem, originário principalmente no desenvolvimento das atividades humanas a jusante da barragem. Na ausência de séries temporais de maior extensão e devido aos múltiplos impactos a que estão sujeitas as bacias de drenagem, somente é visualizada uma influência significativa e perceptível na redução dos fluxos de água e sedimentos em suspensão, em casos extremos como a cascata de grandes barragens na bacia do Rio São Francisco ou nos casos onde é percebida a desestabilização da costa ou ainda em casos de significativa perda de produtividade/fertilidade das águas costeiras. Os estudos nos rios da costa Leste do Brasil revelam que somente a influência da intensidade dos barramentos não explica o comportamento dos fluxos de materiais. Os impactos das barragens, sua dimensão, operação e tempo de residência, associados ao potencial de recarga da bacia pelos múltiplos impactos do desmatamento, agropecuária e ocupações populacionais a jusante da barragem podem apresentar grande influência sobre os fluxos de materiais aos ecossistemas costeiros e, por consequência, sobre as alterações em sua estrutura e funcionamento.

Agradecimentos

Ao CNPq através dos projetos Instituto do Milênio Estuários CNPq/MCT Proc. No. 420.050/2005-1 e

CNPq INCT-TMCOcean Proc. No. 573.601/2008-9, e bolsas a B. Knoppers (PQ) 1C e N. Brandini (PDJ).

Referências Bibliográficas

- ¹ Bodungen, B.; Turner, R. K.; *Science and Integrated Coastal Management*, Dahlen University Press: Berlin, 2001.
- ² Sítio do International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP). Disponível em: <<http://www.igbp.kva.se/page.php?Pid=186>>. Acesso em: 20 janeiro 2011.
- ³ Holligan, P.; *IGBP Report 14 – Coastal Ocean Fluxes and Resources*, IGBP Secretariat: Stockholm, 1990.
- ⁴ Mantoura, R. F. C.; Martin, J. -M.; Wollast, R.; *Ocean margin Processes in Global Change*, John Wiley & Sons: Chichester, 1991.
- ⁵ Pernetta, J. C.; Milliman, J. D.; *IGBP Report 33 – The Land-Ocean Interactions in Coastal Zone implementation plan*, IGBP Secretariat: Stockholm, 1995.
- ⁶ Kremer, H. H.; Tissier, M. D. A.; Burbridge, P. R.; Talaue-McManus, L.; Rabalais, N. N.; Parslow, J.; Crossland, C. J.; Young, B.; *IGBP Report 51 – Land Ocean Interactions in Coastal Zone – Science Plan and Implementation Strategy*, IGBP Secretariat: Stockholm, 2005. [Link]
- ⁷ Walsh, J. J.; *On the Nature of Continental Shelves*, Academic Press Inc.: New York, 1988.
- ⁸ Costlow, J. D. Jr.; *Fertility of the Sea*, Gordon & Breach: New York, 1967.
- ⁹ Blackburn, T. H., Em *Ocean Margin Processes in Global Change*; Mantoura, R. F. C.; Martin, J. -M.; Wollast, R., eds., John Wiley & Sons: Chichester, 1991.
- ¹⁰ Billen, G.; Lancelot, C.; Meybeck, M. Em *Ocean Margin Processes in Global Change*; Mantoura, R. F. C.; Martin, J. -M.; Wollast, R., eds.; John Wiley & Sons: Chichester, 1991.
- ¹¹ Nixon, S. W.; Amerman, J. W.; Atkinson, L. P.; Berounsky, V. M.; Billen, G.; Boicourt, W. C.; Boynto, W. R.; Church, T. M.; Ditoro, D. M.; Elmgrem, R.; Garber, J. H.; Giblin, A. E.; Jahnke, R. A.; Owens, N. J. P.; Pilson, M. E. Q.; Seitzinger, S. P. *Biogeochemistry* **1996**, 35, 141. [CrossRef]
- ¹² Knoppers, B.; Souza, W. F. L.; Ekau, W.; Figueiredo, A. G.; Gomes, A. S.; *Biologia Marinha*, Pereira, R. C.; Gomes, A. S., eds.; 2a ed., Editora Interciência: Rio de Janeiro, 2009, cap. 22.
- ¹³ Milliman, J. D. Em *Ocean Margin Processes in Global Change*; Mantoura, R. F. C.; Martin, J. -M.; Wollast, R., eds., John Wiley & Sons: Chichester, 1991.
- ¹⁴ Milliman, J. D. *UNESCO R M*, **1992**, 64, 56.
- ¹⁵ Turner, A.; Millward, G. E. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **2002**, 55, 857. [CrossRef]
- ¹⁶ Meybeck, M. *Philosophical Transactions of The Royal Society B* **2003**, 358, 1935. [CrossRef] [PubMed]
- ¹⁷ Hopkinson, C. S. Jr.; Vallino, J. J. *Estuaries and Coasts* **1995**, 18, 598. [CrossRef]
- ¹⁸ Odum, W. E.; Odum, E. P.; Odum, H. T. *Estuaries and Coasts* **1995**, 18, 547. [CrossRef]
- ¹⁹ Billen, G.; Garnier, J. *Aquatic Microbial Ecology* **1997**, 13, 3. [CrossRef] [Link]
- ²⁰ Billen, G.; Garnier, J.; Chloé, D.; Billen, C. *Sci. Total Environ.* **1999**, 243/244, 43. [CrossRef]
- ²¹ Fraser, A. I.; Harrod, T. R.; Haygarth, P. M. *Water Science and Technology* **1999**, 39, 41. [CrossRef]
- ²² Lancelot, C.; Billen, G.; Barth, H.; *Eutrophication and algal blooms in North Sea coastal zones, the Baltic and adjacent areas: Prediction and assessment of preventive actions - Water Pollution Research Report 12*, Commission of the European Communities: Brussels, 1990.
- ²³ Bricker, S. B.; Stevenson, J. C. *Estuaries and Coasts* **1996**, 19, 337. [CrossRef]
- ²⁴ Rabalais, N. N.; Nixon, S. W. *Estuaries and Coasts* **2002**, 25, 639. [CrossRef]
- ²⁵ Halim, Y. Em *Ocean Margin Processes in Global Change*; Mantoura, R. F. C.; Martin, J. -M.; Wollast, R., eds., John Wiley & Sons: Chichester, 1991.
- ²⁶ Sinha, M.; Mukhopadhyay, M. K.; Mitra, P. M.; Bagchi, M. M.; Karamkar, H. C. *Estuaries and Coasts*, **1996**, 19, 710. [CrossRef]
- ²⁷ Stanley, D. J. *Marine Geology* **1996**, 129, 189. [CrossRef]
- ²⁸ World Commission on Dams; *Dams and Development: a new framework for decision-making*. Earthscan Publications Ltd: London, 2000. [Link]
- ²⁹ Vorosmarty, C. J.; Sharma, K. P.; Fekete, B. M.; Copeland, A. H.; Holden, J.; Marble, J.; Lough, J. A. *Ambio* **1997**, 26, 210. [Link]
- ³⁰ Milliman, J. D. Em *Encyclopedia of Ocean Sciences*; Steele, J. H.; Turekian, K. K.; Thorpe, S. A., eds., Academic Press: Oxford, 2001.
- ³¹ Souza, W. F. L.; Knoppers, B. *Geochimica Rev. Virtual Quim.* |Vol 3| |No. 2| |116-128|

Brasiliensis **2003**, 17, 57. [Link]

³² Brandt, S. A. *Catena*, 2000, 40, 375. [CrossRef]

³³ Medeiros, P. R. P. *GEF São Francisco – subprojeto 1.1B Determinação da Carga de Nutrientes do São Francisco na Região da Foz*, GEF/OEA/ANA, 2003. [Link]

³⁴ Souza, W. F. L.; *Tese de Doutorado*, Universidade Federal Fluminense, Brasil, 2002. [Link]

³⁵ Knoppers, B.; Medeiros, P. R. P.; Souza, W. F. L.; Jennerjahn, T. Em *Handbook of Environmental Chemistry - Water Pollution: Estuaries*, Wangersky, P. J., ed., Springer-Verlag: Heidelberg, 2006. [Link]

³⁶ Medeiros, P. R. P.; Knoppers, B.; Santos Junior, R. C.; Souza, W. F. L. *Geochimica Brasiliensis* **2007**, 21, 212. [Link]

³⁷ Medeiros, P. R. P.; Knoppers, B.; Souza, W. F. L.; Oliveira, E. N. *Braz. J. Aquat. Sci. Techn.* **2011**. No prelo. [Link]

³⁸ Sítio do blog de geologia marinha, exemplo de impactos de barragem sobre a costa. Disponível em: <<http://geologiamarinha.blogspot.com/2011/01/barr-a-do-rio-jequitinhonha-fechou.html>>. Acesso em: 14 Março 2011.

³⁹ Sítio do jornal O Globo. Disponível em: <<http://oglobo.globo.com/viagem/mat/2008/04/16/s-ao-francisco-rio-mar-426893779.asp>>. Acesso em: 14 Março 2011.

⁴⁰ Sítio do Jornal da Ciência. Disponível em: <<http://www.jornaldaciencia.org.br/Detalhe.jsp?id=19505>>. Acesso em: 14 Março 2011.

⁴¹ Sítio do Image Science and Analysis Laboratory, NASA-Johnson Space Center. Disponível em: <<http://eol.jsc.nasa.gov/>>. Acesso em: 20 Janeiro 2002.

⁴² Ward, P. R. B. *Civil Engineer in South Africa* **1980**, 22, 9. [Link]

⁴³ Vorosmarty, C. J.; Meybeck, M; Fekete, B.; Sharma, K.; Green, P.; Syvitski, J. P. M. *Global and Planetary Change* **2003**, 39, 169. [CrossRef]

⁴⁴ Peters, N. E.; Meybeck, M. *Water International* **2000**, 25, 185. [CrossRef] [Link]

⁴⁵ Medeiros, P. R. P.; Knoppers, B. A.; Cavalcante, G. H.; Souza, W. F. L. *Brazilian Archives of Biology and Technology* **2011**, 54, 387. [CrossRef]

⁴⁶ Humborg, C.; Ittekkot, V.; Cociasu, A. E.; Bodungen, B. V. *Nature* **1997**, 386, 385. [CrossRef]

⁴⁷ Jennerjahn, T.; Knoppers, B.; Souza, W. F. L.; Brunskill, G. J.; Ivan, E.; Silva, L.; Seno, A. Em *The Rev. Virtual Quim.* |Vol 3| |No. 2| |116-128|

Silicon Cycle: Human Perturbations and Impacts on Aquatic Systems - SCOPE 66; Ittekkot, V.; Unger, D.; Humborg, C.; An, N. T., eds.; Island Press: Washington, 2006, cap. 4.

⁴⁸ Souza, W. F. L.; Knoppers, B.; Balzer, W.; Leipe, T. *Geochimica Brasiliensis* **2003**, 17, 130. [Link]

⁴⁹ Ittekkot, V.; Humborg, C. E; Schäffer, P. *Bioscience* **2000**, 50, 776. [CrossRef]

⁵⁰ Turner, R. E.; Rabalais, N. N. *Bioscience* **1991**, 41, 140. [Link]

⁵¹ Friedel, G.; Wüest, A. *Aquatic Science* **2002**, 64, 55. [CrossRef] [Link]

⁵² Newton, A.; Icely, J. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **2008**, 77, 181. [CrossRef]

⁵³ Salomons, W.; Förstner, U.; *Metals in the Hydrological Cycle*, Springer-Verlag: New York, 1984.

⁵⁴ Camelo, L. G. L.; Miguez, S. R.; Marban, L. *Sci. Total Environ.* **1997**, 204, 245. [CrossRef]

⁵⁵ Taylor, M. D. *Sci. Total Environ.* **1997**, 208, 123. [CrossRef]

⁵⁶ Cupit, M.; Larsson, O.; Meeus, C.; Eduljee, G. H.; Hutton, M. *Sci. Total Environ.* **2002**, 291, 189. [CrossRef]

⁵⁷ Honeyman, B. D.; Santschi, P. H. *Environ. Sci. Technol.* **1988**, 22, 862. [CrossRef]

⁵⁸ Wen, L. S.; Santschi, P.; Gill, G.; Paternostro, C. *Mar. Chem.* **1999**, 63, 185. [CrossRef]

⁵⁹ Gibbs, R. U. *Science* **1973**, 180, 71. [CrossRef] [PubMed]

⁶⁰ Turner, A.; Millward, G. E. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **1994**, 39, 45. [CrossRef]

⁶¹ UNESCO/WHO/UNEP. *Water quality assessments - A guide to use of biota, sediments and water in environmental monitoring*, 2nd ed., University Press: Cambridge, 1996.

⁶² Turner, J. N.; Brewer, P. A.; Macklin, M. G. *Sci. Total Environ.* **2008**, 394, 144. [CrossRef] [PubMed]

⁶³ Jennerjahn, T.; Knoppers, B.; Souza, W. F. L.; Carvalho, C.; Mollenhauer, G.; Hubner, M.; Ittekkot, V. Em *Carbon and Nutrient Fluxes in Continental Margins: A Global Synthesis*; Liu, K. K.; Quinones, R.; Talaue-Mcmanus, L.; Atkinson, L., eds.; Springer-Verlag: Berlin, 2010.