

# RESPOSTA MORFOLÓGICA DA FOZ DO RIO SÃO FRANCISCO, DEVIDO À RETENÇÃO DE SEDIMENTOS NOS RESERVATÓRIOS

JEFFERSON VIANNA BANDEIRA<sup>1</sup>, EDUARDO GUILHERME GENTIL DE FARIAS<sup>2</sup>, JOÃO ANTÔNIO LORENZZETTI<sup>3</sup>, LÉCIO HANNAS SALIM<sup>4</sup>

## RESUMO

Usando uma coleção de imagens de satélites obtida desde a década de 1980, mapas antigos e fotos aéreas, o trabalho descreve as mudanças morfológicas na foz do Rio São Francisco, nordeste do Brasil, causada pela retenção de sedimentos devido às diversas barragens construídas na sua bacia hidrográfica desde 1955. Apresentam-se resultados semi-quantitativos da regressão da linha de costa e a variação temporal de seu alinhamento, considerando a interface entre a vegetação e a areia como referência do processo erosivo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Barragens. Embocadura. Resposta morfológica. Retenção de sedimentos. Rio São Francisco.

## MORPHOLOGICAL RESPONSE OF THE SÃO FRANCISCO RIVER MOUTH DUE TO THE RETENTION OF SEDIMENTS INSIDE RESERVOIRS

### ABSTRACT

Using a collection of satellite images obtained since the 1980 decade, historical maps and aerial photos, this paper describes morphological changes at the mouth of São Francisco River, north-eastern Brazil, caused by retention of sediments due to the various dams constructed in its hydrographic basin since 1955. Semi-quantitative results of the regression of the coastline and the temporal variation of its alignment, considering the interface of the vegetation and the sand as reference of the erosive process, are presented.

**KEYWORDS:** Dams. Morphological response. River mouth. São Francisco River. Sediment retention.

## 1. INTRODUÇÃO

Com suas cabeceiras situadas no estado de Minas Gerais, o Rio São Francisco flui em direção ao nordeste brasileiro por 2.863 km, drenando uma área de 645.000 km<sup>2</sup> e desaguando no Oceano Atlântico entre os estados de Alagoas e Sergipe (FIGURA 1). O Rio

<sup>1</sup> Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN/ Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear – CDTN. Doutor. Email: jvb@cdtn.br.

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. Doutor. Email: gentil@dsr.inpe.br.

<sup>3</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. Doutor. Email: loren@dsr.inpe.br.

<sup>4</sup> Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN/ Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear – CDTN. Mestre. Email: salimlh@cdtn.br.

São Francisco é o quinto maior rio da América do Sul e sua embocadura encontra-se situada em um enorme delta de areia formado naturalmente, sobretudo com material de origem continental, porque a quantidade fornecida foi maior que a capacidade de transporte litorâneo (FIGURAS 2 e 3).



Figura 1. Bacia hidrográfica do Rio São Francisco.

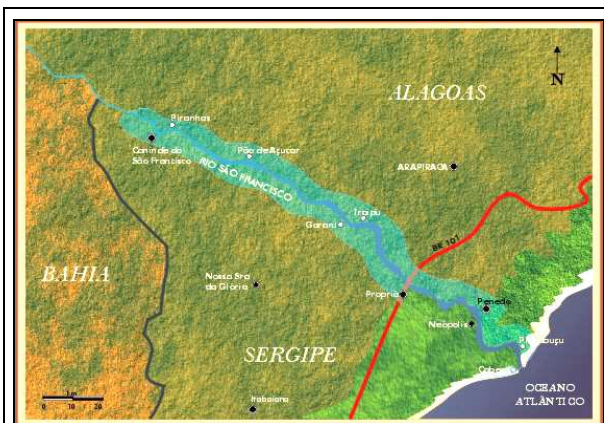


Figura 2. Estuário e foz do Rio São Francisco. [1]



Figura 3. Foz do Rio São Francisco, em 29/01/1982. [1]

Vários reservatórios para geração de energia elétrica foram construídos a partir da década de 1950, ao longo do Rio São Francisco: Três Marias, Sobradinho, Itaparica, Paulo Afonso, Xingó, de montante para jusante (FIGURA 1). Como consequência da retenção de sedimentos nos reservatórios, o fornecimento de areia e também de sedimentos finos (silte

e argila) para a região da foz do Rio São Francisco decresceu drasticamente. Este efeito é mostrado na FIGURA 6, onde pode ser observado que as concentrações de sedimento ao largo e no estuário são similares. A concentração relativamente alta ao longo da costa e espalhando-se na região da embocadura é principalmente devido à areia do transporte litorâneo.

O reservatório de Sobradinho, o qual foi inaugurado em 1978, constitui-se de um enorme lago artificial, o maior da América Latina, com uma área de 4.214 km<sup>2</sup> e comprimento de 350 km (FIGURA 1). Além de sua capacidade de regular a vazão para a operação otimizada das centrais hidrelétricas localizadas a jusante ( $Q_{\text{mínima}} = 2.060 \text{ m}^3/\text{s}$ ), o reservatório de Sobradinho retém praticamente todo o sedimento produzido nas regiões alta e média da bacia hidrográfica do Rio São Francisco.

O principal objetivo deste trabalho é alertar, com resultados bem documentados, os engenheiros fluviais e costeiros acerca da influência de longo prazo na morfologia costeira causada pela construção de barragens com a consequente retenção de sedimentos dentro dos reservatórios formados.

De modo a evitar futuros impactos ambientais como os observados na bacia hidrográfica do Rio São Francisco e outras bacias ao redor do mundo, especialmente em países em desenvolvimento, é aconselhável que o Manejo Integrado da Bacia Hidrográfica (MIBH) seja trabalhado juntamente com o Manejo Integrado da Região Costeira (MIRC) correspondente, constituindo o Manejo Integrado da Bacia Hidrográfica e da Região Costeira (MIBHRC).

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 Estimativa do volume de sedimentos retidos nos reservatórios**

No que diz respeito à região da foz do Rio São Francisco, a construção de reservatórios de grande volume ao longo do curso do rio, relacionados às hidrelétricas mostradas na FIGURA 4, induziu transformação no escoamento do rio e nas cargas de sedimento transportadas. Em consequência da alteração do escoamento e da deposição de sedimentos nos reservatórios, o fluxo de sedimentos foi reduzido e a chegada de sedimentos de origem continental na foz do Rio São Francisco decresceu. A TABELA 1 mostra algumas características do curso d'água relacionadas às regiões geográficas da bacia hidrográfica onde os principais reservatórios se encontram localizados.

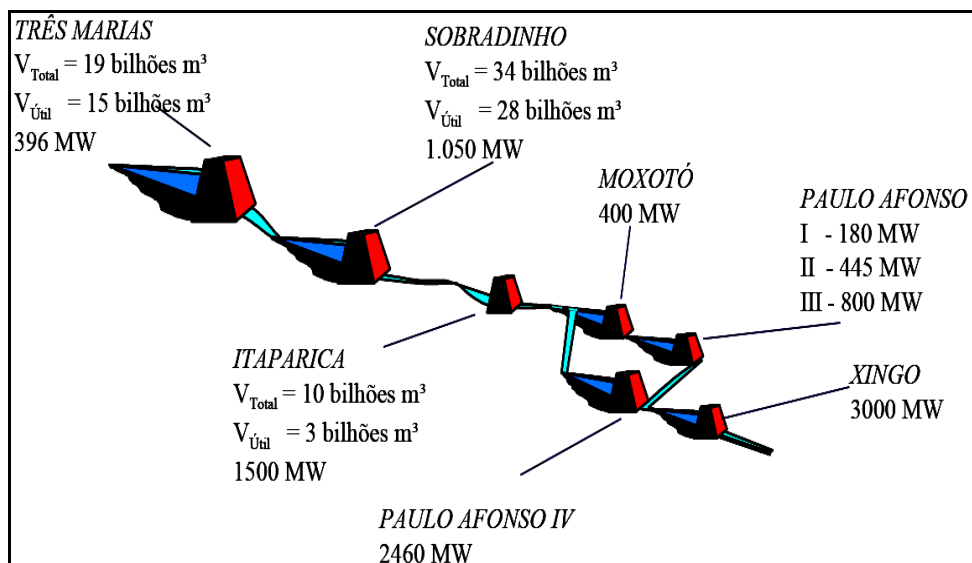


Figura 4. Principais reservatórios na bacia hidrográfica do Rio São Francisco.[2]

A TABELA 2 apresenta os resultados de uma avaliação do transporte de sedimentos no curso do Rio São Francisco. Eles levam em consideração o volume dos sedimentos depositados nos três principais reservatórios (Três Marias, Sobradinho e Itaparica). Os resultados foram obtidos com os dados existentes da carga estimada de sedimento em suspensão para as diversas estações de medição na bacia do Rio São Francisco (FIGURA 5) utilizando-se, sobretudo, valores médios anuais do período 1986 a 1999, considerado o mais consistente [3].

Os resultados da TABELA 2 mostram que é aparente a redução da carga de sedimentos de origem continental para a região da embocadura. Observe-se que esta contribuição, na embocadura, da ordem de  $3,8 \times 10^6$  t/ano, ou equivalente a um volume de  $3 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/ano, representa cerca de 10% do que entra no reservatório de Sobradinho.

Usando os resultados da TABELA 2 calculou-se que, do começo da operação de Três Marias em 1962 até 2011, a carga de sedimentos retida nos três principais reservatórios é de cerca de  $1,88 \times 10^9$  t ou  $1,48 \times 10^9$  m<sup>3</sup>. A FIGURA 6 mostra uma das consequências dessa enorme retenção de sedimentos: a concentração de sedimentos em suspensão no baixo estuário do Rio São Francisco é semelhante àquela ao largo da zona de arrebenção.

Tabela 1. Regiões da bacia do Rio São Francisco e características do curso d'água

Região	Área (km <sup>2</sup> )	Precipitação (mm)	Q <sub>específica</sub> (l/s.km <sup>2</sup> )	Trecho e algumas características do curso d'água
Alto	91.000 (14,1%)	1.000 a 1.500	11 a 14	Cabeceiras até Pirapora: 70% de contribuição ao escoamento. Curso d'água em canais rochosos de grande declividade (margens de canais baixas e erosão do leito do curso d'água). Reservatório de Três Marias.
Médio	352.100 (54,6%)	600 a 1.400	4 a 11	Pirapora até Remanso, no reservatório de Sobradinho: 15% de contribuição ao escoamento entre Carinhanha e Remanso. Declividade do rio de 10 cm/km. Trecho navegável de 1.400 km de extensão.
Sub médio	155.900 (24,2%)	350 a 800	4 a 5	Remanso a Paulo Afonso: 5% de contribuição ao escoamento. Trecho do rio de baixa declividade. No fim do trecho sub-médio e começo das regiões mais baixas há um grande degrau, o qual origina algumas quedas d'água (Itaparica, Paulo Afonso e Xingó).
Baixo	46.000 (7,1%)	800 a 1,300	5	Paulo Afonso até a foz: 10% de contribuição ao escoamento. Trecho que possui a mais baixa declividade.

Tabela 2. Avaliação da carga de sedimentos em suspensão no curso do Rio São Francisco

Reservatório	Entrada da carga de sedimentos (t/ano)	Saída da carga de sedimentos (t/ano)	Retenção de sedimentos em t/ano	Retenção de sedimentos em m <sup>3</sup> /ano	Começo da operação
Três Marias	12.629.415	505.177	12.124.238	9.584.378	1962
Sobradinho	39.135.314	1.565.413	37.569.901	29.699.527	1979
Itaparica	3.191.721	127.669	3.064.052	2.422.175	1985
Na foz do rio	3.797.817				



Figura 5. Estações de monitoramento de sedimento em suspensão no Rio São Francisco.

[3]

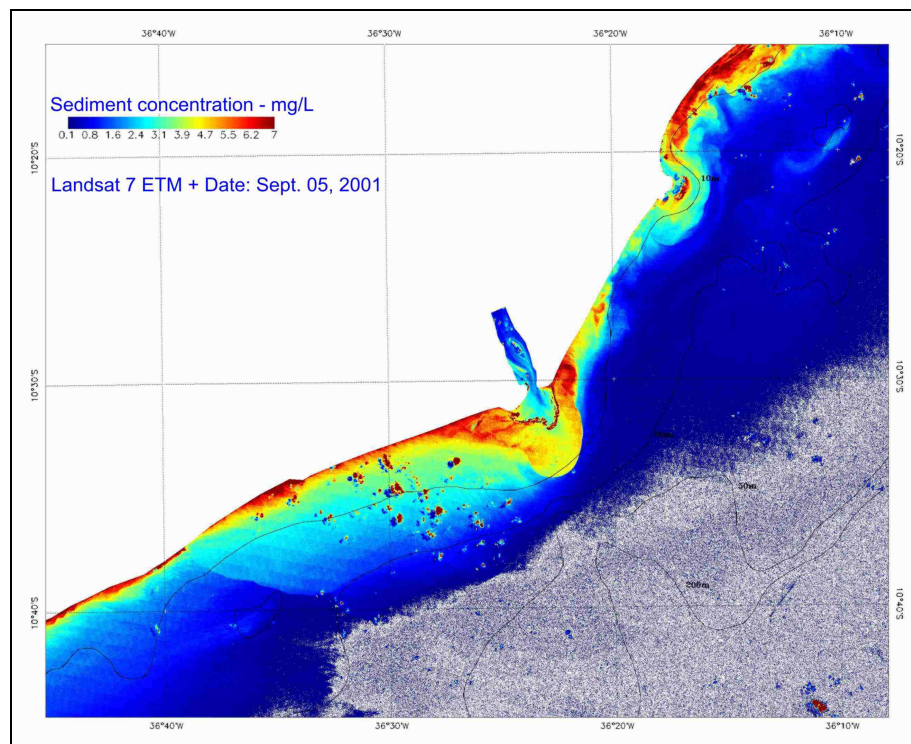


Figura 6. Concentração de sedimentos na foz do Rio São Francisco. [1]

## 2.2 O transporte de sedimentos ao longo da costa de Sergipe

O transporte litorâneo costa de Sergipe, com extensão de 153 km é bi-direcional, totalizando cerca de  $800 \times 10^3$  a  $1.100 \times 10^3$  m<sup>3</sup>/ano. O transporte litorâneo dominante é para SW varia entre  $500 \times 10^3$  a  $650 \times 10^3$  m<sup>3</sup>/ano [4-8]. A maré na região é semi-diurna e a amplitude em sizígia alcança 2,0 m. Os ventos locais são gerados, sobretudo pelo anticiclone subtropical (N to E) e pelo ciclone polar (S). A nuvem de sedimentos em suspensão, na foz do Rio São Francisco, que se observa na FIGURA 3 mostra, muito bem, o transporte litorâneo para SW. Esta foto foi feita em janeiro, quando a dominância das ondas e ventos de NE induz o transporte litorâneo nesta direção.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Consequências da retenção de sedimentos

As principais consequências na região da foz do Rio São Francisco, devido à retenção de sedimentos dentro dos reservatórios das hidrelétricas construídas ao longo de seu curso, são:

a) Redução drástica (mais de 90%) da população de peixes no baixo estuário e na região da embocadura, devido à redução da contribuição de sedimentos finos, os quais carregam nutrientes e matéria orgânica neles adsorvidos, que são elementos fundamentais à biota aquática [9];

b) Erosão na foz do Rio São Francisco. Esta consequência será vista, em mais detalhes, na sequência.

### 3.2 Erosão na região da embocadura do Rio São Francisco

Com a redução da carga de areia de origem continental, o lado direito da embocadura, no Estado de Sergipe, está sofrendo severa erosão. Por que erosão apenas neste lado da embocadura?

O sedimento de origem continental, tão logo sai na embocadura, é carregado preferencialmente na direção da costa sergipana, à SW, devido ao transporte litorâneo dominante nesta direção (FIGURA 3). Com o decréscimo dessa contribuição, que começou com a construção da hidrelétrica de Paulo Afonso, na década de 1950, um efeito de longo prazo (da ordem de décadas) começou a ter lugar: as ondas e correntes costeiras, tendo certa capacidade de transporte de sedimentos, mas não tendo a mesma preenchida, começaram a erodir a costa, logo à sotamar da embocadura, em relação ao transporte litorâneo dominante. Este processo erosivo tende a cessar tão logo a nova orientação da costa, a qual é função da carga de sedimentos disponíveis, sobretudo a carga de areia, se ajuste à capacidade de transporte litorâneo.

No começo da década de 1990, a erosão alcançou e começou a destruir a Vila de Pescadores do Cabeço. A primeira vítima foi o farol construído no começo do século passado, próximo à Vila e a 250 m à terra da linha de costa. As FIGURAS 7 a 14 mostram a progressão deste processo erosivo.

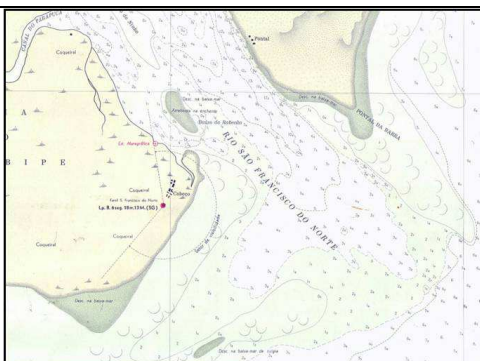


Figura 7. Farol 250 m à terra da linha de costa de 1942. (Carta DHN 1002)



Figura 8. Farol e a Vila de Pescadores de Cabeço a menos de 100 m da linha de costa, no começo da década de 1990. [1]



Figura 9. Igreja na Vila de Cabeço, com o farol já na linha de costa, em 1998. [1]



Figura 10. Erosão na praia do Cabeço e farol ao largo, em novembro de 2001



Figura 11. Foz do Rio São Francisco, com farol ao largo, em 2002. [1]



Figura 12. Farol em 26/02/2004 a 235 m ao largo (Altitude de visão = 873 m). [10]



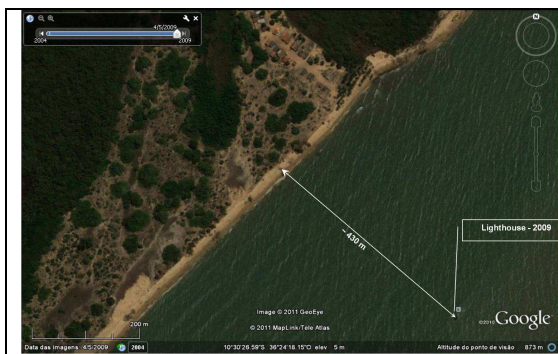


Figura 13. Farol em 05/04/2009 a 430 m ao largo (Altitude de visão = 873 m). [10]



Figura 14. Foz do Rio São Francisco em 05/04/2009. [10]

Pode-se observar na FIGURA 7 que o farol foi construído 250 m à terra da linha de costa levantada em 1942. Nessa época nenhuma hidrelétrica havia sido ainda construída ao longo do Rio São Francisco e pode-se considerar que a região da embocadura encontrava-se em um relativo equilíbrio sedimentológico.

Foi só após o começo da operação da hidrelétrica de Paulo Afonso I (1955) a Paulo Afonso IV (1977) que a contribuição de sedimento de origem continental começou a diminuir significativamente. Em 1978, a hidrelétrica de Sobradinho entrou em operação, fazendo decrescer ainda mais esta contribuição. As hidrelétricas de Itaparica e Xingó, a jusante de Sobradinho, foram construídas depois de 1978.

Considerando as posições da linha de costa em relação ao farol (FIGURAS 7, 9, 12 e 13), e também a cronologia da operação de Paulo Afonso I (1955) e das hidrelétricas subsequentes, pode-se estimar a velocidade média anual de regressão da linha de costa (VMR) nesta região particular, para diferentes períodos de tempo. Assim é avaliado o impacto morfológico de longo prazo na região da embocadura do Rio São Francisco, devido à retenção de sedimentos de origem continental. A TABELA 3 apresenta um resumo dessas ocorrências.

Tabela 3. Velocidade média anual de regressão da linha de costa in na região do farol

Intervalo de tempo	Regressão da linha de costa (m)	Velocidade media de regressão (VMR) (m/ano)	Observações
1955 a 2009	680	12,6	Desde o início da operação da hidrelétrica de Paulo Afonso I até 2009
1955 a 1998	250	5,8	Do início da operação da hidrelétrica de Paulo Afonso I até o farol situado na linha de costa
1998 a 2004	235	39,2	Farol na linha de costa até 2004
2004 a 2009	195	39,0	De 2004 a 2009
1998 a 2009	430	39,1	Farol na linha de costa até 2009

Observando-se a TABELA 3 pode-se inferir a influência de longo prazo na VMR da linha de costa devido à retenção de sedimentos nos reservatórios das hidrelétricas. A VMR de 5,8 m/ano para o período 1955-1998 aumentou 6,7 vezes, para 39,1 m/ano, no período 1998-2009. Acima de tudo, este brusco aumento foi devido ao efeito de longo prazo do começo da operação da hidrelétrica de Sobradinho, 20 anos antes do começo do período considerado.

Em resumo, a marca comparativa dessa dramática erosão na região da embocadura do Rio São Francisco é o farol inclinado, como a *Torre de Pisa* na Itália (FIGURAS 9 a 11), e permanecendo em 2009, a cerca de 430 m ao largo, como um monumento à erosão costeira (FIGURA 13). Nota-se, nas FIGURAS 8 a 13, a escassez de areia na praia litorânea da margem direita, comparada com a da margem esquerda (FIGURA 11), indicando que o processo de erosão costeira está ainda em progressão.

As FIGURAS 15 e 16 apresentam uma visão geral do impacto morfológico na região da foz do Rio São Francisco causado pela retenção de sedimentos dentro dos diversos reservatórios construídos ao longo de sua bacia hidrográfica.

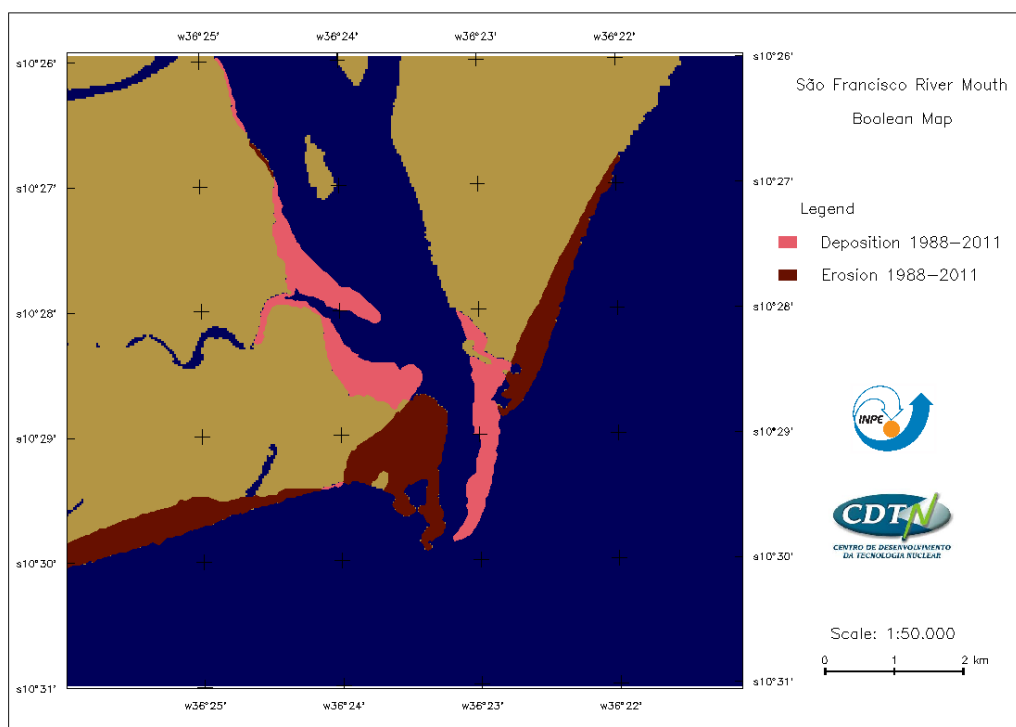


Figura 15. Análise booleana da foz do Rio São Francisco River para o período (1988-2011) baseada em imagens do satélite. [10]



Figura 16. Contornos da costa na região da embocadura do Rio São Francisco (anos 1988, 1995, 2007 e 2011) baseados em imagens do satélite Landsat. [10]

#### 4. CONCLUSÕES

A construção de barragens em geral impacta severamente o meio ambiente devido à retenção de sedimentos coesivos e não coesivos dentro dos reservatórios, como mostrado para o Rio São Francisco.

Os impactos de longo prazo apresentados neste Caso Estudo são consequência da falta de conhecimento dos impactos ambientais devido a reservatórios, quando as primeiras barragens foram construídas ao longo do Rio São Francisco.

De modo a evitar impactos ambientais futuros, como os experimentados na bacia hidrográfica do Rio São Francisco e em outras bacias ao redor do mundo, especialmente em países em desenvolvimento, é aconselhável que intervenções semelhantes que se pretendam fazer em bacias hidrográficas, até agora pouco impactadas pela construção de barragens (e.g. Rio Amazonas, Rio Parnaíba e outros), sejam estudadas integrando-se, desde o princípio, os manejos da bacia hidrográfica e da região costeira. Isto não tem sido praticado até agora de maneira rotineira, mas deve começar a ser feito, para evitar danos para as próximas gerações.

Com base em evidências como as do presente Caso Estudo e associando medições hidráulicas e sedimentológicas, na bacia hidrográfica e na região costeira, bem como levantamentos geológicos, caso necessários, e medições morfológicas na região da

embocadura, poderá ser possível calibrar, validar e aplicar modelos matemáticos de morfologia costeira de modo a prever, no longo prazo, a evolução de muitas embocaduras de rios ao redor do mundo, que sejam ou possam vir a ser sujeitas a impactos semelhantes devido à construção de reservatórios nas respectivas bacias hidrográficas.

O procedimento apontado acima poderá se constituir em uma poderosa ferramenta de manejo costeiro. Ele poderá ser aplicado para selecionar, por exemplo, um local seguro para se construir pela segunda vez, em menos de duas décadas, a Vila de Pescadores do Cabeço, na foz do Rio São Francisco, a qual se encontra novamente em rota de destruição. Quem sabe poderá também ser aplicado para se prever as modificações morfológicas na foz do Rio Amazonas, que deverão ocorrer em um futuro, além de nossa geração, com as várias hidrelétricas que se constroem e as projetadas nos rios de sua margem direita. É essa região que fornece a maior contribuição sedimentológica da bacia hidrográfica em questão.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BANDEIRA, J.V. O Impacto Ambiental de Barramentos em Bacias Hidrográficas sobre a Disponibilidade de Sedimentos e a Estabilidade Morfológica em sua Foz: o Caso da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. In: **XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos** – ABRH, João Pessoa, PB, 2005.
- [2] AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Boletim de Monitoramento dos Reservatórios do Rio São Francisco**, ANA, v. 2, n. 2, p.1-15. Brasília, 2007.
- [3] LIMA, J.E.F.W.; SANTOS, P.M.C.; CHAVES, A.G.M.; SCILEWSKI, L.R. **Diagnóstico do fluxo de sedimentos em suspensão na Bacia do Rio São Francisco**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, Brasília, DF: ANEEL: ANA, 2001.
- [4] BANDEIRA, J. V. **Estimativa do Transporte Litorâneo em torno da Embocadura do Rio Sergipe**. 222p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares - CCTN), Instituto de Pesquisas Radioativas/UFMG, Belo Horizonte – MG, 1972.
- [5] MOTTA, V.F.; BANDEIRA, J.V. Comparison between the Results of Littoral Drift Computations and Cubature of Deposits in a Dredged Channel. In: **Proceedings...14<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering (ICCE)**, Copenhagen, Denmark vol.2 p. 726-740, American Society of Civil Engineers, New York, USA, 1974.
- [6] PLANAVE e DHI **Evolução das praias de Atalaia Nova, Atalaia Velha e da barra do Rio Sergipe. - Modelo matemático - Relatório final**. Relatório Técnico para SERGIPTOS. Rio de Janeiro, Brasil, 1992.
- [7] BANDEIRA, J.V.; SALIM, L.H; CALISTO ACOSTA, O.E. Long-term morphological impacts on the coastline of Sergipe State, Brazil, caused by the construction of dams in the São Francisco River Basin” In: **Seventh International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries – COPEDEC VII**, Dubai, UAE, 2008.

[8] CARVALHO, N.O. **Produção de sedimentos em função da variabilidade climática. O estudo de caso da área contribuinte ao reservatório de Três Marias, região do Alto São Francisco.** Brasília, DF, 2001.

[9] PROJETO GEF – SÃO FRANCISCO Do Velho ao Novo Chico. Uma Discussão dos Problemas e Soluções Hidroambientais para o Baixo São Francisco e a Foz. In: **Workshop de Divulgação dos Resultados do Projeto GEF - São Francisco.** Nov. 2002, Propriá. Palestras. São Cristóvão, UFS, 2002.

[10] BANDEIRA, J.V.; FARIAS, E.G.G.; LORENZZETTI, J.A.; SALIM, L.H. Morphological response of São Francisco River mouth, due to sediment retention in dams In: **Eighth International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries – COPEDEC VIII,** Chennai, India, 2012.