



AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS



GEF  
Fundo para o  
Meio Ambiente Mundial



PNUMA  
Programa das Nações Unidas  
para o Meio Ambiente



OEA  
Organização dos  
Estados Americanos

# PROJETO DE GERENCIAMENTO INTEGRADO DAS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS EM TERRA NA BACIA DO SÃO FRANCISCO ANA/GEF/PNUMA/OEA

**Subprojeto 1.1.A - Estudo Hidrodinâmico-Sedimentológico do Baixo São Francisco, Estuário e Zona Costeira Adjacente-AL/SE**



## Resumo Executivo do Relatório Final ESTUDO HIDRODINÂMICO-SEDIMENTOLÓGICO DO BAIXO SÃO FRANCISCO, ESTUÁRIO E ZONA COSTEIRA ADJACENTE-AL/SE



UFAL - Universidade Federal de Alagoas

Maceió - AL

**PROJETO DE GERENCIAMENTO INTEGRADO DAS  
ATIVIDADES DESENVOLVIDAS EM TERRA  
NA BACIA DO SÃO FRANCISCO  
ANA/GEF/PNUMA/OEA**

**Subprojeto 1.1.A - Estudo Hidrodinâmico-Sedimentológico do  
Baixo São Francisco, Estuário e Zona Costeira Adjacente-AL/SE**

**Resumo Executivo do Relatório Final  
ESTUDO HIDRODINÂMICO-SEDIMENTOLÓGICO DO  
BAIXO SÃO FRANCISCO, ESTUÁRIO E ZONA  
COSTEIRA ADJACENTE-AL/SE**

**Coordenação do Subprojeto**  
Arno Maschmann de Oliveira  
Departamento de Geociências  
Universidade Federal de Alagoas

**Pesquisadores Participantes**

Adriana Sales Reis	Instituto Xingó
Allysson Evangelista de Matos	FUNDEPES
Anderson Gonçalves Nunes	Instituto Xingó
Arthur de Oliveira Hernandez	UFAL
Christiane Sampaio de Souza	UFBA
Geórgenes Hilário Cavalcante Segundo	FUNDEPES
Helenice Vital	UFRN
Marco Vinícius Castro Gonçalves	UFAL
Newton Amaral Franco Júnior	Instituto Xingó
Oberdan Caldas de Oliveira	UFBA
Paulo de Oliveira Mafalda Júnior	UFBA
Rivaldo Couto dos Santos Júnior	Instituto Xingó
Werner Farkatt Tabasa	UFRN
Yatska de Oliveira Hernandez	UFAL

**Março de 2003**

# ESTUDO HIDRODINÂMICO SEDIMENTOLÓGICO DO BAIXO SÃO FRANCISCO, ESTUÁRIO E ZONA COSTEIRA ADJACENTE-AL/SE

## RESUMO EXECUTIVO

### INTRODUÇÃO

O subprojeto 1.1.A - Estudo Hidrodinâmico-Sedimentológico do Baixo São Francisco, Estuário e Zona Costeira Adjacente (AL/SE) executado pela **Universidade Federal de Alagoas** é parte integrante da Componente I - Análise Ambiental da Bacia e da sua Zona Costeira, do Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do São Francisco ANA/GEF/PNUMA/OEA. O seu principal objetivo é identificar a atual hidrodinâmica do baixo curso do rio São Francisco, do estuário e da região oceânica adjacente, quantificando a atual distribuição e transporte de sedimentos, relacionando-os com a produtividade biótica nos três primeiros níveis tróficos (fitoplâncton, zooplâncton e ictioplâncton).

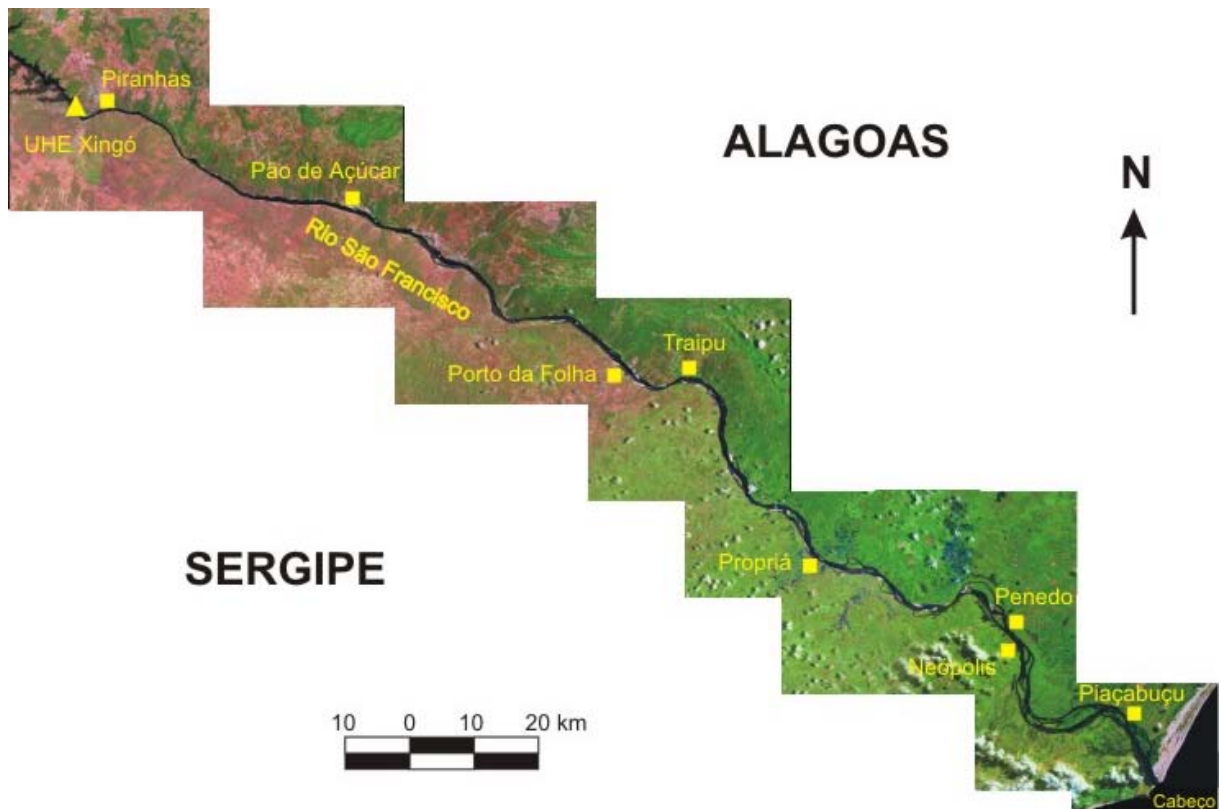
A área estudada está situada na região do Baixo São Francisco (Figura 1), ao longo da calha do rio, desde a Usina Hidroelétrica de Xingó até a sua Foz, incluindo a região oceânica e costeira adjacente (Figura 2). O baixo curso do rio São Francisco tem uma extensão de 265 km, representando menos de 10% da sua extensão total, possuindo compartimentos com características bem distintas. O curso superior do rio escoa encaixado dentro de um “canyon” e o seu curso inferior, a onde estão concentrados estes estudos, escoa dentro de uma planície aluvial que se estende até a região oceânica.



No rio São Francisco há diversos tipos de obras de engenharia relacionadas à geração de energia elétrica, ao abastecimento d'água, à navegação e à proteção contra enchentes. As obras mais frequentes são as barragens, que alteram o regime hidrológico, modificando tanto a vazão líquida quanto reduzem a descarga à sólida à jusante dos barramentos. Especificamente, para este estudo a mais importante é Xingó.

Este estudo avalia os mecanismos responsáveis pelo transporte de sedimentos na região da Foz do rio São Francisco, através do estudo das formas de fundo da calha do rio, com métodos sísmicos de alta resolução, visando melhorar a compreensão dos processos de dispersão e do destino dos sedimentos transportados pelo rio São Francisco para a plataforma oceânica adjacente.

Figura 1. Subdivisão da Bacia do rio São Francisco.



**Figura 2. Baixo curso do rio São Francisco desde a UHE Xingó até a foz**

Este relatório está dividido em oito capítulos abordando os seguintes temas:

- 1 - Caracterização física do baixo São Francisco, incluindo geologia e geomorfologia, clima/precipitações, vazões e sedimentos.
- 2 - Evolução histórica do rio São Francisco e seu estuário com a evolução geológica do Delta e os efeitos dos reservatórios na regularização da vazão e mudanças geomorfológicas.
- 3 - Impactos nos manguezais e praias próximas à foz do rio São Francisco com a localização dos manguezais e dunas, o clima de ondas e correntes na região da foz e a erosão das margens do rio junto à foz e praias adjacentes.
- 4 - Mudanças da morfologia do rio com os efeitos antrópicos da regularização das vazões, do transporte de sedimentos na calha do rio e da erosão das barrancas.
- 5 - Medidas para a redução do assoreamento e erosão com os efeitos das enchentes no processo de desassoreamento da calha do rio e na produção de enchentes regularizadas para desassorear a calha do rio.
- 6 - Distribuição espacial e temporal da biomassa planctônica com a ocorrência e abundância do fitoplâncton, zooplâncton e ictioplâncton, distribuição sazonal e espacial do fitoplâncton zooplâncton e ictioplâncton. As mudanças na produção de ictiofauna e carcinofauna produzidas com a construção dos reservatórios e seus reflexos nas condições sócio-econômica dos pescadores.
- 7 - Conclusões e impactos dos aspectos ambientais abordados neste estudo.
- 8 - Recomendações de medidas mitigadoras para os principais problemas ambientais.

# 1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO BAIXO SÃO FRANCISCO

## 1.1. Geologia e Geomorfologia

A costa Leste-Nordeste do Brasil tem se submetido a uma queda relativa no nível do mar em torno de 5 m durante os últimos 5.000 anos. A medida que o nível do mar baixou, uma extensa plataforma rica em areia foi erodida e redepositada como uma série de cordões litorâneos progradantes (Dominguez et al., 1987), mesmo onde não existem sistemas fluviais. A fonte de sedimentos para esta progradação pode ser alimentada inteiramente pela convergência de ondas induzidas pela deriva litorânea em uma plataforma arenosa rasa, a onde se formou o Delta do rio São Francisco.

O baixo curso do rio São Francisco se inicia em um “canyon” nos Maciços remobilizados do Pediplano da região do Baixo São Francisco, na cidade de Paulo Afonso (BA), se estendendo em forma de cachoeiras em um leito rochoso com cascalhos por cerca de 100 km até as proximidades da cidade de Pão de Açúcar (AL), interrompidos recentemente pelo lago da barragem da Usina Hidroelétrica de Xingo.

A partir de Pão de Açúcar (AL) até a foz do rio, à cerca de 165 km, a declividade do seu leito é reduzida, produzindo meandros que erodem as barrancas arenosas e bancos de sedimentos na calha do rio. A geomorfologia deste setor se inicia dentro do escudo exposto do Patamar Colinoso Marginal até a região de Própria (SE) passando para a bacia sedimentar com predominância dos tabuleiros do grupo Barreiras, do período Terciário, os quais se estendem até a região de Penedo (AL) neste local fica o vértice interno da região deltaica com campos de areia e remanescentes de dunas vegetadas.

## 1.2. Clima / Precipitações

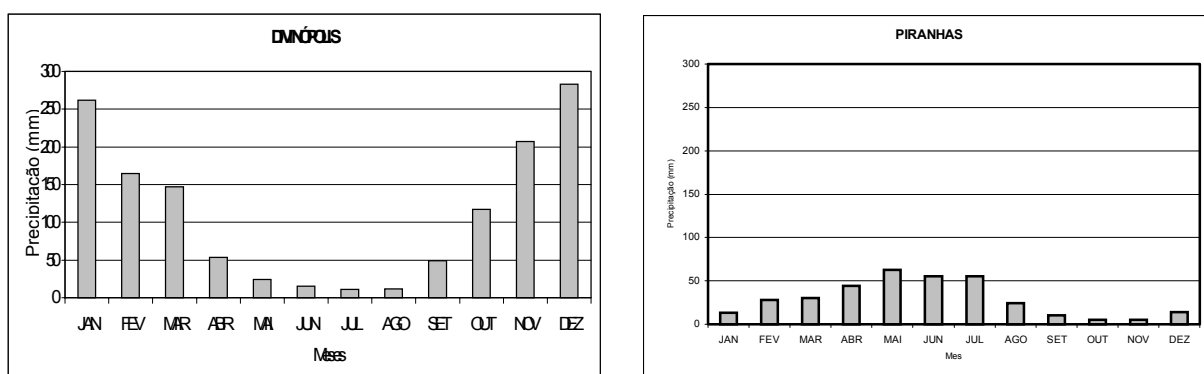
O clima da região do Baixo São Francisco é quente, começando como Semi-Árido a montante, sofrendo uma transição para o Sub-Úmido, no seu curso médio, próximo a Belo Monte (AL), e Úmido na zona junto ao litoral, sendo a precipitação o principal fenômeno que caracteriza as variações climáticas locais.

A distribuição pluviométrica do Alto São Francisco e a parte superior do Médio São Francisco, no estado de Minas Gerais, produz 75% do escoamento do rio. Em contraste, o clima das regiões Sub-Médio e Baixo São Francisco é muito seco e possui uma distribuição sazonal das chuvas diferente, isto pode ser explicado pelo fato de que estas regiões estão submetidas a diferentes climas e sistemas de produção de chuvas.

Observa-se, que o período chuvoso do Alto São Francisco tem início em outubro e se estende até março, ou seja, a maior concentração está no período do verão. Em Divinópolis (MG) com latitude  $20^{\circ} 05' S$ , longitude  $44^{\circ} 58' W$  e 644 m de altitude, representativa desta região, com precipitação média anual de 1.500 mm, o pico de chuva ocorre em dezembro com média de 283 mm e o período menos chuvoso ficou compreendido entre os meses de maio e agosto, com o menor índice em julho com média de 11 mm (Figura 3).

O período chuvoso da região Semi-Árida do Baixo São Francisco tem início em março e se estende até agosto, ou seja, a maior concentração está no período do inverno. Em Piranhas (AL) com latitude  $09^{\circ} 37' S$ , longitude  $37^{\circ} 46' W$  e 110 m de altitude, representativa desta região, com precipitação média anual de 500 mm, o pico de chuvas ocorre em maio com

média de 63 mm e o período menos chuvoso ou sem chuvas ficou compreendido entre os meses de setembro e janeiro (Figura 3).



**Figura 3. Distribuição da precipitação média mensal em Divinópolis (Alto São Francisco) e em Piranhas (Baixo São Francisco), no período de 1942-1999.**

Existe grande variabilidade interanual das precipitações nas regiões com pequeno índice pluviométrico. A precipitação em Piranhas (AL) no ano de 1977 foi de cerca de 1.000 mm e no ano de 1955 ficou com cerca de 200 mm. Adicionalmente, a precipitação média anual aumenta na direção do litoral. Entre Piranhas (AL), no semi-árido, e Piaçabuçu (AL), no Delta do rio, a precipitação média anual aumentou de 500 mm para 1.200 mm.

### 1.3. Vazões

A vazão média de longo prazo do rio São Francisco em Pão de Açúcar (AL) é de 2.850 m<sup>3</sup>/s, com cheias e estiagens em março e em setembro com 4.900 e 1.500 m<sup>3</sup>/s respectivamente. A Vazão em Pão de Açúcar (AL), no Baixo São Francisco, tem uma significativa relação com o período chuvoso de Divinópolis (MG) no Alto São Francisco com os picos de cheia do Baixo apresentando uma defasagem de dois meses em relação aos picos chuvosos do Alto.

As oscilações climáticas, que afetam as precipitações nas regiões do Alto e do Médio São Francisco, determinam o nível das vazões naturais do rio. As intervenções antrópicas, na bacia hidrográfica e calha do rio, produzem perdas de água, por evaporação ou evapotranspiração e modificam a sua distribuição espacial e temporal. Entretanto não se pode detectar nenhuma tendência nos deflúvios na bacia hidrográfica, tais como mudanças climáticas.

Na região estuarina existe uma significativa oscilação das vazões horárias devido ao fluxo e refluxo das marés semi-diúrnas. Os níveis das marés registrados no estuário, em Piaçabuçu, tiveram amplitudes variando entre 0,88 m, e 1,81 m nas quadraturas e sizíguas respectivamente, com os tempos médios 5,7 horas e 6,7 horas para marés enchente e vazante respectivamente.

### 1.4. Sedimentos

A maior produção de sedimentos na bacia do rio São Francisco ocorre nas regiões mais úmidas do Alto e do Médio São Francisco. O transporte médio de sedimentos em Morpará (BA), entre o Médio e Sub-Médio São Francisco, foi de 21,5 x 10<sup>6</sup> T/ano, entre os anos de

1978 a 1984, ao passo que no Baixo São Francisco, em Pão de Açúcar (AL), o rio transportou uma média de  $12,5 \times 10^6$  T/ano, entre os anos de 1966 a 1968.

Com a construção da cascata de represas no Sub-Médio e no Baixo São Francisco, quase todos os sedimentos vindos de montante são retidos, ficando o transporte de sedimentos do Baixo São Francisco restrito ao material produzido localmente pela erosão das suas barrancas e uma pequeníssima contribuição dos afluentes intermitentes. Entretanto as velocidades das correntes são muito fracas para transportarem estes sedimentos, formados em sua maioria, por areias médias e grossas, o que resulta na formação de bancos na calha do rio (Foto 1). O transporte na região do delta resulta de uma interação das correntes estuarinas com os sedimentos de origem fluvial e marítimo.



**Foto 1. Detalhes dos bancos de sedimentos no rio São Francisco a montante de Propriá (SE) em 26/06/2001.**

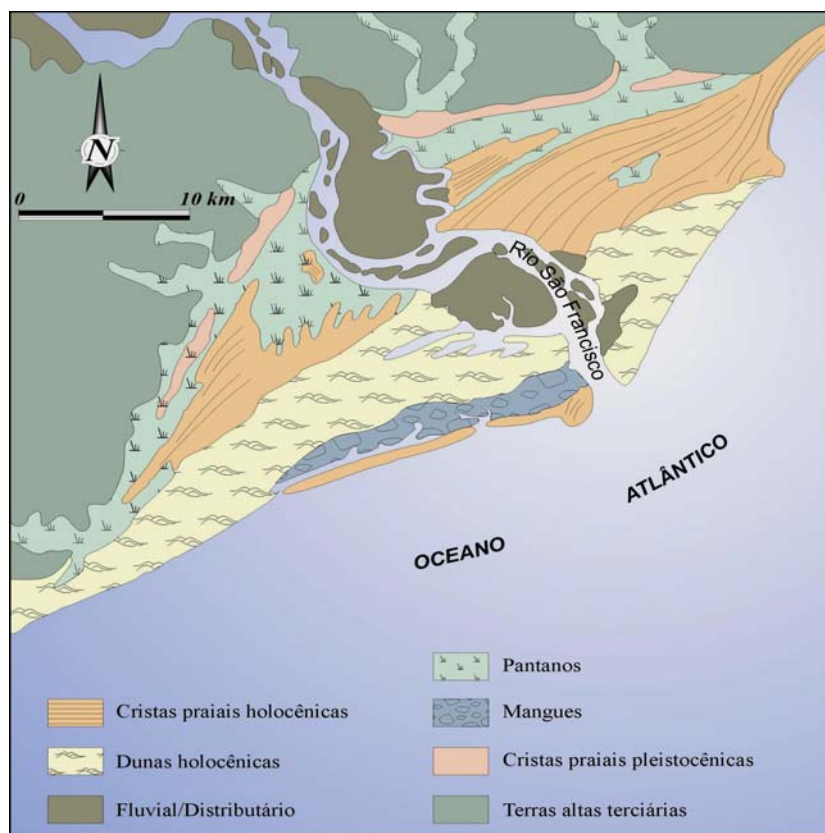
## **2. EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO RIO SÃO FRANCISCO E DO SEU ESTUÁRIO**

### **2.1. Evolução geológica do Delta do rio São Francisco**

A denominação para a desembocadura do rio São Francisco é apresentada na literatura ora como Delta dominado por ondas - “Wave-dominated Delta” (Bacoccoli, 1971; Bandeira jr. et al., 1975 e 1979; Dias, 1981; Dias e Gorini, 1981), ora como cordão litorâneo de planície arenosa - “Beach-ridge strandplain” (Dominguez et al., 1981, 1987, 1992; Dominguez e Wanless, 1991).

A foz do São Francisco apresenta sistemas de cordões litorâneos associados a rios. Ele foi interpretado por Galloway (1975) como delta dominado por ondas, embora segundo Dominguez e Barbosa (1994), estes cordões litorâneos sejam alimentados principalmente pela

deriva litorânea. Desta forma, a foz do São Francisco, devido à presença de linha de costa progradante, planície deltaica e fonte de sedimentos fluvial, pode ser considerada um delta, embora os cordões litorâneos em ambos os lados do rio possam ter diferentes proveniências (Figura 4).



O controle da distribuição dos sedimentos na foz do rio São Francisco, principalmente sobre o estuário e o delta, é de uma forma geral controlado pela influência fluvial e pelos fenômenos marítimos, esta influência atua na remoção e deposição dos sedimentos ao longo deste sistema.

Na região oceânica adjacente, a deriva litorânea, controlada pelo clima das ondas, possui um papel fundamental quanto à variabilidade do perfil praiar, gerando erosão e assoreamento.

**Figura 4. Foz do Rio São Francisco dominada por ondas.**

Observou-se que o sedimento fino é retirado da parte baixa da praia “pé da praia” e depositado na parte alta “berma da praia”, porém, como a região é afetada pelas ondas diretamente. Os sedimentos grossos e os finos são arrastados pela deriva litorânea. Os sedimentos mais finos são, em grande parte, arrastados para a parte alta da região do lavado das ondas, provocando elevação no perfil praiar e a outra parte com finos e grossos são direcionada para o Sudoeste, de acordo com o sentido preferencial das correntes do local que é de Nordeste para Sudoeste.

A variação granulométrica das areias encontrada na margem esquerda, no pé da praia, corresponde aos sedimentos com características de areia média e grossa, variando entre 0,25 mm e 0,5 mm, enquanto o berma da praia na mesma margem, os diâmetros variam entre 0,125 mm e 0,25 mm, ou seja, areias finas e médias. Portanto, na margem esquerda os sedimentos finos que existem no pé da praia são, em grande parte, transportados para o berma a praia.

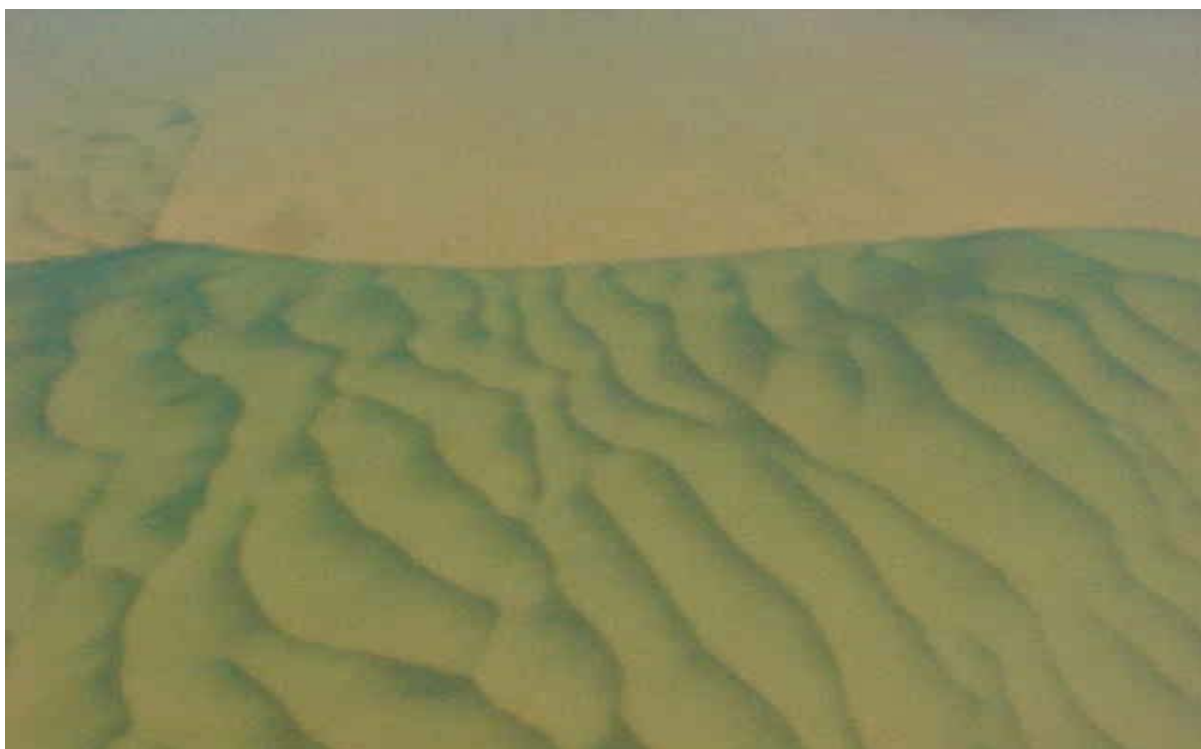
A granulometria do banco de sedimentos dentro do rio e do banco no delta variou entre 0,125 mm e 0,25 mm, o que caracteriza areias finas e médias, sendo ambos, possivelmente, originados pela deriva litorânea do estado de Alagoas. Verificou-se que as características dos sedimentos encontrados dentro do canal, à jusante de Piaçabuçu (AL), e na região da praia do



Cabeço (SE), situada na margem direita, possuem variações semelhantes, o que confirma a existência do transporte de sedimentos do mar para o rio durante a maré enchente.

De acordo com os dados sísmicos resultantes do trabalho de campo na região do estuário do rio São Francisco, a extensão, o tamanho e as características das formas de fundo aluviais são produtos diretos do balanço entre erosão e deposição em diferentes partes do leito. Desta forma a sonografia nos forneceu informações sobre a natureza do fundo como, por exemplo, a textura, a composição e a orientação das feições.

Uma primeira avaliação destes novos dados sonográficos obtidos na região da foz do rio São Francisco, possibilitou a descrição de várias formas de fundo, delinear a distribuição regional e discutir suas relações em relação à estrutura de fluxo geral das correntes. Foram identificados três padrões principais de forma de fundo de acordo com ASHLEY (1990): dunas, ondulações e fundo plano (Foto 2).



**Foto 2. Vista das dunas submersas transportando sedimentos em 26/06/2001.**

As dunas foram classificadas de acordo com a descrição primária da forma em dunas bi-dimensionais - Dunas 2D e dunas tri-dimensionais - Dunas 3D. As formas bi-dimensionais (Dunas 2D) apresentam seções transversais prismáticas simples e dão origem as estratificações cruzadas tabulares. Enquanto as dunas tri-dimensionais (Dunas 3D) são caracterizadas por cristas sinuosas, cujo produto deposicional típico são as estratificações cruzadas acanaladas (“trough cross-bedding”).

Em geral, as dunas 3-D se formam com maiores velocidades de fluxo que as dunas 2-D, considerando que os outros parâmetros, tais como granulometria e profundidade, permaneceram constantes. Amostras coletadas “in situ” mostram que o leito composto por estas dunas é constituído predominantemente por areias finas a médias, moderadamente selecionadas.

As dunas no estuário são grandes, apresentando-se com 40 m de extensão e 1 m de altura, mas podendo variar entre 30 a 90 m de extensão e atingir até 2 m de altura. Campos de dunas grandes assimétricas (1<sup>a</sup>.ordem) podem apresentar superposição de dunas pequenas simétricas (2<sup>a</sup>.ordem) mostrando influência das marés. As grandes dunas dentro da calha do rio, a montante do estuário, tem extensões de quase quinhentos metros e altura de até oito metros.

Em direção à foz, as dunas vão diminuindo progressivamente de extensão e altura até atingirem a forma de ondulações simétricas, com menos de 1 m de extensão e média de 0,3 m de altura, apresentando cristas retas. Amostras coletadas “in situ” mostram que o leito composto por ondulações é constituído predominantemente por areias finas bem selecionadas.

Próximo às margens do rio, bem como na confluência de pequenos rios que deságuam no rio São Francisco, são observados os fundos planos, onde sedimentos finos são depositados a partir da suspensão. Localmente, o tipo de fundo marcado pela presença de dunas e ondulações pode ser intercalado ao fundo plano.

## **2.2. Efeitos dos reservatórios e regularização da vazão nas mudanças geomorfológicas**

A região do baixo São Francisco tem sofrido significantes mudanças em sua morfologia devido à regularização das suas vazões. Atualmente, em consequência do grande número de bancos de areia existentes ao longo do curso do rio, a navegação está difícil e somente é possível com pequenos barcos.

A regularização do baixo curso do rio São Francisco eliminou as fortes correntezas das enchentes, reduzindo assim a potencialidade cíclica do rio de transportar sedimentos. A redução do transporte de sedimentos pelo rio tem gerado assoreamentos que dificultam a navegação e alteram os nichos ecológicos além de produzirem um déficit de sedimentos no delta para a deriva litorânea, o que está resultando numa acelerada erosão de algumas praias próximas da foz.

## **3. IMPACTOS AMBIENTAIS NOS MANGUEZAIS E PRAIAS PRÓXIMAS À FOZ DO RIO SÃO FRANCISCO**

### **3.1 Localização dos manguezais e dunas**

Existe uma pequena área vegetada com mangues na margem direita do rio São Francisco, próximo a sua foz, que se estende 3 km na direção continental e 20 km na direção paralelo à costa. Esta região está sendo parcialmente erodida na sua extremidade junto à praia do Cabeço (Foto 3). No restante do rio não ocorrem margens inundáveis ou lagoas salgadas próprias para o crescimento deste tipo de vegetação.

Na margem esquerda da foz, a deriva litorânea não provoca um grande transporte de sedimentos ao longo da costa, os sedimentos que atingem o berma da praia são transportados pelo vento, sendo depositados sobre as dunas já formadas na região (Foto 4). Estas dunas migram lentamente na direção do rio e vão novamente alimentar as correntes de marés enchentes e vazante com este tipo de sedimentos de origem marinha. Isto é confirmado através da análise granulométrica dos sedimentos encontrados sobre as dunas, onde a granulometria variou entre 0,125 e 0,25, caracterizando sedimentos médios e finos semelhantes aos do berma da praia.



**Foto 3. Praia do Cabeço, na margem direita, sendo erodida pelas correntes e ondas (julho de 2000).**



**Foto 4. Campo de dunas, na margem esquerda, cobrindo antiga área de mangue (julho de 2002).**

### **3.2. Clima de ondas e correntes na região adjacente a foz**

Os ventos na região costeira predominam da direção nordeste, entre outubro e março, e da direção sudeste entre abril a setembro, com velocidades médias de 2,1 e 2,2 m/s

respectivamente. As calmarias oscilam entre 10 a 20% do tempo (Souza & Lima, 2000) Estes valores mostram que os ventos na região da foz do rio São Francisco são pouco efetivos para produzirem ondas que possam influenciar no mecanismo básico de desenvolvimento de ondas e correntes litorâneas.

O clima das ondas geradas no oceano aberto (Quadro 1) mostra pequenas variações sazonais nas suas alturas. Elas se propagam da direção ESE (azimute de 112°), oscilando mais para o Leste no verão e para o Sul no inverno. A margem alagoana do delta do rio São Francisco possui um alinhamento normal ao azimute de 130° e a margem sergipana possui um alinhamento normal ao azimute de 170°. Estes alinhamentos explicam o transporte de sedimentos de praia pela deriva litorânea para o Sudoeste, de Alagoas para Sergipe, formando bancos de sedimentos marinhos no delta do rio (Foto 5).

**Quadro 1. Alturas médias das ondas com diferentes períodos e sazonalidade.**

Estações do ano	Períodos		
	5,0 s	6,5 s	8,0 s
Verão	0,95 m	0,85 m	0,85 m
Outono	0,95 m	0,95 m	0,95 m
Inverno	1,25 m	1,25 m	1,15 m
Primavera	0,95 m	1,15 m	0,95 m



**Foto 5. Banco de areia na região oceânica, a 1 km do delta do rio São Francisco, gerado pela deriva litorânea de Alagoas para Sergipe (julho de 2000).**

O transporte de sedimento, feito pela deriva litorânea, criou dois esporões nas margens direita e esquerda da foz. O sedimento depositado na margem esquerda construiu um prolongamento maior do esporão de forma semi-submersa bloqueando a saída dos canais mais profundos, com isso o fluxo do rio que, anteriormente fluía sem nenhuma barreira começou a ser desviado na direção da margem direita, gerando um desvio do canal da foz do rio na direção da praia do cabeço, resultando em uma grande erosão nesta praia.

As praias localizadas na margem direita do delta do São Francisco estão sofrendo um processo contínuo de erosão, causado principalmente pela falta da reposição de sedimentos. Essa região tem maior transporte por deriva litorânea do que a margem esquerda porque o ângulo de incidência das ondas no litoral sergipano é mais perpendicular.

As enchentes, que anteriormente supriam o litoral sergipano com o déficit de sedimentos vindos do litoral alagoano, atualmente já não mais existem. Como consequência, grande parte do material transportado ao longo das praias do Sul deixou de ser repostado, provocando uma acelerada erosão das mesmas. O processo de erosão dessa região é contínuo e, apesar de recente, já trás problemas para população local.

### **3.3. Erosão das margens do rio junto à foz e praias adjacentes**

Os perfis transversais da praia do cabeço, de janeiro a maio de 2001, apresentaram uma característica típica da estação de verão, quando ocorre engordamento das praias, em consequência das ondas que incidem sobre a costa possuem menor altura e atingirem o litoral de forma menos oblíqua, com isso sua força de arraste tem menos energia.

Entre maio e novembro de 2001 ocorreu um grande recuo da praia do Cabeço, mudando completamente o seu perfil (Foto 6). Essa grande mudança se justifica pelo fato de que essas medidas foram realizadas durante o inverno (junho-julho-agosto), estação do ano com ondas geradas longe da costa e com grande poder destrutivo.



**Foto 6. Detalhes da praia do Cabeço (SE) erodida pelas correntes e ondas, com o berma da praia deslocado na direção do manguezal (novembro 2001).**

Durante o inverno ocorreu uma remoção de sedimento da praia, sendo parte desse sedimento levado pela deriva litorânea na direção sul, e outra parte, mais fina, foi transportado na direção do continente fazendo o berma da praia recuar e provocando destruição de algumas casas do pequeno povoado que ainda existia no local.

#### **4. MUDANÇAS DA MORFOLOGIA DO RIO**

##### **4.1. Efeitos antrópicos com a regularização das vazões**

O rio São Francisco, com uma vazão média anual de  $2.850 \text{ m}^3/\text{s}$ , apresenta uma das maiores vazões do Brasil, porém o rendimento de sedimento por área é um dos menores. Tal fato pode ser explicado pela grande área de drenagem do rio, como também devido às obras para geração de energia.

A partir da década de 50, foram construídas diversas barragens, provocando alterações no regime hidrológico do rio. As barragens construídas no São Francisco modificaram tanto a vazão líquida como a vazão sólida, pois retêm grande parte dos sedimentos que seriam transportados para a região costeira, a última destas barragens, construída no início da década de 1990, foi para a Usina Hidroelétrica de Xingó, (Foto 7).



**Foto 7. Vista da barragem da Usina Hidroelétrica de Xingó (julho de 2000).**

##### **4.2. Transporte de sedimentos na calha do Rio**

A variação encontrada no canal corresponde a sedimentos com características de areias médias e grossas, variando entre  $0,5 \text{ mm}$  e  $1,0 \text{ mm}$ , enquanto sobre os bancos de areia, os diâmetros variam entre  $0,125 \text{ mm}$  e  $0,250 \text{ mm}$ , ou seja, areias finas e médias. Portanto, no

canal, só os sedimentos finos são completamente transportados, permanecendo as areias com granulometria grossa.

Para o Baixo São Francisco, as atividades agrícolas intensivas são praticamente inexistentes, portanto sua influência quanto ao comportamento sedimentológico é ínfima. O principal problema, como já foi mencionado, está na eliminação das enchentes a partir da construção das barragens. No caso do rio São Francisco, observou-se que a maior produção de sedimentos está no alto e médio curso, porém esses sedimentos foram quase totalmente bloqueados e depositados nos reservatórios.

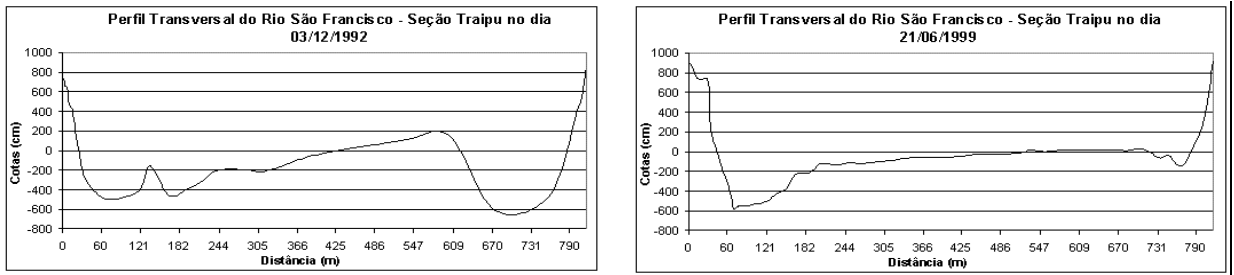
Em 1983 a descarga total de sedimentos do São Francisco para o oceano era de  $6 \times 10^6$  T/ano, com uma correspondente descarga específica de  $9 \text{ T/km}^2\text{ano}$ . No ano 2000 encontrou-se em Própria (SE), no Baixo São Francisco, um transporte total de apenas  $0,41 \times 10^6$  T/ano. Isto foi resultante da soma do transporte por arrasto e suspensão corresponderia a uma descarga específica para toda área da bacia  $0,64 \text{ T/km}^2\text{ano}$ , entretanto o material transportado deve ter se originado no baixo curso do rio.

Considerando somente a área do baixo São Francisco, pois o transporte de montante deve haver ficado retido nas represas, a descarga específica de sedimentos é de aproximadamente  $10,25 \text{ T/km}^2\text{ano}$ , o que ainda é bastante pequena. Essa pequena produção se deve às erosões das barrancas e às chuvas que caem sobre o solo da sub-bacia, que representa uma das poucas fontes de sedimento para o baixo São Francisco.

As diversas barragens existentes no rio São Francisco desencadearam um processo de retenção dos sedimentos em seus reservatórios. Com as barragens em forma de cascatas e a conseqüente eliminação das cheias, o rio perdeu a sua capacidade de transporte de sedimentos formando dunas dentro da calha do rio em diversos pontos (Foto 8). Também os principais canais naturais do rio foram modificados pelo assoreamento (Figura 5).



**Foto 8. Banco de areia semi-submerso a montante de Própria (SE) em 26/06/2001.**



**Figura 5. Perfis batimétricos transversais ao rio São Francisco em Traipú (AL) dos anos de 1992 e 1999, com diferentes referenciais horizontais e verticais.**

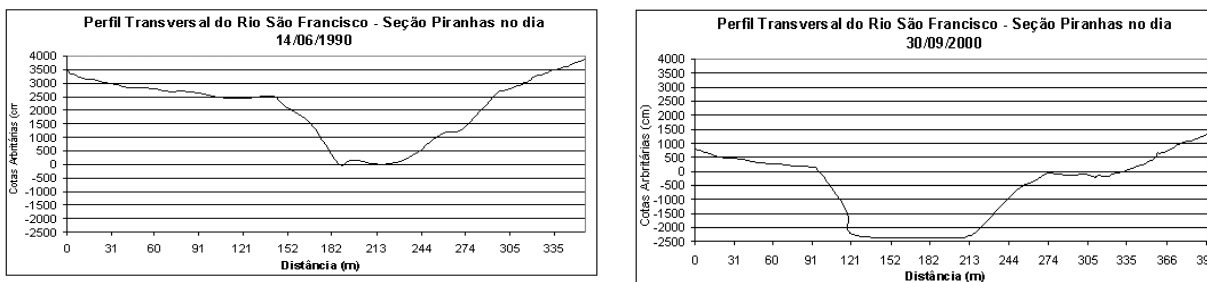
A água que é liberada pela UHE Xingó apresenta uma quantidade muito pequena de sedimentos em suspensão. O trecho à jusante, próximo da barragem, apresenta uma declividade acentuada, com a presença de corredeiras e turbulências (Foto 9), o que, somado a pouca quantidade de sedimentos em suspensão, propicia a erosão do leito do rio com cascalho.



**Foto 9. Leito erodido do rio São Francisco em Piranhas (AL) em 26/06/2001.**

Os perfis batimétricos transversais ao rio, na região próxima à cidade de Piranhas (Figura 6), tinham a forma de V até 1990 com depósitos de sedimentos no seu leito. A partir do enchimento do lago da UHE Xingó, o sedimento acumulado no fundo foi sendo erodido e o rio ficando mais profundo. No ano 2000, o leito rio parou de sofrer erosão o perfil transversal encontrado tinha a forma de U, com o leito do rio diretamente na rocha sem mais sedimentos para serem erodidos.

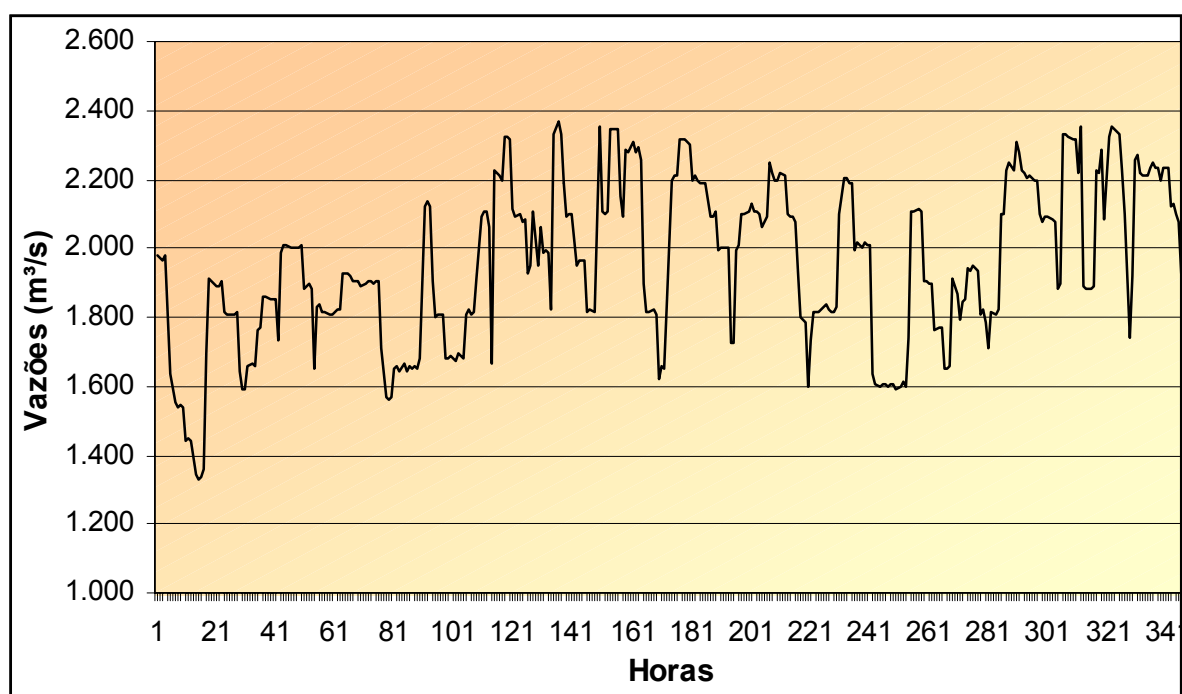




**Figura 6. Perfis batimétricos transversais ao rio São Francisco em Piranhas (AL) dos anos de 1990 e 2000, com diferentes referenciais horizontais e verticais.**

### 4.3. Erosão das barrancas

A principal causa da erosão das barrancas do rio é o fluxo e refluxo de água entre o aquífero e a calha do rio durante a oscilação horária dos níveis da água no rio, determinadas pela oscilação do volume de água liberado pela usina hidroelétrica de Xingo (Figura 7).



**Figura 7. Vazão horária liberada em Xingo na primeira quinzena de 1998.**

O assoreamento da calha do rio São Francisco está diretamente relacionado com a grande produção de sedimentos originados pela erosão das barrancas do rio (Foto 10) e a falta de enchentes para transportar este material até a região costeira adjacente.



**Foto 10. Barrancas do rio São Francisco sofrendo processos erosivos**

## **5. MEDIDAS PARA REDUÇÃO DO ASSOREAMENTO E EROSÃO**

### **5.1 Redução na erosão das barrancas do Rio**

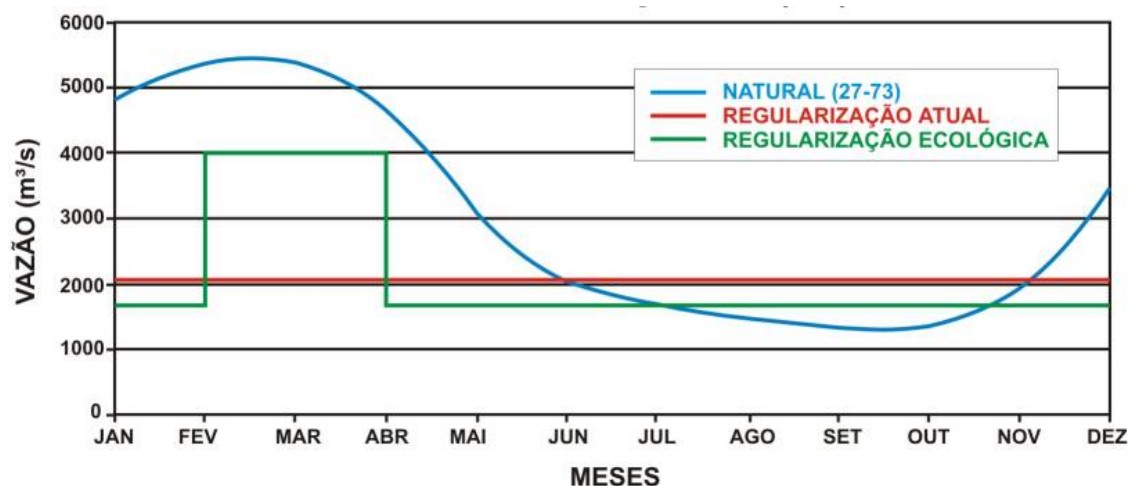
O rápido rebaixamento do nível de água do rio produz um grande fluxo subterrâneo na base dos barrancos retirando alguns materiais finos, que incrementavam sua resistência, tornando-os mais suscetíveis ao desmoronamento das suas partes superiores.

Uma medida eficiente para reduzir as erosões das barrancas é a re-regularização das vazões a jusante do trecho rochoso do rio, ou seja, a partir de Pão de Açúcar. Isto será possível com a construção de uma barragem que libere vazão constante durante as 24 horas do dia. Tal projeto de barragem já foi elaborado pela Companhia Hidroelétrica do São Francisco, CHESF, com a finalidade de permitir maior oscilação horária na geração UHE Xingó sem grandes danos ao meio ambiente e produzir em Pão de Açúcar uma geração de energia uniforme, com vazões sem oscilações horárias.

Outra medida que irá reduzir a erosão das barrancas é o desassoreamento do rio, porque os bancos de sedimentos que dificultam a passagem das correntes de água, desviam o talvegue do rio contra as barrancas, aumentando o poder erosivo na sua base submersa.

### **5.2. Efeitos das enchentes no processo de desassoreamento da calha do Rio**

O material assoreado na calha do rio poderá ser removido com a produção de grandes vazões semelhantes ao das cheias naturais (Figura 8). Entretanto, algum tempo após a uma cheia artificial, as barrancas voltarão a sofrer uma pequena erosão formando um novo suprimento de sedimentos disponíveis para serem levados por futuras cheias artificiais.



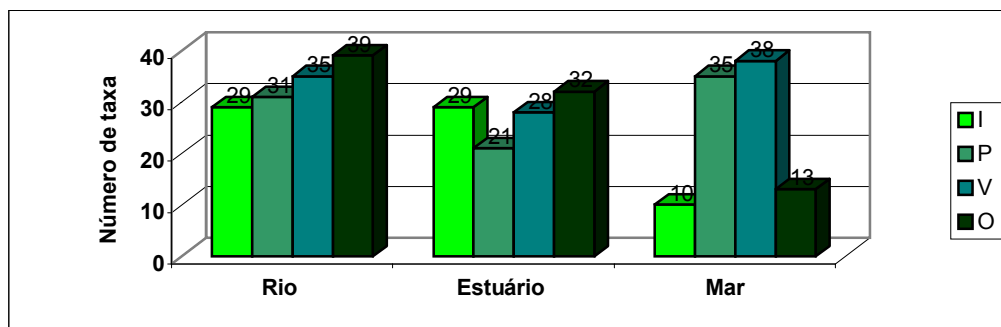
**Figura 8. Vazões: Natural, Regularizada atual e Regularizada ecológica do rio São Francisco em Pão de Açúcar.**

## 6. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DA BIOMASSA PLANCTÔNICA

Considerando a necessidade de correlacionar o transporte de sedimentos com a produtividade pesqueira o presente estudo abordou levantamento de dados presentes e pretéritos sobre hidrologia, plâncton, ictiofauna, carcinofauna, modalidades de pesca de peneídeos e fatores sócio-econômicos do Baixo São Francisco (AL/SE).

### 6.1. ocorrência e abundância do fitoplâncton zooplâncton e ictioplâncton

Foram identificadas 131 espécies de Fitoplâncton no sistema do rio São Francisco, envolvendo 8 espécies de cianofíceas; 46 de clorofíceas; 50 de diatomáceas, 24 dinoflagelados e 3 rodofíceas (Figura 9). As cianofíceas ocorreram nos três ambientes, porém com baixa representatividade. As clorofíceas e rodofíceas apresentaram abundância relativa muito baixa e predominaram no rio e estuário.



**Figura 9. Número de taxa fitoplanctônicas obtidas no rio, estuário e mar adjacente a foz do rio São Francisco, Alagoas.**

As bacilariofíceas foram mais abundantes no estuário e no mar. Já as pirrofíceas não ocorreram no rio e foram mais abundantes no mar do que no estuário. O estuário possui maior riqueza por receber contribuições de espécies provenientes do rio e do mar, além de possuir espécies adaptadas ao seu próprio ambiente.

A composição taxonômica do zooplâncton obtida no complexo do rio São Francisco envolveu apenas 5 filos animais: Annelida, Mollusca, Crustacea, Chaetognata e Chordata. O grupo dos

Crustacea Decapoda, principalmente Caridea, Brachyura e Penaeoidea, possui importância comercial. Apesar da ocorrência de zooplâncton no rio, estuário e mar, a comunidade ictioplanctônica no sistema do rio São Francisco apresentou-se pouco desenvolvida em relação a outros locais do Nordeste. A abundância relativa foi dominada principalmente por Copepoda, que normalmente ocupam a maior parte da abundância relativa em uma amostra de zooplâncton.

## 6.2. Distribuição sazonal e espacial do fitoplâncton zooplâncton e ictioplâncton

Para se estudar a distribuição espacial do plâncton foram caracterizadas 3 massas de água, essencialmente Tropicais:

-**Água límnic** : com condutividade entre 60 e 75  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e temperatura entre 27,6 e 28,6°C, presente na estação R, localizada no Rio São Francisco;

-**Água estuarina** : com salinidade entre 3,2 e 6,7 e temperatura entre 27,5 e 29,3°C encontrada na estação E, localizada no estuário do Rio São Francisco;

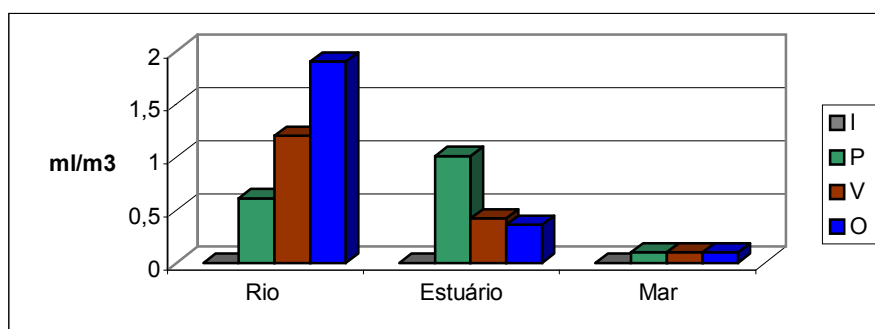
-**Água oceânica** : com salinidade oscilando entre 36,3 e 36,8 e temperatura entre 26,5 e 27,9°C, presente na estação M, situada na região costeira adjacente.

Com relação à influência dos parâmetros abióticos sobre os padrões espaciais e sazonais das comunidades planctônicas, foi possível verificar que a temperatura e o pH, em função da uniformidade na distribuição dos seus valores, não influenciaram a abundância e a distribuição dos organismos planctônicos.

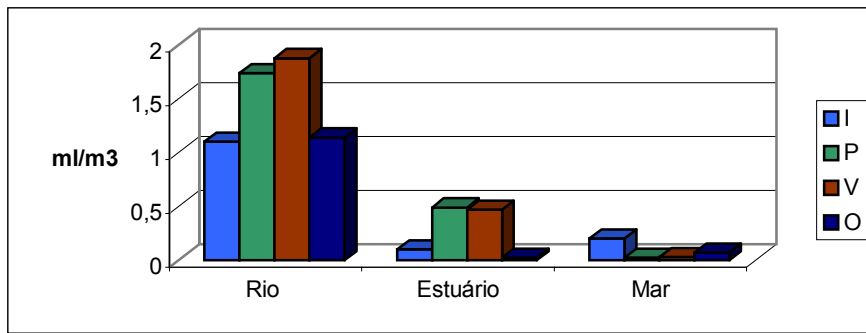
Porém, na região marinha, a elevada salinidade e transparência das águas estimularam a atividade de desova, enquanto que no estuário a salinidade intermediária e a menor transparência favoreceram a ocorrência de larvas de peixes.

No rio, a ausência de salinidade esteve associada com valores mais elevados de biomassa de fitoplâncton e zooplâncton.

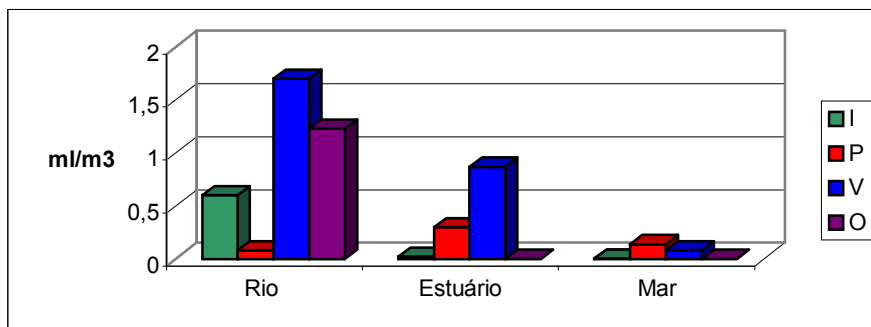
O estado trófico do ecossistema pelágico foi avaliado através da biomassa de fitoplâncton e biomassa de zooplâncton (Figuras 10, 11 e 12). A sazonalidade não afetou a produção planctônica. Em todas as épocas do ano os valores encontrados estiveram próximos do limite inferior esperado para regiões costeiras. Por isto foram considerados extremamente baixos, indicando que o rio pouco contribui para a produção planctônica da região costeira.



**Figura 10. Biovolume de fitoplâncton,  $\text{ml}/\text{m}^3$ , obtido no rio, estuário e mar, adjacentes à foz do rio São Francisco, Alagoas.**



**Figura 11. Biovolume de micropâncton, ml/m<sup>3</sup>, obtido no rio, estuário e mar, adjacente a foz do rio São Francisco, Alagoas.**

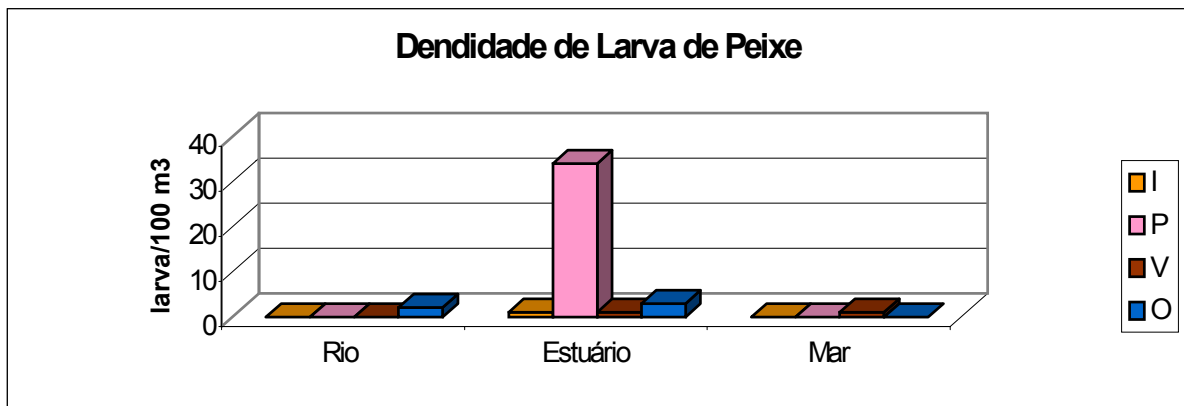


**Figura 12. Biovolume de macropâncton, ml/m<sup>3</sup>, obtido no rio, estuário e mar, adjacente a foz do rio São Francisco, Alagoas.**

### 6.3. Mudanças na produção da ictiofauna e carcinofauna com a construção dos reservatórios

Durante este estudo foram capturadas apenas 190 larvas de peixes, pertencentes a 7 Ordens e 12 famílias. Pelo menos 5 famílias possuem importância comercial: Engraulidae (pititinga), Hemiramphidae (agulinha), Gerreidae (carapeba), Sciaenidae (pescada) e Balistidae (peroá). A comunidade ictioplânctônica no sistema do rio São Francisco apresentou-se pouco desenvolvida em relação a outros locais do Nordeste, com reflexos na biologia pesqueira das espécies que deveriam estar utilizando este sistema como berçário (Figura 13).

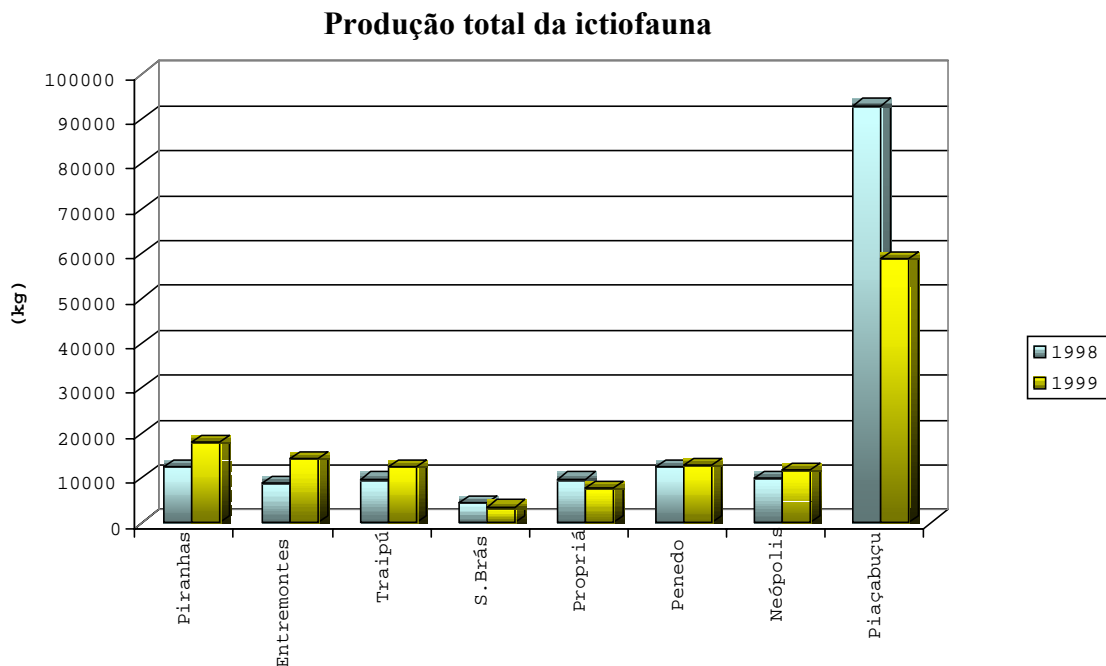
**O sistema rio-estuário-costa do São Francisco esta sendo muito pouco utilizado como sítio de desova e criação de larvas e jovens de peixes, já que as densidades de ictioplâncton encontradas estão abaixo do esperado para uma região costeira tropical. Isto se deve em parte pelo não enchimento das lagoas marginais e a eliminação das corredeiras do rio com a construção da barragem de Xingo.**



**Figura 13.** Densidade de larvas de peixes/100 m<sup>3</sup>, no sistema do rio São Francisco, Alagoas, entre agosto/2000 e maio/2001 (I, inverno; P, primavera; V, Verão; O, outono).

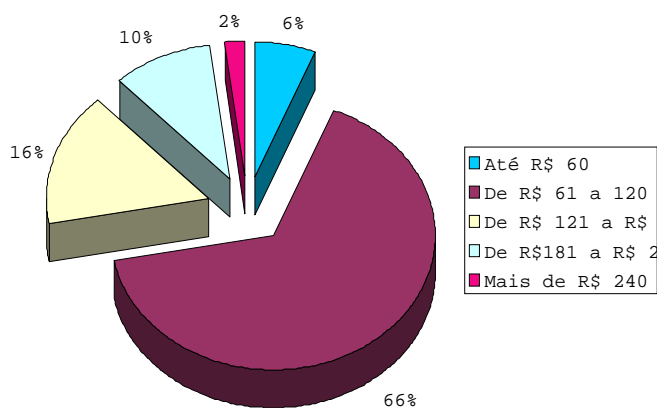
#### 6.4 Condições socioeconômica dos pescadores

A produção pesqueira do baixo São Francisco (Figura 14) é muito pequena, sobressaindo a cidade de Piaçabuçu, onde os pescadores também utilizam traineiras para se deslocam para as regiões oceânicas distantes da foz.



**Figura 14.** Produção total da ictiofauna (kg) por município/localidades do Baixo São Francisco, durante os anos de 1998 e 1999 (Costa & Coelho, 2000).

Como consequência da baixa produtividade pesqueira vem a baixa renda dos pescadores que não tem condições para navegar no oceano. Em Brejo Grande, na região estuarina, a maioria dos pescadores tem renda mensal entre 61 e 120 dólares e somente 2% dos pescadores conseguem renda mensal acima de 240 dólares (Figura 15), esta é uma distribuição de renda típica de todos as colônias de pescadores do Baixo São Francisco.



**Figura 15. Total de pescadores, em frequência relativa por classe de rendimento mensal, auferido com a pesca na sede municipal de Brejo Grande, Estado de Sergipe, no período de setembro de 1997 a fevereiro de 1998 (R\$ 1,00 = US\$ 1,00). (SOUZA, 1999).**

No caso de Piaçabuçu, onde existe uma grande produção pesqueira de origem oceânica, a produtividade aumenta significativamente, mas distribuição de renda não se altera porque o proprietário da embarcação de maior porte concentra a renda do produto pescado.

## 7. CONCLUSÕES E IMPACTOS

### Caracterização Física

- As regiões do Alto e do Médio São Francisco apresentam um maior índice anual de precipitação em torno de 1.500 mm, enquanto que a parte baixa teve a média de 500 mm, em consequência dos diferentes sistemas de produção de chuva. Para o alto e médio curso do São Francisco o período chuvoso vai de novembro a março com pico em dezembro de 290 mm e, para região do Baixo São Francisco, vai de março a agosto, registrando maior valor em maio com 63 mm. Isto faz com que a **sazonalidade hidrológica do Baixo São Francisco espelhe a sazonalidade pluviométrica do alto São Francisco.**

### Evolução histórica do rio e seu estuário

- O material em suspensão, representado por sólidos totais em suspensão (TSS), é transportado pelo rio para região costeira, porém com a regularização do seu caudal, eliminando as enchentes, e o período de quase repouso dentro dos lagos, a sua concentração reduziu-se drasticamente, produzindo um transporte para o oceano de cerca de  $0,4 \times 10^6$  Ton/ano, o qual é baixíssimo quando comparado com outros rios do mundo de porte similar.
- A maior produção de sedimentos na bacia do rio São Francisco ocorre nas regiões Alta e Média, como por exemplo, em Morpará (BA) com  $21,5 \times 10^6$  T/ano, onde estão localizados os seus maiores tributários. Porém, com a presença das barragens, esta carga de sedimento fica quase completamente retida sem atingir o Baixo São Francisco.

## **Impactos ambientais nos manguezais e praias próximas a foz do rio São Francisco**

- **A erosão das praias de Sergipe é um processo contínuo e recente, causado pela falta de reposição de sedimentos, que era suprida anteriormente pelas enchentes do rio.** Os perfis praias das margens direita e esquerda da foz do rio São Francisco são característicos de praias dissipativas, onde as ondas lavam toda a face praial, jogando os sedimentos mais finos para o berma da praia. O período de maior erosão da praia do Cabeço é durante o inverno, quando as maiores ondas e mais oblíquas a linha de praia atingem o litoral sergipano com maior energia, arrastando os sedimentos pela deriva litorânea.
- Os sedimentos finos da face praial são retirados da parte baixa da praia “pé da Praia” e depositados na parte alta “berma da praia”, sendo então parcialmente transportados pelos ventos. Isto contribui para a manutenção do campo de dunas na margem esquerda da foz. Como toda a face praial é afetada diretamente pelas ondas, então tanto os sedimentos grossos quanto os finos são arrastados pela deriva litorânea.
- O transporte litorâneo existente nas praias adjacentes a foz do rio São Francisco é controlado pelas correntes geradas pelas ondas produzidas longe da costa, sendo maior na costa sergipana. Normalmente este déficit era suprido pelo aporte do rio, entretanto com a redução do transporte fluvial as praias do litoral de Sergipe estão sendo erodidas.
- O estuário do rio São Francisco é do tipo bem misturado a maior parte do tempo, com correntes fortes e salinidade quase uniforme. Ele tem um alcance de aproximadamente 40 km, pois, seu limite está condicionado a influência da maré, atingindo a cidade de Penedo, possuindo uma penetração de cunha salina de 5 km durante o estofio de maré cheia.
- Considerando a ausência de sazonalidade térmica na região estuarina e oceânica, três massas de água Tropical foram definidas em função da salinidade e condutividade: água límnic do rio São Francisco, com condutividade, entre 60 e 75  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e salinidade próxima de zero; água estuarina, com salinidade entre 3,2 e 6,7 e água oceânica, com salinidade oscilando entre 36,3 e 36,8.

## **Mudanças da morfologia do rio**

- **Os bancos de areia, formados ao longo do baixo curso do rio São Francisco, são conseqüências da regularização da vazão do rio pelas barragens que controlam as enchentes, as quais eram responsáveis pelo transporte do material acumulado em seu leito.** A produção de sedimentos no Baixo São Francisco resulta da erosão dos barrancos situados em suas margens.
- As grandes amplitudes entre as vazões máximas e mínimas, como as encontradas entre 1948 e 1949, com mínimo de 1.400  $\text{m}^3/\text{s}$  no final de 1948, elevando-se para um pico de 13.000  $\text{m}^3/\text{s}$  no início de 1949 não ocorreram mais a partir de 1994, quando as vazões ficaram reduzidas entre 2.000  $\text{m}^3/\text{s}$  e 3.000  $\text{m}^3/\text{s}$ . A não ocorrência de pequenas vazões, que possibilitava a entrada da cunha salina até regiões interiores do rio, resultou em uma **intrusão salina apenas na região próximo a foz do estuário.**



- Os sedimentos transportados pelo rio, em regime de pequenas vazões, são responsáveis pelas grandes formas de fundo transversais, aqui denominadas dunas, com predomínio das dunas grandes bi-dimensionais. Estas formas de fundo (dunas 2-D e 3-D) observadas na calha do São Francisco indicam a competência do rio para transportar sedimentos. As ondulações, também geradas em condições de fluxo inferior, predominam na interface rio-mar e apresentam forma simétrica indicando a influência das correntes de maré.

### **Medidas para redução do assoreamento e erosão**

- Uma medida eficiente para reduzir as erosões das barrancas é a re-regularização das vazões a jusante do trecho rochoso do rio, ou seja, a partir de Pão de Açúcar. Isto será possível com a construção de uma barragem que libere vazão constante durante as 24 horas do dia. Tal projeto de barragem já foi elaborado pela Companhia Hidroelétrica do São Francisco, CHESF, com a finalidade de permitir maior oscilação horária na UHE Xingó sem grandes danos ao meio ambiente e produzir uma geração energia com vazão diária uniforme.
- **O material assoreado na calha do rio poderá ser removido com a produção de grandes vazões semelhantes ao das cheias naturais.** Entretanto, algum tempo após a uma cheia artificial, as barrancas voltarão a sofrer uma pequena erosão formando um novo suprimento de sedimentos disponíveis para serem levados por futuras cheias artificiais.
- A erosão dos barrancos está fornecendo grande quantidade de sedimentos grossos que o rio não tem capacidade de transportar. Estes sedimentos são transportados pelas correntes de forma helicoidal nas curvas dos meandros do talvegue do rio junto aos barrancos e depositados nos bancos de sedimentos no meio da calha do rio, forçando assim a intensificação dos meandros do canal principal do rio.

### **Distribuição espacial e temporal da biomassa planctônica**

- Devido à distribuição monótona dos valores de temperatura e pH estes parâmetros hidrológicos não influenciaram na formação de padrões espaciais e sazonais na abundância e distribuição dos organismos planctônicos no sistema do rio São Francisco.
- No mar, a elevada salinidade e transparência das águas, estiveram relacionadas com a atividade de desova de peixes; no estuário, a salinidade intermediária e a menor transparência na coluna de água, estiveram relacionadas com a atividade de criação de peixes; no rio, a ausência de salinidade e a transparência intermediária, foram associadas a valores mais elevados de biomassa de fitoplâncton e zooplâncton.
- **A pequena variabilidade sazonal dos parâmetros hidrológicos anulou a possível influência das épocas do ano, sobre a produção e densidade fitoplanctônica, zooplanctônica e ictioplanctônica, com total ausência de padrões sazonais.**
- Foi detectada a existência de padrões espaciais na distribuição da densidade de fitoplâncton, biomassa de fitoplâncton, micropoplâncton e macropoplâncton, com valores

mais elevados no rio São Francisco, valores intermediários no estuário e menores valores no mar, indicando uma maior produção no rio em relação ao estuário e região costeira.

- Os níveis de produção planctônica foram muito baixos, tanto em termos de biomassa, como de densidade, em todas as épocas do ano, que deve estar relacionado com os baixos níveis de produção pesqueira que vem sendo registrados na foz do rio São Francisco.
- O zooplâncton costeiro do sistema do rio São Francisco foi dominado em termos de riqueza e abundância pelo grupo dos Crustáceos, principalmente Copepoda, Caridea e Brachyura, como acontece tradicionalmente com comunidades zooplanctônicas costeiras .
- O sistema do rio São Francisco apresentou pequena riqueza ictioplanctônica, onde foram identificadas apenas 12 famílias, cuja associação costeira foi caracterizada pelas famílias pelágicas: Engraulidae e Syngnathidae e pelos demersais: Gobiidae, Gerreidae, Sciaenidae e Soleidae, apresentando-se pouco desenvolvida para uma região Tropical.
- O padrão espacial detectado na atividade reprodutiva dos peixes envolveu ausência de reprodução pelágica no rio São Francisco, desova na região costeira e pequena atividade de criação de larvas de peixes no interior do estuário, com reflexos negativos na biologia pesqueira e conseqüentemente na captura comercial das espécies que deveriam estar utilizando intensamente este sistema como berçário.
- O aumento do conhecimento sobre os vínculos existentes entre as diferentes abordagens do Plano de Gestão Integrado, que estão relacionadas com massa de água e com as comunidades pelágicas, no caso a ictiofauna e o plâncton, é que irá permitir uma definição sobre a necessidade da implantação, ou não, de um programa de monitoramento para as estas comunidades.

## 8. RECOMENDAÇÕES

**A principal recomendação é o monitoramento da evolução da degradação ambiental com erosão das barrancas do rio, assoreamento do leito do rio com areias e o avanço da erosão da praia.** A Finalidade desta recomendação é para a melhor quantificação das tendências futuras e a avaliação das medidas mitigadoras que vierem a serem tomadas.

Considerando que a eliminação das oscilações horárias de níveis da água a jusante de Pão de Açúcar irá reduzir a erosão das barrancas da margem do rio, recomenda-se, que esta barragem seja construída o mais breve possível, visto que ela já está prevista para a operação da capacidade ampliada de Xingó.

Uma recomendação para limpar a calha do rio, reduzindo a formação de bancos de areia que geram meandros no rio e mais erosão das barrancas é a produção anual de pequenas cheias controladas, com duração de algumas semanas, reduzindo assim o tamanho das dunas submersas, que geram meandros do talvegue do rio além de fornecer um aporte adicional de sedimentos para o delta.

## 8.1 Programa de monitoramento de longo prazo da dinâmica dos sedimentos

O sub-projeto 1.1.A Estudo Hidrodinâmico-sedimentológico do Baixo São Francisco, Estuário e Zona Costeira Adjacente (AL/SE) conseguiu identificar os mecanismos da produção e transporte de sedimentos no baixo curso do rio São Francisco e sua foz, entretanto não pode gerar informações suficientes para se realizar previsões de médio e longo prazo da evolução da calha do rio e sua zona costeira adjacente, selecionando quais intervenções seriam as mais eficientes ou com menor relação custo benefício.

Considerando a dinâmica da produção e transporte de sedimentos finos e arenosos na calha do rio São Francisco e sua foz, torna-se necessário à implantação de um programa de monitoramento de longo prazo da evolução dos níveis batimétricos e transporte de sedimentos entre a barragem de Xingo e a região Costeira adjacente à foz. Com esta nova série de informações será possível utilizar modelos para simular os efeitos de diferentes intervenções e monitorar as mudanças ocorridas no sistema com as intervenções que venham a ocorrer, calibrando e validando, com estes novos dados, os modelos de previsão.

**A Universidade Federal de Alagoas (UFAL) já possui infra-estrutura e pessoal treinado para a operação à longo prazo de um programa de monitoramento, garantindo assim a sustentabilidade** desta atividade sem nenhuma necessidade de novos aportes de recursos, isto se deve ao suporte dado pelo Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do Rio São Francisco (ANA/GEF/PNUMA/OEA) durante a atual fase.

Entretanto a implantação de um sistema de monitoramento da magnitude necessária para o melhor diagnóstico e previsão de médio e longo prazo da dinâmica sedimentar riverina e costeira, requer recursos complementares aos disponíveis nas instituições locais, por um período de até três anos, a partir de quando o programa adquiriria sua própria sustentabilidade com pessoal e recursos das instituições locais.

Ele será composto de três fases, cada uma associada a um **produto**:

- 1<sup>a</sup>) A primeira terá duração de doze meses, será constituída de um levantamento geodésico de precisão **para implantação de uma rede de marcos geodésicos com posicionamento e referência de nível de precisão.**
- 2<sup>a</sup>) A segunda deverá ser iniciada simultaneamente com a primeira e será implantada ao longo de três anos. Ela será constituída por levantamentos batimétricos e medições de transporte de sedimentos a intervalos constantes para **identificar modificações geomorfológicas ao longo do rio e zona costeira adjacente.**
- 3<sup>a</sup>) A terceira será desenvolvida durante o terceiro ano, será constituída pela calibração e validação de **modelos matemáticos de transporte de sedimentos no rio e zona oceânica adjacente à foz.**

**Quadro 2. Custo das três fases (US\$)**

<b>PRODUTOS</b>	Instituição doadora	Contrapartida	Custo Global
1) Marcos geodésicos	85.600	245.000	330.600
2) Identificar modificações geomorfológicas	390.500	985.000	1.375.500
3) Modelos matemáticos de transporte de sedimentos	65.000	99.500	164.500
<b>Custos Totais</b>	<b>541.100</b>	<b>1.329.500</b>	<b>1.870.600</b>

Os Principais parâmetros a serem monitorados serão as variações espaciais e temporais das velocidades e transporte de sedimentos, incluindo as migrações dos bancos de sedimentos do leito do rio e região oceânica adjacente, com medições de correntes, medições de transporte de sedimentos, medições de transparência da água e concentração de sedimentos em suspensão na coluna de água além de levantamentos batimétricos de precisão em regiões representativas dos diferentes tipos de bancos de sedimentos.

Adicionalmente ao monitoramento da dinâmica dos sedimentos no baixo curso do rio São Francisco e região costeira adjacente à foz, também deverá ser elaborado para a região, um plano de monitoramento da erosão das margens do rio, da carga de nutrientes, da concentração da clorofila, da produtividade dos diferentes níveis tróficos, tal com concentração de fitoplâncton, zooplâncton e ictioplâncton, e da variabilidade espacial e temporal de dinâmica bio-ecológica das espécies nativas do rio, estuário e oceano com medidas para proteção da área de mangue junto à foz.

**8.2. Produção sistemática de cheias ecológicas regularizadas**

O rio São Francisco, na sua condição natural, possuía cheias anuais que desassoreavam seu leito, e supriam material ao Delta para alimentar a deriva litorânea de sedimentos. Com a regularização, o aporte de sedimentos vindos de montante ficaram retidos nas represas e o sedimento produzido localmente pela erosão das barrancas ficou depositado na sua calha, produzindo grandes problemas ao meio ambiente.

Considerando que está previsto o aumento da capacidade de geração instalada na cascata de reservatórios da **Companhia Hidroelétrica do rio São Francisco - CHESF**, para atender a demanda regional de energia nas horas de picos de consumo, recomenda-se que a **Agência Nacional de Águas – ANA** negocie junto a **CHESF** para que estes reservatórios sejam operados todos os anos com suas capacidades máximas de geração, sem oscilações, por intervalos de tempo de algumas semanas.

Com o rio no atual nível as correntes de água contornam os bancos de sedimentos formando curvaturas acentuadas junto às margens e fluxo de forma helicoidal nestas barrancas submersas, contribuindo desta forma para transportar o material erodido das barrancas. O aumento da vazão, do nível da água e conseqüentemente das velocidades da água sobre as dunas submersas de sedimentos irá aumentar a capacidade do rio de transportar sedimentos, destruindo, desta forma, as dunas submersas que estão induzindo a formação de meandros do talvegue do rio e ainda transportarão uma grande quantidade de sedimentos para a região oceânica.

Estas cheias ecológicas seriam similares às cheias naturais, devendo assim aumentar o transporte de sedimentos, a turbidez da água pelo revolvimento do leito e o enchimento de algumas lagoas marginais. O rio deverá estar regularizado em dois patamares, um bastante alto, durante algumas semanas na estação das cheias naturais e outro durante o resto do ano um pouco abaixo do atual nível de regularização.

Os custos diretos destas cheias ecológicas são pouco significativos, porque toda a água das pequenas cheias estará gerando energia. Entretanto existirá um custo indireto relacionado com a transferência de energia para outras regiões de consumo e a redução da geração de energia nas hidroelétricas que atualmente abastecem estas regiões. Com uma nova regra de operação dos reservatórios, que incluam a vazão de cheias anuais haverá um provável aumento na produtividade pesqueira e redução da erosão das margens e praias da região costeira adjacente, entretanto os dados existentes ainda não permitem uma quantificação destes benefícios.

### **8.3. Construção da Barragem Hidroelétrica de Pão de Açúcar**

A construção da barragem hidroelétrica a jusante de Xingó em Pão de Açúcar, já prevista pela **CHESF**, para regularizar as oscilações horárias das vazões liberadas pela hidroelétrica de Xingó, irá reduzir as erosões das margens do rio. Estas erosões são geradas, em parte, pela queda dos barrancos enfraquecidos pelas atuais oscilações de níveis que geram fluxo e refluxo da água entre o aquífero e o rio.

# ESTUDO HIDRODINÂMICO SEDIMENTOLÓGICO DO BAIXO SÃO FRANCISCO, ESTUÁRIO E ZONA COSTEIRA ADJACENTE-AL/SE

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b>	1
<b>1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO BAIXO SÃO FRANCISCO</b>	7
1.1. Geologia e Geomorfologia	7
1.2. Clima / Precipitações	9
1.3. Vazões	11
1.4. Sedimentos	13
<b>2. EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO RIO SÃO FRANCISCO E DO SEU ESTUÁRIO</b>	16
2.1. Evolução geológica do Delta do rio São Francisco	16
2.2. Efeitos dos reservatórios e regularização da vazão nas mudanças geomorfológicas	19
<b>3. IMPACTOS AMBIENTAIS NOS MANGUEZAIS E PRAIAS PRÓXIMAS À FOZ DO RIO SÃO FRANCISCO</b>	21
3.1. Localização dos manguezais e dunas	21
3.2. Clima de ondas e correntes na região adjacente a foz	19
3.3. Erosão nas margens do rio junto à foz e praias adjacentes	24
<b>4. MUDANÇAS DA MORFOLOGIA DO RIO</b>	27
4.1. Efeitos antrópicos com a regularização das vazões	27
4.2. Transporte de sedimentos na calha do Rio	31
4.3. Erosão das barrancas do Rio	33
<b>5. MEDIDAS PARA REDUÇÃO DO ASSOREAMENTO E EROSÃO</b>	35
5.1. Redução na erosão das barrancas do Rio	35
5.2. Efeitos das enchentes no processo de desassoreamento da calha do Rio	35
<b>6. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DA BIOMASSA PLANCTÔNICA</b>	38
6.1. Ocorrência e abundância de fitoplâncton, zooplâncton e ictioplâncton	38
6.1.1 Fitoplâncton	38
6.1.2 Zooplâncton	41
6.1.3 Ictioplâncton	41
6.2. Distribuição sazonal e espacial de fitoplâncton, zooplâncton e ictioplâncton	42
6.2.1 Distribuição espacial e sazonal de fitoplâncton	45
6.2.2 Distribuição espacial e sazonal do zooplâncton	47
6.2.3 Distribuição espacial e sazonal de ovos de peixes	48
6.2.4 Distribuição espacial e sazonal de larvas de peixes	49
6.3. Mudanças na produção da ictiofauna e carcinofauna com a construção dos reservatórios	50
6.3.1 Participação relativa da ictiofauna límnic	51
6.3.2 Participação relativa da ictiofauna estuarina/marinha	52

6.3.3	Carcinofauna	53
6.3.4	Produção total de camarão	54
6.3.5	Modalidades de pesca de peneídeos	54
6.4.	Condições socioeconômica dos pescadores	57
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÕES E IMPACTOS</b>	<b>59</b>
7.1.	Caracterização Física	59
7.2.	Evolução histórica do rio e seu estuário	59
7.3	Mudanças na morfologia do rio	60
7.4	Medidas para redução do assoreamento e erosão	61
7.5	Distribuição espacial e temporal da biomassa planctônica	61
<b>8.</b>	<b>RECOMENDAÇÕES</b>	<b>62</b>
8.1.	Programa de monitoramento de longo prazo da dinâmica dos sedimentos	63
8.2.	Produção sistemática de cheias ecológicas regularizadas	67
8.3	Construção da barragem Hidroelétrica de Pão de Açúcar	67
<b>9.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>69</b>
<b>10.</b>	<b>ATORES</b>	<b>78</b>
10.1.	Instituições	78
10.2	Equipe do Subprojeto	79

## **ANEXOS**

- 1. ESTUDO DOS PROCESSOS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DA FOZ DO RIO SÃO FRANCISCO (Relatório Final)**
- 2. CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA-SEDIMENTOLÓGICA DO BAIXO SÃO FRANCISCO (Relatório Final)**
- 3. DINÂMICA DOS SEDIMENTOS DO ESTUÁRIO, DELTA E REGIÃO OCEÂNICA ADJACENTE A FOZ DO RIO SÃO FRANCISCO (Relatório Final)**
- 4. EVOLUÇÃO HISTÓRICA DA DISTRIBUIÇÃO DO PLÂNCTON, ICTIOFAUNA E CARCINOFAUNA, DO BAIXO SÃO FRANCISCO (Relatório Final)**
- 5. ANÁLISE DE PADRÕES ESPACIAIS E SAZONAIS NA DISTRIBUIÇÃO E ABUNDÂNCIA DO FITOPLÂNCTON, ZOOPLÂNCTON E ICTIOPLÂNCTON NA REGIÃO DA FOZ DO RIO SÃO FRANCISCO (Relatório Final)**

## **LISTA DE FIGURAS**

- |   |  |   |
|---|--|---|
| 1 | Subdivisão da bacia do rio São Francisco   | 4 |
| 2 | Localização dos pontos de amostragem e medições no Baixo São Francisco, estuário e zona oceânica adjacente. (A) Fonte: CODEVASF (2002) | 5 |

3	Localização dos pontos de amostragem e medições no Baixo São Francisco, estuário e zona oceânica adjacente. (B) Fonte: CODEVASF (2002)	6
4	Localização dos pontos de amostragem e medições no Baixo São Francisco, estuário e zona oceânica adjacente. (C) Fonte: CODEVASF (2002)	7
5	Distribuição da precipitação média mensal em Divinópolis, no período de 1942-1999.	10
6	Variação anual da precipitação em Divinópolis, no período de 1942-1999	10
7	Distribuição da precipitação média mensal em Piranhas, no período de 1942-1999.	11
8	Variação anual da precipitação em Piranhas, no período de 1942-1999.	11
9	Variação da vazão média mensal na cidade de Pão de Açúcar, no período de 1943-1999	12
10	Variação anual da vazão máxima e média em Pão de açúcar, no período de 1943-1999.	13
11	Variação da vazão média mensal anual em Pão de açúcar, no período de 1943-1999.	13
12	Foz do Rio São Francisco dominada por ondas.	17
13	Distribuição dos mangues no delta do rio São Francisco	21
14	Perfil de praia na região no povoado do Cabeço para os anos de 2001 e 2002.	25
15	Perfil Transversal do Rio São Francisco em Piranhas (14/06/90)	29
16	Perfil Transversal do Rio São Francisco em Piranhas (25/11/95)	29
17	Perfil Transversal do Rio São Francisco em Piranhas (30/09/00)	30
18	Vazão horária liberada em Xingo na primeira quinzena de 1998	33
19	Vazão média mensal liberada em Xingo	36
20	Vazões: Natural, Regularizada atual e Regularizada ecológica do rio São Francisco em Pão de Açúcar	37
21	Número de taxa fitoplanctônicas obtidos no rio, estuário e mar adjacente a foz do rio São Francisco, Alagoas.	39
22	Abundância relativa de Cyanophyta obtida no rio, estuário e mar adjacente a foz do rio São Francisco, Alagoas.	39
23	Abundância relativa específica de Chlorophyta obtida no rio, estuário e mar adjacente a foz do rio São Francisco, Alagoas.	39
24	Abundância relativa específica de Bacillariophyta obtida no rio, estuário e mar adjacente a foz do rio São Francisco, Alagoas.	40
25	Abundância relativa específica de Pyrrophyta obtida no rio, estuário e mar adjacente a foz do rio São Francisco, Alagoas.	40
26	Abundância relativa específica de Rodophyta obtida no rio, estuário e mar adjacente a foz do rio São Francisco, Alagoas.	40
27	Biovolume de fitoplâncton, ml/m <sup>3</sup> , obtido no rio, estuário e mar, adjacente a foz do rio São Francisco, Alagoas.	43
28	Biovolume de micropâncton, ml/m <sup>3</sup> , obtido no rio, estuário e mar, adjacente a foz do rio São Francisco, Alagoas.	44
29	Biovolume de macropâncton, ml/m <sup>3</sup> , obtido no rio, estuário e mar, adjacente a foz do rio São Francisco, Alagoas.	45
30	Densidade/m <sup>3</sup> de fitoplâncton obtido no rio, estuário e mar adjacente a foz do rio São Francisco, Alagoas, entre agosto/2000 e maio/2001.	46
31	Abundância relativa de organismos zooplanctônicos no sistema do rio São Francisco, Alagoas, entre agosto/2000 e maio/2001.	47
32	Densidade de organismos zooplanctônicos (org/m <sup>3</sup> ), no sistema do rio São Francisco, Alagoas, entre agosto/2000 e maio/2001.	47
33	Abundância relativa de larvas de peixes, no sistema do rio São Francisco,	



Alagoas, entre agosto/2000 e maio/2001 (I, inverno; P, primavera; Verão; O, outono).	48
34 Densidade de ovos de peixes/100 m <sup>3</sup> , no sistema do rio São Francisco, Alagoas, entre agosto/2000 e maio/2001 (I, inverno; P, primavera; Verão; O, outono).	49
35 Densidade de larvas de peixes/100 m <sup>3</sup> , no sistema do rio São Francisco, Alagoas, entre agosto/2000 e maio/2001 (I, inverno; P, primavera; Verão; O, outono).	50
36 Produção total da ictiofauna (kg) por município/localidades do Baixo São Francisco, durante os anos de 1998 e 1999 (Fonte: UFAL/EPEAL — Monitoramento da pesca, COSTA & COELHO, 2000).	50
37 Participação relativa (%) das principais famílias da ictiofauna límnic do Baixo São Francisco, 1998 (Fonte: UFAL/EPEAL — Monitoramento da pesca, COSTA & COELHO, 2000).	51
38 Participação relativa (%) das principais famílias da ictiofauna límnic do Baixo São Francisco, 1999 (Fonte: UFAL/EPEAL — Monitoramento da pesca, COSTA & COELHO, 2000).	52
30 Participação relativa (%) das principais famílias da ictiofauna estuarina/marinha do Baixo São Francisco, 1998 (Fonte: UFAL/EPEAL — Monitoramento da pesca, COSTA & COELHO, 2000).	52
40 Produção total da carcinofauna <i>Macrobrachium carcinus</i> (kg) por município/localidades do Baixo São Francisco, durante os anos de 1998 e 1999 (Fonte: UFAL/EPEAL — Monitoramento da pesca, COSTA & COELHO, 2000).	53
41 Produção total da carcinofauna (kg) por município/localidades do Baixo São Francisco, durante os anos de 1998, 1999 (Fonte: UFAL/EPEAL — Monitoramento da pesca, COSTA & COELHO, 2000) e 2000 (Fonte: IBAMA, Alagoas, 2001).	54
42 Rendimento mensal dos pescadores do Cabeço, frequência relativa por classe de rendimento mensal, auferido com a pesca no povoado Cabeço, Município de Brejo Grande, Estado de Sergipe, no período de setembro de 1997 a fevereiro de 1998. (Fonte: UFPE – Tese de Mestrado (Souza, 1999).	57
43 Redimento mensal dos pescadores de Saramém, em frequência relativa por classe de rendimento mensal, auferido com a pesca no povoado Saramém, Município de Brejo Grande, Estado de Sergipe, no período de setembro de 1997 a fevereiro de 1998. (Fonte: UFPE – Tese de Mestrado (Souza, 1999).	58
44 Rendimento mensal dos pescadores de Brejo Grande, em frequência relativa por classe de rendimento mensal, auferido com a pesca na sede municipal de Brejo Grande, Estado de Sergipe, no período de setembro de 1997 a fevereiro de 1998. (Fonte: UFPE – Tese de Mestrado (Souza, 1999).	58

## LISTA DE QUADROS

1 Biovolume de fitoplâncton, em ml/m <sup>3</sup> , obtido no rio (R) estuário (E) e mar (M) adjacente a foz do rio São Francisco, Alagoas. (A = arrasto A; B = arrasto B).	43
2 Biovolume de microplâncton, em ml/m <sup>3</sup> , obtido no rio (R) estuário (E) e mar (M) adjacente a foz do rio São Francisco, Alagoas. (A = arrasto A; B = arrasto B).	44
3 Biovolume de macropilâncton, em ml/m <sup>3</sup> , obtido no rio (R) estuário (E) e mar (M) adjacente a foz do rio São Francisco, Al. (A = arrasto A; B = arrasto B).	45
4 Densidade de fitoplâncton (organismos/m <sup>3</sup> ) obtido no rio, estuário e mar adjacente a foz do rio São Francisco, Alagoas.	46
5 Produção total (kg) por espécie e por município/localidade, entre 1998 e 1999 (Costa & Coelho, 2000).	53

6	Produção total (kg) por espécie e por município/localidade, entre 1998/99 (Costa & Coelho, 2000) e 2000 (IBAMA, Alagoas, 2001).	54
---	---	----

## LISTA DE FOTOS

1	Barragem da Usina Hidroelétrica de Xingó	2
2	Bancos de areia assoreando a calha do rio	3
3	Imagem aérea da foz do rio São Francisco na década de 70	3
4	Imagem aérea da foz do rio São Francisco no ano 2001	3
5	Detalhes dos bancos de sedimentos no rio São Francisco a montante de Propriá (SE) em 26/06/2001.	15
6	Vista das dunas submersas transportando sedimentos em 26/06/2001	19
7	Distribuição dos mangues no delta do rio São Francisco	22
8	Praia do Cabeço na margem direita	22
9	Banco de areia na região oceânica em frente ao delta a 3 km da foz	23
10	Erosão da praia do Cabeço na margem direita do delta do rio São Francisco	24
11	Detalhes da praia do Cabeço (SE) erodida pelas correntes e ondas, com o berma da praia deslocado na direção do manguezal (novembro 2001)	26
12	Vista da barragem da Usina Hidroelétrica de Xingó (julho de 2000)	27
13	Turbulência da corrente próximo a Piranhas (rio São Francisco)	28
14	Leito erodido do rio São Francisco próximo a Piranhas (AL) em 26/06/2001	28
15	Lagoa marginal próximo à São Brás durante a estação de chuvas locais.	30
16	Lagoa marginal transformada em viveiro de peixes	31
17	Banco de sedimentos depositados na calha do rio, provenientes das barrancas do rio.	32
18	Barrancos do rio São Francisco sofrendo processos erosivos	33
19	Detalhes de um barranco sendo erodido	34
20	Embarcação típica utilizada pelos pescadores	57

## LISTA DE SIGLAS

<b>AL</b>	Alagoas
<b>ANA</b>	Agência Nacional de Água
<b>ANEEL</b>	Agência Nacional de Energia Elétrica
<b>CCEN</b>	Centro de Ciências Exatas e Naturais
<b>CHESF</b>	Companhia Hidro Elétrica do São Francisco.
<b>CODEVASF</b>	Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba
<b>DF</b>	Distrito Federal.
<b>DNAEE</b>	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica.
<b>EDUFAL</b>	Editora da Universidade Federal de Alagoas
<b>ENOS</b>	El Niño Oscilação Sul
<b>FUNDEPES</b>	Fundação de Desenvolvimento Extensão e Pesquisa

<b>GEF</b>	Global Environment Facility.
<b>IBAMA</b>	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente
<b>IG-USP</b>	Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo
<b>IOS</b>	Índice de Oscilação Sul
<b>MMA</b>	Ministério do Meio Ambiente
<b>NASA</b>	National Aeronautic & Space Administration
<b>NEB</b>	Nordeste Brasileiro
<b>NMRH-AL</b>	Núcleo de Meteorologia e Recursos Hídricos de Alagoas
<b>OEA</b>	Organização dos Estados Americanos
<b>PE</b>	Pernambuco
<b>PLANVASF</b>	Plano de Diretor para o Desenvolvimento do Vale do São Francisco
<b>PNUMA</b>	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
<b>RJ</b>	Rio de Janeiro
<b>SE</b>	Sergipe
<b>SRH</b>	Secretaria de Recursos Hídricos
<b>SUVALE</b>	Superintendência do Vale do São Francisco
<b>TSM</b>	Temperatura da Superfície do Mar
<b>TSS</b>	Total de Sedimentos em Suspensão
<b>UFAL</b>	Universidade Federal de Alagoas
<b>ZCAS</b>	Zona de Convergência do Atlântico Sul
<b>ZCIT</b>	Zona de Convergência Inter-tropical