



IMPACTOS NOS PROCESSOS MORFOLÓGICOS DO BAIXO CURSO DO RIO SÃO FRANCISCO, DECORRENTES DA CONSTRUÇÃO DE BARRAGENS

Amparo de Jesus Barros Damasceno Cavalcante

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientadores: Susana Beatriz Vinzon

Marcos Aurélio Vasconcelos

Freitas

Rio de Janeiro

Outubro de 2011

IMPACTOS NOS PROCESSOS MORFOLÓGICOS DO BAIXO CURSO DO RIO
SÃO FRANCISCO, DECORRENTES DA CONSTRUÇÃO DE BARRAGENS

Amparo de Jesus Barros Damasceno Cavalcante

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Examinada por:

Prof^a. Susana Beatriz Vinzon, D.Sc.

Prof. Marcos Aurélio Vasconcelos Freitas, D.Sc.

Prof. Paulo Cesar Colonna Rosman, Ph.D

Prof. José Almir Cirilo, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

OUTUBRO DE 2011

Cavalcante, Amparo de Jesus Barros Damasceno

Impactos nos Processos Morfológicos do Baixo Curso do Rio São Francisco, Decorrentes da Construção de Barragens. / Amparo de Jesus Barros Damasceno Cavalcante. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011.

XIX, 138 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Susana Beatriz Vinzon

Marcos Aurélio Vasconcelos Freitas.

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2011.

Referências Bibliográficas: p. 139-145.

1. Construção de Barragens. 2. Redução de descargas líquidas e sólidas. 3. Impactos nos Processos Morfodinâmicos. I. Susana Beatriz Vinzon *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

Este trabalho é dedicado ao Cristo o criador e a minha querida e eterna mãe (*in memorian*) por mais uma vitória concedida em minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Jesus Cristo, filho de Deus, por nos ter concedido a magnitude da criação e dom da sabedoria que excede todo entendimento.

A minha querida e eterna mãe, Conceição Damasceno (*in memoriam*) por seu direcionamento na importância dos estudos, bem como pelo amor, carinho e dedicação.

A meu pai, William Damasceno (*in memoriam*), por seu desejo de me ver qualificada profissionalmente.

Ao meu marido, pela colaboração na coerência do trabalho e também pela compreensão, amor e carinho durante a longa jornada desta pesquisa.

As pessoas e instituições que de forma direta ou indiretamente contribuíram para a elaboração deste trabalho.

Meus sinceros agradecimentos à bolsa de estudo concedida pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), sob o qual proporcionou um auxílio financeiro ao desenvolvimento desta pesquisa.

A Prof^a. Susana Beatriz Vinzon e ao Prof Marcos Aurélio Vasconcelos Freitas, pela segura orientação, pelas palavras de repreensão e ao mesmo tempo de ânimo e apoio quanto da recomendação deste documento.

A querida Tia Lúcia e ao Tio Duarte por seus incentivos, amor e carinho.

Aos amigos de verdade: Clarisse, Ábia, Marise, Nataly, John, Jorge, Pepe, Marcelo, Karina, Iran, Teodózio, Corbiniano, Cícero, Lazáro, Cláudia, Bárbara, Ramiro, Evelyne, Fátima e toda a equipe da AGEVAP que nas horas mais difíceis estenderam suas mãos para a finalização deste trabalho, bem como de incentivo e companheirismo.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

IMPACTOS NOS PROCESSOS MORFOLÓGICOS DO BAIXO CURSO DO RIO SÃO FRANCISCO, DECORRENTES DA CONSTRUÇÃO DE BARRAGENS

Amparo de Jesus Barros Damasceno Cavalcante

Outubro/2011

Orientadores: Susana Beatriz Vinzon

Marcos Aurélio Vasconcelos Freitas.

Programa: Engenharia Oceânica

Este trabalho apresenta os impactos morfológicos no sistema fluvial e estuarino do baixo curso do rio São Francisco, decorrentes da construção de barragens, bem como propõe ações de recuperação à área impactada. Precipitações máximas e totais mensais e anuais foram analisadas nas estações de Piranhas, SE (1935-2011) e Piaçabuçu, SE (1929-2011). Somente a estação de Piranhas apresentou valores de precipitação abaixo do padrão normal climatológico nos de 1999 a 2001. Os estudos de vazões líquidas nas estações de Piranhas, SE (1979-2008), Pão de Açúcar, AL (1960-2007), Traipu, AL (1977-2008) e Propriá, SE (1977-2008) revelam a redução das vazões máximas, mínimas e médias mensais e anuais. Quanto as vazões sólidas, na estação de Piranhas, SE em 3 anos de estudo (2006 a 2009) a média anual de concentração de sedimentos em suspensão (C_{ss}) foi de 6,1 mg/l e a descarga sólida (Q_{ss}) foi de 935 ton/dia. Na estação de Traipu, AL e Propriá, SE durante 10 anos de estudo (2000 a 2010), os resultados mostraram que as médias anuais de concentração de sedimentos em suspensão foram de 13,33 mg/l e 12,76 mg/l e as descargas sólidas de 2.115 ton/dia e 1.938 ton/dia. Os resultados revelam alterações das vazões líquidas e sólidas no baixo São Francisco, após a construção de barragens, ocasionando o aceleração dos processos erosivos nas margens e linha de costa da região em estudo.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

IMPACTS ON MORPHOLOGICAL PROCESSES OF THE LOWER COURSE OF
THE RIVER SÃO FRANCISCO, ARISING FROM THE CONSTRUCTION OF
DAMS

Amparo de Jesus Barros Damasceno Cavalcante

October/2011

Advisors: Susana Beatriz Vinzon

Marcos Aurélio Vasconcelos Freitas.

Department: Ocean Engineering

This paper presents the morphological impacts in estuarine and river system of the lower course of the Sao Francisco River, resulting from the construction of dams, as well as proposes actions for recovery of the impacted area. Maximum precipitation and monthly and annual totals were analyzed at stations Piranhas, SE (1935-2011) and Piaçabuçu, SE (1929-2011). Only Piranhas station had values of precipitation below the normal climatological standard from 1999 to 2001. The studies of liquid flow at the stations Piranhas, SE (1979-2008), Pão de Açúcar, AL (1960-2007), Traipu, AL (1977-2008) and Propriá, SE (1977-2008) reveal the reduction in maximum, minimum and midium monthly and annual flow. About the solid flow rates, at Piranhas station, SE, during a 3 years study (2006-2009) the annual average of concentration of suspended sediments (C_{ss}) was 6.1 mg / l and solid discharge (Q_{ss}) was 935 ton / day. At Traipu station, AL, and Propriá, SE, during 10 years of study (2000-2010), results showed that the average annual of concentration of suspended sediments were 13.33 mg / l and 12.76 mg / l and solid discharges of 2,115 ton / day and 1,938 tons / day. Results reveal changes in liquid and solid flow in the lower São Francisco, after the construction of dams, causing the accelerating erosion of the banks and shoreline of the study area.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA

AGRADECIMENTOS

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	1
1.1. Conseqüências da alteração no sistema de cursos de águas naturais.....	3
1.2. Breve histórico do sistema hidrelétrico brasileiro e os impactos oriundos de barragens.....	4
1.3. Problemas socioambientais ocasionados por barragens.....	10
1.4. Política Nacional de Meio Ambiente.....	13
1.5. Legislação aplicada aos recursos hídricos.....	16
<i>1.5.1. Legislação aplicada à bacia hidrográfica do São Francisco.....</i>	<i>18</i>
1.6. Políticas e ações aplicadas à preservação dos estuários.....	20
2. ÁREA DE ESTUDO.....	22
2.1. Localização e descrição física geral.....	22
2.1.1. <i>Geologia e geomorfologia.....</i>	<i>23</i>
2.1.2. <i>Pedologia e cobertura vegetal.....</i>	<i>25</i>
2.1.3. <i>Hidrologia.....</i>	<i>26</i>
2.1.4. <i>Clima e precipitações.....</i>	<i>28</i>
2.1.5. <i>Ambiente costeiro.....</i>	<i>30</i>
2.2. Caracterização sócio-econômica.....	33
2.3. Levantamento da problemática ambiental do baixo São Francisco.....	38
3. IMPACTOS NOS PROCESSOS MORFOLÓGICOS DO BAIXO CURSO DO RIO SÃO FRANCISCO.....	40
3.1. Dados pluviométricos, vazões líquidas, sólidas e concentração de sedimentos em suspensão.....	40

3.2.	Caracterização das estações.....	41
3.3.	Precipitações mensais e anuais.....	45
3.4.	Vazões máximas, mínimas e médias mensais e anuais.....	48
3.5.	Vazões líquidas, sólidas e concentração de sedimentos em suspensão.....	54
3.6.	Morfodinâmica fluvial.....	58
3.6.1.	<i>Efeitos hidrológicos, geomorfológicos e sedimentológicos gerais da construção e operação de barragens.....</i>	<i>62</i>
3.6.2.	<i>Alterações nas descargas líquidas a jusante de barragens.....</i>	<i>65</i>
3.6.3.	<i>Alterações nas descargas sólidas a jusante de barragens.....</i>	<i>71</i>
3.6.4.	<i>Caracterização, identificação e distribuição da erosão marginal</i>	<i>76</i>
3.6.5.	<i>Comportamento geotécnico dos taludes marginais.....</i>	<i>90</i>
3.6.6.	<i>Evolução histórica dos impactos morfológicos no canal do baixo curso do rio São Francisco.....</i>	<i>95</i>
3.7.	Morfodinâmica estuarina.....	103
3.7.1.	<i>Dinâmica costeira e seus reflexos na erosão marginal.....</i>	<i>109</i>
3.7.2.	<i>Evolução histórica dos impactos morfológicos na linha de costa do baixo São Francisco.....</i>	<i>114</i>
4.	RECUPERAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS NO BAIXO CURSO DO RIO SÃO FRANCISCO.....	120
4.1.	Controle de sedimentos.....	120
4.2.	Controle de sedimentos em cursos de água.....	122
4.3.	Controle de sedimentos nos reservatórios.....	124
4.3.1.	<i>Medidas preventivas.....</i>	<i>124</i>
4.3.2.	<i>Medidas corretivas.....</i>	<i>126</i>
4.4.	Aplicabilidade da bioengenharia de solos no controle da erosão marginal.....	128
5.	CONCLUSÃO.....	136
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	139

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização da área do baixo São Francisco.....	23
Figura 2. Subbacias presentes na região do baixo São Francisco.....	27
Figura 3. Mapa hidrográfico da região do baixo São Francisco.....	28
Figura 4. Carta sedimentológica e geológica da região da foz do rio São Francisco DOMINGUEZ, 1996.....	32
Figura 5. Batimetria do estuário do São Francisco e da costa.....	33
Figura 6. Localização das estações pluviométricas estudadas na região do baixo São Francisco.....	42
Figura 7. Localização das estações fluviométricas estudadas na região do baixo São Francisco.....	43
Figura 8. Localização das estações sedimentométricas estudadas na região do baixo São Francisco.....	44
Figura 9: Precipitações máximas e totais mensais médias anuais na estação Piranhas, SE no período de 1935 – 2011.....	46
Figura 10: Precipitações máximas e totais mensais médias anuais na estação de Piaçabuçu, SE no período de 1929 – 2011.....	47
Figura 11. Vazões máximas, mínimas e médias mensais e anuais na estação de Piranhas, SE no período de 1979 – 2008.....	50
Figura 12. Vazões máximas, mínimas e médias mensais e anuais na Estação de Pão de Açúcar, AL no período de 1960 – 2007.....	51

Figura 13. Vazões máximas, mínimas e médias mensais e anuais na estação de Traipu, AL no período de 1977 a 2008.....	52
Figura 14. Vazões máximas, mínimas e médias mensais e anuais na estação de Propriá, SE no período de 1977 a 2008.....	53
Figura 15. Vazões líquidas, sólidas e concentração de sedimentos em suspensão na estação Piranhas, SE baixo São Francisco, BR, no período de 2006 a 2009.....	56
Figura 16. Vazões líquidas, sólidas e concentração de sedimentos em suspensão na estação Traipu, AL, baixo São Francisco, BR, no período de 2000 a 2010.....	57
Figura 17. Vazões líquidas, sólidas e concentração de sedimentos em suspensão na estação Propriá, SE, baixo São Francisco, BR, 2000 a 2010.....	58
Figura 18. Diagrama de Hjulström (SHIELDS, 1936).....	60
Figura 19. Nível alcançado pelo rio nas cheias, ao final do ano de 1979 (FONTES, 2002).....	67
Figura 20. Defluências horárias na Usina Hidrelétrica de Xingó, em 18/07/2001. Eixo vertical (vazões em m ³ /s) e eixo horizontal horas (CHESF, 2001).....	69
Figura 21. Defluências horárias em Xingó no dia 05/08/2001 (domingo) (CHESF, 2001).....	70
Figura 22. Variações dos níveis d'água na estação fluviométrica de Pão de Açúcar, em julho de 1988 (CONSÓRCIO JAAKKO POYRY-TAHAL, 2000).....	70
Figura 23. Oscilações do nível do rio no período de 01 a 31/07/2001 nas estações fluviométricas de Piranhas, Pão de Açúcar e Propriá. (CHESF, 2001).....	71

Figura 24. Representação de esquema genérico do papel executado por uma grande barragem na retenção da carga sólida sedimentar (ANA/GEF/PNUMA/OEA,2003)...	73
Figura 25. Margem esquerda do rio São Francisco localizada no Perímetro Irrigado Continguiaba-Pindoba (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2003).....	80
Figura 26. Praia fluvial estreita, em trecho sob erosão. Observe a faixa de areia úmida indicando evidência da recente descida do nível do rio (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2003).....	81
Figura 27. Atuação da erosão fluvial, abaixo do nível do solo e das raízes (FONTES, 2002).....	82
Figura 28: Ação conjunta de processos gravitacionais: fluxo de grãos e queda de blocos (FONTES, 2002).....	83
Figura 29. Síntese da atuação dos três conjuntos de processos erosivos marginais (em perfil transversal) e as dinâmicas ambientais (fluvial e estuarina) às quais se relacionam (em planta) (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2003).....	85
Figura 30. Estágio preparatório para abertura do foco erosivo (FONTES, 2002).....	87
Figura 31. Estágio inicial do foco erosivo (CASADO, 2000).....	88
Figura 32. Início do estágio da erosão ativa (margem verticalizada, com solapamento basal inicial e sem faixa de praia, em uma margem situada adjacente ao talvegue) (CASADO, 2000).....	88
Figura 33. Estágio de estabilização temporária (FONTES, 2002).....	89
Figura 34. Estágio de renovação do ciclo erosivo (CASADO, 2000).....	89

Figura 35. Evolução histórica na mudança morfológica do canal na região do baixo São Francisco.....	100
Figura 36. Recuo de linha de margem, destruindo a faixa de terreno anteriormente existente entre a estrada e a margem do rio. Foto obtida do dia 24/05/99 e a outra 08/11/99 (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2003).....	101
Figura 37 Concentração de sedimentos em suspensão no mar (gm^{-3}) obtida a partir dos dados TM2 em 31/12/2000 (MEDEIROS, 2003).....	110
Figura 38. Concentração de sedimentos em suspensão no mar (g m^{-3}) obtida a partir dos dados TM2 Landsat em 24/07/2000 (MEDEIROS, 2003).....	110
Figura 39. Variação horária do nível de maré em Piaçabuçu (Alagoas), rio São Francisco, durante 10 dias do mês de setembro 2000. Nas marés de quadratura, a amplitude de maré alcançou apenas 0,54 m, atingindo 1,56 m nas marés de sizígia. O tempo necessário (período de enchente) até a maré atingir o nível máximo (preamar) foi de aproximadamente 6h e 30min e o período vazante foi aproximadamente 5 horas e 30 minutos (SEGUNDO, 2001).....	112
Figura 40. Barrancos marginais só atingidos durante as marés excepcionalmente altas. As raízes expostas dos coqueiros marcam a posição anterior da linha de margem do Povoado Saramen (FONTES, 2002).....	113
Figura 41. Impacto direto das ondas sobre camada de sedimentos argilosos, durante a subida da maré, 2001. Notar outra marca de solapamento acima, referente a nível mais elevado do rio (FONTES, 2002).....	114
Figura 42. Estimativa da evolução histórica do recuo da linha de costa na foz do rio São Francisco, BR (BANDEIRA,2008 E GOOGLE, 2011).....	118
Figura 43. Cálculo da evolução da situação da foz do rio São Francisco (BANDEIRA <i>et al.</i> (2008).....	120

Figura 44. Revestimento de margem de rio com enrocamento (VANONI, 1977).....	123
Figura 45. Espigões posicionais ao longo da margem de um rio para direcionar a corrente e proteger contra a erosão (CARVALHO, 2008).	124
Figura 46. Esquema de solução de escoamento do sedimento por obra de derivação (bypass), em túnel, para o reservatório Amsteg, Suíça (BRUK, 1985).....	125
Figura 47. Esquema de solução de escoamento do sedimento por obra de derivação (bypass), em galeria ou canal, para o reservatório Palagnedra, Suíça. (BRUK, 1985).....	125
Figura 48. Dispositivo de sifonagem hidráulica usada no reservatório Rioumajou, França. (BRUK, 1985).....	127
Figura 49. Diagrama de disposição para retirada de sedimento de reservatório por sifonagem. (BRUK, 1985).....	127
Figura 50. Barragens de consolidação construídas em madeiras e pedras (DURLO, <i>et al.</i> , 2005).....	130
Figura 51. Cinto basal saliente, em vista frontal e em cortes transversais (retilíneo, inclinado e sinoidal) (DURLO, <i>et al.</i> , 2005).....	130
Figura 52. Vista transversal do revestimento de taludes fluviais é a parede vegetada de madeira (Parede Krainer). DURLO, <i>et al.</i> , 2005.....	130
Figura 53. Diferentes posições de depósitos de materiais para râmprolas: a) perpendiculares, b) declinantes, e c) inclinantes (DURLO, <i>et al.</i> , 2005).....	130
Figura 54. Revestimento de talude fluvial, com gabiões (DURLO, <i>et al.</i> , 2005).....	131

Figura 55. Quatro momentos distintos: (a) a área recoberta pelo geotêxtil e, na base do talude, instalados retentores de sedimentos; (b) em agosto de 2004 ocorreu o desenvolvimento das espécies plantadas; (c) após três meses, a área totalmente povoada e conseqüentemente o processo erosivo controlado; e (d) em janeiro de 2005 a vegetação densa protege o talude antes erodido (RIBEIRO, 2008).....135

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Principais usinas hidrelétricas do São Francisco e as características de seus reservatórios (REBOLSAS, <i>et al.</i> , 2006).....	9
Tabela 2. Contribuições das microbacias inserida no baixo São Francisco.....	27
Tabela 3. Valores correspondentes aos Estados pertencentes à região do Baixo São Francisco obtidos a partir dos dados do censo demográfico do IBGE 2000, 2008 e 2010.....	37
Tabela 4. Comportamento médio das descargas líquidas, sólidas e concentração de sedimentos em suspensão nas estações Piranhas, SE, Traipu, AL e Propriá, SE, baixo São Francisco, BR.....	58
Tabela 5. Alterações hidrológicas e geomorfológicas em setores de um Rio represado (GUERRA, <i>et al.</i> , 2009).....	64
Tabela 6. Elementos a serem considerados em um rio represado por barragens (FONTES, 2002).....	64
Tabela 7. Correlação entre as condições climáticas e hidrológicas sazonais do alto e baixo São Francisco (FONTES, 2002).....	66
Tabela 8. Alterações na carga total de sedimentos transportados anualmente na região do baixo São Francisco (1 OEA/PLANVASF, 1986; 2 MILLIMAN, 1983; e 3 PROJETO GEF SÃO FRANCISCO/UFAL, modificado por OLIVEIRA em 2001).....	74
Tabela 9. Dados da carga de sedimentos em suspensão estimada por diversas estações de calibragem localizadas na bacia do rio São Francisco (BANDEIRA, <i>et al.</i> , 2008).....	76

Tabela 10. Volume de material erodido nas três seções monitoradas, no período de fevereiro de 1999 a janeiro de 2000 (CASADO, 2000).....	101
Tabela 11. Médias Mensais do volume erodido nos trechos em estudo em m ³ (FONTES, 2002).....	102
Tabela 12. Média de regressão da linha de costa (BANDEIRA, <i>et al.</i> , 2008).....	119
Tabela 13. Métodos aplicados pela bioengenharia para contenção de processos erosivos (DURLO, <i>et al.</i> , 2005)	132

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Ao longo dos anos, a população mundial vem crescendo, e intensificando os diversos usos da água, dentre os quais estão o abastecimento, a geração de energia elétrica e a irrigação.

No início do século XX a transmissão de energia elétrica por grandes distâncias tornou-se técnica e economicamente viável, propiciando assim o grande desenvolvimento de usinas hidrelétricas, sobretudo no Brasil, que tem a sorte de possuir numerosos rios com potencial de aproveitamento hidrelétrico. Em face dessa realidade, o parque hidrelétrico brasileiro é considerado um dos maiores do mundo, responsável pela produção de 97% da energia elétrica do país (TUNDISI, *et al*, 2006).

A energia hidráulica transformada em energia elétrica tem sido um dos usos mais freqüentes dos recursos hídricos. As hidrelétricas utilizam barragens para regularizar a vazão e criar o desnível necessário à produção de energia (TUCCI, 2001).

A construção de barragens origina impactos ambientais como a perda de áreas agricultáveis e a mortandade da fauna e da flora existentes, alagadas pelo reservatório. Além disso, provocam alterações significativas na dinâmica natural de rios, de estuários e da zona costeira, bem como, o assoreamento de rios, a interferência no transporte de sedimentos, a regularização das vazões, o controle de cheias e, conseqüentemente, o recuo das margens com grandes perdas de faixa praia. Também há os conflitos socioeconômicos entre os moradores regionais e os organizadores do empreendimento.

Vale ressaltar que, a despeito destes impactos, os empreendimentos hidrelétricos são responsáveis pela produção de energia (hidroeletricidade); aumento do potencial de água potável e de recursos hídricos reservados; criação de possibilidades de recreação e turismo; aumento do potencial de irrigação; aumento e melhoria da navegação e transporte; aumento da produção de peixes e possibilidade do desenvolvimento da aquicultura; regulação do fluxo e inundações; e geração de emprego para população local.

No Brasil a construção de grandes barragens, com o objetivo principal de geração de energia elétrica, teve seu início em 1901, com a construção, em São Paulo, da represa Edgar de Souza, no rio Tietê, em consequência do desenvolvimento industrial e socioeconômico, resultando na formação de um grande número de ecossistemas lacustres artificiais. Consta-se na realidade brasileira que muitos de seus rios tiveram grande parte do seu curso segmentado por barragens, o que é mais evidente nos rios do estado de São Paulo (ESTEVEZ, 2011).

As barragens construídas em cascata nos Rios Tietê, Grande, Paranapanema e São Francisco, produzem efeitos e impactos cumulativos, transformando inteiramente as condições biogeofísicas, econômicas e sociais de todo o rio.

As barragens construídas ao longo do rio São Francisco, criadas com finalidade, principalmente, de geração de energia, impactaram a região de sua foz, em função da significativa retenção de sedimentos coesivos e não coesivos dentro dos reservatórios de algumas destas barragens. Em função da redução do aporte continental de sedimentos e modificações na hidrodinâmica fluvial e estuarina, as margens e a costa da região do baixo São Francisco, BR, em estudo, vem sofrendo erosões nos últimos anos.

BANDEIRA, 2008, descreve que as políticas públicas de desenvolvimento regional adotadas e a opção por um modelo de desenvolvimento que prioriza o uso das águas do rio para irrigação e geração de energia, em detrimento dos demais usos, através da implantação de grandes projetos hidrelétricos, têm provocado profundas alterações na bacia do rio São Francisco, rompendo o equilíbrio dinâmico natural do sistema fluvial, principalmente a jusante das barragens administradas pela Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF).

Segundo ROCHA, 2009, o equilíbrio ambiental da região do Baixo São Francisco vem sendo modificado com o impacto promovido pela operação da cascata de barragens para geração de energia, bem como pela supressão da vegetação ciliar. Estas alterações são representadas pela erosão acelerada das margens, compostas por solos de

baixa coesão, que põem em risco importantes empreendimentos agrícolas, obras de engenharia e ecossistemas locais ricos em biodiversidade.

Estas modificações no regime hídrico, no comportamento de descarga e no transporte de carga sólida do rio vêm contribuindo a um forte desequilíbrio, ocasionando impactos ambientais negativos em todo o vale, principalmente no baixo curso do rio, que apresenta maior vulnerabilidade hidroambiental. A operação destes reservatórios contribuiu para o desenvolvimento da região, porém, ao mesmo tempo, também gerou um grande passivo ambiental e sócio-econômico, causando impactos negativos no ecossistema fluvial e estuarino e na vida da população ribeirinha.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar os impactos nos processos morfológicos do baixo curso do rio São Francisco, SE, decorrentes da construção de barragens, bem como propor ações de recuperação da região em estudo.

1.1. Conseqüências da alteração no sistema de cursos de águas naturais

A crise ambiental é descrita considerando três aspectos básicos: crescimento populacional, demanda de energia e de matérias e geração de resíduos. O desenvolvimento tecnológico traz a necessidade de desenvolvimento da humanidade, que, por sua vez, resulta em uma quantidade significativa de resíduos, tanto em termos de matéria quanto em termos de energia (BRAGA, *et al.*, 2005).

O processo de desenvolvimento social, econômico e cultural de um povo gera grande consumo (energia, água, alimentos, etc.) e termina por produzir pressões e modificações nos sistemas naturais, especialmente nos recursos hídricos, estuários e zonas costeiras que são particularmente sensíveis às intervenções antrópicas. Ao longo dos anos, a espécie humana, tem modificado seu padrão de vida, utilizando tecnologias cada vez mais avançadas para ter uma vida melhor, o que implica em um consumo cada vez maior de energia.

A partir da década de 70, com base no modelo econômico desenvolvimentista, a construção de grandes barragens no Brasil vem provocando inúmeros impactos sociais e ambientais, destruindo grandes áreas e expulsando

populações do campo, funcionando como uma verdadeira expropriação de suas terras e de suas condições de reprodução social (REZENDE, 2006).

Nos últimos anos, uma série de impactos ambientais tem sido relatada na região do baixo São Francisco em função das sucessivas intervenções humanas no rio São Francisco, principalmente aqueles resultantes da construção e operação das barragens da Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF), entre as décadas de setenta e noventa no setor alto, médio, submédio e baixo curso deste Rio (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2002).

Dentre os impactos ambientais acometidos à bacia do Rio São Francisco, em especial à região do seu baixo curso, está à alteração no regime fluvial, à regularização das vazões do rio e às modificações no comportamento hidráulico e sedimentológico.

A constatação dessa realidade tem evidenciado o uso não sustentável dos ecossistemas aquáticos e costeiros, bem como, as múltiplas e conflitantes atividades antrópicas que se desenvolvem na região em estudo, o que destaca a necessidade de se estabelecer formas de uso e manejos adequados de modo a compatibilizar o desenvolvimento com a qualidade de vida, a equidade social e a manutenção dos sistemas naturais.

1.2. Breve histórico do sistema hidrelétrico brasileiro e os impactos oriundos de barragens.

A hidroeletricidade consiste em aproveitar a energia potencial ou cinética da água, transformando-a em energia mecânica, por meio de uma turbina, e, finalmente, em eletricidade por um gerador. A grande vantagem da hidroeletricidade é o seu altíssimo rendimento, além de ser um dos sistemas mais baratos de produção de eletricidade.

Até o final dos anos 40, a iniciativa privada foi à principal responsável pela produção, transmissão e distribuição de energia elétrica, para atendimento das principais cidades do Brasil. A partir dos anos 50, ocorreu um perceptível avanço no processo de

urbanização e de industrialização, ocasionando um crescimento da demanda por energia elétrica e, conseqüentemente, a necessidade de investimentos no setor elétrico.

Alguns governos estaduais criaram empresas, como a CEMIG (1952), COPEL (1955) e CESP (1966), que se constituíram por intermédio de processos de fusão de pequenas e médias empresas. Já as empresas federais formaram-se em torno de aproveitamentos hidrelétricos específicos, como exemplo destas a CHESF (1948), no São Francisco, e Furnas (1957), no Rio Grande. Além dessas, foi criada também a Eletrobrás (1961) para ser o principal agente financiador e conduzir o processo de reengenharia para produção e distribuição de energia elétrica em escala nacional.

O sistema elétrico do País apresenta quatro grandes sistemas interligados por linhas de transmissão, integrados pelas empresas concessionárias das Regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste e por concessionárias da Região Nordeste e parte da região Norte. Esses sistemas atendem a 98% do consumo nacional. Além desses sistemas interligados, existem aproximadamente trezentos sistemas isolados de pequeno porte localizado na sua maioria na região Norte (Amazônia), cobrindo cerca de 45% do território nacional. Estas usinas hidrelétricas, em 2002, produziram 236.915 GWh, que adicionados a 76.896 GWh produzidos pela Usina Itaipu Binacional, totalizaram 313.811 GWh, ou seja, 88,9% do total, para atendimento ao mercado nacional (REBOLSAS, *et al.*, 2006).

Segundo ESTEVES, 2011, 154 represas de grande porte ocupavam uma área superior a 18.979 km², sendo que uma das maiores, a represa de Sobradinho, localizada no rio São Francisco, BA, ocupa uma área de 5.190 km².

O rio São Francisco também é um rio segmentado por barragens, sendo composto por 20 hidrelétricas em operação efetiva. Na Tabela 1, estão representadas as principais hidrelétricas presentes na Bacia Hidrográfica do São Francisco e as características de seus reservatórios.

Com base nos dados dessa tabela, o aproveitamento hidrelétrico Piloto, está localizado na cidade de Paulo Afonso, BA, margem esquerda do riacho Gangorra, com

aproveitamento do braço do Capuxu, a cerca de 500 m da margem direita do rio São Francisco. A área deste reservatório é igual a 0,75 km², com vazão regularizada a fio d'água, com utilização de 13,8 milhões metros cúbicos em sua cota nominal de 220 m. A usina Piloto, a primeira hidrelétrica da Bacia em estudo, foi construída e projetada pela CHESF, iniciando sua operação em 1949, com uma potência total igual a 2MW.

O segundo aproveitamento hidrelétrico a ser construído na Bacia foi o complexo de Paulo Afonso (I, II, III e IV), tendo sua operação iniciado nos anos de 1954 (Paulo Afonso I), 1961(Paulo Afonso II), 1971 (Paulo Afonso III) e 1979 (Paulo Afonso IV). O Complexo também foi construído e projetado pela CHESF e está localizado na cidade de Paulo Afonso no estado da Bahia. Os reservatórios de Paulo Afonso (I, II e III) apresentam superfície de espelho d'água igual a 4,8 km², área drenada igual a 603.683 km² e inundada igual a 5 km², com vazão regularizada a fio d'água, cujo volume utilizado em cada reservatório é de 26 milhões de metros cúbicos. A usina de Paulo Afonso I gera uma potência total de 180,00 MW, de Paulo Afonso II gera uma potência total de 442,98 MW, de Paulo Afonso III gera uma potência total de 794,2 MW. Paulo Afonso IV apresenta área de 12,9 km², área drenada igual a 603.683 km² e área inundada igual a 16 km², com vazão regularizada a fio d'água e utiliza 127 milhões de metros cúbicos em sua cota nominal de 252 m. A potência gerada em Paulo Afonso IV é de 2.462,4 MW.

A usina de Sobradinho, localizada no estado da Bahia, cerca de 40 km a montante das cidades de Juazeiro, BA e Petrolina, PE, encontra-se posicionada no rio São Francisco a aproximadamente 748 km de sua foz, possuindo, além da função de geração de energia elétrica, a de principal fonte de regularização dos recursos hídricos da região. Tendo iniciado sua operação em 1979, mesmo ano que Paulo Afonso IV, o reservatório de Sobradinho tem cerca de 320 km de extensão, apresenta uma superfície de espelho d'água de 4.214km², uma área drenada de 498.425 km², uma área inundada de 4.214 km² e uma capacidade de armazenamento de 34,11 bilhões de metros cúbicos em sua cota nominal de 392,5 m, garantindo, assim, através de uma depleção de até 12m, juntamente com o reservatório de Três Marias (CEMIG), uma vazão regularizada de 2.060 m³/s nos períodos de estiagem, permitindo a operação de todas as usinas da CHESF situadas ao longo do Rio São Francisco. A usina de Sobradinho gera uma

potência de 1.050,3 MW, além disso, vale ressaltar que o reservatório formado por esta usina apresenta a maior área de inundação dentre as usinas hidrelétricas presentes na bacia do São Francisco.

A hidrelétrica de Três Marias localiza-se na região do Alto São Francisco, no estado de Minas Gerais, estendendo-se desde as cabeceiras, na Serra da Canastra, município de São Roque de Minas, até a cidade de Pirapora, MG. O reservatório apresenta uma área de 1.110 km², uma área drenada igual a 50.600 km² e uma área inundada igual a 1.142 km², com vazão regularizada de 689 m³/s e utilização 19,53 bilhões de metros cúbicos em sua cota nominal de 572,5 m. Esta usina iniciou sua operação em 1961 e foi criada com os objetivos de regularizar o curso das águas do rio São Francisco nas cheias periódicas, de melhorar a navegabilidade, de utilizar o potencial hidrelétrico e de fomentar a indústria e a irrigação. A hidrelétrica de Três Marias é responsável por gera uma potência total de 396 MW.

O aproveitamento hidrelétrico de Moxotó, também denominado de Apolônio Sales, encontra-se localizado no município de Delmiro Gouveia, AL, a 8 km da cidade de Paulo Afonso, BA. Integrante do Complexo de Paulo Afonso, a usina localiza-se a cerca de três quilômetros a montante da barragem Delmiro Gouveia, de modo que a água turbinada em suas máquinas aciona também as Usinas de Paulo Afonso I, II e III. Em um segundo desnível, em cascata, e através de um canal escavado a partir de sua margem direita, o reservatório de Moxotó fornece a água necessária ao acionamento da Usina de Paulo Afonso IV, que se situa em paralelo a este. A Usina foi construída e projetada pela CHESF, iniciando sua operação em 1977. O reservatório formado por esta usina apresenta área de 98 km², área drenada igual a 603.683 km² e área inundada igual a 93km², com regularização da vazão semanal, e utilização de 1,16 bilhões de metros cúbicos em sua cota nominal de 252 m. A potência total gerada nesta usina é de 400MW.

Em 1988 foi criada a usina hidrelétrica de Itaparica, que passou a se chamar Luiz Gonzaga em homenagem ao "Rei do Baião nordestino". Localizada no estado de Pernambuco, a 25 km a jusante da cidade de Petrolândia, PE, e posicionada no rio São Francisco, a 50 km a montante do Complexo Hidrelétrico de Paulo Afonso, possuindo,

além da função de geração de energia elétrica, a de regularização das vazões afluentes diárias, semanais e mensais daquele complexo. Seu reservatório apresenta uma superfície de espelho d'água de 828 km², uma área drenada de 591.465 km² e uma área inundada de 835km², com vazão regularizada de 2.060 m³/s e utiliza uma capacidade de armazenamento de 10,78 bilhões de metros cúbicos em sua cota nominal de 304 m. Esta hidrelétrica possui uma capacidade de geração de energia elétrica de 1479, 6 MW.

O aproveitamento hidrelétrico de Xingó, criado em 1994, está localizado entre os estados de Alagoas e Sergipe, situando-se a 12 km do município de Piranhas (AL) e a 6 km do município de Canindé do São Francisco, SE. Xingó está posicionada, com relação ao São Francisco, a cerca de 65 km a jusante do Complexo de Paulo Afonso. Xingó está localizado num 'canyon', constituindo-se em uma fonte de turismo na região através da navegação no trecho entre Paulo Afonso e Xingó, além de prestar-se ao desenvolvimento de projetos de irrigação e ao abastecimento de água para a cidade de Canindé, SE. Seu reservatório apresenta uma área de 60km², uma área drenada igual a 608.722 km² (maior área drenada dentre os reservatórios do São Francisco) e uma área inundada igual a 60 km², com vazão regularizada a fio d'água, utilizando 3,8 bilhões de m³ em sua cota nominal de 138m. A hidrelétrica de Xingó é a que tem a maior capacidade de geração de energia elétrica dentre as usinas presentes na bacia hidrográfica do São Francisco, cuja potência total é de 3.162 MW.

Nos últimos vinte anos, os usos múltiplos destes sistemas no Brasil (construção de hidrelétricas e reserva de águas para diversos fins) diversificaram muito, ampliando a sua importância econômica e social e, ao mesmo tempo, produzindo e introduzindo novas complexidades no seu funcionamento e impacto (REBOUÇAS *et al.*, 2006).

Com base nas características hidráulicas (tipo de tomada de água da barragem), estes reservatórios podem apresentar grande instabilidade limnológicas, ou seja, apresentar baixo tempo de residência da água (tempo de permanência da água no reservatório). Podem ainda ser considerados como um estágio intermediário entre um rio e um lago ou mesmo um ambiente lótico e lêntico (BAXTER, 1977).

Tabela1. Principais usinas hidrelétricas do São Francisco e as características de seus reservatórios (REBOLSAS, *et al.*, 2006)

Empresa	Usina	UF	Bacia hidrográfica	Área do reservatório (km ²)	Vazão regularizada (m ³ /s)	Área drenada (km ²)	Área inundada (km)	Tempo de residência das águas no reservatório	Início Operação	Volume (10 ⁶ m ³)			Cota (m)		Canal de Fuga (m)	Potência (MW)	
										Máximo	Mínimo	Útil	Máxima	Mínima		Efetiva	Total
CEMIG	Três Marias	MG	São Francisco	1.110	689	50600	1142	-	1961	19.528	4.250	15.278	572,5	549,2	515,7	6 x 66	396
	Sobradinho	BA		4.214	2.060	498425	4214	-	1979	34.116	5.447	28.669	392,5	380,5	362,5	6 x 175,1	1.050,3
	Itaparica (Luís Gonzaga)	PE		828	2.060	591465	835	2,4 meses	1988	10.782	7.233	3.549	304	299	251,5	6 x 246,6	1.479,6
	Moxotó (Apolônio Sales)	AL		98	regularização semanal	603683	93	5 dias	1977	1.150	970	180	252	250	230,3	4 x 100	400
CESF	Paulo Afonso I	BA		4,8	Fio d'água	603683	5	8 dias	1954	26	16,2	9,8	230	228,3	146,1	3 x 60	180
	Paulo Afonso II	BA		4,8	Fio d'água	603683	5	8 dias	1961	26	16,2	9,8	230,3	228,3	146,1	6 x 73,8	442,98
	Paulo Afonso III	BA		4,8	Fio d'água	603683	5	8 dias	1971	26	16,2	9,8	230,3	228,3	146,1	4 x 198,6	794,2
	Paulo Afonso IV	BA		12,9	Fio d'água	603683	16	5 dias	1979	127	98	29	252	250	135,8	6 x 410,4	2.462,4
	Paulo Afonso Piloto	BA		0,75	Fio d'água	-	-	-	1949	13,8	-	-	220	-	146,1	1 x 2	2
	Xingó	AL/SE		60	Fio d'água	608722	60	16	1994	3.800	3.759	41	138	137,2	19,5	6 x 527	3.162

Os impactos ambientais de grandes lagos artificiais na região a montante, sobre o próprio ambiente aquático formado e a jusante são: a probabilidade de desmoronamentos de terra em virtude do peso das águas represadas e/ou da barragem; a modificação no transporte de sedimentos; a alteração na condição de reprodução das espécies aquáticas, em função da destruição das lagoas marginais; alteração no regime hidrológico que passa a ter regime de cheia e seca aperiódico, portanto independente do regime pluviométrico da região; alteração na qualidade física e química da água, desaparecimento de ecossistemas naturais (florestas, rios, lagos, cavernas, quedas d'água, etc.) e por fim deslocamentos de populações estabelecidas em terras inundadas, que passam a viver ao redor das barragens, exercendo pressão sobre os recursos naturais e modificando o uso das águas marginais (ESTEVES, 2011).

As conseqüências das modificações no regime hidrológico a jusante da barragem podem ser observadas após o fechamento da represa ou anos mais tarde. A ausência de períodos sazonais de cheia e seca interferem no ciclo de crescimento e no processo reprodutivo de muitas espécies de vegetais e animais, levando muitas populações a forte redução ou mesmo extinção. Nos períodos de cheia, há pouca deposição de sedimentos nas várzeas a jusante, pois estes ficam retidos a montante da barragem. As barragens ao controlarem o volume de água com o objetivo de estabilizar a geração de energia elétrica tendem a eliminar totalmente a inundação periódica das várzeas a jusante ou torná-la aperiódica. O efeito imediato irreversível dessa modificação é eliminação da fertilidade natural das áreas alagadas, sobre a qual está intimamente relacionada à atividade sócio-econômica regional.

1.3. Problemas socioambientais ocasionados por barragens

Os impactos socioculturais provocados pelo deslocamento obrigatório estão condicionados à perda de identidade coletiva, decorrentes da perda da propriedade rural e de padrões de organização social, como relações de parentesco e amizade na comunidade. Os impactos socioeconômicos e culturais ameaçam a sobrevivência dos camponeses, que são atingidos em sua reprodução como seguimento social dotado de uma cultura específica (ROTHMAN, 1999).

Percebe-se que o principal impacto socioeconômico, em virtude da construção de barragens hidrelétrica e do enchimento do lago, é o dano material sofrido pelas populações ribeirinhas, com a perda de terras, plantações, casas e demais benfeitorias a serem inundadas. Muitas são as memórias e as histórias da população que ficam debaixo d'água. Suas casas de imensurável valor, seus laços de amizade e suas culturas sociais são desfeitas ou mesmo destruídas.

É importante descrever que estes empreendimentos hidrelétricos pagam uma compensação financeira por utilizar os recursos hídricos para fins de geração de energia elétrica.

O Presidente da República na Lei nº 7990 de 28 de dezembro de 1989 instituiu, para os Estados, Distrito Federal e Municípios, compensação financeira pelo resultado da exploração de petróleo ou gás natural, de recursos hídricos para fins de geração de energia elétrica, de recursos minerais em seus respectivos territórios, plataforma continental, mas territorial ou zona econômica exclusiva, e dá outras providências.

O Art. 1º desta Lei descreve que o aproveitamento de recursos hídricos, para fins de geração de energia elétrica e dos recursos minerais, por quaisquer dos regimes previstos em lei, ensejará compensação financeira aos Estados, Distrito Federal e Municípios, a ser calculada, distribuída e aplicada na forma estabelecida nesta Lei.

A compensação financeira pela utilização dos recursos hídricos para fins de geração de energia elétrica foi instituída pela constituição federal de 1988 e trata-se de um percentual que as concessionárias de geração hidrelétrica pagam pela utilização de recursos hídricos. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) gerencia a arrecadação e a distribuição dos recursos entre os beneficiários: Estados, Municípios e órgãos da administração direta da União (ANEEL, 2011).

Conforme estabelecido na nº Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, com modificações dadas pelas Leis nº 9.433/97, nº 9.984/00e nº 9.993/00, são destinados 45% dos recursos aos Municípios atingidos pelos reservatórios das UHE's, enquanto

que os Estados têm direito a outros 45%. A União fica com 10% do total. Geradoras caracterizadas como Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH's), são dispensadas do pagamento da Compensação Financeira. As concessionárias pagam 6,75% do valor da energia produzida a título de Compensação Financeira.

O percentual de 10% da compensação financeira que cabe à União é dividido entre o Ministério de Meio Ambiente, Recursos Hídricos e Amazônia Legal (3%); o Ministério de Minas e Energia (3%) e para o Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (4%), administrado pelo Ministério da Ciência e Tecnologia. O percentual de 0,75% é repassado ao MMA para a aplicação na implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

No Art. 5º Lei nº 7990 de 28 de dezembro de 1989 é descrito que quando o aproveitamento do potencial hidráulico atingir mais de um estado ou município, a distribuição dos percentuais referidos nesta Lei será feita proporcionalmente, levando-se em consideração as áreas inundadas e outros parâmetros de interesse público regional ou local.

Na Resolução da ANEEL nº 88 de 22 de Março de 2001 ficou estabelecido metodologia para o rateio da compensação financeira pela utilização de recursos hídricos para fins de geração de energia elétrica devido pelas centrais hidrelétricas e royalties de Itaipu, Distrito Federal e Municípios. O repasse por regularização a montante é descrito no Art. 2º desta Resolução nº88 que relata que nas centrais hidrelétricas beneficiadas por reservatórios regularizadores de montante o acréscimo de energia por eles propiciado será considerado como geração associada, sendo repassada parte da compensação financeira devida por elas aos estados e municípios atingidos por estes reservatórios, na proporção do acréscimo de energia.

É evidente que a compensação elétrica paga por estes empreendimentos contempla somente os beneficiários situados a montante da barragem, em contrapartida, a população situada a jusante da barragem até a presente data na legislação vigente não se criou leis que contemplem esta população.

1.4. Política Nacional de Meio Ambiente

No Brasil até o início da década de 80, as barragens podiam ser construídas sem qualquer avaliação ambiental de seus impactos, mas, a partir da metade da década de 80, esses empreendimentos tiveram que se submeter a procedimentos de análise de seus efeitos socioambientais. Dentro deste contexto, a Política Nacional do Meio Ambiente surge, instituindo a Avaliação de Impacto Ambiental e o Licenciamento Ambiental como instrumentos de sua atuação.

A Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) surgiu juntamente com a redemocratização do país e a pressão dos movimentos ambientalistas, bem como de instituições financeiras internacionais (Banco Mundial e o Banco Interamericano de Desenvolvimento).

Após a Conferência de Estocolmo, o Brasil iniciou, de forma mais efetiva, a criação de instituições para tratar as questões ambientais. Com base neste contexto, foi promulgada a Lei nº 6.938 de 31 de agosto 1981, que instituiu as diretrizes básicas da PNMA.

Com base nessa legislação foi criado o Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA), que representa a estruturação de órgãos governamentais competentes para normatizar as questões ambientais, tomar medidas necessárias à gestão de recursos naturais bem como fiscalizar o uso destes recursos. Com a criação do SISNAMA, houve a divisão de competências entre os entes federados (União, estados e municípios) para lidar com o meio ambiente de forma coordenada e responsável pelas questões ambientais.

As diretrizes da PNMA e a composição do SISNAMA são descritos nos artigos: 5º e 6º da Lei nº 6.938/81:

- O artigo 5º: as diretrizes da Política Nacional do Meio Ambiente serão formuladas em normas e planos, destinados a orientar a ação dos Governos da União, dos Estados, do Distrito Federal, dos Territórios e dos Municípios no que se relaciona com a preservação da qualidade ambiental e manutenção do equilíbrio ecológico.

- O artigo 6º: Os órgãos e entidades da União, dos Estados, do Distrito Federal, dos territórios e dos Municípios, bem como as Fundações instituídas pelo Poder Público, responsáveis pela proteção e melhoria da qualidade ambiental, constituirão o Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA).

Nesta mesma Lei, foi constituído o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), como órgão normativo, consultivo e deliberativo, responsável pela elaboração das diversas resoluções que regulamentam as questões ambientais, como por exemplo, as regras do licenciamento ambiental.

Outro avanço importante da referida lei foi à instituição dos instrumentos da PNMA, dentre os quais estão a Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) e Licenciamento Ambiental que é instituído pelo Estudo de Impacto Ambiental (EIA). A partir do EIA é elaborado o Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), que contém suas conclusões de forma resumida e com uma linguagem acessível, com gráficos, cartazes, fluxogramas e outras técnicas para facilitar a compreensão, devendo ser dada a devida publicidade às pessoas direta e indiretamente interessadas (REZENDE, 2007). O empreendedor, para realizar o EIA deve se submeter à AIA e ao licenciamento ambiental previsto em lei.

O EIA representa um conjunto de atividades científicas e técnicas que incluem o diagnóstico ambiental, a identificação, previsão e medição dos impactos, sua interpretação e valoração e por fim a definição de medidas mitigadoras e de programas de monitorização destes impactos (REZENDE, 2007).

A AIA é responsável por identificar e prever os efeitos e os impactos sobre o meio ambiente decorrentes de determinadas ações (programas, políticas, planos e ou projetos), mas também deve interpretar e comunicar informações acerca dos impactos. A adoção dos procedimentos dessa avaliação se faz necessária para que seja feito o uso mais racional do meio ambiente pelo empreendedor. É com base nesse procedimento que o Estado decide se o meio ambiente pode ser impactado por uma determinada atividade.

A resolução nº 01, de 23 de janeiro de 1986 do CONAMA disciplinou o EIA para atividades sujeitas ao licenciamento ambiental.

Atualmente, a exigência do estudo para as atividades causadoras de significativa degradação ao meio ambiente está regulada por dispositivo constitucional.

O artigo. 225, § 1º, IV da Constituição Federal cita:

Art. 225. Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de usos comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.

(...)

§ 1º Para assegurar a efetividade desse direito, incube ao Poder Público;

(...)

IV- exigir, na forma da lei, para a instalação de obra ou atividade potencialmente causadora de significativa degradação do meio ambiente, estudo prévio de impacto ambiental, a que se dará publicidade.

Desta forma, a realização do EIA se tornou uma garantia constitucional e o mesmo tornou-se um dos principais instrumentos previstos na legislação ambiental, com o objetivo de controlar os efeitos das atividades degradantes do meio ambiente.

Todo esse aparato legislativo, com seus diversos institutos faz atualmente parte da política brasileira, tendo a finalidade de assegurar que as intervenções no ambiente sejam discutidas e que as atividades poluidoras causem menos danos ambientais, bem como fiquem sob a tutela e concessão do Estado.

A Política Nacional do Meio Ambiente deve promover o incentivo da participação social, seja através da representação colegiada de órgãos ambientais, que geralmente são compostos por representantes do governo e sociedade civil, seja através de procedimentos institucionais que manifestem suas idéias e defenda os diversos interesses da sociedade, como, por exemplo, o espaço da audiência pública.

Vale ressaltar que a estruturação desta política, em especial o licenciamento ambiental, promoveu oportunidades para empreendedores e comunidades atingidas por barragens defenderem suas vontades e interesses políticos.

1.5. Legislação aplicada aos recursos hídricos

O gerenciamento de recursos hídricos no Brasil possui um aparato institucional dos mais avançados do mundo. Sua atuação é bastante recente e teve seu início com a criação da Agência Nacional de Águas (ANA) no ano 2000 (REBOUÇAS, *et.al*, 2006)

O sistema de gestão recursos hídricos nem sempre teve uma característica de participação pública e descentralização como nos dias atuais. Ao contrário, ao longo de todo século XX, a gestão sempre foi centralizada pelo setor elétrico. Passado o tempo, a participação da sociedade civil foi se tornando cada vez mais organizada por meios de associações técnicas e profissionais, fato este que propiciou a mudança no panorama dos recursos hídricos brasileiros.

A mudança no modelo de gestão de recursos hídricos tem uma relação fundamental com a Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), com a Associação Brasileira de Engenharia Sanitária (ABES), com a Associação de Águas Subterrâneas (ABAS) e com a Associação de Irrigação e Drenagem (ABID).

Em 1980 a proteção das águas apareceu no Código Penal e estabelecia a prisão celular de um a três anos para quem corrompesse ou conspurcasse a água potável de uso comum ou particular, tornando-a impossível de beber ou nociva a saúde.

Em 1906, o governo veio a se preocupar com a elaboração de normas legais que regulamentasse atividades produtivas (mineração, agricultura e pesca) e normatizasse a utilização de recursos naturais, como floresta e água. No ano seguinte o Projeto do Código de Águas foi elaborado pelo jurista Alfredo Valladão, e encaminhado à Câmara dos Deputados pelo presidente Affonso Pena para apreciação, mas o mesmo não foi promulgado. Três décadas depois, o Código das Águas foi editado em virtude da inadequabilidade tanto por parte dos dispositivos da Constituição Federal vigente como pelos problemas relacionados às secas periódicas que ocorriam no semi-árido nordestino.

Em 10 de julho de 1934, o Código de Águas foi remodelado com base no projeto inicial e por via do Decreto nº 24.643, foi aprovado no Governo Provisório de Getúlio Vargas. Dos 205 artigos do Código de Águas, cerca de 30% referiam-se ao aproveitamento hidráulico. Esses artigos foram regulamentados e aplicados na íntegra, pois o governo tinha grande interesse de viabilizar e produção de energia a baixo custo para atender às demandas das novas indústrias que estavam sendo instalada no País.

A grande dificuldade de regulamentação do Código de Águas foi atribuída às necessidades de intervenção estatal na regulação e uso das águas para fins elétricos, que demandou grandes obras e investimentos em infra-estrutura a partir de meados do século XX. É fato que o verdadeiro mandante da regulação hídrica, desde a década de 1920 até os anos 80, foi o setor de geração hidrelétrica, a princípio de iniciativa do setor privado e, posteriormente, sob orientação do Estado (REZENDE, 2007).

Apesar da criação do Código de Água ter sido um marco jurídico importante para o País e ter permitido a notável expansão do sistema hidrelétrico brasileiro, o mesmo não realizou sua efetiva implantação, pois suas ações seguiram objetivos exclusivamente setoriais e nunca foram regulamentados, como por exemplo, os artigos que se referiam ao uso múltiplo e a conservação da qualidade da água.

Em 1978 foi criado Comitê Especial de Estudos Integrados de Bacias Hidrográficas (CEEIBH), com a criação de comitês executivos em diversas bacias hidrográficas, como no Paraíba do Sul e no São Francisco. Esses comitês tiveram apresentações consultivas, nada obrigando a implantação de suas decisões, mas de certa forma contribuíram para experiências importantes

A intenção de reformar o sistema de gestão recursos hídricos brasileiro começou a tomar corpo ao longo da década de 1980, com o reconhecimento, por parte de setores técnicos do governo.

No dia 8 de janeiro de 1997, o Presidente da República sanciona a Lei nº 9.433 (Lei das Águas), que institui a Política Nacional do Meio Ambiente e cria o Sistema de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH), dessa forma, a decisão

do País de enfrentar, com um instrumento moderno e inovador, o desafio de equacionar a demanda crescente de água para fazer face ao crescimento urbano, industrial e agrícola, aos potenciais conflitos de usos gerados pela disponibilidade e ou demanda e principalmente o preocupante avanço da degradação ambiental dos rios e lagos, dentre outros aspectos.

A Lei das Águas contém modernos instrumentos e princípios de gerenciamento de recursos hídricos e apresenta conceitos inovadores no que se refere a organização do setor de planejamento e gestão de recursos hídricos, nos âmbitos nacionais e estaduais e em termos de participação dos diferentes autores envolvidos e interessados na questão dos recursos hídricos.

A Política Nacional de Recursos Hídricos estabelecida pela Lei nº 9433/97, tem por objetivo primordial assegurar à atual e às futuras gerações a disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos, ao mesmo tempo busca a preservação e a defesa contra os eventos hidrológicos críticos e o desenvolvimento sustentável, por meio da utilização racional e integrada dos recursos hídricos.

A reforma institucional do Setor de Recursos Hídricos consolidada de forma ampla no dia 17 de julho de 2000, foi descrita na Lei Federal nº 9.984, que criou a Agência Nacional de Água (ANA). A ANA foi criada com o objetivo de regular e disciplinar a utilização dos rios e lagos de domínio da União, assegurando água em quantidade e qualidade para usos múltiplos, e implementar o SINGREH em parceria com os governos estaduais e municipais, com os usuários de água e com a sociedade civil organizada. Além de criar condições técnicas e institucionais para a implementação da Lei das Águas, a ANA busca soluções para o enfrentamento de dois graves problemas: as secas prolongadas (Região Nordeste) e a poluição dos rios.

1.5.1. Legislação aplicada à bacia hidrográfica do rio São Francisco

O SINGREH possibilita a gestão de recursos hídricos no País de forma descentralizada e participativa. Esse sistema é composto pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), pela Secretaria de Recursos Hídricos (SRH/MMA), pela Agência Nacional de Águas (ANA), pelos Conselhos de Recursos Hídricos dos Estados

e do Distrito Federal (CERHs), pelos órgãos dos poderes públicos federal, estaduais, do Distrito Federal e dos municípios, pelos Comitês de Bacia e as Agências de Bacias cujas competências se relacionem com a gestão de recursos hídricos.

No SINGREH, o comitê de bacia é uma entidade deliberativa que congrega não só os governos eleitos democraticamente, mas também usuários e sociedade civil organizada. Esta é uma nova forma de organização política participativa. Atualmente os Comitês de Bacias são organismos do Estado brasileiro, pois suas decisões têm impacto direto na vida dos usuários de água da bacia hidrográfica. A priorização de obras hidráulicas nos planos de bacia e o valor da cobrança pelo uso da água são exemplos da capacidade do comitê de bacia de impactar a vida do cidadão residente na bacia hidrográfica.

O Presidente da República, no uso da atribuição que lhe confere o art. 84, inciso IV, da Constituição, e tendo em vista o disposto na Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e na Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2001, decretou a instituição do Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, órgão colegiado, com atribuições normativas, deliberativas e consultivas, no âmbito da respectiva bacia hidrográfica, vinculado ao Conselho Nacional de Recursos Hídricos - CNRH, nos termos da Resolução do CNRH nº 5, de 10 de abril de 2000, sendo a área de atuação deste Comitê, o rio de domínio da União, localizada nos Estados de Minas Gerais, Goiás, Bahia, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e no Distrito Federal, é definida pelos limites geográficos da bacia hidrográfica do Rio São Francisco, delimitada pela área de drenagem com sua foz, locada, em escala 1:1.000.000, nas coordenadas 36°24' de longitude oeste e 10°30' de latitude sul.

A gestão compartilhada de recursos hídricos demanda a compatibilização dos diversos conflitos de interesses. É necessário também requerer a criação de ambientes institucionais adequados à resolução, à negociação e à superação dos problemas e das lacunas existentes nos arcabouços jurídico-legais (TUNDISI, *et al.*, 2006)

A implementação dos instrumentos de gestão de recursos hídricos avançou na maioria dos Estados brasileiros, e esse avanço se deu por pressão dos agentes

econômicos por garantia de recursos hídricos, a partir de uma política desenvolvimentista de atração de capitais e do apoio do governo federal, como por exemplo, por meio do Programa Proágua, financiado pelo Banco Mundial, destinados aos Estados da Região Nordeste.

A reforma institucional do setor de recursos hídricos no Brasil resultou em um sistema de gerenciamento dos mais sofisticados do mundo. Atualmente tanto governos de diferentes níveis participam da gestão ao nível da bacia hidrográfica como também, usuários, sociedade civil organizada e associações profissionais fazem parte desse processo, garantindo uma participação pública democrática.

1.6. Políticas e ações aplicadas à preservação dos estuários

Com o avanço do crescimento populacional, a expansão da agricultura e a renovação industrial, as obras portuárias e canais de navegação, a quantidade e a diversidade de sedimentos e resíduos domésticos e industriais passaram a ser cada vez maiores, ameaçando as características naturais dos estuários.

Segundo MIRANDA, *et al*, 2002, as atividades humanas diretas ou remotas ocasionaram variações significativas com diferentes graus de impacto, sendo as causas potenciais da degradação dos estuários.

Na maior parte do mundo e atualmente no Brasil há uma crescente preocupação pela a implantação de políticas e ações que possibilitem o desenvolvimento sustentável das regiões costeiras de maneira geral e, em particular, dos sistemas estuarinos.

Os estuários durante décadas foram regiões de conflitos e temas de debates políticos, geralmente envolvendo interesses industriais e comerciais. Somente 1968 surgiu o Decreto de Proteção ao Estuário, porém com sérias limitações sobre o real controle do uso (MIRANDA, *et al*, 2002).

Em 1969 criaram uma legislação ambiental nos EUA que culminou com a implantação do EIA, a partir de 1º de janeiro de 1970. Em seguida, 1972, apelos

subsequentes do Ministério do Interior produziram a Lei Federal de Controle de Zonas Litorâneas, que concedeu fóruns de planejamento aos Estados e exigiu que ações federais nas áreas costeiras fossem consistentes com os programas estaduais aprovados.

Muitas características dos estuários, que necessitam de proteção, não afetam imediatamente seu aspecto estético, os organismos marinhos e o bem-estar público, mas estudos ecológicos são necessários para identificar detalhadamente os valores a serem protegidos. Sendo que o mais importante é estar consciente de que os estuários são ecossistemas que devam ser poupados da degradação ambiental (MIRANDA *et al.*,2002).

No Brasil, o primeiro EIA, o do lançamento de resíduos tóxicos no litoral da Bahia, por meio de barcaças, foi elaborado em 1975. O estado do Rio de Janeiro adotou um regulamento pioneiro para o uso do EIA no Brasil, por meio da Norma Administrativa CECA-NA-001, em cumprimento à deliberação de dezembro de 1977.

Em julho de 1982, foi designada a comissão de gerenciamento costeiro na secretaria de comissão interministerial para os recursos do mar (SECIRM), que financia atividades de pesquisa vinculadas ao Plano Setorial de Recursos do MAR (PSRM) de algumas universidades brasileiras, tendo como atribuição principal elaborar um projeto de lei sobre o Gerenciamento Costeiro. Com base nisso, foi concebido o Programa de Gerenciamento Costeiro – PROGERCO, coordenado pela SECIRM, que visava promover o reconhecimento temático do litoral brasileiro, estabelecendo macrozoneamento que permitisse ordenar os recursos costeiros nacionais (MIRANDA *et al.*,2002).

A promulgação da Lei nº 7661, de 18 de maio de 1988, que instituiu o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC), como parte integrante da Política Nacional para os Recursos do Mar e da Política Nacional do Meio Ambiente, assegurou a política e ações para a preservação dos ecossistemas costeiros em particular dos estuários. O Art. 2º dessa Lei descreve que o plano deve orientar a utilização racional da Zona Costeira, de forma a contribuir para qualidade de vida de sua população e a proteção do seu patrimônio natural, histórico, étnico e cultural.

A Constituição Federal, promulgada em 1988, relata no capítulo VI do Meio Ambiente e do Título VIII da Ordem Social, sobre a proteção do meio ambiente, abrangendo de forma particular os estuários. Este Ato Constitucional tem grande importância tanto na indicação de que o uso dos ecossistemas costeiros se faça em condições de assegurar a sua preservação, reconhecendo sua vulnerabilidade, como também na afirmação de que sua gestão visa a sua preservação para presentes e futuras gerações.

2. ÁREA DE ESTUDO

2.1. Localização e descrição física geral

O presente estudo compreende a região do Baixo São Francisco localizada entre os paralelos de 8° e 11° de Latitude Sul e os meridianos de 36° e 39° de Longitude Oeste. A região ocupa a porção mais ocidental da bacia do rio São Francisco, com expansão territorial de aproximadamente 25.417,26 km², abrangendo os estados da Bahia, Pernambuco, Sergipe e Alagoas, e compreende as bacias dos rios Ipanema e Capivara. Nesta área estão inseridas as subbacias dos rios Ipanema e Traipu, afluentes da margem esquerda do rio São Francisco, e na margem direita, as bacias do rio Capivara e do rio Gararu.

A área se estende desde a usina hidrelétrica de Xingó (Canindé do São Francisco, SE) até a região da foz do São Francisco, correspondendo a uma extensão de aproximadamente 210 km, como podemos observar na Figura 1 abaixo:

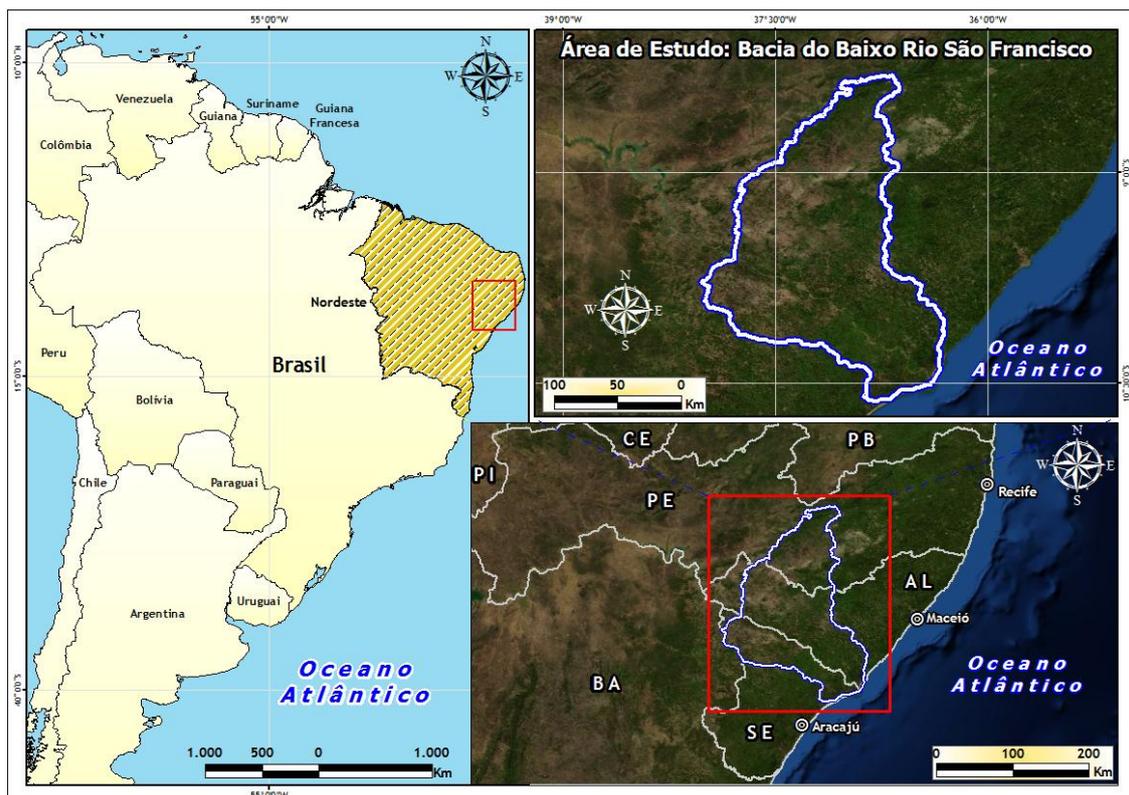


Figura 1. Localização da área do baixo São Francisco

2.1.1. Geologia e geomorfologia

No Brasil, a costa Leste-Nordeste está relativamente submetida a uma queda no nível do mar em torno de 5 m durante os últimos 5.000 anos. Em função do abaixamento do nível do mar, uma extensa plataforma rica em areia foi erodida e redepositada como uma série de cordões litorâneos progradantes (DOMINGUEZ, *et al.*, 1987) mesmo onde não existe 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, onde se formou o Delta do rio São Francisco (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2002).

A região do Baixo curso do rio São Francisco apresenta um “canyon” nos maciços remobilizados do pediplano na cidade de Paulo Afonso (BA), estendendo-se, 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 Xingó.

A declividade do leito do rio na área de estudo é reduzida, produzindo meandros que erodem as barrancas arenosas e bancos de sedimentos na calha do rio.

Com base na segmentação tectônica da Plataforma Sulamericana em províncias estruturais, a região do baixo São Francisco situa-se inteiramente inserida na província Borborema, caracterizada pela existência de rochas metamórficas oriundas de choques de placas tectônicas ocorridos durante o ciclo Brasileiro. Posteriormente, foi acrescida de material advindo de uma seqüência de empurrões comuns nos processos pós-orogênicos.

Sedimentos foram acrescentados no período jurássico e cretáceo, além da ocorrência de intrusões magmáticas. Finalizando o processo de formação da estrutura geológica da área, sedimentos recentes se acumularam no período terciário (formação Barreiras) e quaternário (aluviões e dunas) em regiões restritas. A formação do grupo Barreiras ocorre desde Penedo até as proximidades do município de Arapiraca, sendo caracterizado por apresentar elevações de topos planos e bordos escarpados, mergulhando suavemente no sentido do litoral e dos principais rios. Esta formação integra a maior parte dos sedimentos da parte sul da região, constituindo-se de tabuleiros na base e no delta dos quais, localizam-se terraços marinhos e, a norte e nordeste, tabuleiro terciários.

Ao longo do Rio São Francisco, a planície fluvio-marinha e aluvial apresenta uma paisagem monótona, de superfícies planas, praticamente sem desníveis acentuados, formados por sedimentos recentes, aluvionares, eólicos e praias.

A geomorfologia do Baixo São Francisco pode ser caracterizada pela ocorrência, de leste para oeste, de três Domínios morfoestruturais, subdivididos em três unidades geomorfológicas.

O primeiro Domínio recebe a denominação de Depósitos Sedimentares e estende-se por áreas marginais do rio São Francisco e pelos litorais dos Estados de Sergipe e Alagoas. Este domínio está representado por planícies e tabuleiros formados por sedimentos predominantemente inconsolidados. As feições encontradas refletem as

deposições de sedimentos acumulados em ambientes marinho, fluvial, flúvio-marinho, eólico e coluvial.

O segundo Domínio morfoestrutural é denominado de Remanescente das Raízes de Dobramento, situado na porção central do Baixo São Francisco, aproximadamente entre as cidades de Porto da Folha e Propriá. Este Domínio é caracterizado por apresentar alinhamento de cristas e vales subseqüentes e perpendiculares, resultantes da dissecação diferencial e do desgaste de estruturas dobradas e ocasionais exposições do seu embasamento.

O terceiro Domínio dos Maciços Remobilizados ocupa a maior área do Baixo São Francisco, estendendo-se de Porto da Folha até Paulo Afonso (BA). É caracterizado por apresentar formas resultantes de erosão de blocos arqueados e deslocados por reativações tectônicas. Merece destaque a ocorrência de inselbergs, cristas e sulcos aprofundados nas zonas diaclasadas. Topografias planas aparecem em regiões protegidas do recuo remontante da erosão fluvial

2.1.2. Pedologia e cobertura vegetal

De maneira geral, podem-se identificar duas regiões distintas, de oeste para leste, com relação à pedologia no Baixo São Francisco. Na primeira, localizada entre as cidades de Paulo Afonso (BA) e Propriá (SE), predominam três diferentes tipos de solos distribuídos em grandes manchas: solos Litólicos, Planossolos Solódicos e Bruno não-Cálcico. A segunda, localizada a jusante da cidade de Propriá, se estende até a foz do rio São Francisco no oceano e pode ser caracterizada pela existência de uma maior variedade de tipos de solos, porém com pequena abrangência areal. Dentre os solos que ocorrem na área destacam-se as Areias Quartzosas Marinhas, Areias Quartzosas, Solos Indiscriminados de Mangue, Podzólicos, Latossolos, Solos Aluviais e Gleis Pouco Húmicos (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2002).

A cobertura vegetal original na região do Baixo São Francisco é representada por extensas áreas de caatinga, que se constitui num tipo xerófito de vegetação, ou seja, com adaptações funcionais contra a falta de água, desenvolvidas em função do baixo nível de precipitação pluviométrica da região do semi-árido.

Na área em questão ocorrem duas variações fisionômicas desse tipo de vegetação: a caatinga arbórea densa e a caatinga arbórea aberta. A primeira pode ser caracterizada estruturalmente por apresentar um estrato arbóreo denso com espécies que variam de 8 a 10 m de altura; um estrato formado por arbustos espinhosos e perenes e, por último, um estrato herbáceo estacional. A segunda variação fisionômica apresenta uma cobertura lenhosa de estrutura aberta e porte baixo deixando exposto o estrato campestre. Este tipo de caatinga pode ser encontrado em condições naturais em áreas de clima acentuadamente seco e ocorrência de solos litólicos.

Próximo ao litoral ocorrem formações pioneiras que cobrem ambientes sedimentares recentes, instáveis e sem tempo necessário para serem edafizados. Dois tipos de ambientes aparecem no litoral de Alagoas e Sergipe: a restinga e os mangues.

2.1.3. Hidrologia

O São Francisco é um dos poucos rios perenes situados na área de trabalho, utilizado para diferentes finalidades sociais e econômicas como: abastecimento de água para populações urbanas (inclusive a cidade de Aracaju), diluição de efluentes domésticos, abastecimento de agricultura irrigada, com plantio de culturas de ciclo curto, aquíicultura, ecoturismo, navegação e exploração da hidroeletricidade através da Usina de Xingó, da Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF).

A área em estudo é composta por 10 micro-bacias hidrográficas. Na Figura 2 e Tabela 2 abaixo podemos observar as contribuições de cada micro-bacia para a área em estudo

Com base nos dados da tabela 2, podemos observar que o rio São Francisco (26,80% da área em estudo), o rio Ipanema (24,43%), o rio Piauí (13,07%) e o rio Traipu (10,55%) são os corpos hídricos de maior percentagem dentro da subbacia do baixo São Francisco, ou seja, são os que mais contribuem.

Tabela 2. Contribuições das microbacias inserida no baixo São Francisco

Subbacia Hidrográfica	Subbacias Hidrográficas e/ou Região Hidrográfica	Área (km ²)	Área (%)
Baixo São Francisco	RH Riacho Grande	1.765,285	6,95
	RH Píai	3.321,766	13,07
	RH Traipu 02	2.680,412	10,55
	RH Ipanema	1.835,367	7,22
	RH Capiá	168, 794	0,66
	RH Traipu 01	228, 812	0,90
	RH Talhada	158, 819	0,62
	Rio Ipanema	6.209,008	24,43
	RH Capiá 02	2.237,917	8,80
	BHRio São Francisco	6.811,084	26,80
Total	10	25.417,264	100

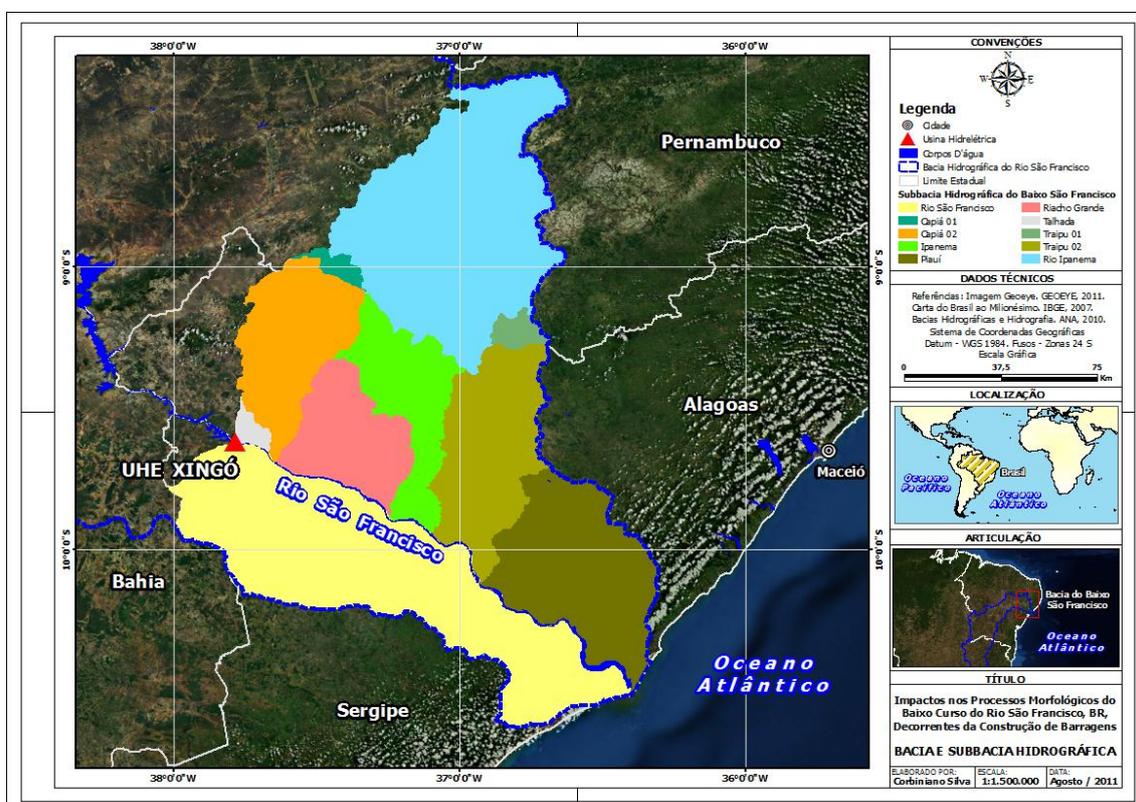


Figura 2. Subbacias presentes na região do baixo São Francisco

Em contra partida, as microbacias que menos contribuem para a região em estudo são a região hidrográfica Talhada (0,62% da área em estudo) e a região hidrográfica Capiá (0,66% da área em estudo).

Dentre seus afluentes podemos citar os rios: Boa Vista, Ribeira do Capiá,

Jacaré, Ipanema, Traipu, Tibiri, Porucaba e Piauí, afluentes da sua margem esquerda, localizados no Estado de Alagoas. Na margem direita, localizada no Estado de Sergipe, destacam-se os rios Marraquinho, Campos Novos, Capivara, Gararu, Poção e Betume (localizado próximo à foz do São Francisco no oceano Atlântico). Além da presença de rios, a subbacia também é composta por riachos, presentes na margem direita (Lajeadinho, Jacaré, Mocambo) e na esquerda (Grande e Camarão). Observe, na Figura 3 abaixo, o mapa hidrográfico da região do Baixo São Francisco com os principais rios afluentes (rios Ipanema, Traipu, Gararu e Capivara).

Segundo o Resumo Executivo do Relatório Final da ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2002, o Baixo São Francisco e a Zona Costeira apresentaram uma vazão média mensal máxima de 4.680m³/s no mês de março e uma vazão mensal mínima de 1.536m³/s.

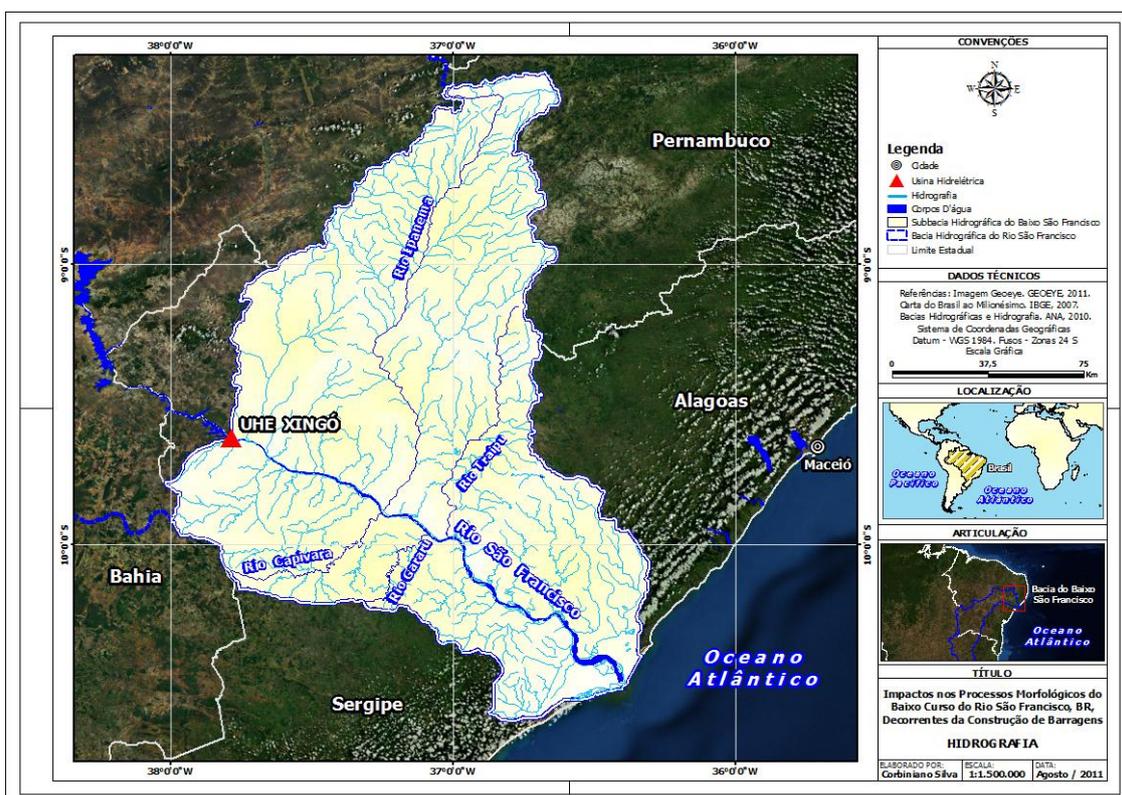


Figura 3. Mapa hidrográfico da região do baixo São Francisco

2.1.4. Clima e precipitações

O clima da região do Baixo São Francisco é quente, começando com o semiárido, a montante, sofrendo uma transição para o subúmido, 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, produzem 75% do escoamento do rio. Em contraste, o clima das regiões submédio 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.

A área do baixo São Francisco contém três diferentes tipos de clima, de leste para oeste:

- Subúmido úmido, com no inverno (junho a agosto), megatérmico e moderada deficiência hídrica no verão (dezembro a fevereiro), mesotérmico;
- Subúmido seco, com moderado excesso hídrico no verão (megatérmico) e;
- Semiárido, sem excesso hídrico (megatérmico)

O regime pluviométrico é caracterizado pela ocorrência de uma estação chuvosa e um período seco variável espacialmente, com a faixa litorânea tendo a ocorrência de quatro meses secos e, à medida que se avança em direção ao interior, este período vai aumentando até alcançar sete meses secos na região do semi-árido.

A região apresenta duas estações distintas: a estação úmida, entre os meses de março/abril a agosto/setembro, e a estação seca, entre os meses de setembro/outubro a fevereiro/março.

A precipitação anual está entre 800 e 1.200 mm e a temperatura média anual é de 25 °C, sendo dezembro o mês mais quente, com temperaturas entre 26 e 27 °C, e junho o mês mais frio, com temperaturas em torno dos 23 °C.

A precipitação média na zona litorânea é de 1.300mm e, na região situada próxima ao limite com o submédio São Francisco, os valores caem para 600 mm.

2.1.5. Ambiente costeiro

O sistema estuarino do rio tropical São Francisco está localizado a leste do Brasil, no Atlântico Sul Ocidental. Sua posição geográfica está inserida a 10°36'S de Latitude e 36°23'W de Longitude. Este estuário é alimentado pela bacia do rio São Francisco que cobre uma área de 634 x 10³ km² ente a latitude 7° e 21°S e longitude 35° e 47°40'W, correspondendo a 7,5% do território brasileiro (representa a segunda maior bacia hidrográfica do Brasil). Este sistema estuarino lagunar apresenta 5 km de largura e 25 km da extensão da Ponte de Mangue, Pacatuba, SE, até a foz.

A plataforma continental do rio São Francisco, na qual predominam as Águas Tropicais de Superfícies (ATS) da Corrente Sul Equatorial (CSE), é bastante estreita, variando de 20 a 50 km de largura, e a quebra da plataforma ocorre em profundidades de 40 a 80 m (KNOPPERS *et al.*, 2005) . A margem da plataforma continental está entre 30 e 50 m de profundidade. A sedimentação para o nordeste é essencialmente de carbonatos, com dominância de fragmentos de algas calcáreas (*Halimeda* sp.) (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2002).

A configuração climática global deste estuário é governada pela massa de ar atlântica equatorial e pela zona de convergência intertropical, que se expande e contrai ao redor do Equador, causando a variabilidade sazonal de chuva e os ventos alísios do E e NE.

A zona costeira tropical do Brasil, excluindo a planície quaternária da Amazônia, é orlada por tabuleiros terciários com a incisão de vales de fundo plano de ventos aluviais terciários inconsolidados, denominados Formação de Barreiras Terciárias. Falésias fósseis do tabuleiro afloram ao longo da linha de costa, intercaladas por trechos estreitos da planície quaternária. A planície do São Francisco tem uma área de 800 km² e os depósitos sedimentares são ventos pleistocênicos aluviais e os terraços de cume de praia (120 ka) na porção interna da planície, as paleolagoas holocênicas (5730 ± 200 anos) nas áreas baixas, os terraços de cume de praia pleistocênicos e holocênicos, pântanos e mangues de água doce e dunas holocênicas ativas e inativas (DOMINGUEZ, 1996)

As fácies das dunas migrando para o norte da foz do rio, representam o lado submetido à correnteza, onde assoreiam e são alimentadas pela deriva litorânea preferencial de NE-SW, sendo mantida pelas ondas predominantes de leste, e estando presas devido à barreira hidrodinâmica impostas pela descarga do rio (barragens, efeitos de quebra-mar ou mole). Os manguezais estão estabelecidos no lado da baixa deriva, tradicionalmente sendo nutridos pelos sedimentos de nascente. Atualmente, entretanto, o lado direito de baixa deriva está sofrendo com a erosão costeira aguda, devido à falta de depósitos de sedimentos das nascentes induzidos pela retenção nos reservatórios da represa a montante (MEDEIROS, 2003).

Os sedimentos de plataforma no lado de alta deriva são principalmente carbonatos autógenos (de algas *Halimeda* e *Coralina*), com uma faixa estreita de sedimentos siliclástico próximo à costa. O lado de baixa deriva, além do banco de areia da foz do rio e da plataforma interna, é caracterizado pelo siliclástico (parcialmente lamoso) e a plataforma externa de sedimentos carbonáticos. Os sedimentos siliclásticos originados do rio, erosão costeira das ribanceiras fósseis dos tabuleiros terciários, e dos depósitos mais recentes durante o nível mais baixo do mar. A largura da plataforma varia entre 20 e 40 km. A margem da plataforma mais próxima da foz do rio está localizada nas profundidades de 50 a 70 m e é caracterizada pelo canyon São Francisco (Figura 4), onde depósitos lamacentos prevalecem (DOMINGUEZ, 1996).

A batimetria da foz do rio reflete a assimetria entre os lados de baixa e alta deriva, e suas ilhas a montante e bancos de areia pró-delta, se encaixam na categoria de um estuário-delta (Figura 5).

Este estuário é composto de um canal interno acima de 12 metros de profundidade, com uma barreira subaquática perpendicular a costa ao longo do lado de baixa deriva. Ondas quebram sobre as barreiras e induzem a ressuspensão dos sedimentos marcados. (KNOPPERS, *et al*, 2005).

A região costeira do rio São Francisco caracteriza-se por apresentar mesomareés do tipo semi-diurna. O regime de ondas é de alta energia, ondas de NE e E-SE predominam ao longo do ano. As ondas leste são mais importantes em janeiro a maio

(verão-outono) e setembro a novembro (primavera), já as ondas de sul ocorrem de março a agosto (DOMINGUEZ, 1996).

A profundidade da região estuarina do rio São Francisco é bastante variável, chegando a atingir 18 metros em canal próximo a cidade de Piaçabuçu (AL), e aproximadamente 10 metros próximo a foz (SANTOS JUNIOR *et al*, 2007). O pró-delta do São Francisco está localizado entre 0,5 a 2,5km da foz e é uma região caracterizada por uma forte zona de arrebentação, com ondas altas e bancos de areias submersos expostos durante a baixa-mar.

O nível do rio São Francisco é afetado diariamente pelas marés oceânicas, na medida em que a subida do nível do mar provoca o barramento natural do fluxo do rio. A elevação e abaixamento do nível da água doce do rio, em dois ciclos diários de maré alta e baixa, exercem um papel importante na promoção da erosão marginal fluvial. A influência da maré é percebida até as proximidades da cidade de Propriá, SE, distante 75 km da foz (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2003).

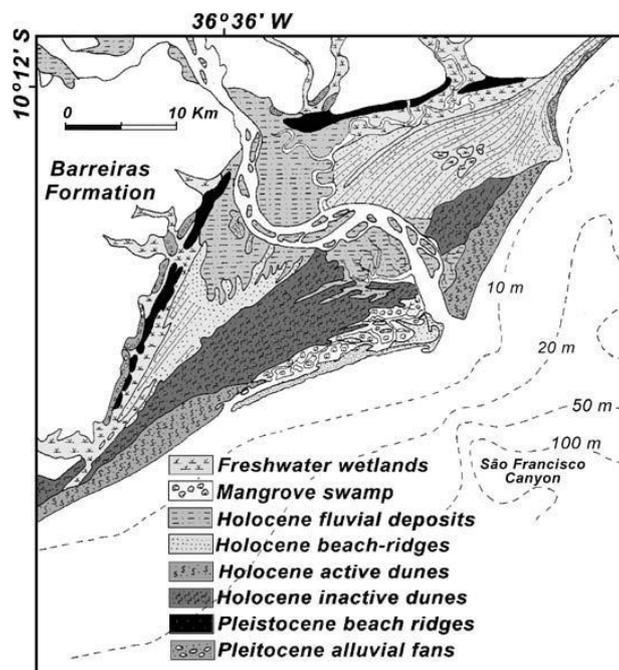


Figura 4. Carta sedimentológica e geológica da região da foz do rio São Francisco (DOMINGUEZ, 1996).

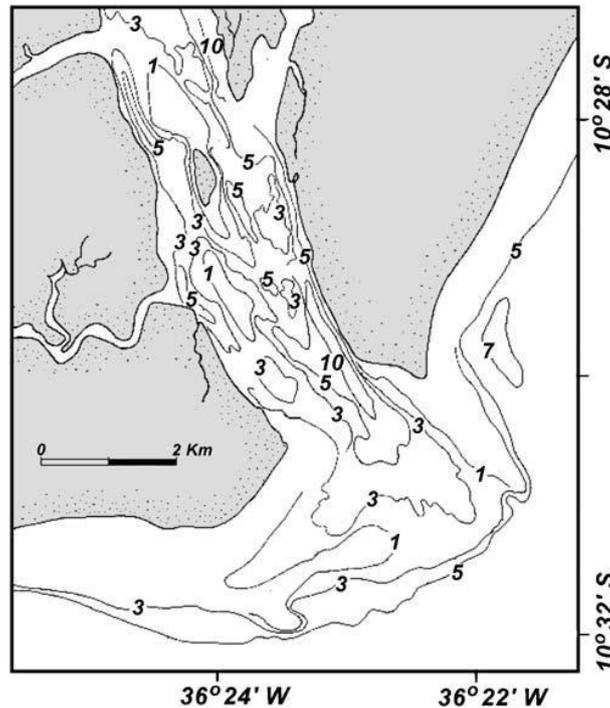


Figura 5. Batimetria do estuário do São Francisco e da costa (DOMINGUEZ, 1996).

2.2. Caracterização Sócioeconômica

Com base nos dados do Censo Demográfico IBGE 2000, a população no baixo São Francisco equivale a 2.005.462 habitantes, perfazendo uma densidade demográfica de 43,11 hab/km². Desse total, 1.042.186 residem em zonas urbanas e 963.276 residem em áreas rurais.

Atualmente, com base nos dados do Censo Demográfico IBGE 2010, a população na região do baixo São Francisco apresenta 2.176.286 habitantes, perfazendo uma densidade demográfica de 46,35 hab/km². Desse total de 1.253.683 residem em zonas urbanas e 922.603 em áreas rurais.

A região do Baixo São Francisco recebe contribuições do estado de Alagoas, Pernambuco, Sergipe e Bahia. Veja na Tabela3 abaixo as contribuições de cada Estado para a região em estudo, cujos valores referem-se à área, a população, o Índice de Desenvolvimento Humano Médio (IDHM) e o Produto Interno Bruto e per capita, são dados totais de cada município pertencente à região do baixo São Francisco. Devo advertir também que parte desses municípios está totalmente inserida no limite da

subbacia do São Francisco enquanto outros têm apenas uma parcela de contribuição na região em estudo.

Com base nos dados do IBGE do censo 2010 apresentado na Tabela 3 fica evidente que o estado de Alagoas apresenta a maior área dentro da região do baixo São Francisco, ou seja, o Estado contribui com uma área de 15.393,72 km², representando aproximadamente 40,21% da região do baixo São Francisco e 55,43% da área total deste Estado (27.779,30 km²). A população presente nesta contribuição do estado é de 1.143.106 habitante, a maior densidade demográfica (74,26 hab/km²). A região contribui com o maior Produto Interno Bruto de R\$ 4.891.110, em contrapartida possui o segundo maior Produto Interno Bruto per capita R\$ 170.241,36. O Índice de Desenvolvimento Humano apresentou valor igual a 0,56, representando um desenvolvimento humano médio. Vale ressaltar também que, no censo do IBGE 2000, esta parcela do estado continha a população rural (654.099 habitantes) maior do que a população urbana (529.175 habitantes), já nos dados do censo IBGE 2010 a população urbana (654.099 habitantes) se manteve maior do que a população rural (515.265 habitantes).

Por outro lado o estado da Bahia apresenta a menor área (1.952 km²) de contribuição para o Baixo São Francisco, representando desse modo 4,65% da área em estudo e apenas 0,35% da área total deste estado (564.830,9 km²). A população presente nesta pequena parcela é de 32.055 habitantes, uma densidade demográfica de 18,02 hab/km². Devemos destacar também que a população rural em 2000 (27.313 habitantes) mostrou-se bem maior que a população residente nas zonas urbanas (6.539 habitantes), já em 2010 a população rural aumentou e a urbana diminuiu. O Índice de Desenvolvimento Humano na Bahia apresentou valor igual a 0,53, desenvolvimento humano médio igual ao estado de Alagoas. Os valores do Produto Interno Bruto (R\$ 89.932) e do Produto Interno Bruto per capita (R\$ 5.426, 96) representaram os menores valores de contribuição para a região do Baixo São Francisco.

O Estado de Pernambuco apresenta a segunda maior área da região em estudo com 12.260,41 km², representando 32,03% desta área e 12,49% da área total do estado (98.146,3 km²). A população da região em estudo é de 636.288 habitantes, perfazendo

uma densidade demográfica de 51,89 hab/km². Em 2010 a população urbana e rural aumentou com relação a ano de 2000. O Índice de Desenvolvimento Humano nesta região foi médio e apresentou valor igual a 0,58. O resultado mais atual do Produto Interno Bruto foi de R\$ 2.864.824 e do Produto Interno Bruto per capita é de R\$ 72.622,66.

Sergipe abrange o baixo curso do São Francisco com uma área igual a 8.845,65km² representando 23,11% da região em estudo e 40,38% da área total deste estado (21.918,4km²). A população em 2010 foi de 364.837 habitantes totalizando uma densidade demográfica de 41,24hab/km². A população urbana e rural se manteve em crescimento quando comparado aos anos de 2000 e 2010. Esta região apresentou o maior Índice de Desenvolvimento Humano Médio (0,60). O estado obteve o segundo maior valor do Produto Interno Bruto (R\$ 3.307.729) e o maior valor do Produto Interno Bruto per capita (R\$ 214.033, 58).

O resumo executivo do relatório final da ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2003, descreve que a infra-estrutura do baixo São Francisco é bastante reduzida quando comparadas as demais regiões do rio São Francisco.

A infra-estrutura de transporte é insuficiente para atender a demanda da região, principalmente da área rural. Os transportes rodoviários são de péssima qualidade e má conservação, os transportes ferroviários necessitam de interligações para o melhor desenvolvimento da região no nordeste, os transportes fluviais encontram-se subutilizados em função da falta de investimentos privados e públicos e principalmente em função das condições precárias de navegabilidade, causadas pelo processo de sedimentação do rio São Francisco.

A saúde na área da subbacia do baixo São Francisco é precária, apresentando hospitais e postos de saúde insuficientes para atender a demanda da população local.

Quanto ao saneamento básico, esta região reproduz o que se visualiza nas diversas regiões do país, ou seja, insatisfatório. Vale ressaltar que somente cerca de 75%

da população recebe abastecimento de água potável. Esse índice não se apresenta de forma homogênea em toda esta área, isto é, existem municípios com apenas 40% de sua população sendo abastecida por água potável. A qualidade dessa água é precária, pois na maioria dos municípios não possui estações de tratamento de água e esgoto.

O setor educacional encontra-se altamente comprometido no que diz respeito à qualidade do ensino, infra-estrutura básica das escolas e falta de cursos profissionalizantes na região. As unidades escolares apresentam um número bastante reduzido e se localizam, na maioria das vezes, na zona urbana. Além desses graves problemas, um ainda mais grave é a qualificação dos professores que atendem as comunidades carentes, pois muitos desses docentes não possuem escolaridade ao nível do quinto ano do ensino fundamental.

No Baixo São Francisco o setor energético utiliza fontes de energia primária como a hidráulica, a lenha, a cana-de-açúcar e os produtos importados como petróleo e carvão energético. Já a energia secundária utilizada nesta região é diversificada e apresenta várias carvoarias e destilarias de álcool localizado nos estados de Sergipe (Jacaré dos Homens) e Alagoas (Penedo). A hidrelétrica Xingó localizada na região, pertencente à Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF), produz uma capacidade instalada de geração de energia em torno de 3.000 MW. Grande parte dessa energia gerada é exportada para os grandes centros urbanos do Nordeste.

A estrutura fundiária concentra-se de pequenas e médias propriedades. Nas áreas que contemplam os estados de Alagoas e Sergipe, mais de 50% dos estabelecimentos são de tamanho inferior a 5 ha, principalmente nas áreas onde o clima é semiárido. Nessa região, as atividades econômicas desenvolvidas, na sua maioria, utilizam tecnologia inadequada ao tamanho da propriedade (agricultura de sequeiro e pecuária extensiva), resultando em falta de sustentabilidade econômica digna para a população.

Tabela 3. Valores correspondentes aos estados pertencentes à região do baixo São Francisco obtidos a partir dos dados do censo demográfico do IBGE 2000, 2008 e 2010

Estados	Nº Municípios	Área	Área (%)	População Censo 2000	Densidade Censo 2000	População Urbana Censo 2000	População Rural Censo 2000	População Censo 2010	Densidade Censo 2010	População Urbana Censo 2010	População Rural Censo 2010	IDH Médio PNUD 2000	PIB (Mil Reais) Censo 2008	PIB per capita (Reais) Censo 2008
Alagoas	47	15.393,72	40,21	1.066.881	69,30	529.175	537.706	1.143.106	74,26	654.099	515.265	0,56	4.891.110	170.241,36
Sergipe	28	8.845,65	23,11	326.813	36,95	166.374	160.439	364.837	41,24	194.044	170.793	0,60	3.307.729	214.033,58
Pernambuco	18	12.260,41	32,03	577.912	47,14	340.098	237.814	636.288	51,89	397.143	239.145	0,58	2.864.824	72.622,66
Bahia	2	1.779,01	4,65	33.856	19,03	6.539	27.313	32.055	18,02	8.397	23.658	0,53	89.932	5.426,96
TOTAIS	95	38.278,80	100,00	2.005.462	43,11	1.042.186	963.272	2.176.286	46,35	1.253.683	948.861	0,57	11.153.595	462.324,56

As atividades produtivas desenvolvidas no Baixo São Francisco predominam a agricultura de sequeiro e agricultura irrigada (cana, feijão, milho, mandioca, algodão, sisal, banana, abacaxi, fumo, hortaliças e café). Além das atividades agrícolas, existe também a piscicultura semi-intensiva associada à pecuária de médio porte. Ambas as atividades descritas acima tem apresentado bons resultados.

A CODEVASF incentivou esse tipo de ocupação nos perímetros de irrigação localizados nas áreas de várzeas, nos estados de Alagoas e Sergipe, como forma de incentivar as atividades agrícolas e as de piscicultura na região. Com base nas atividades industriais assinala-se a área-programa de Arapiraca-Mata Grande, com destaque para os municípios de Igreja Nova, Coruripe, Junqueiro e Penedo, por representar uma grande parcela da produção regional de açúcar e álcool.

O baixo São Francisco contém também diversas atrações turísticas como os perímetros de irrigação da CODEVASF, onde se encontram o cultivo de cereais, frutas, horticulturas, peixes e vinhos finos. No estado de Sergipe, no município de Canindé do São Francisco, é possível se navegar entre os ‘*canyons*’ do São Francisco até o lago de Xingó. Em Poço Redondo encontra-se o Museu de Artes Sacras, considerado um dos três melhores do país, bem como, curiosidades sobre a vida de Lampião. A cidade de Penedo, AL compõe o centro histórico da região. Por fim o trecho turístico se estende até a foz do rio São Francisco, na praia do Peba, onde está localizado o Pontal do Coruripe.

2.3. Levantamento da problemática ambiental no baixo São Francisco

Há influência exercida pelas barragens sobre o regime hidrológico e sedimentológico da bacia hidrográfica do São Francisco pode ser considerado basicamente três períodos: o primeiro período de 1977 a 1987; o segundo de 1988 a 1993; e o terceiro de 1994 a 2008.

No período de 1977 a 1987, a influência da barragem de Sobradinho sobre o regime hidrossedimentológico de todo o trecho do Rio à jusante, inclusive o baixo São Francisco, foi determinante, embora ainda fosse afetada pelas eventuais contribuições dos afluentes situados no submédio São Francisco, mesmo com a presença das

barragens de Moxotó e Paulo Afonso. Sobradinho representa um marco na história hidrológica e sedimentológica do São Francisco como a forma mais significativa da intervenção e controle do homem sobre as condições naturais deste Rio em estudo.

No período de 1988 a 1993, iniciou-se a fase onde se somam as participações de Sobradinho, Itaparica, Paulo Afonso IV e Moxotó (reservatório de regularização semanal). Ambas ampliaram o controle sobre as vazões e a retenção de sedimentos no trecho abaixo de Sobradinho. Para a região do baixo São Francisco esta fase remete uma importância significativa, pois além de significar uma maior redução no aporte de sedimentos, representa um maior controle sobre as altas vazões e eventuais cheias (contribuição dos afluentes do submédio São Francisco).

Por fim o período de 1994 a 2008 é marcado pela influência da usina hidrelétrica de Xingó que, diante da sua posição e influência, pode ser considerada como uma nascente artificial do rio para o trecho compreendido até a foz. Xingó apesar de trabalhar a fio d'água, ela representa um marco na artificialização e controle das condições hidrossedimentológicas. Primeiro, por reter a pequena contribuição de sedimentos aluviais de Paulo Afonso (representa o elo final da cadeia de bloqueio da quase totalidade das partículas oriundas Rio acima) e segundo, porque, sua operação produz flutuações artificiais de vazões diárias que desempenham um papel fundamental para a dinâmica do atual deste rio. A UHE Xingó apresenta vazão regularizada a fio d'água com área de reservatório igual a 60 km², área drenada de 608722 km², área inundada de 60 km e tempo de residência das águas em seu reservatório de 16 dias.

Convém ressaltar que Sobradinho corresponde à principal barragem responsável pela modulação e/ou regularização da vazão do rio ao longo da cascata de hidroelétricas desde os anos 80 até os dias atuais.

Com base nos estudos realizados neste trabalho, confirma-se que no período posterior a construção da barragem de Sobradinho ocorreu uma redução das vazões máximas, mínimas e médias mensais e anuais, porém mesmo com a redução das vazões, os fortes picos anuais de vazão permaneceram. Apesar da grande capacidade de regularização de Sobradinho, as cheias continuavam a ocorrer anualmente, atingindo

vazões médias na ordem de 6.000 m³/s em praticamente todos os anos do período. A ocorrência das enchentes foi reduzida significativamente após o ano de 1987. Desde 1988, foi verificada somente a ocorrência de algumas cheias, em 1992, quando a vazão média atingiu aproximadamente 10.000 m³/s. Em 1993, quando atingiu aproximadamente 6.000 m³/s. De 1993 até 2008 foi verificada vazões mais elevada em 2004 com vazão igual a aproximadamente 8.000 m³/s, no decorrer dos outros anos não foi verificado a ocorrência de elevação da vazão na região do baixo curso do São Francisco.

Nos últimos 10 anos a regularização das vazões máximas, mínimas e médias mensais e anuais, se manteve na maior parte do tempo, abaixo ou próximo de 2.000 m³/s, eliminando assim a sazonalidade anual e deixando de obedecer ao calendário natural. Essa relativa estabilidade do fluxo ocasionou várias implicações na desestabilização das margens que por sua vez vem propiciando a erosão avançada das mesmas.

3. IMPACTOS NOS PROCESSOS MORFOLÓGICOS DO BAIXO CURSO DO RIO SÃO FRANCISCO

3.1. Dados pluviométricos, vazões líquidas, sólidas e concentração de sedimentos em suspensão

Neste trabalho foram utilizados os seguintes materiais:

- Banco de dados da subbacia 49 (região do Baixo São Francisco) disponibilizado pela a Agência Nacional de Águas (ANA);
- Limites territoriais, estaduais e municipais, além do limite que compreende a área do Baixo São Francisco;
- Imagens de satélites do Google, 2005 e 2009 (GOOGLE, 2011) e fotos aéreas da região em estudo;
- Revisão bibliográfica em literatura específica, sites especializados e consultas a jornais e tablóides regionais; e
- Consulta a artigos científicos referentes à região do baixo São Francisco.

O presente trabalho concentrou-se na região do Baixo São Francisco, cujo limite estudado foi desde a jusante da barragem de Xingó, SE até a foz do São Francisco SE/AL, distante aproximadamente 210 km. Foram coletados dados da região em estudo, disponibilizados no banco de dados da ANA. Foram analisados dados hidrológicos de Chuva (dados pluviométricos), Vazão (dados fluviométricos) e dados sedimentológicos, como forma de obter uma correlação das alterações morfodinâmicas fluviais e estuarinas ocorridas ao longo dos anos na região do Baixo São Francisco, com a construção das barragens inseridas no curso principal deste rio.

3.2. Caracterização das estações

A caracterização e as possíveis alterações nos dados de chuva, vazão e sedimentos na região do baixo São Francisco, foram realizadas a partir do tratamento de dados disponíveis nas estações pluviométricas, fluviométricas e sedimentométricas, administrada pela ANA (Agência Nacional de Águas).

Com base no banco de dados da ANA, as chuvas medidas nas estações pluviométricas são dados brutos obtidos com o auxílio do pluviômetro, os dados fluviométrico são dados brutos, cuja medição é uma média diária, obtida pelo método de curva chave e por fim a concentração de sedimentos em suspensão também são dados brutos como nas demais estações analisadas.

O tratamento dos dados de chuva, vazão e sedimentos foi realizado com o auxílio do programa Excel, sendo que para os dados de chuva foi desenvolvido uma média mensal e anual para cada ano em estudo, para os dados de vazão foi realizada médias mensais e anuais para cada ano em estudo e, para os dados de sedimentos foi apresentado o comportamento das descargas líquidas (Q m³/s), sólidas (Q_{ss} ton/dia) e concentração de sedimentos em suspensão (mg/l) para cada estação em estudo.

Para o estudo dos dados referidos acima foram escolhidos 2 estações pluviométricas (Figura 6), 4 estações fluviométricas (Figura 7) e 3 estações sedimentométricas (Figura 8), cuja localização geográfica e as características são:

1) Estações Pluviométricas:

A estação Piranhas, SE está localizada na região do baixo São Francisco (subbacia 49), altitude de 110 m em relação ao nível do mar, cuja localização geográfica é de 9° 37' 34" de Latitude Sul e 37° 45' 22" de Longitude Oeste. Na presente estação, os estudos foram realizados no período de 1935 a 2011 (76 anos analisados)

A estação Piaçabuçu, SE encontra-se localizada na região do baixo São Francisco (subbacia 49), altitude de 10m em relação ao nível do mar, cuja localização geográfica é de 10° 24' 23" de Latitude Sul e 36° 25' 34" de Longitude Oeste. Nesta estação os estudos foram concentrados no período de 1929 a 2011 (82 anos de estudo).

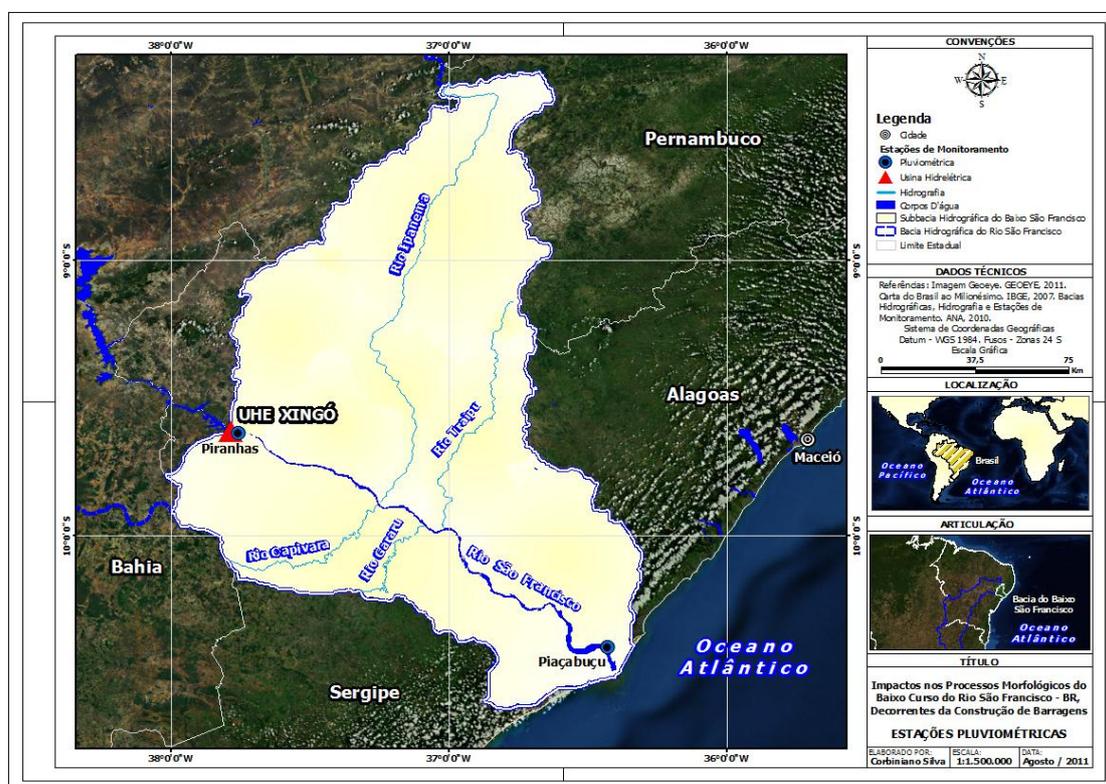


Figura 6. Localização das estações pluviométricas estudadas na região do baixo São Francisco.

2) Estações Fluviométricas;

A estação Piranhas, SE localiza-se na região do baixo São Francisco (subbacia 49), altitude de 10,85m, em relação ao nível do mar, cuja localização geográfica é de 9° 45' 59" de Latitude Sul e 37° 00' 29" de Longitude Oeste. Nesta estação os estudos foram concentrados obedecendo ao intervalo de 1979 a 2008, configurando 29 anos de estudo.

A estação Pão de Açúcar, AL está localizada na região do baixo São Francisco (subbacia 49), altitude de 10,85 m, em relação ao nível do mar 8,1m, cuja localização geográfica é de 9° 45' 05" de Latitude Sul e 37° 26' 47" de Longitude Oeste. Na presente estação os estudos ocorreram no intervalo de 1977 a 2007, determinando assim, 30 anos analisados.

A estação Traipu, AL encontra-se localizada na região do baixo São Francisco (subbacia 49), de altitude de 2,29 m em relação ao nível do mar, cuja localização geográfica é de 9° 58' 17" de Latitude Sul e 37° 00' 10" de Longitude Oeste. Nesta estação, os estudos se concentraram no intervalo de 1977 a 2008 configurando 31 anos de estudo.

A estação Propriá, SE localiza-se na região do baixo São Francisco (subbacia 49 do São Francisco), altitude de 1,57 m, em relação ao nível do mar, cuja localização geográfica é de 10° 12' 41" de Latitude Sul e 36° 49' 26" de Longitude Oeste. Nesta estação os estudos foram concentrados obedecendo ao intervalo de 1977 a 2006, produzindo assim 29 anos de estudo.

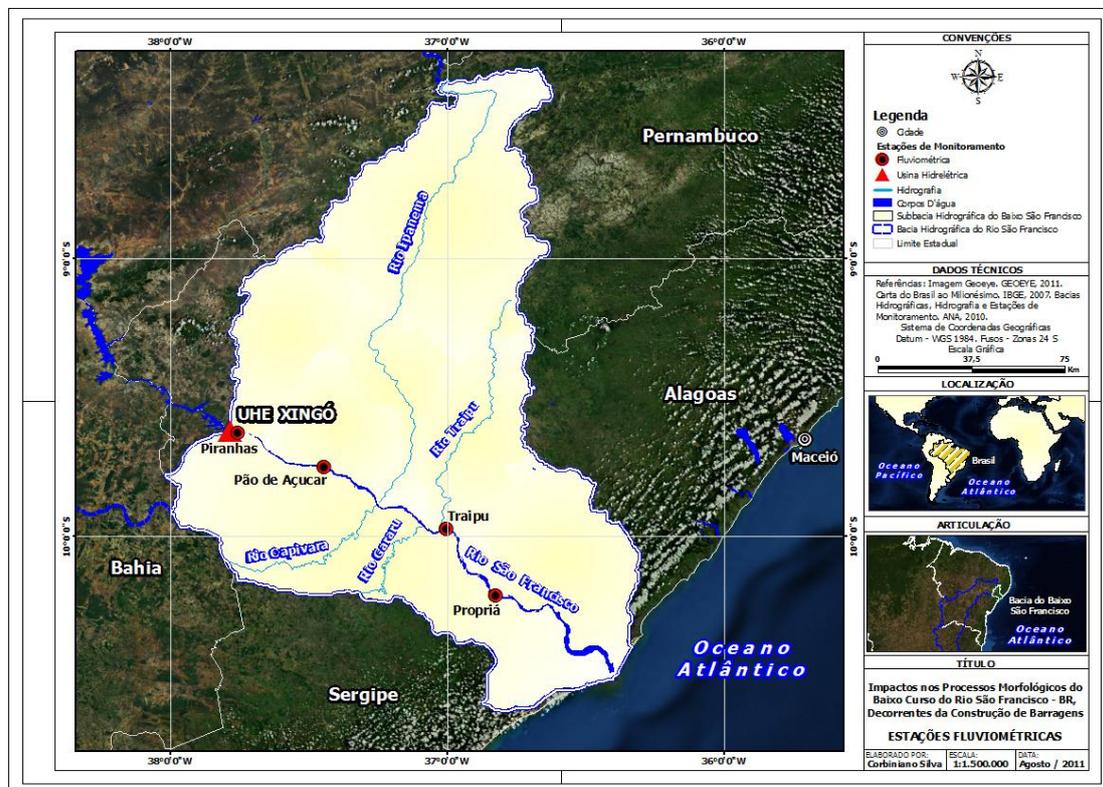


Figura 7. Localização das estações fluviométricas estudadas na região do baixo São Francisco.

3) Estações Sedimentométricas:

A estação Piranhas, SE localiza-se na região do baixo São Francisco (subbacia 49), altitude de 10,85 m em relação ao nível do mar, cuja localização geográfica é de 9° 37' 34" de Latitude Sul e 37° 45' 22" de Longitude Oeste. Nesta estação os estudos foram concentrados no período de 2006 a 2008 (3 anos de estudo).

A estação Traipu, AL está localizada na região do baixo São Francisco (subbacia 49), altitude de 2,29 m em relação ao nível do mar, cuja localização geográfica é de 9° 58' 17" de Latitude Sul e 37° 00' 10" de Longitude Oeste. Nesta estação, os anos de estudos analisados ocorreram no período 2000 a 2010 (10 anos de estudos).

Estação Propriá: localizada na região do baixo São Francisco (subbacia 49), altitude de 1,57 m em relação ao nível do mar, cuja localização geográfica é de 10° 12' 41" de Latitude Sul e 36° 49' 26" de Longitude Oeste. Nesta estação, os anos de estudos analisados se concentraram no período de 2000 a 2010 (10 anos de estudo).

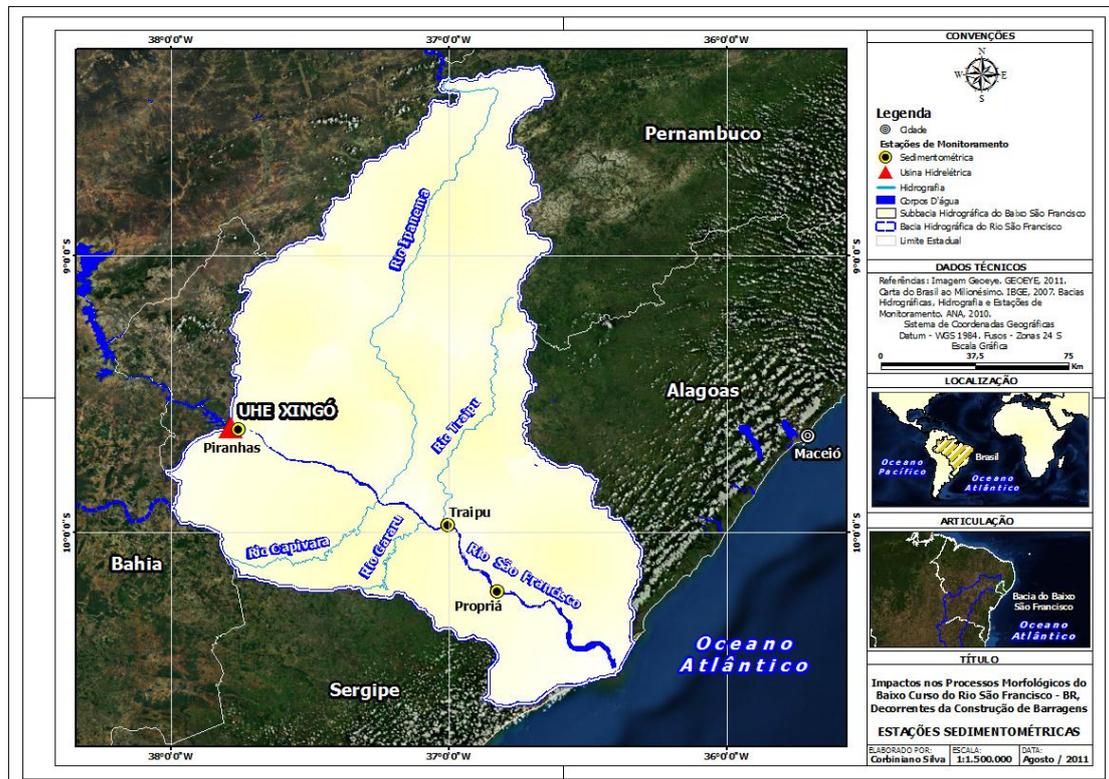


Figura 8. Localização das estações sedimentométricas estudadas na região do baixo São Francisco.

Vale ressaltar que neste trabalho foram consideradas as estações com maior número de dados como forma de aproximar-se de uma maior precisão dos resultados analisados na região do baixo São Francisco.

3.3. Precipitações mensais e anuais

A precipitação na hidrologia é entendida como toda a água proveniente do meio atmosférico que atinge a superfície terrestre. Neblina, chuva, granizo, saraiva, orvalho, geada e neve são formas diferentes de precipitações. Sendo que o que as diferencia é o estado em que a água se encontra (TUCCI, 2001).

Em uma bacia hidrográfica a disponibilidade de precipitação durante o ano é o fator determinante para quantificar, entre outros, a necessidade de geração de energia elétrica, irrigação de culturas e o abastecimento de água doméstico e industrial. A determinação da intensidade de precipitação é importante para o controle de inundação e erosão do solo.

Para a realização deste estudo foram utilizados dados pluviométricos da rede hidrométrica sob a gestão da ANA (Agência Nacional de Águas). O presente trabalho apresenta os resultados de precipitações mensais e anuais nas estações de Piranhas, SE e Piaçabuçu, SE. A estação Piranhas está situada logo após a jusante da UHE Xingó, distante 206 km da foz do São Francisco e a estação Piaçabuçu, distante 12km da foz.

As precipitações máximas e totais mensais e anuais acumulados na estação pluviométrica de Piranhas no período de 1935 a 2011 não sofreram variações significativas, ou seja, a quantidade de chuvas ao longo dos 76 anos analisados se manteve em condições normais segundo os padrões de circulação atmosférica (Figura 9). Durante o período estudado a máxima precipitação mensal foi de 120 mm (ano de 1988) e o valor mais elevado de precipitação total mensal foi de 306,40 mm no ano de 1960 e as precipitações médias anuais atingiram valores superiores a 80 mm (87,92 mm no ano de 1974). As precipitações totais mensais no ano de 1957, 1960 e 2004 apresentaram valores superiores a 250 mm, em contrapartida na década de 30, 40 e a partir de 2005 até 2008 estas precipitações foram menores que 200 mm. Vale ressaltar

que no ano de 1999 (29,91 mm), 2000 (37,0 mm) e 2001 (33,28 mm) as precipitações médias anuais foram baixas, sendo consideradas, com base na revisão bibliográfica, como anormais segundo os padrões climatológicos atmosféricos (crise energética de 2001). Mesmo apesar destas variações ao longo destes anos, a linha de tendência da precipitação média anual revela que as variações não foram significativas. Podemos concluir que as precipitações podem não ter correlação com os impactos antrópicos dos empreendimentos hidrelétricos, bem como correlação com os processos erosivos das margens na região do baixo São Francisco em estudo.

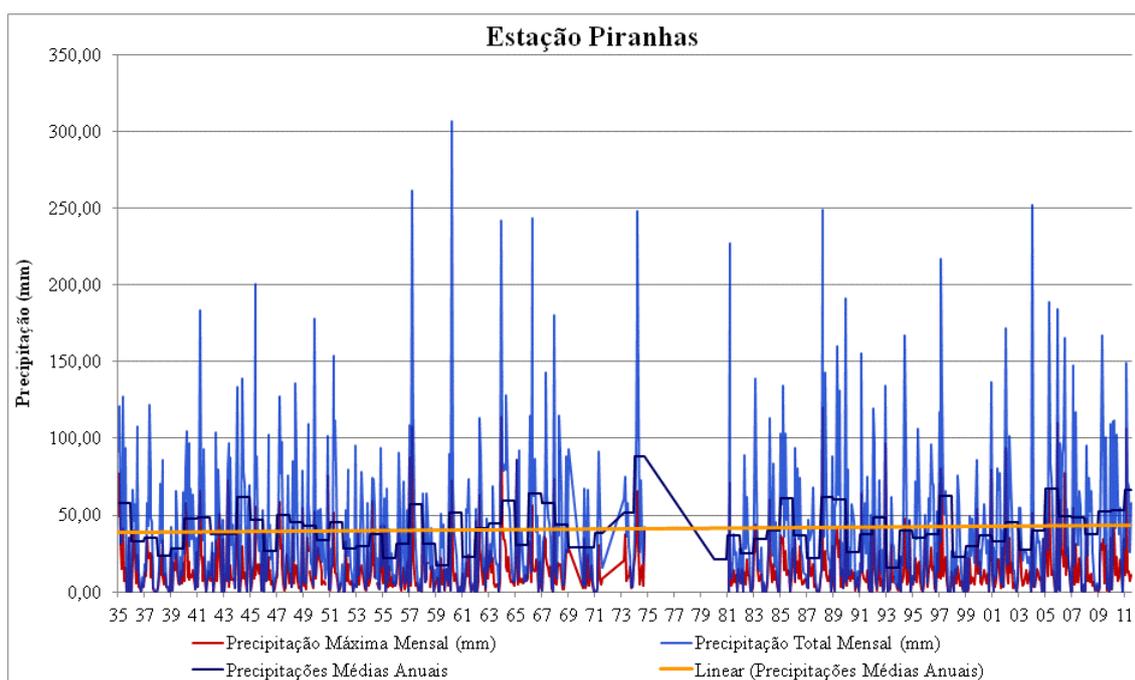


Figura 9. Precipitações máximas e totais mensais e médias anuais na estação Piranhas, SE, do baixo São Francisco no período de 1935 a 2011.

Na estação pluviométrica de Piaçabuçu os valores de precipitações mensais e anuais acumulados no período de 1929 a 2011 não obtiveram variações significativas, ou seja, a quantidade de chuvas ao longo dos 82 anos analisados se manteve em condições normais segundo os padrões de circulação atmosférica (Figura 10). Durante o período estudado a máxima precipitação mensal foi de 176 mm em 1945 e a precipitação total mensal foi de 559 mm em 1953. O valor médio anual mais elevado durante o período de estudo foi de 164,20 mm em 1966. Observe que na década de 30, 40, 60, 70 e no ano de 2008 as precipitações atingiram valores inferiores a 500 mm, na década de 50 seus valores eram abaixo 600 mm, na década de 80 a precipitação atingiu um resultado acima de 500 mm e na década de 90 seus valores foram menos que 400 mm.

Mesmo apesar destas variações ao longo destes anos, a linha de tendência da precipitação média anual revela que as variações não foram significativas. Podemos concluir que as precipitações podem não ter correlação com os impactos antrópicos dos empreendimentos hidrelétricos, nem tão pouco correlação com os processos erosivos das margens na região do baixo São Francisco em estudo.

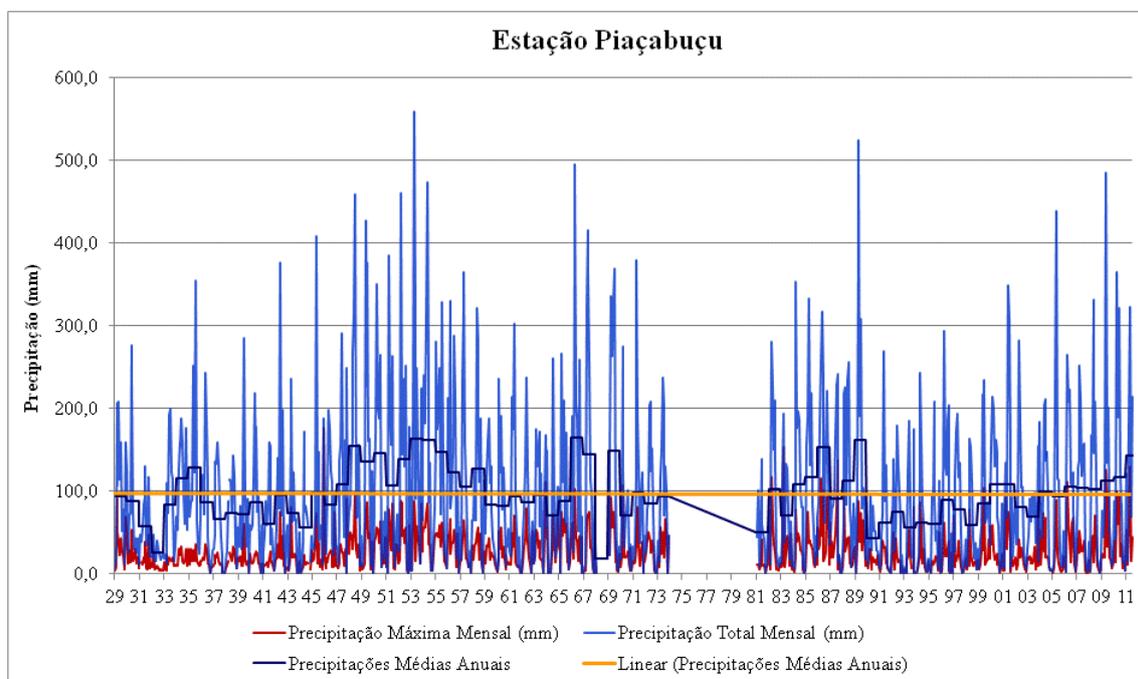


Figura 10. Precipitações máximas e totais mensais e médias anuais na estação Piaçabuçu, SE, do baixo São Francisco no período de 1929 a 2011

Em 2001 foram verificados que os índices pluviométricos, nos meses de recarga fluvial (janeiro, fevereiro e março), ficaram abaixo da média climatológica (MEDEIROS, *et al*, 2007). A crise de energia ocorrida em 2001 foi prevista na avaliação de risco anual de racionamento energético em 1997 (REBOUÇAS, *et al.*, 2006).

Os resultados obtidos nas estações pluviométricas de Piranhas e Piaçabuçu revelam que na maioria dos anos analisados as variações de precipitações mensais e anuais seguiram as condições normais atmosféricas e não houve significativas alterações dos dados pluviométricos em função dos empreendimentos hidrelétricos, nem tão pouco poça está correlacionados com os processos erosivos da região do baixo São Francisco.

Vale ressaltar que as chuvas sobre o baixo curso do rio São Francisco relaciona-se com as mudanças nas configurações da circulação atmosférica de escala planetária e com a interação oceano-atmosfera no Pacífico e no Atlântico. Dentre os mecanismos de grande escala que produzem precipitações sobre a Bacia do rio São Francisco destacam-se os sistemas frontais, associados à ZCAS (Zona de Convergência Atlântico Sul), VCANs (Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis) e a ZCIT (Zona de Convergência Intertropical). O principal mecanismo dinâmico produtor de precipitações tem sua gênese na ZCAS, porém esta atua em períodos distintos, de novembro a março nas subbacias do alto e médio São Francisco, e de abril a agosto na subbacia do baixo São Francisco.

3.4. Vazões máximas, mínimas e médias mensais e anuais

A vazão é o volume de água que passa por uma determinada seção, de um rio ou canal, num determinado intervalo de tempo. O cálculo de vazão permite quantificar o consumo, avaliar a disponibilidade dos recursos hídricos e planificar a respectiva gestão da bacia hidrográfica.

A construção de barragens são atividades antropogênicas que exercem efeitos em ambientes fluviais e estuarinos. Uma das alterações mais evidenciadas é a modulação ou regularização total da vazão, objetivando uma demanda de água relativamente constante, necessário à geração de energia hidrelétrica. Essa regulação provoca redução na variabilidade da vazão natural do rio, causando impactos sobre a pulsação natural das forçantes físicas do ecossistema.

Segundo MEDEIROS, *et al.*, 2007 a regularização da vazão de maneira geral, direta ou indiretamente, é a responsável pela alteração do balanço hídrico e sedimentar do ecossistema aquático.

Diversas barragens hidrelétricas construídas na bacia hidrográfica do rio São Francisco ao longo dos anos, mas precisamente em meados da década de 70, provocaram modificações da pulsação natural e nas vazões mensais e anuais do baixo São Francisco. A seguir descreveremos as variações das vazões mensais e anuais para cada estação em estudo.

Para a realização deste estudo foram utilizados dados fluviométricos da rede hidrométrica sob a gestão da Agência Nacional de Águas. O presente trabalho apresenta o comportamento das vazões máximas, mínimas e médias mensais e anuais nas estações de Piranhas, SE, Pão de Açúcar, AL, Traipu, AL e Propriá, SE, ambas situadas a jusante da UHE Xingó (distante 210 km da foz) e localizada na região do baixo São Francisco em estudo.

Na Figura 11 são apresentados dados de vazões de 1979 a 2008, registradas na estação fluviométrica de Piranhas, localizada a jusante da UHE Xingó, distante 206 km da foz do São Francisco. Ao realizar a análise da variação das vazões máxima, mínimas e médias mensais e anuais observou-se que no período amostrado os picos de vazão máxima sofreram redução, no ano de 1979 a vazão máxima alcançou 12.708 m³/s, enquanto que no ano 2008 a vazão apresentou valor igual a 2840 m³/s (vazão reduzida). Podemos observar que tanto as vazões máximas quanto as mínimas e as médias mensais e anuais sofreram redução. As enchentes (cheias) foram reduzidas consideravelmente a partir da década de 80 quando Sobradinho entra em operação em 1979. Com base no gráfico desta Estação, mesmo depois da operação de Sobradinho as cheias continuavam a acontecer (1979, 1985, 1992). A partir de 1994 quando Xingó entra em operação estas cheias são totalmente regularizadas e sua vazão reduzida consideravelmente. Em 1979 a vazão máxima era 12.708 m³/s, 1985 era 12.225 m³/s, 1992 era 10.004 m³/s, 2004 era 8.820 m³/s e no dado mais atual de 2008 a vazão foi de 2.840 m³/s. A linha de tendência da vazão média anual apresentou-se em decaimento com variações significativas. Depois da Operação da UHE Xingó somente em 2004 a vazão apresentou um valor mais elevado de 8.820 m³/s. O resultado dos dados analisados na estação de Piranhas revela que a partir de 1994 a vazão foi reduzida e vem se mantendo regularizada em média de 1.672,97 m³/s, com exceção do ano de 2004.

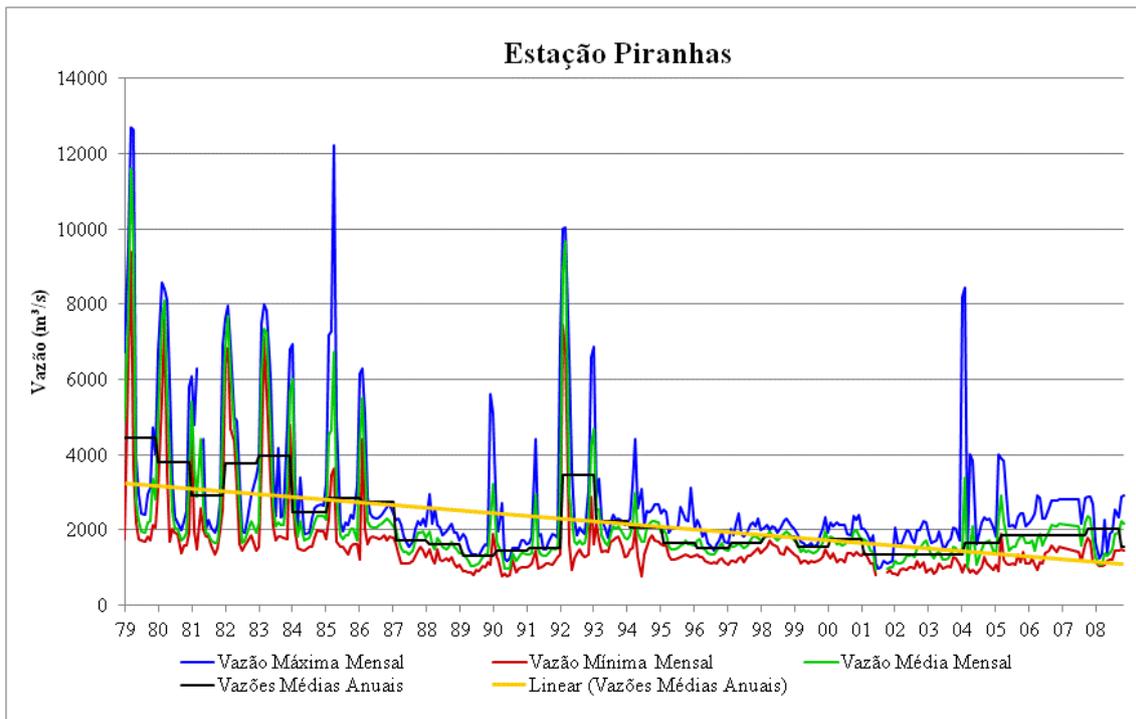


Figura 11. Vazões máximas, mínimas e médias mensais e anuais na estação Piranhas, SE, do baixo São Francisco, no período de 1979 a 2008.

Na Figura 12 são revelados dados de vazões de 1960 a 2007, registradas na estação fluviométrica de Pão de Açúcar, localizada logo após a estação de Piranhas, distante 168 km da foz. Ao realizar a análise das vazões máxima, mínimas e médias mensais e anuais foi observado que no período amostrado os picos de vazão máxima sofreram redução, no ano de 1960 a vazão máxima alcançou 15.230 m³/s, enquanto que no ano 2007 a vazão reduziu a 2.776 m³/s. Observar-se que tanto a vazão máxima quanto as mínimas e as médias mensais e anuais sofreram redução. As enchentes (cheias) durante os 47 anos analisados foram se reduzindo consideravelmente. Em 1960 a vazão era 15.230 m³/s, 1979 era 14.202 m³/s, 1985 era 13.336 m³/s, 1992 era 10.366 m³/s e no dado mais atual de 2007 a vazão foi de 2.776 m³/s. Anos como 2003 e 2006 foram exceções, pois a vazão apresentou valores mais elevados de 7.981 m³/s e 6.388 m³/s. A redução da vazão se deu a partir de 1994 quando UHE Xingó entra em operação. A linha de tendência da vazão média anual apresentou-se em decaimento com variações significativas. O resultado dos dados analisados na estação de Pão de Açúcar revela que a partir do ano de 1994 a vazão foi reduzida e vem se mantendo regularizada em média de 1.805,84 m³/s, com exceção 2003 e 2006 onde a vazão apresentou valores mais elevados.

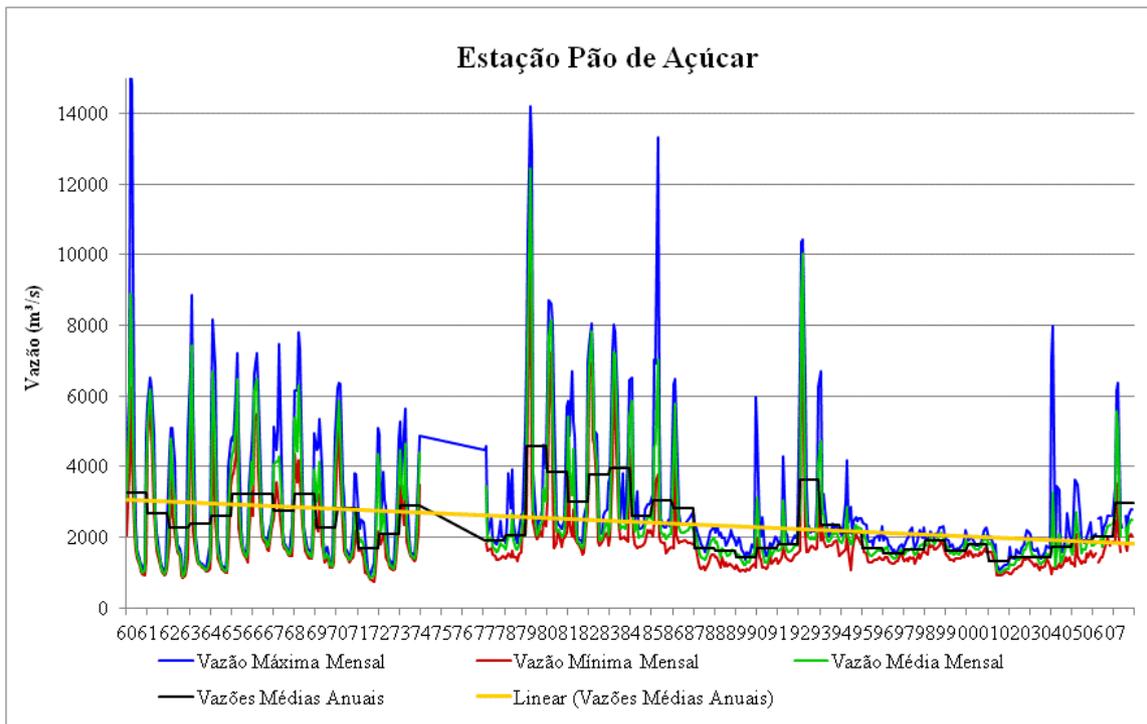


Figura 12. Vazões máximas, mínimas e médias mensais e anuais na estação Pão de Açúcar, SE, do Baixo São Francisco, no período de 1960 a 2007.

Na Figura 13 é apresentada a série de vazões de 1977 a 2008, registradas na estação fluviométrica de Traipu, localizada a aproximadamente 40 km acima da Estação de Propriá e distante 108 km da foz. Ao realizar a análise das vazões máxima, mínimas e médias mensais e anuais observou-se que no período amostrado os picos de vazão máxima sofreram redução. No ano de 1979 a vazão máxima alcançou 13.016 m³/s, enquanto que no ano 2008 a vazão máxima foi reduzida a 2880 m³/s. Devemos observar que tanto a vazão máxima quanto as mínimas e as médias mensais e anuais sofreram redução. As enchentes (cheias) durante os 31 anos analisados foram se reduzindo consideravelmente. Em 1979 a vazão era 13.016 m³/s, 1985 era 12.524 m³/s, 1992 era 10.416 m³/s, 2004 era 8.944 m³/s e no dado mais atual de 2008 a vazão foi de 2.880 m³/s, sendo que em 2004 apresentou uma vazão elevada no valor de 8.944 m³/s e em 2007 um valor de 7.168 m³/s. A linha de tendência da vazão média anual apresentou-se em decaimento com variações significativas. O resultado dos dados analisados na estação fluviométrica de Traipu revela que a partir do ano de 1994 a vazão foi reduzida e vem se mantendo regularizada em média de 1.967,87 m³/s, com exceção do ano de 2004 e 2007.

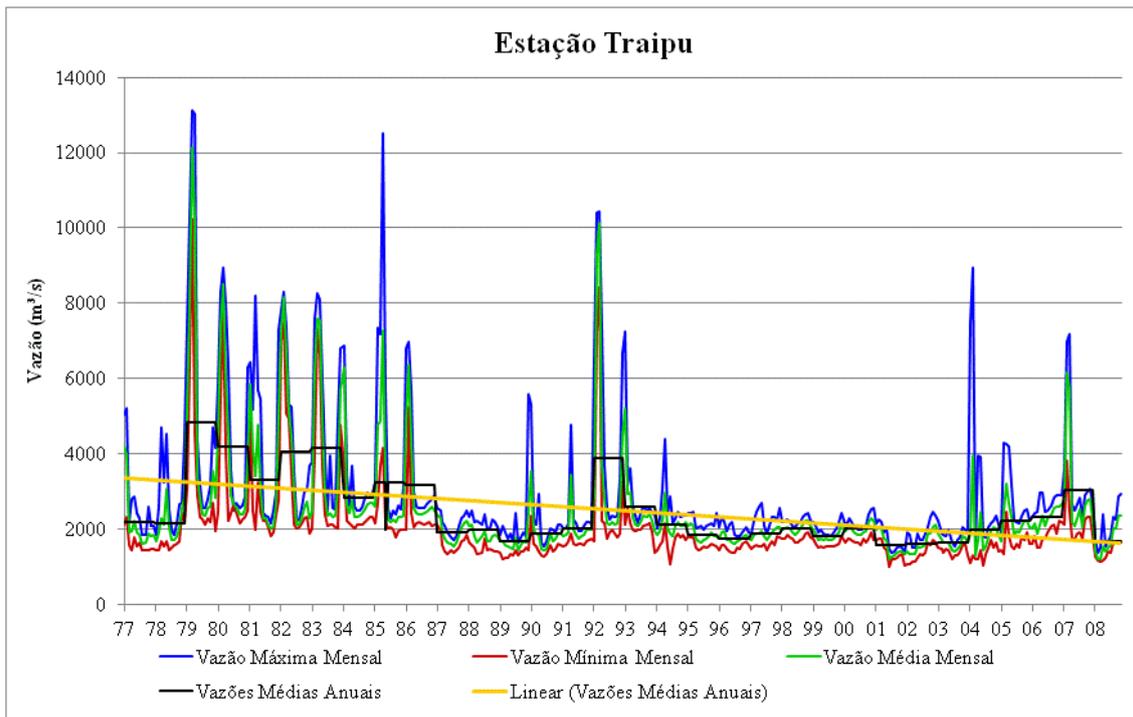


Figura 13. Vazões máximas, mínimas e médias mensais e anuais na estação Traipu, AL, do baixo São Francisco, no período de 1979 a 2008.

Na Figura 14 as vazões de 1977 a 2008, registradas na estação fluviométrica de Propriá, localizada nas proximidades da foz do São Francisco (distante 71 km da foz). Ao realizar a análise das vazões máxima, mínimas e médias mensais e anuais observou-se que no período amostrado os picos de vazões máximas mensais sofreram redução, no ano de 1979 a vazão máxima alcançou $13.873 \text{ m}^3/\text{s}$, enquanto que no ano 2008 a vazão reduziu a $2.892 \text{ m}^3/\text{s}$. Note também que tanto as vazões máximas quanto as vazões mínimas e médias mensais e anuais sofreram redução. A precipitação máxima mensal no ano de 1979 foi de $13.873 \text{ m}^3/\text{s}$, em 1985 foi de $15.046 \text{ m}^3/\text{s}$, em 1992 foi de $7.395,29 \text{ m}^3/\text{s}$, em 2004 o valor se elevou a $9.933,20 \text{ m}^3/\text{s}$ e em 2008 o valor decaiu para $2.892,50 \text{ m}^3/\text{s}$. A linha de tendência da vazão média anual apresentou-se em decaimento e com alterações significativas. O resultado dos dados analisados na Estação fluviométrica de Propriá revela que a partir de 1994 a vazão máxima mensal foi reduzida e vem se mantendo regularizada em média $2052,19 \text{ m}^3/\text{s}$, com exceção do ano de 2004 e 2007.

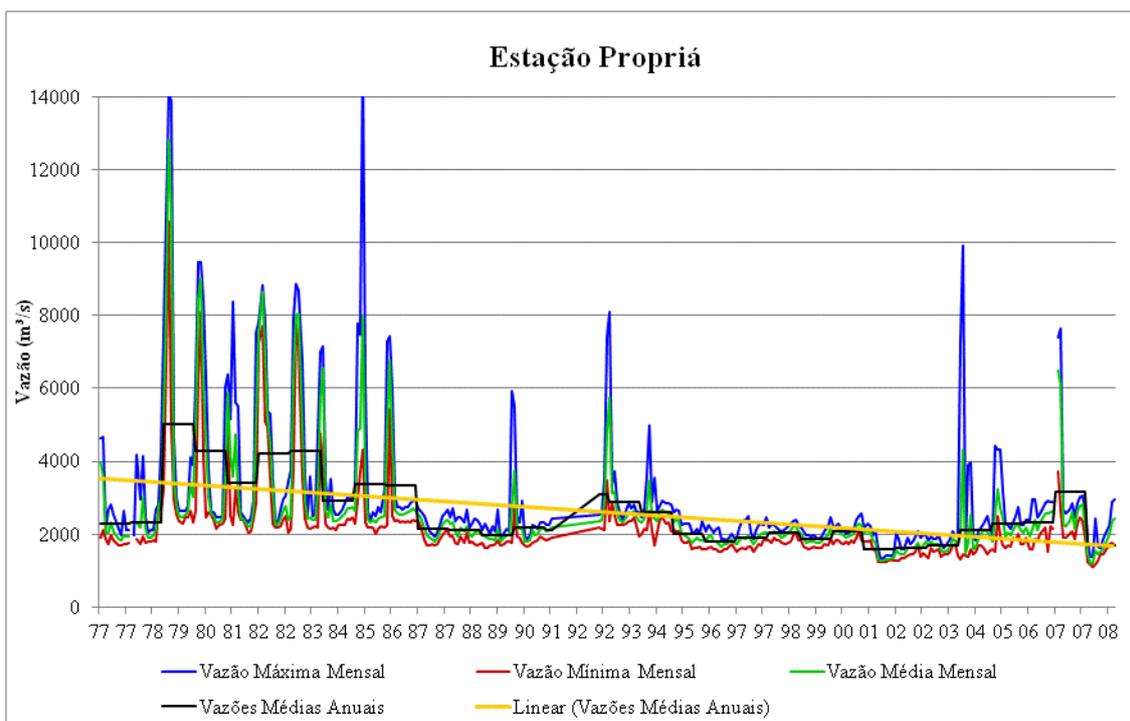


Figura 14. Vazões máximas, mínimas e médias mensais e anuais na estação Propriá, SE, do baixo São Francisco, no período de 1977 a 2008.

Associando a variabilidade hidrológica ao período de implementação dessas hidrelétricas, foi possível elaborar a decomposição da série temporal da vazão anual em 4 estágios em função da operacionalidade e do impacto desses empreendimentos na região do baixo São Francisco.

O primeiro estágio de 1960-1971 abrangeu a construção da UHE Três Marias, MG no Ato São Francisco e Paulo Afonso II e III, BA, que essencialmente não afetou de forma significativa à variabilidade temporal e a magnitude da vazão do baixo São Francisco, pois o potencial de recarga de água e matéria entre o alto, médio e baixo São Francisco é alto.

O segundo estágio de 1977-1985 incorporou a operação da barragem de Apolônio Sales (Moxotó), Paulo Afonso IV e Sobradinho, sendo a última com grande potencial de retenção de sedimentos em seu reservatório (praticamente grande parte da carga sedimentar do Rio São Francisco fica retida nesta barragem). Além de controlar praticamente toda a descarga sólida regulou também as descargas líquidas.

O terceiro estágio de 1988-1994 congregou a implementação das barragens de Itaparica (Luis Gonzaga), PE e Xingó, SE, sendo a última iniciada sua operação em 1994, determinando a regularização definitiva da vazão descarregada para a região do baixo São Francisco.

Por fim o quarto estágio de 1995 a 2008 corresponde às condições pós-barragens com vazão regularizada. Devemos ressaltar que a UHE Sobradinho é a principal barragem responsável pela modulação e/ou regularização da vazão do rio desde a década de 80.

Na região do baixo São Francisco, BR, com base nos dados analisados nas estações Piranhas, Pão de Açúcar, Traipu e Propriá, revela que, além da redução das vazões líquidas, os picos de enchentes com altas vazões acima de 10.000 m³/s aproximadamente, que ocorriam normalmente nos meses de janeiro a março, foram notavelmente suavizados, com exceções esporádicas de vazões que ultrapassaram a capacidade limite de controle das barragens, tal como em 1979 (acima de 15.000 m³/s), 1985 (acima de 12.000 m³/s), 1992 (acima de 10.000 m³/s).

Em 2001 na estação pluviométrica de Piranhas, localizada a 206 km da foz do São Francisco, no ano de 1999 (29,91 mm), 2000 (37,0 mm) e 2001 (33,28 mm) as precipitações médias anuais foram baixas, sendo consideradas com base na revisão bibliográfica como anormais segundo os padrões climatológicos atmosféricos. A redução das chuvas neste período (1999-2001) ocasionou uma redução das vazões líquidas na região do baixo São Francisco. Esta situação de escassez não afetou somente a bacia hidrográfica do São Francisco, outras bacias hidrográficas também tiveram suas vazões líquidas reduzidas e conseqüentemente esta situação de escassez de água propiciou o desenvolvimento da crise energética de 2001.

3.5. Vazões líquida, sólidas e concentração de sedimentos em suspensão

A medição de descarga em suspensão tem por objetivo conhecer o valor do transporte em suspensão, a concentração de sedimentos e a distribuição granulométrica. Está fase de medição é a mais predominante, visto que o rio transporta sempre uma

maior carga em suspensão. Estima-se que na maior parte dos cursos d'água essa parcela representa mais de 90% da descarga sólida total (CARVALHO, 2008).

O aumento da vazão intensifica a velocidade do escoamento fluvial, a capacidade de transporte do rio e a lavagem das margens, incrementando o material particulado e dissolvido transportado.

A produção de sedimentos por uma bacia hidrográfica é influenciada, por diversos fatores, tanto natural (clima, geologia, relevo e área da bacia) quanto antropogênicos (construção de barragens). Diversas ações antropogênicas modificam o padrão natural da produção de sedimentos, algumas incrementam a produção de sedimentos, tal como o desmatamento, intensificando a erosão, e outras provocam sua redução, tal como as barragens, que retêm e diminuem a capacidade de transporte de sedimentos pelos rios.

A redução das vazões líquidas induz uma maior sedimentação do material particulado em suspensão no rio, a erosão das suas margens e assoreamento, além disso, induz também a erosão costeira. Essas alterações acontecem em função da perda do equilíbrio de energia entre o rio e o mar, bem como da perda de reposição de sedimentos fluviais na costa.

O presente trabalho apresenta o comportamento das vazões líquidas, sólidas e da concentração de sedimentos na região do baixo São Francisco. Para este fim foram escolhidas três estações sedimentométricas: Estação Piranhas, SE, Traipu, AL e Propriá, AL, ambas situada a jusante da UHE Xingó, distante aproximadamente 210 km da foz.

Na Estação Piranhas (Figura 15), localizada logo após a barragem de Xingó, e distante 206 km da foz. Os estudos se concentraram no período de 2006 a 2009. A descarga líquida máxima foi de 2.979 m³/s no ano de 2007 e a mínima de 1.038 m³/s no ano de 2008; a descarga sólida máxima foi de 1.356 ton/dia no ano de 2008 e a mínima de 342 ton/dia no ano de 2007 e a concentração de sedimentos em suspensão máxima foi de 15 mg/l no ano de 2008 e a mínima foi de 1,3 mg/l no ano de 2007. A média das descargas líquidas, sólidas e da concentração de sedimentos em suspensão foram

respectivamente de 2.286 m³/s, 935 ton/dia e 6,1 mg/l no período em estudo. Vale ressaltar que quanto maior a concentração do particulado em suspensão, maior será também a descarga sólida. Quanto maior a vazão líquida menor a vazão sólida, configurando assim a ocorrência de processos erosivos e quanto menor a vazão líquida, maior é a vazão sólida, configurando assim a ocorrência de processos sedimentares. Observa-se com base nos dados apresentados no gráfico abaixo da estação de Piranhas, que as vazões líquidas excederam as vazões sólidas na sua maioria, determinando assim que nesta região está ocorrendo mais processos erosivos do que sedimentares.

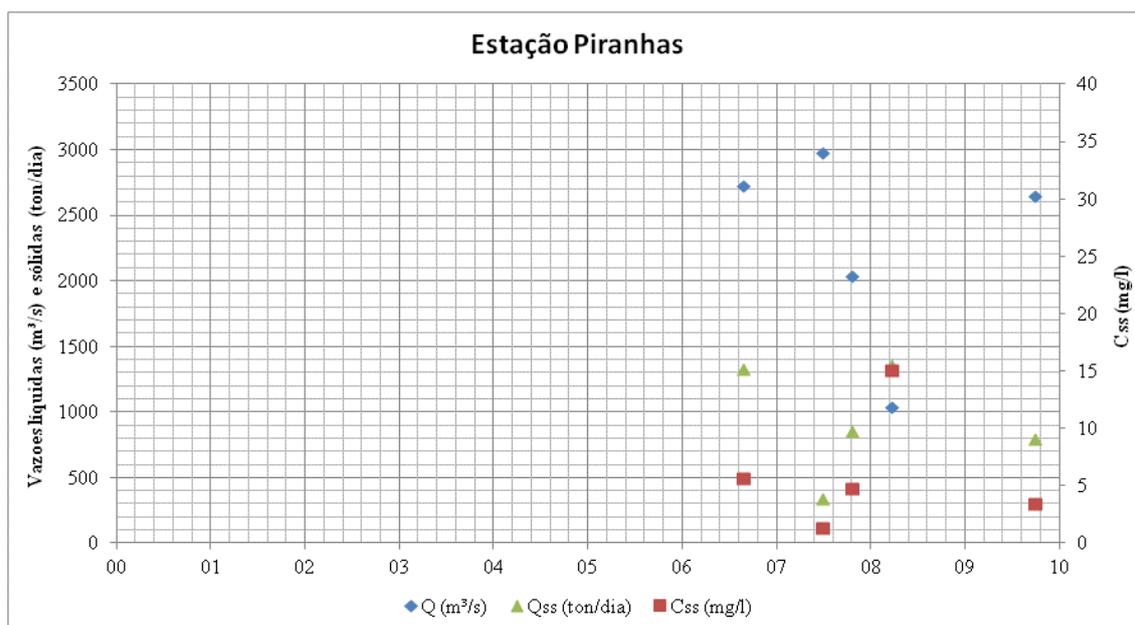


Figura 15. Vazões líquidas, sólidas e concentração de sedimentos em suspensão na estação Piranhas, SE, baixo São Francisco, BR, no período de 2006 a 2009.

Na Estação Traipu (Figura 16), localizada após a Estação de Piranha, distante 108 km da foz, os estudos se concentraram no período de 2000 a 2010. A descarga líquida máxima foi de 2.633 m³/s no ano de 2006 e a mínima de 1.189 m³/s no ano de 2001; a descarga sólida máxima foi de 8.022 ton/dia no ano de 2003 e a mínima de 295 ton/dia no ano de 2001 e a concentração de sedimentos em suspensão máxima foi de 32,32 mg/l no ano de 2008 e a mínima foi de 2,7 mg/l no ano de 2004. A média das descargas líquidas, sólidas e da concentração de sedimentos em suspensão foram respectivamente de 1.935 m³/s, 2.115 ton/dia e 13,33 mg/l no período em estudo. Vale ressaltar que quanto maior a concentração do particulado em suspensão, maior será também a descarga sólida. Observa-se, com base nos dados apresentados no gráfico

abaixo da estação de Traipu, que as vazões sólidas excederam as vazões líquidas, configurando a presença de processos sedimentares.

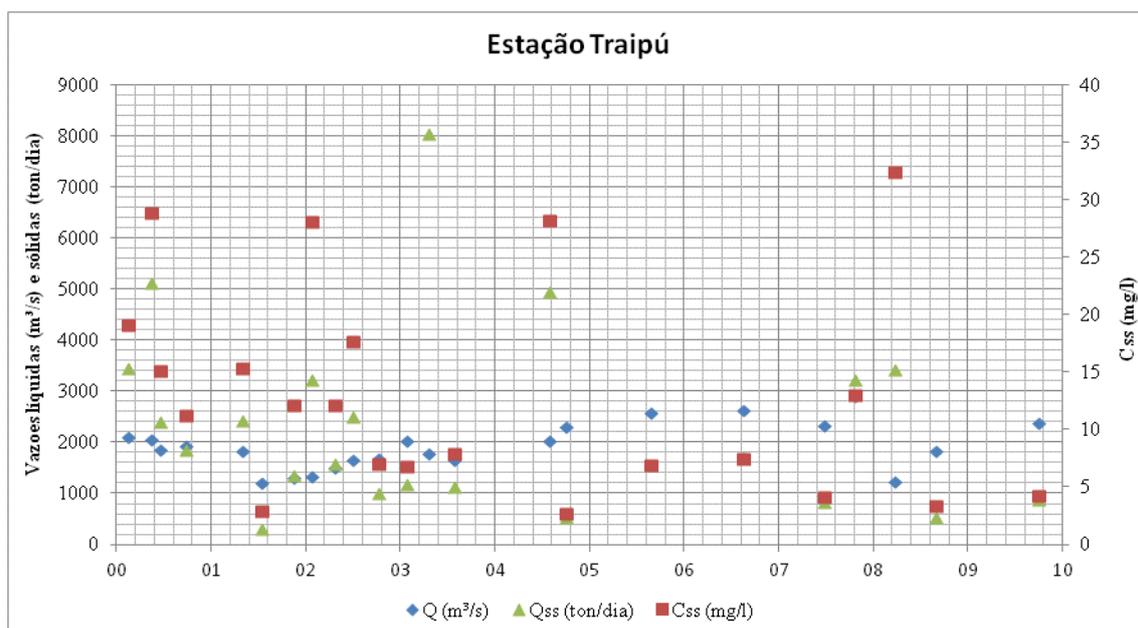


Figura 16. Vazões líquidas, sólidas e concentração de sedimentos em suspensão na Estação de Traipu, SE, baixo São Francisco, BR, no período de 2000 a 2010.

Na Estação Propriá (Figura 17), localizada nas proximidades do Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba, os estudos se concentraram no período de 2000 a 2010. A descarga líquida máxima foi de 2.633 m³/s no ano de 2006 e a mínima de 919 m³/s no ano de 2001; a descarga sólida máxima foi de 4.214 ton/dia no ano de 2004 e a mínima de 606 ton/dia no ano de 2001 e a concentração de sedimentos em suspensão máxima foi de 38,82 mg/l no ano de 2004 e a mínima foi de 5,26 mg/l no ano de 2000. A média das descargas líquidas, sólidas e a concentração de sedimentos em suspensão foram respectivamente de 1.797 m³/s, 1938 ton/dia e 12,76 mg/l no período em estudo. Observa-se, com base nos dados apresentados no gráfico abaixo na estação de Propriá, que as vazões líquidas excederam as vazões sólidas no período de 2000 a 2005, determinando assim a ocorrência de processos sedimentares e no período de 2006 a 2010 as vazões líquidas excederam as vazões sólidas, determinado assim a presença de processos erosivos.

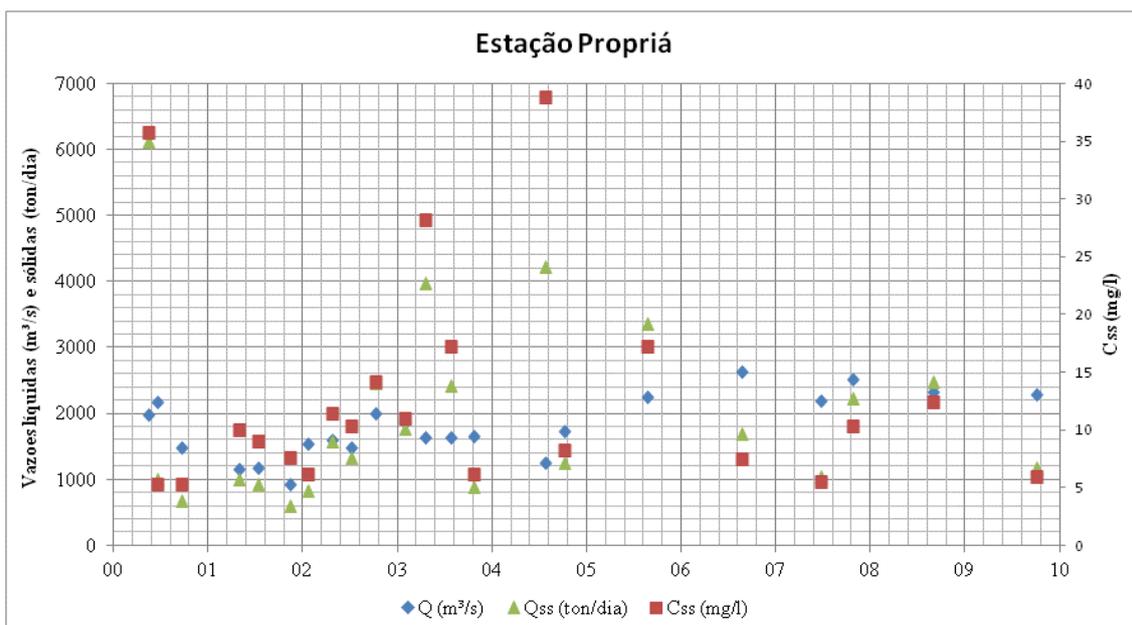


Figura 17. Vazões líquidas, sólidas e concentração de sedimentos em suspensão na Estação de Propriá, SE, baixo São Francisco, BR, no período de 2000 a 2010.

A Tabela 4 abaixo revela que a média anual das descargas líquidas foi reduzida em direção a foz (estação de Propriá localizada nas proximidades da foz) e as descargas sólidas e a concentração de sedimentos aumentou em direção a foz. Logo após a barragem de Xingó, está localizada a estação de Piranhas e os dados médios de descargas sólidas e de concentração de sedimentos revelam valores menores que nas estações seguintes. Este fato pode comprovar que os sedimentos presentes na região do baixo São Francisco não são originários do rio São Francisco e sim podem ser oriundos de sedimentos erosivos das margens do seu baixo curso ou mesmo sedimentos aportados da contribuição de seus pequenos afluentes (Ipanema, Traipu, Gararu e Capivara).

Tabela 4. Comportamento médio anual das descargas líquidas, sólidas e da concentração de sedimentos em suspensão nas estações Piranhas, SE, Traipu, AL e Propriá, SE.

Estações	Período Analisado	Média Anual C _{ss} (mg/l)	Média Anual Q _{ss} (ton/dia)	Média Anual Q (m³/s)
Piranhas (SE)	2006-2009	6,1	935	2.286
Traipu (AL)	2000-2010	13,33	2.115	1.935
Propriá (SE)	2000-2010	12,76	1.938	1.797

3.6. Morfodinâmica fluvial

A água é um dos agentes modeladores exógenos do relevo mais importantes na construção e composição da paisagem terrestre. Além disso, está ligada aos

processos de erosão e sua influência sobre a estabilidade de encostas e taludes fluviais é decisiva. Do seu escoamento nos cursos de água, resultam processos fluviais que participam da constante esculturação das formas de relevo e correlacionam-se, de forma dinâmica, aos aspectos ecológicos, econômicos e sociais (DURLO *et al.*, 2005).

Os rios funcionam como canais de escoamento, sendo parte integrante do ciclo hidrológico. Sua alimentação se processa através das águas superficiais e das subterrâneas (CHRISTOFOLETTI, 2009). Estima-se que um oitavo da drenagem anual do ciclo hidrológico escoam diretamente para o mar (escoamento superficial), a partir da superfície da terra, e que sete oitavos da água se infiltram, pelo menos temporariamente.

O volume de água escoada em determinado canal varia, com o decorrer do tempo, em função de fatores como o regime de precipitação, condições de infiltração, drenagem subterrânea e outros. Essa variação do nível das águas fluviais, no decorrer do ano, corresponde ao regime fluvial, e a vazão ou módulo fluvial é medida em metros cúbicos por segundo.

O comportamento da velocidade das águas e seu fluxo (turbulento ou laminar) relacionam-se com a corrente fluvial (ou trabalho) que o rio executa, permitindo o transporte da carga sedimentar nas suas mais variadas formas (suspensão, saltação e rolamento), de acordo com a granulometria das partículas (tamanho e forma) e das características da própria corrente, elaborando assim uma forma de relevo fluvial em função destas variáveis.

Os sedimentos fornecidos e carregados pelos rios podem estar na forma dissolvida (constituintes intemperizados das rochas), em suspensão (silte e argila) ou constituir a carga do leito do rio (cascalhos, areias).

A erosão provê a carga a ser transportada por um rio e compreende não apenas o material sólido carregado no fundo, mas também as partículas em suspensão e o material em solução (CHRISTOFOLETTI, 2009).

Considerando que a hidrodinâmica exerce uma seleção progressiva dos sedimentos em respeito à composição e ao tamanho, o entendimento apropriado desse fenômeno é essencial as previsões de comportamento dos elementos ligados aos sedimentos. Existem dois grupos distintos de sedimentos, os sedimentos arenosos (areias) e os finos (silte e argila).

Segundo SANTOS, 2007, o transporte de sedimentos é função da hidrodinâmica, da forma, tamanho e coesão das partículas. Para cada tamanho de partícula, existe uma velocidade crítica do fluido necessária para movimentá-la. O diagrama clássico de Hjulström, (SHIELDS, 1936), apresentado na Figura 18 abaixo, ilustra a relação entre velocidade de fluxo e a granulometria, que rege os processos de erosão, transporte e sedimentação. É necessária maior força para colocar em suspensão as argilas do que os sedimentos arenosos, devido às forças de coesão entre os minerais de argila, cuja superfície específica é maior e eletricamente insatisfeita. O oposto se observa em relação à sedimentação, as argilas permanecem em suspensão por muito mais tempo em virtude de sua forma foliar e conseqüente menor velocidade de decantação (regida pela Lei de Stokes).

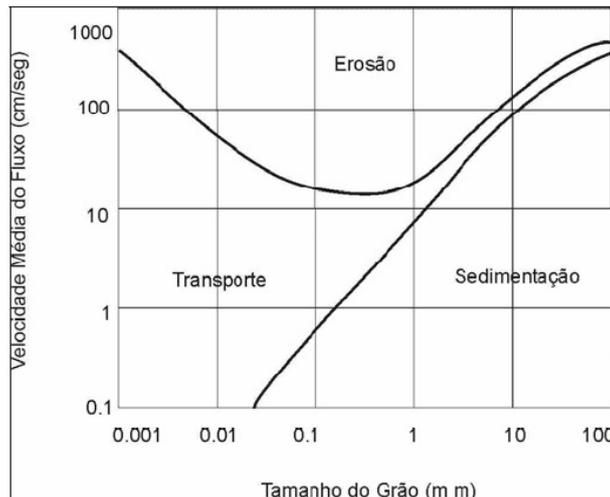


Figura 18. Diagrama de Hjulström (Shields, 1936)

A competência de um rio em transportar sedimentos e o volume da carga transportada depende da velocidade de fluxo e da seção do canal fluvial, ou seja, da vazão ou descarga fluvial. O transporte das cargas suspensa e dissolvida dá-se a mesma velocidade que flui as águas, enquanto que a carga de fundo (ou carga de leito do rio) movimenta-se muito mais lentamente devido ao seu deslocamento intermitente por

saltação. Em geral, a carga de fundo corresponde à cerca de 10 a 20% da carga suspensa.

Logo após o transporte do sedimento, o rio inicia o processo de deposição da carga detrítica. Essa deposição ocorre quando há diminuição da competência ou da capacidade fluvial. Essa diminuição pode ser causada pela redução da declividade, pela redução do volume ou pelo aumento do calibre da carga detrítica. Dentre as várias formas originadas pela sedimentação fluvial destacam-se as planícies de inundação (várzeas) e os deltas, podendo também ser imputados os cones de dejeção, as praias e os banhados, as restingas fluviais e outras (CHRISTOFOLETTI, 2009).

Vale ressaltar que a fonte fluvial é a principal fonte de matéria orgânica alóctone terrestre para os sedimentos estuarinos, que consistem em uma mistura complexa de material de diversas origens. A fonte marinha que aporta no sistema via maré e a biomassa autóctone derivada dos produtores primários do sistema (plâncton, bentos e vegetação marginal) são outras fontes naturais também significativas para a matéria orgânica sedimentar (FONTES, 2002).

Nas bacias hidrográficas, as características de tipologia de leito, de canais, de padrões de drenagens, analisadas em conjunto, proporcionam uma dinâmica peculiar das águas correntes. A inter-relação dinâmica que existe entre os elementos da bacia hidrográfica implica, por outro lado, em constantes trocas de causa e efeito entre os mesmos. Então quaisquer modificações em um destes elementos podem vir a promover alterações na dinâmica fluvial, de diferentes formas e escalas.

As características do canal de escoamento estão sendo gradativamente alteradas em função da variabilidade sazonal das condições ambientais e, durante longos anos, há um equilíbrio entre o fluxo de água e detritos que entram e saem do sistema fluvial, a morfologia do rio e de sua bacia de drenagem não é estática, pois o material está sendo constantemente removido e há modificações nas formas de relevo superficiais e fluviais (CHRISTOFOLETTI, 2009)

Modificações provocadas por atividades humanas desenvolvidas em um trecho do rio resultam em um complexo rearranjo do sistema fluvial, identificado em inúmeros estudos de caso, nos quais foram constatadas respostas, diferenciadas no espaço e no tempo, após intervenções humanas como a regularização dos fluxos com a construção de barragens, diques, dentre outros (GUERRA *et al.*, 2009). Dentre as formas que o rio responde as mudanças na topografia do seu leito e nas descargas líquida e sólida refere-se à intensa erosão das suas margens.

A intervenção humana de grande intensidade, como exemplo as grandes barragens, gera o rompimento do equilíbrio longitudinal do rio. Praticamente todo barramento do canal fluvial, interfere no seu sistema lótico (correntezas), passando a ser um sistema com características lênticas (ou de águas semiparadas) no reservatório. Este impacto desencadeia uma série de efeitos e, dependendo da magnitude e da área de abrangência, pode ser irreparável.

O estado de estabilidade é atingido e mantido pela interação mútua das características do canal, tais como a declividade, forma do perfil transversal, rugosidade e padrão. O rio é um sistema auto-regulador, qualquer alteração nos fatores controladores causará um deslocamento em certa direção que tenderá a absorver o efeito da mudança.

Na região do baixo São Francisco em estudo, é preocupante o quadro de degradação ambiental de seu ecossistema fluvial (rompimento do equilíbrio natural), afetando as áreas marginais inundáveis e propiciando conseqüências socioeconômicas e culturais advindas destas alterações no ambiente.

3.6.1. Efeitos hidrológicos, geomorfológicos e sedimentológicos gerais da construção e operação de barragens

As características hidrológicas de um rio comandam o funcionamento da dinâmica do canal, ou seja, estas características como: a velocidade da corrente fluvial, a variabilidade das descargas e a frequência das descargas extremas, exercem importantes controles sobre as condições físicas, como também sobre as condições químicas e biológicas do corpo hídrico.

Quando o rio é represado, o regime hidrológico do segmento a jusante pode ser alterado em parte pela operação da barragem, que é responsável tanto pelo controle e regularização das descargas, como pela redução da variabilidade sazonal e das descargas extremas e, em parte, pelas modificações nas características dos efluentes líquidos e sólidos originados das barragens e que alimentam o segmento do rio situado a jusante das mesmas (FONTES, 2002). Além disso, a planície aluvial também pode ser comprometida por estes impactos, afetando diretamente o regime hidrológico subterrâneo, pois ao represar o rio, ocorrem modificações, no nível piezométrico, o que por sua vez implica em alterações nas taxas de infiltração da água no solo.

Em condições naturais, uma vez cessado o período das chuvas, os rios continuam por longo tempo, abastecidos pela reserva de água acumulada no solo ou nas rochas, que escoam lentamente. Caso o regime de estiagem seja muito intenso, o nível hidrostático passará a situar-se abaixo do nível dos rios, ocasionando a inversão da infiltração da água, que passará a ser do rio para a zona de saturação mais abaixo, tornando-o seco (LEINZ, *et al.*, 2003). A alteração do regime de descargas do rio afeta diretamente o seu nível hidrostático. Quando a superfície piezométrica fica abaixo do leito do rio, tornando-o mais seco

Na maioria das barragens, ocorre também a redução do fluxo nos períodos de vazão natural elevada, e, conseqüentemente, diminuição na energia da corrente. Na sua totalidade estes empreendimentos afetam as descargas naturais, com exceção de enchentes extremas, quando somente barragens construídas para regulação de grandes enchentes têm qualquer efeito sobre o fluxo de água.

A construção de barragens rompe com a seqüência natural dos rios em pelo menos três setores distintos: 1º montante do reservatório/barragem; 2º no reservatório e periferia e 3º a jusante do reservatório/barragem (GUERRA, *et al.*, 2009). O presente trabalho se deterá a relatar somente os impactos ocorridos a jusante destas barragens. Na Tabela 6 abaixo, estão descritas as principais alterações hidrológicas e geomorfológicas no setor situado a jusante de um rio represado e na Tabela 7 estão alguns elementos importantes a serem considerados quanto à natureza e distribuição dos impactos gerados a jusante das barragens (FONTES, 2002).

Tabela 5. Alterações hidrológicas e geomorfológicas em setores de um rio represado (GUERRA, *et al*, 2009).

SETOR DA BACIA	PRINCIPAIS IMPACTOS HIDROLÓGICOS	PRINCIPAIS IMPACTOS GEOMORFOLÓGICOS
A jusante da barragem	Controle da regularização das descargas Redução da carga sólida (sedimentos) Alteração na estrutura térmica Redução do nível piezométrico Alteração nas taxas de infiltração Menor disponibilidade de água subterrânea	Entalhe no leito do rio, com conseqüente descida do nível de base local Descida do nível de base dos afluentes com retomada erosiva (entalhe) dos seus leitos Processos de erosão nas margens; Alteração nos sedimentos de fundo e das margens Reajustamento na morfologia do canal pela migração dos setores de erosão e sedimentação Processos de deposição nas margens e fundo do leito Modificações na dinâmica da foz.

Tabela 6. Elementos a serem considerados em um rio represado por barragens (FONTES, 2002)

ELEMENTO A SER CONSIDERADO	CARACTERÍSTICA DO IMPACTO
Usos / Demandas por água	Na bacia (a jusante da barragem/reservatório)
Escala / amplitude espacial dos impactos Natureza e seqüência dos impactos Forma de operação das barragens Escala temporal Encadeamento de impactos Efeitos sobre os meios antrópicos e bióticos	Ocorrência tanto em âmbito local, regional e de bacia Dependendo da abrangência da área de influência de uma obra de engenharia fluvial o impacto pode se estender desde as cabeceiras, passando pela planície fluvial até a desembocadura do rio e zona costeira adjacente São diferentes no segmento a jusante Depende da(s) finalidade(s) para qual foi construída Imediato, médio e longo prazo Há uma seqüência de impactos em cadeia Impactos diretos e indiretos atingem os meios bióticos e antrópicos (históricos e socioeconômicos)

Alguns exemplos de construção de barragens que ocasionaram alterações no regime de seus rios, citamos a barragem Bennett, no Canadá, a barragem do rio Damodar, na Índia, a barragem de Dallas no rio Columbia, nos E.U.A, a barragem de Aswan no rio Nilo (Egito), as barragens no rio San Francisco (EUA) e o rio Colorado (EUA).

Considerando a magnitude de tais impactos, esta pesquisa apresenta a seguir os principais impactos potenciais de naturezas hidrológicas, geomorfológicas e sedimentológicas que vem ocorrendo ao longo dos anos na região do baixo São Francisco.

3.6.2. Alterações nas *descargas líquidas a jusante de barragens*

O regime hidrológico natural do rio São Francisco e o seu regime sedimentológico, contribuíam para a dinâmica do sistema fluvial e a ocorrência de erosão nas margens. Esta caracterização ocorreu no período de 1926 a 1976, anterior, portanto, à construção da barragem de Sobradinho e por isso mesmo o período que mais se aproxima das condições naturais, uma vez que ainda era baixo o nível de controle do homem sobre o rio, no que se refere às condições hidrossedimentológicas do seu baixo curso.

Aproximadamente 80% do total das suas águas no baixo curso do rio São Francisco provem das subbacias do alto e médio São Francisco. A participação das subbacias afluentes do baixo São Francisco, na sua maioria formada por rios intermitentes, normalmente não alcança 5%, valor este que era ainda proporcionalmente muito menor antes de 1993, quando, nos períodos de enchentes, as vazões chegavam a atingir entre 4.000 e 12.000 m³/s (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2003).

O regime hidrológico natural do baixo curso do São Francisco se apresenta com uma nítida variação sazonal ao longo do ano, marcada por dois períodos bem distintos: um de altas vazões, estendendo-se de dezembro a maio (coincidente na sua maior parte com o verão na região) e outro de baixas vazões entre junho a novembro (coincidente na sua maior parte com o inverno).

Os regimes pluviométricos provenientes das subbacias do alto e médio São Francisco influenciam diretamente no sistema de produção de chuvas do baixo São Francisco. O período chuvoso desta região em estudo tem início em Fevereiro-Março e se estende até agosto e o período seco corresponde aos meses de primavera e verão (setembro a janeiro). Assim, o período de maior pluviosidade no baixo São Francisco (abril a agosto) coincide com os meses de menor vazão média do Rio (Tabela 7).

Tabela 7. Correlação entre as condições climáticas e hidrológicas sazonais do alto e baixo São Francisco (FONTES, 2002).

Regime Fluviométrico Alto e Baixo São Francisco	Estação climática	Meses	Regime Pluviométrico Baixo São Francisco	Regime Pluviométrico Alto São Francisco
Vazões elevadas (enchentes) Baixas vazões	Verão Inverno	Dezembro a maio Junho a novembro	Estiagem Estação Chuvosa	Estação Chuvosa Estiagem

Os estudos da gênese das vazões da bacia do rio São Francisco também constataram que as regiões do Alto São Francisco e a vertente ocidental do segmento Médio da bacia, respondem pela produção de 85% das vazões de estiagem do São Francisco. Estas regiões descritas acima, juntamente com os rios das Velhas, Paracatu e Urucuia também são as maiores geradoras das grandes cheias, contribuindo significativamente no processo, produzindo, em conjunto, cerca de 74% dos deflúvios máximos de até 30 dias consecutivos em Traipu, AL.

FONTES, 2002 relatou que as variações interanuais evidenciavam um padrão caracterizado pela extrema variabilidade das vazões, mas com a ocorrência sazonal, em praticamente todos os anos no período de 1926 a 1976, de picos de médias mensais acima de 4.000 m³/s, entre os meses de dezembro de um ano a março do ano seguinte.

Dentre as experiências marcantes a respeito dos efeitos das inundações por cheias na região do baixo São Francisco em estudo podemos citar: a verificada em 1979, onde o nível do rio na altura da cidade de Propriá atingiu conta de 9,40m e a outra bem marcante foi à enchente de abril de 1985, onde a conjunção das altas vazões provenientes do Alto São Francisco, com precipitações pluviométricas anormais nos afluentes do submédio, propiciou a inundação desta região. Na grande cheia ocorrida em 1979 (Figura 19), a barragem de Sobradinho conseguiu reduzir o pico de enchente em cerca de 30%, de 18.000 para 13.000 m³/s aproximadamente.

Os picos de altas vazões médias correspondem aos períodos de enchentes que invariavelmente provocavam o transbordamento do rio, ocupando toda a extensão do seu leito maior. O nível das águas se elevavam entre 2 e 5 metros, alcançando vez

por outra 8 m de altitude (SUVALE, 1973).



Figura 19. Nível alcançado pelo rio São Francisco nas cheias, ao final do ano de 1979 (FONTES, 2002).

As altas vazões médias propiciavam a inundação das terras baixas marginais levando ao acúmulo de água nas depressões (várzeas) e a deposição de sedimentos finos (siltes e argilas) e matéria orgânica, fertilizando o solo. Quando do retorno das águas ao leito menor, parte das várzeas permanecia preenchida com águas, se constituindo nas chamadas lagoas marginais

Com base nos dados deste trabalho as vazões médias mensais nas estações fluviométricas do baixo São Francisco a partir de 1977 revelam que no período imediatamente posterior à construção da barragem de Sobradinho (1978-1987) ocorreu redução das vazões mínimas, mas que permaneceram os fortes picos anuais de vazão característicos do verão. Apesar da capacidade de regularização de Sobradinho, as cheias continuaram a ocorrer anualmente, atingindo vazões médias mensais da ordem de 6.000 m³/s, ou superiores, em praticamente todos os anos do período.

A frequência de enchentes no baixo São Francisco foi substancialmente reduzida após 1987-1988, como pode ser visualizada nos dados deste trabalho, época que coincidente com a construção da barragem de Itaparica. A barragem Itaparica que possui uma pequena capacidade de regularização, desempenha um papel importante na retenção das vazões produzidas no submédio São Francisco, abaixo de Sobradinho, e que eram, ciclicamente, as responsáveis pela potencialização de cheias, como a de 1985. Desde 1988, só se verificou a ocorrência de apenas uma cheia, em 1992, quando a vazão média atingiu aproximadamente um valor de 10.000 m³/s.

Vale ressaltar que apesar dos meses de maior vazão coincidirem com aqueles de maior disponibilidade hídrica na bacia (período chuvoso no alto e médio São Francisco), em termos locais esta variação ocorre devido à maior ou menor liberação de água através das turbinas da Usina Hidrelétrica de Xingó. Estas variações na vazão se traduzem em flutuações centimétricas diárias no nível do rio ao longo do ano, que embora estejam muito aquém dos valores anteriormente alcançados durante os períodos de enchentes, mesmo assim, contribuem para o fenômeno da erosão marginal, ao produzir marés artificiais.

No estágio de subida das águas desenvolve-se um gradiente, dirigindo-se do canal fluvial para dentro do material da margem. No estágio de descida o gradiente de energia reverte o seu sentido e a água move-se em direção ao canal do rio, diminuindo a estabilidade do talude marginal. O influxo e refluxo nas margens podem causar efeitos erosivos, ao desestabilizar as margens, após e durante o retorno das águas ao seu nível anterior.

A construção da Usina Hidrelétrica de Xingó, em 1994, representa um marco definitivo em relação ao controle do homem sobre o comportamento do segmento do sistema fluvial situado a jusante desta barragem. Com a entrada em operação da UHE Xingó, concluía-se a parte essencial do sistema de barragens construído pela CHESF e estabelecia-se um elevado nível de controle sobre o comportamento do segmento do canal abaixo da usina.

No baixo curso do rio São Francisco cerca de 97% da descarga líquida e sólida provém das áreas situadas rio acima e que, portanto, encontram-se amplamente controladas pela cascata de barragens existente de Sobradinho a Xingó (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2003).

Uma das influências mais diretas das regras de operação de uma usina hidrelétrica sobre os fluxos efluentes, principalmente no caso de usinas que trabalham sob demanda e que aumentam consideravelmente a sua produção nos horários de pico de consumo dá-se pela flutuação constante das vazões efluentes. Este é o caso da Usina de Xingó, projetada para entrar de forma mais expressiva no sistema interligado de

geração de energia elétrica nos momentos de maior demanda de consumo. No canal situado a jusante da usina, estas regras de operação, se traduzem em oscilações horárias, diárias, semanais e mensais das vazões e, conseqüentemente, do nível do rio.

A partir de 1994, com a entrada em operação da Usina de Xingó todo o fluxo no baixo curso do São Francisco passou a ser aquele que é liberado após passar pelas turbinas. Para proporcionar uma idéia da ordem de grandeza da variação diária e semanal das vazões defluentes de Xingó, as Figuras 20 e 21 exemplificam o comportamento em um dia útil e em um fim de semana, respectivamente, ficando bem evidenciado o horário de ponta, com valores máximos entre 18 e 24 horas. É preciso estar atento na análise destes gráficos para os valores utilizados, pois os dados utilizados são de 2001, ano considerado atípico em termos de vazões liberadas por Xingó, pois coincide com a execução do programa emergencial de racionamento de energia elétrica em função dos níveis extremamente baixos do reservatório de Sobradinho. Em 2001 a vazão média correspondeu a quase a metade dos valores normalmente liberados desde 1994 (FONTES, 2002).

Observando os gráficos de defluências horárias da UHE de Xingó, nota-se que no dia de final de semana a demanda da vazão diminui quando comparada a vazão demandada no dia útil da semana. Por outro lado os dados revelam que no dia de final de semana a demanda máxima consumida é de aproximadamente $1.200\text{m}^3/\text{s}$ às 19h, já no dia útil está demanda máxima consumida está concentrada no período de 4h (19 às 23h). Então as demandas de consumo máximo são maiores nos dias de semana úteis do que nos dias de final de semana.

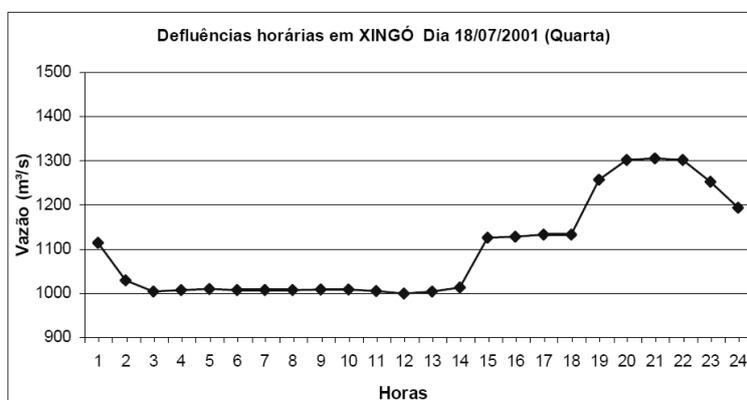


Figura 20. Defluências horárias na Usina Hidrelétrica de Xingó, em 18/07/2001. Eixo vertical (vazões em m^3/s) e eixo horizontal (horas) (CHESF, 2001).

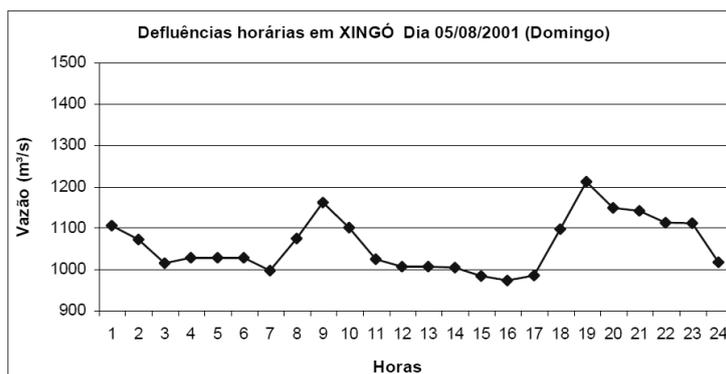


Figura 21. Defluências horárias em Xingó,SE no dia 05/08/2001 (domingo) (CHESF, 2001).

As variações das vazões obedecem também outro ciclo (Figura 22), este de ordem semanal, correspondente as variações da demanda de energia elétrica, entre os dias da semana. Neste ciclo, os níveis mínimos exibem um padrão regular, ocorrendo em intervalos de 7 dias, coincidentes com os fins de semana, quando a demanda diminui muito, exigindo menores vazões turbinadas.

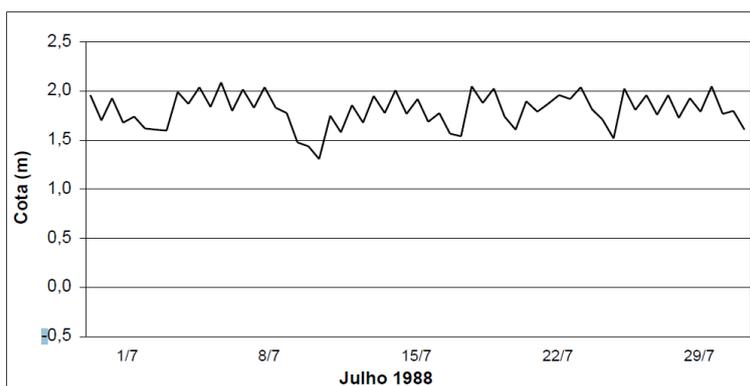


Figura 22. Variações dos níveis d'água na estação fluviométrica de Pão de Açúcar, AL em julho de 1988 (CONSÓRCIO JAAKKO POYRY-TAHAL, 2000).

Também podemos observar na Figura 23 a correlação das variações dos fluxos turbinados com as respostas no canal, em termos de vazão e amplitude da oscilação do nível do rio, à medida que aumenta a distância em relação à barragem (estações fluviométricas de Piranhas, Pão de Açúcar e Propriá). Nesta Figura, os deslocamentos das curvas tornam evidenciadas as defasagens temporais entre as respostas das variações da vazão e do nível do rio entre Pão de Açúcar (próximo ao corpo da barragem) e Propriá. É possível observar que as curvas das estações sucessivamente mais distantes da barragem de Xingó, estão deslocadas para a direita, indicando a defasagem de tempo entre a alteração na vazão e a resposta no local da

estação. Está subida e descida do nível das águas tende a produzir, respectivamente, fluxos e refluxos de subsuperfície nas margens arenosas. No estágio de subida das águas desenvolve-se um gradiente do canal fluvial para dentro do material da margem. No estágio de descida o gradiente de energia reverte o seu sentido e a água move-se em direção ao canal do rio, diminuindo a estabilidade do talude marginal.

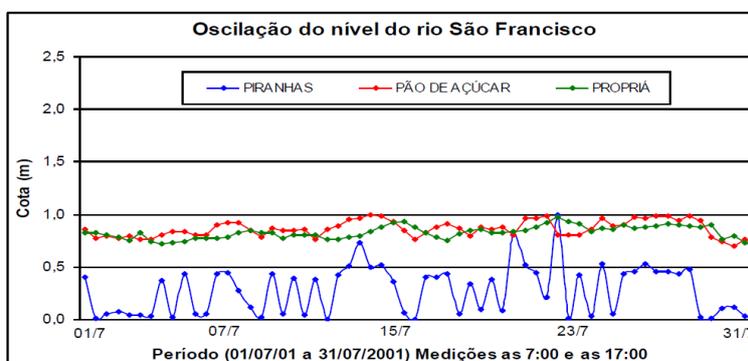


Figura 23. Oscilações do nível do rio no período de 01 a 31/07/2001 nas estações fluviométricas de Piranhas, Pão de Açúcar e Propriá. (CHESF, 2001)

No trecho do baixo São Francisco compreendido entre UHE Xingó e a foz, esta hidrelétrica controla praticamente todo o fluxo do rio, na medida em que é mínima a contribuição dos afluentes situados a jusante da mesma. Apesar disso, faz-se a ressalva que o controle real encontra-se em Sobradinho, pois a operação de Xingó é totalmente dependente das liberações de água por parte de Sobradinho.

3.6.3. Alterações nas descargas sólidas a jusante de barragens

Modificações das vazões consistem na redução da velocidade da corrente e, conseqüentemente, da capacidade de transporte de sedimentos pelo rio. Estes sedimentos são responsáveis pela formação e manutenção de praias de rios, pelo equilíbrio do fluxo sólido e líquido entre os continentes e oceanos, constituem fator fundamental para a dinâmica dos cursos d'água, transportam nutrientes que servem de alimento para biota destes corpos hídricos (CARVALHO, 2008).

Em um rio, a produção e a deposição de sedimentos dependem fundamentalmente das suas características naturais como: chuvas, tipos de solo, topografia, densidade de drenagem, cobertura vegetal e área de drenagem, e das modificações antrópicas como: o uso e ocupação dos solos, o uso da água, as alterações nos cursos d'água, dentre outros. Dependendo do grau da interferência ou mesmo da

alteração do fluxo de sólidos de um rio, os impactos ambientais nesse ecossistema aquático podem ser irreversíveis.

Grande parte dos sedimentos oriundos de montante, retidos nos reservatórios de usinas hidrelétricas provocam modificações nas características dos fluxos efluentes da barragem e interferem na dinâmica do segmento do rio situado a jusante da barragem.

A retenção de sedimento no reservatório provoca um escoamento de água mais limpa para a jusante da barragem. Esse escoamento límpido, associado com sua maior energia, devido à liberação para a jusante da energia potencial acumulada no reservatório, aumenta o poder erosivo do escoamento, provocando degradação, com aprofundamento da calha do rio e erosão das margens. A regularização dos cursos d'água a jusante traz grande influência neste processo erosivo. Por outro lado, a atenuação dos picos de cheias a jusante diminui os problemas de inundação, mas impede o espalhamento de sedimentos finos contendo nutrientes nas várzeas e matas ciliares, além de diminuir as concentrações de nutrientes da cadeia alimentar da biota aquática e terrestre (CARVALHO, 2008).

A Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, no decorrer do tempo, vem sofrendo impactos oriundos de barragens construídas no seu curso principal. O reservatório de Sobradinho retém uma grande parte da carga sólida e o restante desta carga sedimentar fica armazenado nas demais barragens rio abaixo. A barragem de Xingó representa o elo final da cadeia de retenção de sedimentos provenientes de montante. A jusante da barragem, a água é límpida e as medições efetuadas durante o programa de monitoramento ambiental da usina indicam uma retenção quase que total da carga em suspensão.

Quanto à carga de fundo, a pequena contribuição advinda do trecho entre as barragens Paulo Afonso e Xingó, deposita-se na porção mais a montante do reservatório, não tendo possibilidade de entrar nas tomadas d'água das turbinas da usina de Xingó.

Com base no projeto de gerenciamento integrado das atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2003), observe na Figura 24 o papel exercido pela barragem de Xingó na retenção da carga sólida e, na Tabela 8, veja as alterações na carga sedimentar total transportada anualmente no baixo curso do rio São Francisco.

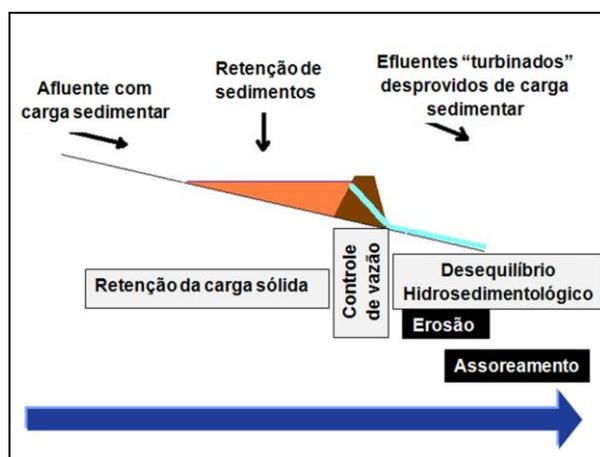


Figura 24. Representação de esquema genérico do papel exercido por uma grande barragem na retenção da carga sólida sedimentar (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2003).

Esta situação apresentada na Figura 24 somente poderá mudar, principalmente em relação a carga sedimentar, caso haja a ocorrência de episódios de altas vazões por ocasião de chuvas excepcionais no alto, médio ou submédio São Francisco, implicando em uma diminuição do tempo normal de permanência da água no reservatório e no eventual revolvimento de parte do sedimento fino depositado em alguns locais do fundo dos reservatórios situados rio acima, sobretudo em Sobradinho.

Campanhas de monitoramento ambiental da qualidade da água a jusante da barragem de Xingó foram realizadas pela CHESF em 1997, revelando valores de sólidos em suspensão de apenas 0,2mg/l, próximo a cidade de Piranhas, SE. Além da CHESF a ANEEL, no ano de 2000, com base nos dados obtidos da estação hidrosedimentológica de Propriá, observou-se que a concentração de sedimentos em suspensão variou entre o mínimo de 5,2ppm (junho a setembro) até 22,3ppm (fevereiro) e 35,6ppm (maio). A elevação destes valores pode ser atribuída à contribuição dos afluentes a jusante de Xingó, por ocasião das fortes chuvas de verão, quando as águas apresentam um aspecto temporariamente turvo e de coloração amarela.

Esse mesmo fenômeno pode ocorrer eventualmente em algum período da estação chuvosa local, que concide com o inverno. Nos demais climas, estas contribuições são insignificantes, predominam as condições em que a água sem carga em suspensão, límpida e de coloração esverdeada ou azulada, é liberada pela usina de Xingó.

Além deste fenômeno descrito acima, FONTES, 2002 no período de 2000 a 2002 observou que durante as chuvas excepcionais ocorridas no alto, médio ou submédio, a água que ultrapassa a barragem de Xingó era de coloração amarela, indicando a presença de partículas finas em suspensão. Porém este fenômeno ocorria em pequena duração, pois depois de alguns dias esta água voltava a apresentar uma coloração límpida, já característico abaixo da barragem de Xingó.

Sem a ocorrência de chuvas excepcionais os estudos descritos pela CHESF, 1997, CHESF e ANNEL, 2000 e FONTES, 2002 revelam a ausência de carga de sedimentos em suspensão na água que ultrapassava a barragem de Xingó.

Estudos realizados por OEA/PLANVASF, 1986; MILLIMAN, 1983; e Projeto GEF SÃO FRANCISCO/UFAL, modificado por OLIVEIRA em 2001(Tabela 8), revelam uma notável diminuição da carga sedimentar transportada, pois estes valores representavam apenas 3,8% da carga sólida total transportada antes da implantação das barragens rio acima, (12×10^6 t/ano) e 7,6% da carga sólida transportada após a implantação da barragem de Sobradinho, porém antes da construção de Itaparica e Xingó.

Tabela 8. Alterações na carga total de sedimentos transportados anualmente na região do baixo São Francisco (1 OEA/PLANVASF, 1986; 2 MILLIMAN, 1983; e 3 PROJETO GEF SÃO FRANCISCO/UFAL. Modificado por OLIVEIRA em 2001)

PERÍODO	LOCALIDADE	ANO	CARGA TOTAL DE SEDIMENTOS (x 10 ⁶ ton./ano)
Período Pré-barragem de Sobradinho	Pão de Açúcar (1) Foz (2) Propriá (3)	1966-1968	12
Período Pós-barragem de Sobradinho		1983	6
Período Pós-barragem de Xingó		2000	0,466

O desencadeamento de processos erosivos e o assoreamento ao longo do estirão do rio situado a jusante da barragem de Xingó são evidências do complexo reajustamento da morfologia do canal em busca de um novo equilíbrio dinâmico (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2003). A erosão marginal e do leito do canal, além de fornecer partículas sólidas para o transporte pela corrente fluvial, contribui para o processo de assoreamento do canal fluvial.

GUERRA *et al.*, 2009, descreve que as mudanças ocorridas no regime das águas, a jusante do reservatório, em função da retenção das descargas líquidas e sólidas, acarretam significativos efeitos nos processos do canal fluvial, tais como o entalhe do leito, a erosão das margens e a deposição a jusante atingindo longas distâncias.

Na região do Baixo São Francisco, a redução das descargas sólidas provocou alterações tanto no canal fluvial, quanto na região estuarina. Em geral, a principal fonte de sedimentos assentados nos deltas dos rios são os materiais em suspensão e nutrientes transportados pelo rio para a região estuarina. Em larga escala, a zona de acumulação de sedimentos é composta de materiais continentais originados das rochas continentais.

A determinação da carga de sedimentos na área da foz de um rio e o cálculo dos sedimentos por ele transportados e retidos em suspensão na sua foz é um problema complexo, devido às dificuldades relacionadas com a avaliação da medida da descarga de sedimentos, em particular da camada de sedimentos e dos sedimentos suspensos. Por essa razão, o transporte de material suspenso transportado para fora do rio e a camada de sedimentos de muitos rios ainda são desconhecidos. Ademais, o somatório de sedimentos é insuficientemente estudado na área de foz do rio, onde os agentes dos rios e do mar devem ser associados e levados em consideração.

BANDEIRA, *et al.*, 2008, apresenta na Tabela 9 os resultados de uma avaliação, em linhas gerais, do transporte de sedimentos no curso do rio São Francisco. Estes foram obtidos usando-se os dados existentes da carga de sedimentos em suspensão, estimada por diversas estações de calibragem localizadas na bacia do rio São

Francisco, considerando, ainda, o volume de sedimentos depositados nos três principais reservatórios de contenção de sedimentos em Três Marias, Sobradinho e Itaparica.

Tabela 9. Dados da carga de sedimentos em suspensão estimada por diversas estações de calibragem localizadas na bacia do rio São Francisco (BANDEIRA, *et al.*, 2008).

Reservatório	Fluxo de carga de sedimentos internos (t/ano)	Retenção de Sedimentos (t/ano)	Fluxo da carga de sedimentos externos (t/ano)	Início da Operação
Três Marias	12.629.415	12.133.822	505.177	1962
Sobradinho	39.135.314	37.599.601	1.565.413	1979
Itaparica	3.191.721	3.066.473	127.669	1985
Xingó	–	–	–	1994
Na foz do Rio	3.797.817	–	–	2007

O fluxo de sedimentos internos é oriundo do curso d'água principal da bacia hidrográfica do rio São Francisco e o fluxo da carga de sedimentos externos é originado dos tributários que alimentam o curso principal desta bacia.

Os dados apresentados na Tabela 9 indicam que a redução da carga de sedimento de origem continental para a área da foz do rio São Francisco é bastante significativa. Essa contribuição calculada na foz do rio é em torno de $3,8 \times 10^6$ t/ano ou equivalente a uma contribuição de 3×10^6 m³/ano de volume, aumenta aproximadamente 10% da carga de sedimentos carreados para dentro do reservatório de Sobradinho. Nota-se que desde o início da operação do reservatório Três Marias até 2007, a carga de sedimentos retida nos principais reservatórios foi de aproximadamente $1,72 \times 10^9$ t/ano ou $1,36 \times 10^9$ m³ no período de 45 anos (1962 a 2007).

3.6.4. Caracterização, identificação e distribuição das margens sobre erosão

Na região do baixo São Francisco em estudo foram identificados e cadastrados mais de setenta focos erosivos marginais no trecho do rio situado entre Xingó e a foz (CASADO, 2000). Apesar dos focos de erosão marginal ocorrer em ambas às margens, a maior quantidade deles e os de maior magnitude está localizado na margem sergipana.

Os focos de erosão estão distribuídos ao longo de toda região do baixo São Francisco, porém os trechos mais críticos, com taxas de erosão e recuo das margens mais elevadas, são os correspondentes ao Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba e ao

Perímetro Irrigado Betume.

De ante destas inúmeras ocorrências de erosão distribuídos na Região em estudo, nenhuma destas se compara à intensa erosão que vem ocorrendo na porção sul da foz, que apresenta um grave problema social causado pela erosão (com a destruição total do Povoado Cabeço, SE) e o recuo significativo da linha de costa.

A região do baixo São Francisco apresenta três classes de margens: margens sob erosão, margens em erosão e margens estáveis. As margens em erosão são aquelas que apresentam evidências de estarem sendo submetidas à atuação significativa de processos erosivos acelerados, apresentam recuos constantes e formam barrancos com faces quase verticais, também aqui referidos como taludes marginais ou “barrancas”. As margens estáveis não exibem evidências significativas de erosão acelerada e, tampouco, de acumulação recente de sedimentos fluviais, sendo normalmente recobertas por vegetação rasteira ou arbustiva, também podem ser constituídas por sedimentos fluviais, litorâneos ou por afloramentos de rochas sedimentares da bacia Sergipe-Alagoas, principalmente por folhelhos da Formação Barra do Itiúba e da Formação Penedo e arenitos. É comum o desenvolvimento de plantas aquáticas na base destas margens. As margens em acresção são aquelas em que a taxa de deposição supera a taxa de erosão, resultando na formação de depósitos fluviais recentes, sejam na forma de praias fluviais ou na forma de barras laterais. As barras laterais, arenosas e móveis, com o tempo evoluem para ilhas fixas e vegetadas e terminam por se anexar à margem do rio. São raras as faixas de praia associadas a margens em acresção, desenvolvidas diretamente nas margens da calha principal do rio (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2003).

Apesar da variedade de características físicas das margens e de suas relações com o rio, verificou-se que as margens podem ser agrupadas segundo alguns critérios que se relacionam a fatores que desempenham um papel decisivo na sua susceptibilidade ou não a erosão e no grau de eficiência do processo erosivo. Os parâmetros ou critérios descritivos geomorfológicos e sedimentológicos (altura, perfil transversal, locação relativa na calha fluvial, locação em relação ao talvegue do canal e

material constituinte) definem as distinções entre as margens.

A distinção das margens, segundo estes critérios, se faz necessário face aos comportamentos diferenciados dos diversos trechos de margens perante os processos erosivos, em resposta aos fatores intervenientes e predisponentes da erosão e servirão de base para a classificação dos tipos/padrões de margens erosivas. Estes critérios descritivos, quando aplicados à classificação das margens em erosão, fornecem uma visão fragmentada de seu comportamento perante o fenômeno erosivo. Entretanto o que se observa é que cada trecho de margem em erosão marginal exhibe uma associação peculiar destas características que o individualiza e controla as suas respostas face à atuação dos processos erosivos.

Dentre os tipos de margens que compõem a região do baixo São Francisco, podemos citar:

- Margens altas a muito altas (até 10m de altura), constituídas por areias finas, não coesivas, muito friáveis. Formadas por um campo de dunas eólicas ativas que ocupa o lado norte da planície costeira e cuja borda está sendo alvo de erosão fluvial, ondas e correntes de maré enchente. O canal principal margeia parte destas margens, em trecho aproximadamente retilíneo, sendo o talvegue profundo e próximo. Secundariamente, formam-se canais de maré enchente junto à margem;
- Margens arenosas, constituídas por areias finas a médias, não coesivas a semi-coesivas, de perfil suave, onde se desenvolve uma faixa de praia fluvial, limitada por um pequeno barranco, de natureza erosiva, com distribuição restrita aos segmentos mais inferiores do rio, entre a foz e as proximidades da cidade de Ilha das Flores. De uma forma geral, estas margens estão posicionadas a certa distância do talvegue, não sofrendo a ação direta da correnteza fluvial. Apresenta uma escarpa erosiva recuada e com evidências de erosão, como raízes expostas das árvores, são indicativas de que o processo erosivo atuante principal está relacionado a eventos episódicos e de alta energia;
- Margens baixas, constituídas por depósitos argilosos espessos ricos em restos de

vegetais e amplamente distribuídos nesta região, aflorantes nas margens e partes rasas do rio, podendo ser também recobertos por uma camada pouco espessa, areno-argilosa, sobre a qual se desenvolve o solo e estão localizadas nas proximidades de Neópolis até próximo à foz. Este padrão de margem exhibe claramente 2 aspectos evidentes de estar sendo submetida à erosão, apesar das baixas alturas dos barrancos argilosos. No primeiro aspecto apresenta-se uma face verticalizada do barranco desprovido de vegetação sofrendo um forte ataque de ondas e da correnteza fluvial. No segundo momento os sinais de erosão marginal não são evidentes, porque a erosão se processa por baixo da cobertura vegetal que ainda está presente tanto na face como no topo do barranco marginal;

- Margens constituídas por materiais alóctones transportados pelo homem para a construção dos diques de proteção contra as cheias. Seus solos são selecionados e compactados, assentados sobre sedimentos arenosos ou argilosos. Ocorrem nos trechos do rio onde o recuo da margem atingiu os diques de proteção contra cheias dos Perímetros Irrigados da CODEVASF (Cotinguiba-Pindoba e Betume) ou onde foram colocados blocos de rochas ígneas e metamórficas (enrocamento) para proteção da margem contra a erosão marginal. Estes trechos de margens continuam submetidos à ação erosiva marginal;
- Margens de constituição mista (argilas, siltes e areias interestratificadas), de altura média a alta, com ausência de faixa de praia, associada à proximidade do talvegue e a inflexão da corrente principal em direção à margem. Este tipo de margens estão compreendidas entre a Ilha das Flores e Penedo e apresentam alternância de focos erosivos, com os intervalos entre eles (às vezes, na forma de pontais) protegidos ainda pela vegetação, mas com suas raízes expostas; e
- Margens essencialmente formadas por areias não coesivas, altas a médias, e se caracterizam por se posicionarem geralmente nas curvas desenvolvidas pelo talvegue/canal principal, nos pontos onde o mesmo inflete em direção à margem, estas margens estão distribuídas entre Propriá e Neópolis (Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba.), onde estão concentrados os mais ativos e extensos focos de erosão marginal. Este tipo de margem apresenta a maior taxa de eficiência

dos processos erosivos e, portanto, recuo mais acentuado da linha de margem. Quanto maior a taxa de recuo, mais alto é o barranco e as areias mais friáveis. Suas margens estão sob contínua erosão acentuada, totalmente desprovida de vegetação na face do barranco.

As margens altas quando comparadas às médias e baixas, e estando submetidas às mesmas forças, fatores e processos, apresentam uma maior taxa efetiva de recuo. Isto porque a altura favorece o desencadeamento e a frequência de movimentos de massa controlados pela ação gravitacional e pode facilitar a participação da água subterrânea no processo erosivo, principalmente naquelas constituídas por areias ou interestratificadas (areias e argilas). Estas margens estão presentes nos perímetros irrigados Cotinguiba-Pindoba e Betume-Povoado Cerrão e concentram exatamente os focos erosivos mais críticos (Figura 25).



Figura 25. Margem esquerda do rio São Francisco localizada no Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2003)

Margens altas e médias ocorrem nos segmentos mais distantes da foz e as mais baixas nos segmentos mais próximos à foz (CASADO, 2000).

As praias fluviais, quando presentes, tendem a ser de pequena largura e a sua formação está relacionada à pelo menos duas gêneses distintas. Nas margens em acreção ou já estabilizadas, ou ainda nas margens das barras arenosas emersas, se formam as expensas das partículas aportadas pela corrente.

Nos trechos onde o talvegue encontra-se aderente à margem, não há desenvolvimento de faixa de praia ou ela é incipiente. A própria inexistência da faixa de

praia é um indicativo da proximidade do talvegue e da ação intensa da corrente fluvial. Uma boa parte dos trechos de margens sob erosão não possuem praias, característica que favorece o ataque direto das ondas na base do barranco (Figura 26).



Figura 26. Praia fluvial estreita, em trecho sob erosão. Observe a faixa de areia úmida indicando evidência da recente descida do nível do rio (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2003).

No baixo curso do rio São Francisco a erosão se manifesta em duas faixas de praia distintas: faixas de praias estreitas, associadas às margens altas, e faixas de praias largas, associadas às baixas. No primeiro caso, estão intimamente associadas à proximidade do talvegue em relação às margens e a ação conjugada da corrente fluvial e ondas do dia-a-dia (oscilações de Xingó). No segundo apresentam-se distantes do talvegue e são associadas unicamente a ação de ondas nas marés episodicamente mais altas (preamar).

Os levantamentos batimétricos revelam que nos trechos sem praia ou com praia estreita e onde o talvegue se encontra adjacente às margens, revelaram a existência de uma estreita faixa submersa, aproximadamente plana e rasa, que se estende até as bordas do canal principal. Esta faixa foi designada como plataforma de abrasão, permanece coberta pela água, mesmo nos períodos correspondentes à maré baixa (baixa mar) e representa a área onde o material removido diretamente do barranco ou da praia pelas ondas, é inicialmente acumulado e em seguida retrabalhado e redistribuído pelas correntes fluviais. A plataforma de abrasão contribui para a absorção da maior parte da energia das ondas que incidem em direção às margens (FONTES, 2002).

As margens formadas constituídas por sedimentos coesivos são os mais

resistentes a erosão. Entretanto, quando sofrem solapamento e/ou ficam saturados, ocorrem freqüentes movimentos de massa, com a queda de blocos e deslizamentos. A ação erosiva sobre estas margens, portanto, só é efetiva quando sofrem a ação corrosiva da corrente fluvial ou o embate direto das ondas nas subidas das marés.

Em contrapartida as margens formadas essencialmente por sedimentos não coesivos (Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba e Cajaiba, SE), são constituídas por areias finas a médias friáveis a muito friáveis, praticamente sem cimento ou matriz siltica-argilosa, o que explica em grande parte a vulnerabilidade e facilidade com que a erosão avança sobre as mesmas, quando associada a outros fatores.

A remoção do material constituinte ocorre principalmente na base do barranco, grão a grão, pela ação combinada da corrente fluvial e da ação das ondas. A Figura 27 mostra a atuação da erosão fluvial abaixo do nível do solo e das raízes nesse local, onde o talvegue encontra-se adjacente a margem esquerda no rio. Este tipo de margem é também altamente susceptível aos movimentos de massas, pela ação de gravidade, devido à baixa coesão das partículas, uma vez rompida à condição inicial de estabilidade.

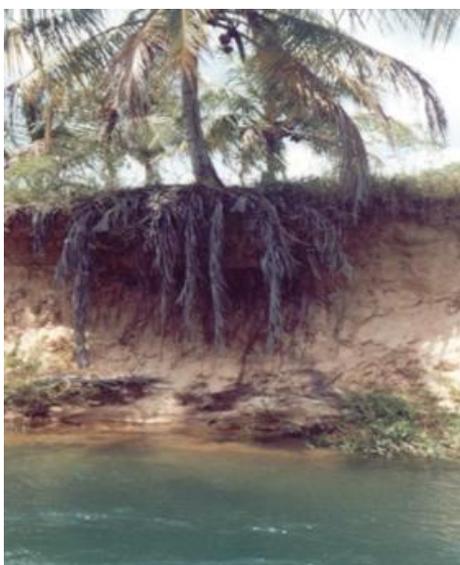


Figura 27. Atuação da erosão fluvial, abaixo do nível do solo e das raízes (FONTES, 2002)

Os dois processos gravitacionais ocorridos na região em estudo são o fluxo

de grãos, na parte intermediária do barranco e a queda de blocos, na parte superior. Para as camadas arenosas posicionadas na base do barranco, o rompimento inicial da condição estável se dá pelo solapamento causado pela ação direta da corrente fluvial e da ação de ondas e enquanto que para a camada superior silte-arenosa (sobre a qual se desenvolvem o solo), pelo solapamento causado pela remoção das areias subjacentes.

As areias que constituem a porção central e mais espessa das margens são caracteristicamente muito friáveis, não coesivas, e se movimentam o barranco abaixo através do mecanismo de fluxo de grãos. Atribui-se a facilidade de ocorrência deste tipo de movimento de massa, não apenas às características geotécnicas das areias, mas também ao rebaixamento do lençol freático, diminuindo em muito o teor de umidade das mesmas, e, conseqüentemente, o seu grau de estabilidade (Figura 28).



Figura 28: Ação conjunta de processos gravitacionais: fluxo de grãos e queda de blocos (FONTES, 2002).

Nas margens de constituição mista, a forma de estruturação das camadas de areias, siltes e argilas influenciam no favorecimento ou resistência à erosão. A depender da posição ocupada pela camada ela pode estar posicionada exatamente no intervalo de flutuação do nível do rio ou pode ainda estar sendo submetida à ação da corrente principal. Nestes casos, a susceptibilidade é grande quando a camada é arenosa e, ao contrário, a resistência à erosão é maior quando se tratam de sedimentos coesivos, os quais, inclusive, podem proteger parcialmente as camadas arenosas adjacentes. Estas margens, ao sofrer variações do nível do rio, podem fazer com que, em determinados estágios, camadas de resistências distintas sejam atingidas pela ação erosiva do fluxo

e/ou das ondas. Além disso, a posição relativa entre camadas coesiva e não coesivas pode favorecer o desencadeamento de movimentos de massas, à medida que as partículas são removidas pela erosão marginal.

As margens construídas por engenheiros respondem à atuação dos processos erosivos semelhantemente as margens de constituição mista descrita acima. A presença de silte e argila na matriz destas areias proporcionam uma maior estabilidade geotécnica para este padrão de margem, diminuindo a ocorrência de movimentos de massas, em relação às margens não coesivas.

Vale ressaltar que na maior parte dos trechos destas margens sob erosão, é difícil dissociar a ação das ondas, da ação das marés (ambas relacionadas com a oscilação do nível do rio) e da ação direta da corrente fluvial, na medida em que estes processos atuam concomitantemente e/ou de forma complementar e o produto resultante é o mesmo, isto é, a erosão e, portanto, o recuo das linhas de margens.

As três naturezas distintas dos processos erosivos que atuam em conjunto para promover a erosão nas margens do baixo curso do rio São Francisco são: a) relacionados à hidrodinâmica do canal, b) relacionados à dinâmica natural do estuário e as oscilações artificiais do nível do rio (operacionalidade da UHE Xingó) e c) relacionados ao comportamento geotécnico do barranco (talude marginal). Eles atuam respectivamente em três posições, em relação à superfície da água: abaixo do nível do rio (subaquoso), ao nível do rio e acima deste (subaéreo) (Figura 29).

O primeiro conjunto de processos está diretamente relacionado com a geometria hidráulica do canal e com a ação direta da corrente fluvial, e se traduz através da retirada de partículas pelo fluxo (erosão das margens), pela pressão exercida contra as paredes do lado externo (côncavo) das curvas do talvegue e pela produção de fluxos secundários transversais em direção à margem sob erosão.

O segundo está relacionado com a dinâmica do estuário e a interação com as oscilações do nível do rio produzidas artificialmente pela operação da Usina Hidrelétrica de Xingó. A dinâmica do estuário é responsável pela produção de ondas

durante os ciclos diários de subida das marés que promovem o solapamento e a retirada dos materiais da base dos barrancos.

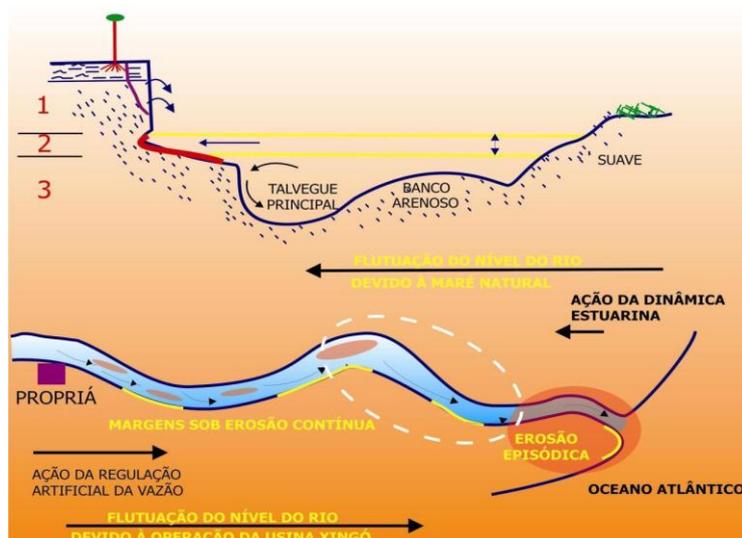


Figura 29. Síntese da atuação dos três conjuntos de processos erosivos marginais (em perfil transversal) e as dinâmicas ambientais (fluvial e estuarina) às quais se relacionam (em planta) (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2003).

Estas ondas atuam ao mesmo tempo, que as ondas produzidas pelo vento. As marés de sizígia, equinócio e as meteorológicas, ao elevar o nível do rio, possibilitam que a erosão venha a atingir níveis mais elevados do barranco (por vezes incidindo sobre níveis menos coesivos, e, portanto, mais susceptíveis à erosão) e margens que normalmente se encontram distantes da linha d'água, isto é, com uma larga faixa de praia entre o barranco erosivo e o rio (margens presente na região de Saramen, Brejo Grande, SE).

Concomitantemente a estas flutuações naturais do nível do rio, somam-se as oscilações artificiais (diárias, semanais, mensais e anuais) produzidas pela operação das usinas hidrelétricas de montante, as quais são responsáveis pela ação das ondas associadas à subida do nível e as conseqüentes variações do lençol freático que contribuem para facilitar a erosão na base do barranco.

E o terceiro, consistindo em movimentos gravitacionais nos barrancos, ocorre com a participação indireta da água do rio, que é responsável pelo estágio inicial de solapamento e desestabilização. Em margens altas e com diferenças de comportamento geotécnico entre os níveis não coesivos (areais friáveis) e semicoesivos

(siltes), o recuo das margens ganha uma dinâmica própria, sem a participação da água do rio, durante um determinado estágio do ciclo erosivo.

A atuação associada destes três conjuntos de processos é a responsável pelas taxas de erosão mais efetiva, caso as demais condições de suscetibilidade à erosão forem atendidas. O caso típico é o trecho da margem direita situado no Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba, onde se atinge a máxima eficiência do processo erosivo e a velocidade de recuo das margens.

O esquema exemplificado na Figura 29 não se aplica as margens localizadas no Pontal da Barra e Saramen (margens situada na foz do São Francisco), pois a erosão nestes casos não está associada à ação da corrente fluvial (subaquosa). Ela ocorre no nível de intermarés, e apenas por ocasião das marés excepcionalmente altas, pela ação direta das ondas. A erosão na base dos barrancos arenosos e não coesivos provoca movimentos gravitacionais, como queda de pequenos blocos e fluxo de grãos arenosos, resultando no recuo dos mesmos e com a exposição de raízes e a derrubada de árvores.

Os conjuntos de processos resultantes da ação da água (na zona de intermarés e subaquosos) estão diretamente condicionados à dinâmica fluvial e a dinâmica estuarina. A primeira atua no sentido montante-jusante e a segunda no sentido inverso.

A dinâmica fluvial pós-barragens é diretamente ou indiretamente afetada pela operação da Usina Hidrelétrica de Xingó, principalmente no que se refere à flutuação artificial do nível do rio, produzindo uma espécie de “maré artificial” diária. Esta flutuação se faz sentir com maior intensidade no segmento do rio entre Xingó e Propriá (FONTES, 2002). A influência da dinâmica estuarina alcança até o trecho do rio próximo à cidade de Propriá, através da oscilação do nível do rio provocada pelas marés oceânicas.

No dia-a-dia, a flutuação do nível do rio e as ondas associadas desempenham um papel importante na manutenção do ciclo evolutivo da erosão marginal, ao remover o material proveniente do desmoronamento das partes altas e

acumulado na base do barranco. As partículas são, então, transportadas por correntes secundárias e, em seguida, incorporadas ao fluxo principal do canal fluvial.

A remoção do material das margens exerce um papel importante na continuidade do processo evolutivo de recuo das margens ao evitar que a margem atinja um perfil de equilíbrio. O contínuo trabalho de remoção subaquosa das partículas pela corrente principal cuja trajetória coincide com o talvegue, é, em última instância, o grande responsável pelo recuo das linhas de margem. Sem esta remoção não haveria continuidade do processo, pois a tendência seria do barranco atingir um perfil de equilíbrio, estabilizando a margem (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2003).

Observe abaixo os estágios evolutivos das margens sob erosão contínua:

- 1) Estágio preparatório;
- 2) Estágio erosivo inicial;
- 3) Estágio de erosão ativa;
- 4) Estágio de estabilização temporária; e
- 5) Estágio de renovação do ciclo.

No estágio preparatório, não ocorre ainda o recuo da margem, mas nota-se uma pequena clareira na vegetação que recobre a base e a face da margem, resultado da sua retirada pela ação da corrente fluvial (Figura 30).



Figura 30. Estágio preparatório para abertura do foco erosivo (FONTES, 2002)

O estágio erosivo inicial envolve a formação de um foco inicial de erosão, situado entre porções com remanescentes da vegetação ciliar. Este comportamento está relacionado com a formação de correntes secundárias geradas a partir da incidência de

frentes de ondas em direção a margem e pela aproximação da corrente principal/talvegue em direção à margem (Figura 31).



Figura 31. Estágio inicial do foco erosivo (CASADO, 2000)

O estágio de erosão ativa é, muitas vezes, marcado inicialmente por um pronunciado solapamento basal no barranco marginal diretamente pela ação da corrente fluvial, associado com ação de ondas. Aos poucos, o solapamento basal fica menos pronunciado devido ao acúmulo de material desmoronado na base que, ao dar origem a uma estreita faixa de praia, modifica a forma de atuação da erosão. Esta passa a ocorrer principalmente pelo espraiamento e embate das ondas durante a subida do nível do rio sobre o material desmoronado presente na base do barranco, apesar da erosão pela corrente fluvial continuar a ocorrer de forma subaquosa, agora, um pouco mais distante da escarpa/barranco marginal (Figura 32).



Figura 32. Início do estágio da erosão ativa (margem verticalizada, com solapamento basal inicial e sem faixa de praia, em uma margem situada adjacente ao talvegue)

(CASADO, 2000).

O estágio de estabilização temporária ocorre quando o elevado acúmulo de material proveniente das partes mais altas do barranco resulta em um perfil suavizado e uma condição de estabilidade temporária. Apesar disto, permanece o lento e contínuo trabalho diário de remoção de partículas promovido pelas ondas e secundárias correntes associadas (Figura 33).

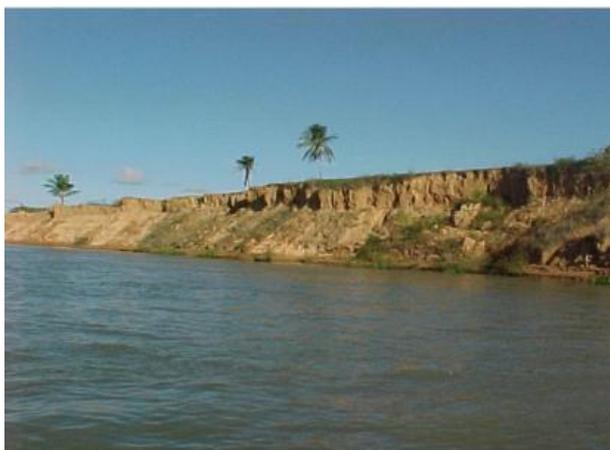


Figura 33. Estágio de estabilização temporária (FONTES, 2002)

O estágio de renovação do ciclo ocorre a partir da retomada do perfil verticalizado do barranco, após a remoção do material desmoronado acumulado na base. Esta retirada é efetuada pelas ondas, associada à remoção subsequente pela corrente fluvial e restitui o perfil verticalizado, possibilitando assim a renovação do ciclo erosivo marginal (Figura 34).



Figura 34. Estágio de renovação do ciclo erosivo (CASADO, 2000)

3.6.5. *Comportamento geotécnico dos taludes marginais*

Os movimentos de massas são, assim como os processos de intemperismo e erosão, fenômenos naturais contínuos na dinâmica externa, que modelam a paisagem da superfície terrestre.

Quando estes movimentos são complexos resultam de uma combinação de diferentes formas de movimento (rastejo, fluxo ou corrida, deslizamento e desmoronamento), causados pela ação de vários agentes em trabalho simultâneo, resultando num processo dinâmico e contínuo de erosão, transporte e posterior sedimentação (DURLO, *et al.*, 2005).

Um movimento complexo pode iniciar com uma erosão superficial do solo e depois progredir à formação de pequenos sulcos que, por sua vez, podem se transformar em formas ainda mais intensas de erosão, onde movimentos de deslizamentos e desmoronamentos se sucedem e complementam-se, gerando os sedimentos que serão transportados. Em função da forma com que atuam, estes movimentos podem ser segregados em entalhamento e erosão.

O entalhamento corresponde à erosão em sulco, ocasionada pelo sistema fluvial. Esta erosão ocorre em profundidade tornando os taludes cada vez mais altos, íngremes e instáveis, sendo por isso acompanhada por desmoronamentos e deslizamentos em diferentes formas e dimensões.

Outra forma de entalhamento é a corrosão que ocorre junto ao nível da água. Este tipo de erosão retira o apoio da encosta propiciando freqüentes deslizamentos e principalmente desmoronamentos de taludes. O material movimentado, ao chegar ao fundo do entalhamento, é novamente erodido e transportado.

À medida que o entalhamento se torna mais profundo, mais facilmente pode ocorrer a erosão pelo aumento da força da água. Por outro lado, a supressão da base de apoio (desconfinamento) da encosta aumenta sua altura e torna o talude mais íngreme e instável.

As causas destes movimentos estão ligadas às ações internas e externas ao talude, de um ou mais agentes destes. Como causas externas estão à adição e a subtração de peso. Como causas internas são citadas a retirada da tensão superficial, a elevação do corpo e mudança do centro de gravidade, a elevação da pressão devido à mudança no nível do lençol freático, a lavagem de materiais cimentados, a erosão subterrânea retrogressiva, o umedecimento repentino do solo (liquefação) e o inchamento do solo (DURLO, *et al.*, 2005).

Todas estas causas internas podem ter participação na perda de equilíbrio de um talude fluvial, mas somente a adição (interna ou externa) e, principalmente, a subtração de peso (o desconfinamento causado pela erosão), resultam a maioria destes deslizamentos. Por outro lado, estes fenômenos de adição e subtração de peso são os que, mais facilmente, podem ser influenciados pelo homem, tornando-se, assim, necessário o desenvolvimento de ferramentas para o controle dos processos fluviais.

Vale ressaltar que no ambiente fluvial a perda de estabilidade resulta normalmente, em deslizamentos e desmoronamentos. Dentre as causas destes movimentos que mais causam impactos na região em estudo está a elevação da pressão devido ao lençol freático.

Em condições naturais, a adição de água, tanto por baixo, oriunda de lagos ou rios, como por cima, devido às chuvas, eleva o nível do lençol freático e aumenta a pressão nos poros do solo, podendo contribuir para as movimentações de massa (GUERRA, *et al.*, 2009). Quanto maior a diferença entre a altura do freático e a linha superior da camada permeável, tanto maior será a pressão exercida pela água, e, em consequência, tanto mais propenso ficará o solo à movimentação.

O excesso de umidade no solo não pode retirar (temporariamente) o efeito de coesão, dado pelos materiais cimentantes (argilas, matéria orgânica e sesquióxidos) como também lavá-los (lixiviá-los) permanentemente. Este processo normalmente é lento, mas, uma vez iniciado, retira constantemente e paulatinamente a resistência do substrato e, por decorrência, a estabilidade do talude (DURLO, *et al.*, 2005).

Uma das principais causas da erosão das margens do baixo São Francisco são o fluxo e refluxo entre o aquífero e a calha do rio durante a oscilação horária dos níveis d'água do rio, determinada pelo volume de água liberado pela Usina Hidrelétrica de Xingó, que varia de acordo com a demanda para geração de energia. Durante o rápido rebaixamento do nível de água do rio, se produz um grande fluxo subterrâneo na base dos barrancos, retirando alguns materiais finos, tornando os taludes marginais mais suscetíveis a deslizamentos freqüentes e ao desmoronamento de suas partes superiores. O material depositado na base do barranco é então transportado pelas correntes mais intensas nas curvas dos meandros do talvegue do rio para os bancos de sedimentos no meio da sua calha (OLIVEIRA, 2003).

A estabilidade dos taludes é definida através de um Fator de Segurança (FS) relativo ao equilíbrio de momentos, aplicado em análise de movimentos rotacionais, considerando-se a superfície de ruptura circular. HOLANDA *et al.*, 2008 para realizar a instrumentação dos taludes, escolheu trechos de margem situados no Perímetro Irrigado Continguiaba-Pindoba, SE. Em seu experimento o mesmo constatou que em ambos os trechos analisados a estabilidade dos taludes se manteve instável, com exceção do trecho após o retaludamento que apresentou estabilidade estável. Nos taludes, próximo a estes trechos instrumentados, também foi percebido a ocorrência de solapamento na base do barranco, pois, o material que compunha o talude era carregado, tornando-o instável e promovendo, então, o desmoronamento por cisalhamento, uma vez que não existia mais sustentação de base para conter a ação do peso do bloco, assim como escorregamento rotacional.

Segundo o resumo executivo do relatório final da ANA/GEF/PNUMA/OEA apresentado em 2003, um outro aspecto a destacar no estudo da erosão marginal no baixo São Francisco, após a construção da cascata de barragens é a longa duração da vazão regularizada implicando na permanência do nível do rio em um determinado patamar durante um período muito longo, em níveis médios relativamente elevados em relação às suas condições anteriores.

A relativa estabilidade do fluxo tem várias implicações para a desestabilização das margens constituídas por sedimentos. Vários autores afirmam que a

duração de uma descarga em particular é sempre mais importante que a sua magnitude ou que a ocorrência de vazões de cheias, exceto no caso de fluxos muito grandes (HOLANDA *et al.*, 2008).

O regime natural permitia anteriormente ao próprio ambiente fluvial encontrar novas formas de equilíbrio e de interação com os limites do canal que não necessariamente resultavam em erosões marginais persistentes e pronunciadas, como as observadas nas últimas décadas.

Outras implicações são derivadas das posições dos fluxos principais, e, em consequência, as posições que os respectivos talvegues ocupam em planta. Faz parte da dinâmica natural do rio as modificações na posição do talvegue, após as grandes enchentes. Estas mudanças da linha de talvegue podem ter várias implicações, mas convém destacar que provavelmente impedia, em muitos casos, que uma linha de maior velocidade de fluxo permanecesse na mesma posição durante vários anos seguidos, uma vez que era constante a abertura de novos trajetos e o abandono de locais submetidos à erosão.

A permanência da incidência da linha de fluxo principal sobre um determinado trecho da margem submetida à erosão e o conseqüente somatório das taxas de recuo da margem ao longo dos anos, pode resultar em um valor mais expressivo do que seria de se esperar em um quadro natural. Este fenômeno foi particularmente observado na faixa correspondente ao Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba.

O relatório da ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2003, chama a atenção que este contexto não se aplica a todas as situações. Por vezes ocorre exatamente o oposto: em alguns trechos do rio foram identificadas pequenas mudanças atuais nos trajetos dos talvegues como consequência da migração recente de barras arenosas e do assoreamento provocado pela remobilização dos sedimentos do canal e dos materiais retirados das margens pela erosão. Este é um claro sinal do estado de não equilíbrio por que passa atualmente este segmento do rio.

Estas mudanças nas posições do talvegue continuam a ocorrer, embora em

um ritmo menor, impulsionadas não pelas grandes vazões, mas por uma vazão efetiva que possibilita o transporte de carga de fundo (areias), com a conseqüente migração de pequenas dunas subaquosas e barras arenosas no leito do canal. Estas formas instáveis estão atualmente em constante deslocamento.

Nas condições atuais as barras formadas atualmente permanecem sempre submersas (a não ser em episódios excepcionais, como o que resultou do racionamento na produção de energia elétrica, em 2001), enquanto aquelas que foram formadas em uma condição anterior de nível mais elevado do rio (cheias), hoje permanecem emersas, mas inativas, transformando-se em verdadeiros terraços fluviais ou em ilhas, sendo paulatinamente colonizadas pela vegetação.

A ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2003 apresentaram resultados relevantes quanto ao comportamento geotécnico dos taludes marginais e do lençol freático no trecho do Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba.

A vazão e o nível do rio sofreram inúmeras variações que conseqüentemente interferiram no aquífero local provocando sua elevação e/ou rebaixamento. Estas variações da cota do rio aferidos à região do baixo São Francisco estão condicionadas às subidas e descidas diárias provocadas pelas marés no estuário e às flutuações nas vazões liberadas pela Usina Hidrelétrica de Xingó.

Este relatório apresentado no período monitorado de janeiro de 2002 a fevereiro de 2002, o fluxo hidráulico normal da água subterrânea local deu-se no sentido da margem para o rio. O nível do lençol freático se eleva na razão de 0,1744m/m, na medida em que se afasta da margem.

Entretanto, quando ocorria a elevação do nível do rio (o que ocorre diariamente em função da maré e da operação da Usina Hidrelétrica de Xingó), o fluxo se invertia passando a ser do rio para a margem. Neste caso, a relação entre a elevação do nível do rio e o nível de água subterrânea, obedeceu à proporção de 1: 0,6861, ou seja, cada elevação de 1m na cota do rio corresponde a uma elevação de 0,6861m no nível do lençol freático.

A direção normal do fluxo hidráulico, da margem para o rio, chama a atenção para a contribuição que o mesmo pode estar fornecendo para o processo de solapamento da base do talude. A água que percola o interior de um talude em direção ao rio, exerce, em virtude de sua viscosidade, uma pressão sobre as partículas do subsolo. Esta pressão atua no sentido do fluxo e tende a provocar uma movimentação ou lixiviação das partículas mais finas para o sopé do talude. Como consequência desse processo, a camada arenosa da base do talude vem sendo submetida a uma situação de desequilíbrio. Além disso, os fluxos de água subterrânea tornam a base do talude saturada, deixando-a mais susceptível ao solapamento pela ação de ondas (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2003).

A ausência de vegetação na superfície do talude e o lençol freático mais baixo do que nas condições naturais, também faz surgir outro fator predisponente da erosão. A insolação incidindo diretamente sobre as partículas do material arenoso constituinte da superfície do talude faz com que o mesmo perca a sua umidade natural. O ressecamento trás como consequência à perda da coesão aparente provocando a separação das partículas e facilitando a sua remoção pela ação da força da gravidade (FONTES, 2002).

Com base no Relatório descrito acima, em praticamente metade do ano, o nível do lençol freático permanece abaixo do nível natural, o que, entre outras implicações, significa perda de coesão das areias que formam a margem, facilitando a ocorrência de movimentos de massas gravitacionais e conseqüentemente a desestabilização dos taludes marginais e o agravamento dos processos erosivos das margens da região do baixo São Francisco

3.6.6. Evolução Histórica dos impactos morfológicos no canal do baixo do São Francisco

A jusante da barragem, o regime do canal sofre mudanças significativas em decorrência dos efeitos do reservatório e da sua forma de operação na descarga de água e sedimentos. A dinâmica fluvial é alterada pela retenção dos sedimentos na barragem e pelo controle da vazão e das enchentes.

Os principais efeitos a jusante das barragens são:

- Erosão local na posição de descargas de vertedouro e de tomada de água.
- Rebaixamento de fundo do rio no estirão imediato a jusante da barragem.
- Alterações morfológicas do canal fluvial
- Recuo da linha de costa

As modificações que ocorrem no regime das águas a jusante do rio acarretam significativos efeitos nos processos do canal. O aumento da declividade acentua os processos de erosão no leito e nas margens do canal fluvial, em consequência do aumento da energia da corrente promovida pela redução da carga sólida anteriormente transportada, em grande parte retida no reservatório. O material erodido é então depositado em algum outro trecho do rio, a jusante, atingindo longas distâncias. O perfil longitudinal do rio principal e dos seus tributários é gradualmente remodelado e aprofundado, produzindo um novo terraço fluvial (MAKKAVEYEV, 1970).

As mudanças a jusante da barragem além de causar principalmente o rebaixamento e modificações morfológicas do canal principal do rio afetam a morfologia da costa, na forma de erosão, provocando uma retração significativa na foz dos rios. Fato que se deve à falta de alimentação de sedimento para a região da foz, à modificação da vazão e à ação das ondas que não encontram a barreira dos depósitos de sedimentos para reduzir o seu efeito (CARVALHO, 2008).

Ocorrem alterações tanto na descarga de sedimentos transportados, quanto no material do leito fluvial, seja no tamanho do grão e nas formas de leito resultantes, na configuração em planta do canal, na distribuição das depressões e elevações ao longo do canal, bem como as respostas dos tributários às mudanças no canal principal. De fato não é somente a descarga líquida e a concentração de sedimentos que determinam as mudanças no canal. Vários outros parâmetros podem também afetar o sistema fluvial, como, por exemplo, mudanças nos tamanhos dos grãos das partículas transportadas (BRANDT, 2010).

Ao longo dos anos, muitos pesquisadores têm direcionado seus estudos a entender o completo reajustamento da morfologia do canal a jusante e estimar o tempo requerido para resposta morfológica chegar ao seu equilíbrio.

Casos como o do baixo Mississipi que após a construção da barragem de Gavins Point no afluente Missouri, em 1953, constatou que, em 1984, a descarga sólida no Golfo do México tinha se reduzido um terço da carga original e/ou primitiva, ocasionando um abaixamento e redução das áreas do delta e recuo na linha costeira.

Outro caso importante de ser citado é a erosão histórica do delta e da foz do Nilo, que recuou 3 km de 1900 a 1991. Este recuo foi determinado após a existência das barragens, sendo que a barragem de Aswan teve sua construção finalizada em 1902 e a de Aswan Alta em 1967.

O caso do Rio Paraíba do Sul, também é bastante semelhante com a problemática ocorrida no rio em estudo. No rio Paraíba do Sul, existe a construção de diversos empreendimentos hidrelétricos e, apesar do seu baixo curso d'água não estar completamente regularizado, a região compreendida pela foz do rio tem sofrido muitos problemas sociais, sendo conhecido o caso da cidade de Altafona, que já perdeu muitas casas e ruas (MIRANDA *et al.*, 2002).

No Brasil, as ocorrências na foz do Paraíba do Sul e na foz do São Francisco são bastante conhecidas. No baixo São Francisco tem ocorrido freqüentes erosões nas margens do rio, na região dos perímetros irrigados implantados pela SUVALE/CODEVASF (Perímetro Irrigado Cotinguiba Pindoba e Betume), bem como na região de sua foz (recuo da linha de costa).

HOLANDA *et al.*, 2005, descreve que os reservatórios existentes a montante do baixo curso do rio São Francisco têm causado severas modificações do regime fluvial e da carga de sólidos em suspensão, que aliados as oscilações de maré, alteram o equilíbrio morfológico que existia naquele trecho de rio.

O regime de escoamento deste Rio se adaptou à nova configuração fluvial

por meio da redução da declividade e do deslocamento do talvegue para junto da margem, aumentando sensivelmente a probabilidade de ocorrência de erosão, já observado em toda região do baixo São Francisco.

Uma das formas que o rio encontra para retornar ao equilíbrio anterior refere-se à intensa erosão das margens, bem como, à mudança na topografia do fundo do leito, ocorrendo o deslocamento de grandes volumes de massa de solos (desestabilização das margens).

Pesquisas desenvolvidas no trecho entre Propriá e a foz (trecho inserido no baixo São Francisco) revelam significativas mudanças na posição das curvas principais do rio São Francisco nos últimos 148 anos. Ao contrário do que é comum acontecer em grandes rios que cruzam planícies sedimentares no seu curso inferior, não foram observadas grandes e evidentes mudanças laterais na posição da calha fluvial e nem, tampouco, migrações de suas curvas no período histórico mencionado. Apesar disso, estão ocorrendo mudanças internas na morfologia da calha, sem, entretanto, implicar em mudanças significativas na geometria externa da calha do rio (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2003).

Observe na Figura 35 a evolução histórica na mudança morfológica do canal na região do baixo São Francisco. O estudo da evolução histórica revela que no segmento do rio onde se situa o Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba, na margem direita, ocorreu uma inversão do processo geológico dominante no início da década de 70. Até a década de 60 predominava a sedimentação, já no início da década de 70, o local passou a ser palco da atuação de processos erosivos, porém de forma não contínua, uma vez foi intercalado por períodos de assoreamento após as cheias.

Mudança na trajetória do talvegue principal, da margem esquerda para a direita. A partir da grande cheia de 1979, o canal principal (talvegue) passou a se dirigir para o centro da calha e daí para margem direita (sergipana), onde permaneceu desde então, com uma forte tendência a acentuar sua curvatura em direção ao trecho onde se situa o Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba.

Assim, o início do fenômeno erosivo no trecho correspondente ao Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba é anterior a sua implantação e a construção da barragem de Sobradinho. Entretanto, fica evidenciado que o processo erosivo na margem direita tornou-se acentuado a partir do início da década de 80, período imediatamente posterior à entrada em operação da usina hidrelétrica de Sobradinho, tornando-se mais agressivo no final da década de 90, o que pode ser atribuído, em parte, à incapacidade do canal em modificar e renovar periodicamente sua morfodinâmica devido a ausência das cheias anuais, e à necessidade do canal se adequar às novas condições hidrosedimentológicas impostas pela construção e operação das grandes barragens rio acima.

Observe que o recuo das margens na localidade não ocorreu de maneira uniforme. Além de ter provocado a destruição do 1º dique de proteção contra cheias, construído no ano 2000 para conter a erosão das margens, e do 2º dique, construído para atenuar essa erosão, do Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba, atualmente este seguimento continua sofrendo intensa erosão fluvial. Em 2006 novas obras de engenharia foram construídas (dique e espigões) com objetivo de conter o avanço acelerado da erosão das margens neste perímetro.

No Relatório da ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2003, foi observado em seus experimentos nas margens do Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba que, considerando a largura da faixa erodida no período de 1980-2001, o rio avançou cerca de 750 metros no ponto mais crítico, sendo 350 metros correspondentes a uma ilha anteriormente existente no local e 400 metros ao recuo da margem do rio propriamente dita, o que resultou em uma taxa média de aproximadamente 22,0 m/ano (Figura 36).

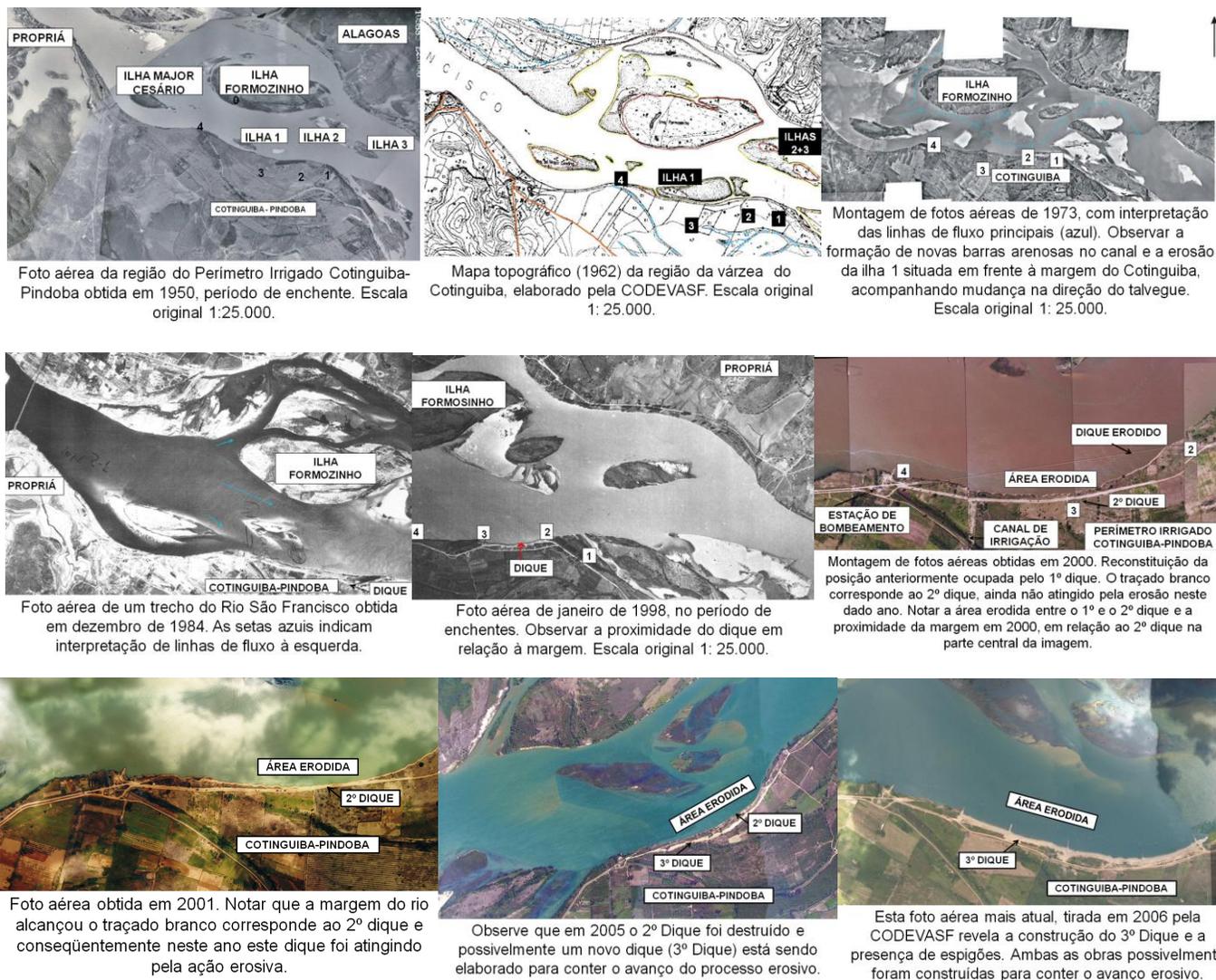


Figura 35. Evolução histórica na mudança morfológica do canal na região do baixo São Francisco (Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba, SE).

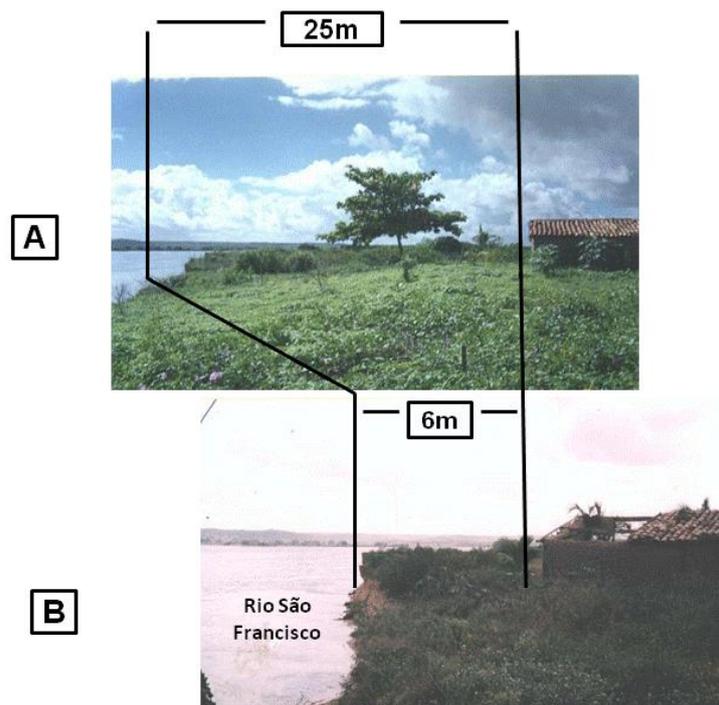


Figura 36. Recuo de linha de margem, destruindo a faixa de terreno anteriormente existente entre a estrada e a margem do rio. Foto obtida do dia 24/05/99 e a outra 08/11/99 (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2003).

CASADO, 2000 monitorou na região do Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba o volume de material erodido e o recuo da margem em três seções (A, B e C), no período de fevereiro de 1999 a janeiro de 2000 (Tabela 10) e constatou que a maior taxa de erosão ocorrida na seção B, foi caracterizada por apresentar as maiores porcentagens de material arenoso (95,31 %) e as menores porcentagens de argila e silte (0,97%) na composição das camadas da base do barranco, conferindo-lhe menor coesão e, sob este aspecto, maior susceptibilidade à erosão.

Tabela 10. Volume de material erodido nas três seções monitoradas, no período de fevereiro de 1999 a janeiro de 2000 (CASADO, 2000).

Seção	Altura média da margem (m)	Extensão Lateral da área monitorada (m)	Recuo da margem (m/ano)	Volume de material erodido (m ³)
A	5,21	12,0	8,30	456,40
B	6,36	12,0	47,30	2.541,46
C	3,91	12,0	4,45	114,95

Observe na Tabela 11 abaixo as diversas pesquisas que têm revelado o volume de material erodido em trechos monitorados no Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba, SE.

Tabela 11. Médias Mensais do volume erodido na região do Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba em m³ (FONTES, 2002).

Trecho	Fev/1999 a Jan/2000 (Casado, 2000)	Dez/1999 a Out/2001 (Santos, 2002)	Mar/2004 a Fev/2005 (Bandeira, 2005)	Jul/2005 a Dez/2005 (Oliveira, 2006)
1	38,03	23,57	0,60	29,28
2	211,79	290,37	15,03	-
3	9,58	12,23	10,14	27,57

CASADO 2000, no período de fevereiro de 1999 a janeiro de 2000, determinou que o volume total de material erodido, considerando apenas a extensão lateral (12 metros cada) das três seções monitoradas foi de 37.353,72 m³.

SANTOS, 2002 determinou que o volume total de material erodido no trecho 1 foi de 542,00 m³, no trecho 2 foi de 6.678,40 m³ e no trecho 3 foi de 281,20 m³ no período de dezembro de 1999 a outubro de 2001.

De acordo com BANDEIRA, 2005 os resultados confirmaram o maior volume de terra erodida para o trecho 2, apresentando maior taxa de erosão, pois a base do barranco era constituída por um material arenoso (95,31 % de areia).

OLIVEIRA em 2006, revela que no trecho 1 o volume total de material erodido foi de 175,68 m³, pois o barranco neste trecho apresentou a maior largura média e a maior altura entre os trechos pesquisados, entretanto, por apresentar maior coesão entre as partículas de solo (argila), o processo erosivo ocorreu progressivo e abruptamente, por solapamento da base, com grande movimento de massa caracterizado por desmoronamento de grandes blocos.

Com base nos dados apresentados na Tabela 9 acima podemos sugerir que as maiores taxas de volume de material erodido, estão associadas, em parte, às mudanças nas características litológicas do barranco e da sua altura, e em parte às inter-relações com a dinâmica do canal.

HOLANDA *et al.*, 2008 determinou o recuo de margem em seus experimentos e observou que a distribuição da erosão marginal pode variar, notadamente, de um ponto para outro da margem porque as características morfológicas

e sedimentológicas do talude podem variar e, além disso, quase sempre o ângulo de incidência da corrente na margem varia de um local para outro devido ao traçado do rio.

O impacto da erosão marginal na região do baixo São Francisco em estudo gera conseqüências para as populações ribeirinhas como: diminuição das terras agricultáveis, restrição do lazer, além da ocorrência de problemas de acesso ao seu leito, por criar dificuldades à navegação, em razão do assoreamento da calha do rio (HOLANDA *et al.*, 2007).

A CODEVASF ao longo dos anos vem empregando soluções de engenharia civil para conter o avanço desta erosão, adotada sempre em caráter emergencial e com alto custo. Estas obras de contenção da erosão marginal vêm falhando parcialmente, provavelmente devido à falta de estudos prévios que objetivassem a compreensão do comportamento da dinâmica fluvial e ao conhecimento dos fatores e processos envolvidos, agravados pela ausência de dados precisos de monitoramento hidrosedimentológico e geomorfológico.

O desencadeamento destes processos erosivos e do assoreamento ao longo do estirão situado a jusante da barragem de Xingó, SE são evidências do complexo reajustamento da morfologia do canal em busca de um novo equilíbrio dinâmico.

3.7. Morfodinâmica estuarina

A zona costeira representa a área de transição entre continentes e oceanos, abrangendo diversos ambientes como estuários, baías, lagoas, marismas e manguezais, e controla o fluxo e o destino de água e matéria do ciclo global.

Estuários são ecossistemas costeiros de transição entre o continente e o oceano adjacente, onde a água do mar é diluída pela água doce da drenagem continental (MIRANDA *et al.*, 2002). Esse ecossistema é forçado por agentes locais e remotos gerados pela ação de ventos climáticos, oceanográficos, geológicos, hidrológicos, biológicos e químicos, que ocorrem na bacia de drenagem e no oceano adjacente, muitas vezes, dezenas, centenas e até milhares de quilômetros de distância.

A diferença dos estuários para outro sistema natural é a presença e a interação de mecanismos físicos, como a propagação de maré, o aparecimento de gradientes longitudinais, verticais e transversais de salinidade, o escoamento em direção a embocadura, as forças de Coriolis e centrífuga, devidas a rotação da Terra e curvatura dos canais naturais e a entrada de contribuições sólidas e os processos de transporte dos sedimentos pelas correntes de maré e pela circulação provocada pelos gradientes de densidade.

O estuário tem com principal característica a interação da água salgada com a água doce, sendo a penetração da maré o principal agente dos seus principais processos sedimentológicos e morfológicos, que consistem, respectivamente, na colocação em movimento de grãos de sedimentos, seu transporte e sua cessação e nas alterações geométricas em planta e em perfil ou em seção transversal, conseqüente da ruptura no equilíbrio dinâmico do transporte de sedimentos.

A diferença principal entre o mecanismo gerador da morfologia dos rios e dos estuários é que nos rios há a imposição das variáveis independentes pela bacia contribuinte e sua relação de casualidade com as variáveis dependentes é de sentido único. Já no estuário, há um retorno entre as variáveis, podendo atuar juntas (KNOPPERS *et al.*, 2005).

A interação das variáveis: maré na foz, mecanismo de propagação da maré, contribuições líquidas e sólidas de montante, matérias sólidas introduzidas no estuário, granulometria e densidade dos sedimentos, bem como, profundidades, larguras e declividades do canal, dimensões e posições dos bancos, gradientes longitudinais e verticais de salinidades, incorrem na conformação do estuário (planta e perfil), na distribuição e textura dos depósitos e na natureza e quantidade dos sedimentos em trânsito.

Havendo alterações das grandezas dependentes, não mudando as independentes, as primeiras assumem novos valores, buscando o equilíbrio. As variáveis independentes podem ser afetadas por alterações naturais ou artificiais na geometria do estuário, agindo sobre a celeridade de propagação da maré. Em vez da

casualidade em uma direção do rio, há uma retroalimentação em que a variável dependente modifica a independente, esta última modificando a primeira.

As amplitudes das variações de níveis e as amplitudes das variações de velocidades médias instantâneas são constantes ao longo do estuário ideal através das diferentes seções. Se for considerado que as vazões fluviais desempenham um papel desprezível na região da morfologia do estuário em questão e os escoamentos de maré já produziram configuração de equilíbrio, conclui-se que a forma do estuário aproxima-se da forma de um estuário ideal (KNOPPERS *et al.*, 2005).

A circulação estuarina é aquela provocada pela gravidade resultante dos gradientes longitudinais e verticais de salinidade, que são provocadas pelo encontro da água salgada com a doce.

A diferença de densidade entre a água fluvial e marinha é responsável pela circulação gravitacional no estuário, sendo as diferenças de nível entre o rio e o oceano (maré) e a atuação dos ventos outros dois fatores muito importantes na mistura e formação dos gradientes longitudinal e vertical de densidade e salinidade em estuários.

Nos estuários estratificados, a cunha salina impede que sedimentos do mar entrem no estuário além da extremidade da cunha e impossibilita que sedimentos vindos do continente avancem para fora daquela extremidade. A extremidade da cunha salina é o ponto preferencial de acúmulo de sedimentos marinhos e continentais. A montante dessa extremidade, o sentido de transporte de sedimentos perto do fundo é de dentro para fora. A jusante, o transporte e o escoamento de sedimentos próximos do fundo se dirigem para dentro do estuário.

Os sedimentos podem vir de diversas fontes, tais como da extremidade de montante, conduzidos pelas vazões fluviais, resultantes da erosão das bacias ou dos leitos fluviais, podem penetrar pelo lado do mar, conduzidos pela maré ou pelas ondas que penetram o estuário, podem ser provenientes da erosão da plataforma continental, ou de despejos sólidos de origem industrial, doméstica, ou do retorno de materiais dragados.

Os estuários recebem substâncias e produtos de atividades antrópicas, os quais degradam a qualidade da água. Tais produtos, e suas principais fontes, são as seguintes:

- sedimentos (agricultura, pavimentação, construção e obras portuárias);
- organismos patogênicos, matéria orgânica e nutrientes;
- pesticidas e herbicidas (agricultura); e
- metais pesados, óleo e substâncias químicas tóxicas (indústrias, portos, marinas e navegação).

A descarga de água doce na parte interna, a entrada de água do mar, e os transportes de sedimentos em suspensão e nutrientes orgânicos e inorgânicos são processos que desempenham uma grande importância para o desenvolvimento urbano, social e econômico das regiões estuarinas. Partes dessas substâncias são utilizadas como alimento pelos organismos marinhos, e os poluentes, que também são transportados em conjunto com as substâncias naturais, podem impactar severamente a variabilidade da biota marinha e representar uma ameaça para a saúde das populações que utilizam esses recursos naturais como alimento (MIRANDA *et al.*, 2002).

A região estuarina apresenta uma produtividade normalmente maior que a fluvial e a marinha adjacente, em função das características hidrodinâmicas da circulação que, através da retenção de nutrientes, estimula a produtividade primária. Quanto maior o tempo de residência das águas estuarinas, tanto maior será a produtividade primária estuarina. E, por serem altamente produtivas, as águas estuarinas e os manguezais associados dispõem de condições ideais à renovação de recursos pesqueiros.

Todas essas forças físicas ocorrem de concomitantemente, havendo alternância de importância entre eles, de acordo com a área. Esta circulação confere à costa uma dinâmica particular, que torna os fenômenos de erosão e sedimentação intensos, implicando muitas vezes em assoreamento de canais de navegação e variações da linha de costa.

Vale ressaltar que nos estuários, as mudanças de potencial redox, pH, salinidade e a presença mais abundante de agentes complexantes (principalmente matéria orgânica) alteram a especiação dos metais, nutrientes e outros contaminantes, através de mecanismos de adsorção/desorção, complexação e precipitação, afetando inclusive a biodisponibilidade dos mesmos. Essas mudanças físico-químicas estuarinas expressam-se através do forte gradiente de mistura da água doce com a do mar, da variação do material particulado em suspensão e de complexos processos hidrodinâmicos associados (KNOPPERS *et al.*, 2005).

Segundo MIRANDA *et al.*, 2002, o desenvolvimento da ocupação das regiões adjacentes aos estuários, que ocorreu a partir da metade do século XIX, a geometria e as condições das bacias de drenagem dos rios foi gradativa e drasticamente alterado. Essas alterações, resultantes da construção de represas, barragens e canais artificiais, do desmatamento, da pavimentação e construção de estradas, interferem nas características ecológicas naturais desses ambientes marinhos.

Os estudos de impacto ambiental de barragens em sistemas fluviais naturais enfatizaram apenas os problemas gerados no continente e nos próprios reservatórios (TUNDISI *et al.*, 2003). Tais perturbações na dinâmica marinha foram praticamente negligenciadas até quase o final do século XX, quando alguns trabalhos pioneiros identificaram conseqüências desses impactos na região marinha, como a perda de recursos pesqueiros e a desestabilização/ erosão da costa, decorrentes da construção de barragens nos rios Nilo, Ganges e Danúbio.

O tema recebeu maior atenção após o reconhecimento de que estudos relacionados à elaboração de estratégias de gerenciamento costeiro e o desenvolvimento sustentável devem ser executadas de forma integrada, incluindo as bacias de drenagem, os estuários e as águas costeiras (HAY, 1998).

O processo de sedimentação nos estuários, ao preenchê-lo gradualmente, torna-se uma ameaça ao expulsar a água do mar que contribui para a sua formação, podendo transformá-lo novamente num rio forçado por maré. Igualmente importante é à entrada dos produtos estranhos ao ambiente estuarinos que, associados ao processo de

sedimentação, podem encurtar a vida geológica e a saúde biológica natural desse ecossistema marinho (MIRANDA, *et al*, 2002).

Para compreender os processos que afetam a distribuição e a variabilidade de propriedades físicas, a concentração de substâncias naturais (salinidade, nutrientes dissolvidos e sedimentos em suspensão) e dos organismos biológicos, bem como a concentração de poluente, deve-se estudar o estuário como um todo, destacando-se a interação dos principais componentes como: a circulação, transporte e mistura nas águas estuarinas e costeiras; os efeitos ambientais sobre a fauna e flora estuarina e o transporte, erosão e deposição de sedimentos.

O conhecimento desses processos deve ser aplicado para gerenciar a tomada de decisões sobre a melhor utilização e a sobrevivência como um recurso natural renovável e produtivo.

Os estuários sempre estiveram intimamente relacionados com o crescimento da atividade econômica pelos seguintes motivos: são locais adequados para a instalação de portos; são férteis e podem produzir grandes quantidades de matéria orgânica; constituem uma via de acesso importante para o interior do continente; suas águas são renováveis periodicamente sob a influência da maré.

O ambiente estuarino é o local de desova e de criação de diversas comunidades biológicas e também desempenham um papel importante nas rotas migratórias de peixes de valor comercial.

Para o Geophysics Study Committee, cerca de 60% das grandes cidades distribuídas ao redor da Terra estão localizadas nas proximidades dos estuários, representando em proporção uma das mais valiosas regiões de nosso planeta. No Brasil, esse percentual é praticamente o mesmo.

O estudo da dinâmica marinha juntamente com a dinâmica fluvial é de grande importância, pois essas pesquisas podem solucionar problemas relacionados ao impacto de alterações na bacia hidrográfica e na geométrica das bacias costeiras.

3.7.1. *Dinâmica costeira e seus reflexos na erosão marginal*

O estuário do Rio São Francisco é considerado o único exemplo de estuário quase que exclusivamente impactado pelas alterações hidrológicas e redução extrema na descarga de sedimentos e de nutrientes da barragem, com dificilmente alguma compensação de materiais de montante, reposição de fontes naturais e culturais

Desde os anos 50, o rio São Francisco evoluiu para um sistema único, quase que exclusivamente impactado por uma cascata de barragens, que agora controlam 98% da bacia e reduz a descarga para o estuário em 35% (KNOPPERS *et al.*, 2005).

Além das alterações nas descargas líquidas (vazão), a carga sedimentar (nutrientes) também foi reduzida substancialmente na região do baixo São Francisco, mas precisamente a jusante UHE Xingó. Em função das barragens construídas rio acima, mudanças significativas na composição relativa dos produtos orgânicos e inorgânicos dissolvidos bem como na composição de partículas para as zonas de misturas estuarinas e, assim para a composição e sustento da biomassa de fitoplânctos e produção.

MEDEIROS, 2003 realizou estudos na região da foz do São Francisco em 31/12/2000 e o mesmo constatou a baixa concentração de material em suspensão na região da foz do rio São Francisco, por consequência da baixa carga transportada pelo rio (Figura 37). Além disso, o mesmo também observou que a concentração de material em suspensão no interior do Rio, após eventos de maré enchente, ocorre quando o material re-suspenso da região costeira é transportado para o interior deste rio (Figura 38).

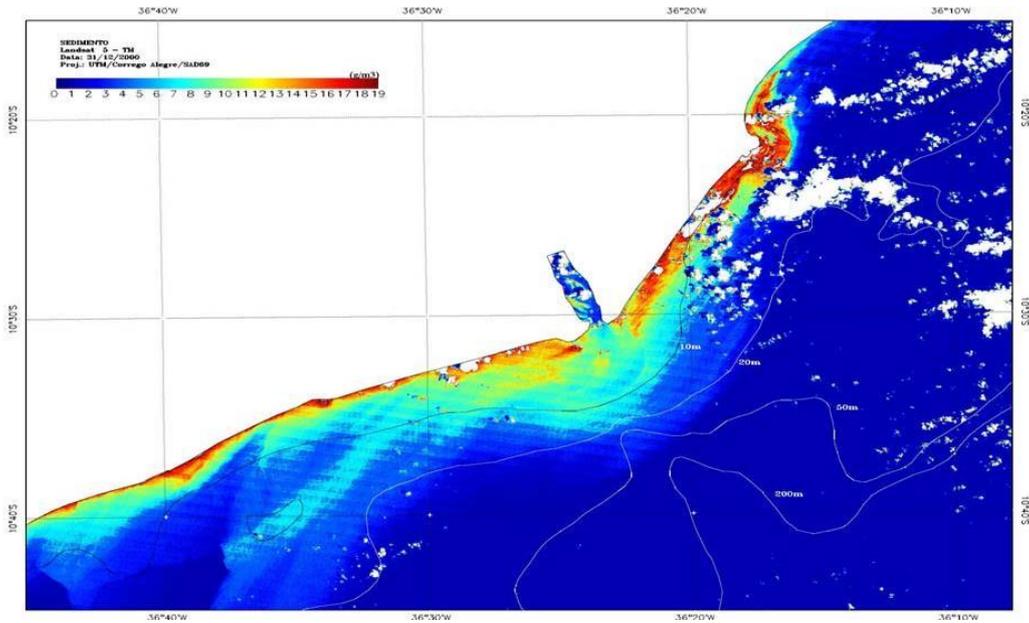


Figura 37. Concentração de sedimentos em suspensão no mar (g m^{-3}) obtida a partir dos dados TM2 em 31/12/2000 (MEDEIROS, 2003).

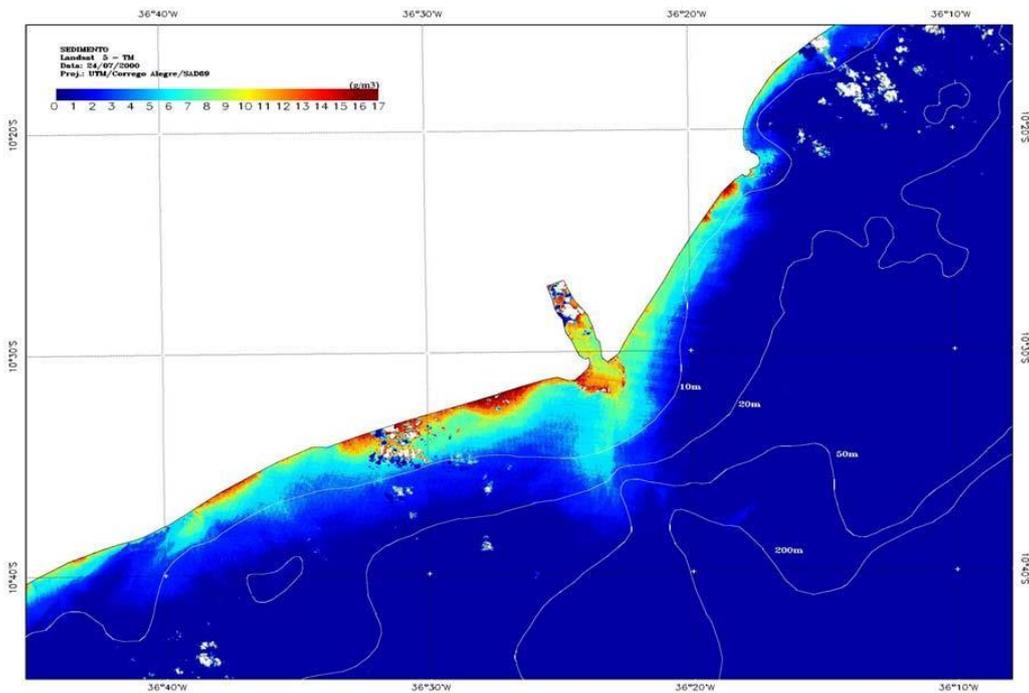


Figura 38. Concentração de sedimentos em suspensão no mar (g m^{-3}) obtida a partir dos dados TM2 Landsat em 24/07/2000 (MEDEIROS, 2003).

Alterações no regime hidrológico e sedimentológico do rio podem causar deslocamentos dos limites entre as zonas estuarinas. Por exemplo, em resposta a uma redução da vazão fluvial, aflora o eventual avanço da água salgada na zona do estuário inferior (cunha salina (CAMPOS, 2001)).

MEDEIROS, 2003, realizou um estudo da intrusão da cunha salina na superfície e no fundo do estuário do rio São Francisco em 17/06/2002 e o mesmo constatou a ocorrência de intrusão salina no estuário interno do São Francisco. A intrusão salina foi associada a um evento de maré enchente (preamar) e a uma baixa vazão do rio.

As marés, ao penetrarem nos rios, podem causar oscilações do nível d'água a até dezenas de quilômetros para montante. As modificações da onda de maré ao longo desses corpos d'água são acentuadas pela fricção junto ao fundo e às paredes laterais (margens) dos canais fluviais, pelas mudanças na geometria dos canais e pela interação com a descarga fluvial. As variações nas amplitudes das marés oceânicas, causadas por eventos astronômicos (marés de sizígia e marés de quadraturas) ou eventos climáticos episódicos (tempestades e ventos fortes) desempenham um papel importante ao alterar os valores normais de oscilação das marés no estuário, o que repercute em termos da potencialização dos seus efeitos erosivos no canal fluvial.

SEGUNDO, 2001 observou que as oscilações de marés medidas em Piaçabuçu, SE comprova que nos períodos de sizígia, a variação entre os níveis da baixa-mar e da preamar chega a superar em 1m aqueles da maré de quadratura (Figura 39). Isto significa que, no trecho inferior do rio, nos períodos das marés excepcionalmente altas de sizígia, o nível máximo da maré sobe entre 50 e 70 cm acima do máximo alcançado nas marés de quadratura. Significa também que as ondas produzidas durante a subida da maré vão atingir os barrancos situados mais distantes da linha d'água (pela presença de uma faixa de praia) ou níveis mais elevados dos barrancos (quando da ausência ou estreita faixa de praia). É desta forma que se explica o ataque erosivo em certos focos de erosão presentes no povoado de Saramen, SE e na Ilha Teresa, SE.

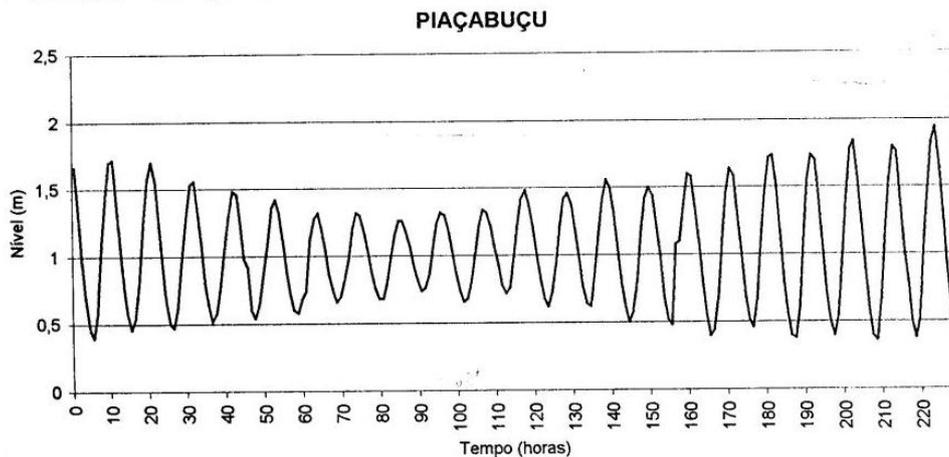


Figura 39. Variação horária do nível de maré em Piaçabuçu, AL, rio São Francisco, durante 10 dias do mês de setembro 2000. Nas marés de quadratura, a amplitude de maré alcançou apenas 0,54 m, atingindo 1,56 m nas marés de sizígia. O tempo necessário (período de enchente) até a maré atingir o nível máximo (preamar) foi de aproximadamente 6h e 30min e o período vazante foi aproximadamente 5 horas e 30 minutos (SEGUNDO, 2001).

FONTES, 2002 relatou na sua pesquisa que as flutuações sazonais das marés no estuário do São Francisco podem ser excepcionalmente aplicada em duas ocorrências distintas. Uma delas, regular e de ocorrência mundial, por ocasião dos equinócios de verão e primavera (21 de março e 21 de setembro) quando são geradas marés um pouco mais elevadas que nos demais meses. As marés de março são conhecidas na região pelo seu caráter destrutivo. A outra, também episódica e dependente das condições climáticas locais, são as marés ditas meteorológicas, a diferença entre a maré observada na região e a maré astronômica (a maré prevista pelas relações espaciais do conjunto Terra-Sol-Lua). Situações de tempestade com ventos fortes soprando contra a costa e queda de pressão atmosférica promovem o empilhamento de água na região costeira, que se propaga ao longo de baías e estuários/rios. Neste caso, o resultado, durante a preamar, é o aumento acima do previsto, da altura da maré, pois seus efeitos se sobrepõem e se somam aos da maré que estaria ocorrendo normalmente na região afetada pelo evento meteorológico. Esta possibilidade é importante sob o ponto de vista do estudo da erosão marginal, como já comentado anteriormente, pois significa que as ondas produzidas durante a subida da maré atingirão níveis mais altos das margens e mais distantes da linha d'água.

A subida do nível da maré, acompanhada pela produção de ondas, é

responsável por vários efeitos erosivos e a produção de várias feições nas margens, atuando ou não em conjunto com a ação do fluxo fluvial. Sua atuação fica registrada sob a forma da faixa de intermarés nas praias fluviais, por reentrâncias na base dos barrancos e pela produção de micro escarpas na faixa de praia ou na base do barranco, em constante processo de desmoronamento e recuo.

Analisando-se em detalhe o processo de remoção, verificam-se duas formas de atuação:

- a) na primeira, a remoção direta das partículas individuais constituintes das argilas ou areias, promove o solapamento da base do barranco, e, com o passar do tempo, cria instabilidade na parte superior do barranco, que desmorona ou desliza, em formas de blocos maiores. Estes, ao caírem na zona de ação das ondas, entrarão novamente no ciclo erosivo, sendo desmembrados e removidos pelas ondas (Figura 40);
- b) na segunda, a remoção se dá pela formação de micro escarpas nas areias da faixa de praia ou nas areias acumuladas na base do barranco como resultado de movimentos de massa declive abaixo. Passo-a-passo, as micro escarpas vão recuando e permitindo a remoção de novas areias acumuladas na base do barranco em recentes episódios gravitacionais (Figura 41).



Figura 40. Barrancos marginais só atingidos durante as marés excepcionalmente altas. As raízes expostas dos coqueiros marcam a posição anterior da linha de margem do Povoado Saramen (FONTES, 2002).



Figura 41. Impacto direto das ondas sobre camada de sedimentos argilosos, durante a subida da maré, 2001. Notar outra marca de solapamento acima, referente a nível mais elevado do rio (FONTES, 2002)

Os ventos também se relacionam com os processos erosivos das margens do São Francisco, atuando de forma indireta na promoção da erosão marginal. Estes em parte são responsáveis pela formação das ondas e estas, sim, atuam diretamente na remoção de partículas das margens.

O baixo São Francisco, com uma calha larga e pouco sinuosa, variável entre 500 e 1.000 metros, favorece a ação do vento e a formação dos corredores de vento, que ficam evidentes rio acima, onde o rio corre confinado em um “canyon” (FONTES, 2002). A ação constante das ondas produzidas pelos ventos só é intensificada quando associada às marés meteorológicas, por ocasião de tempestades acompanhadas de ventos fortes ou ainda, na coincidência de marés de sizígia e ventos fortes, quando podem exercer um papel mais decisivo na erosão marginal.

3.7.2. *Evolução Histórica dos impactos morfológicos na linha de costa*

A influência dos impactos antrópicos no processo sedimentar da costa torna-se uma importância ao longo dos últimos séculos. É, portanto, necessário o

desenvolvimento sustentável nas zonas costeiras para examinar os impactos das alterações humanas e a respostas morfológicas correspondentes. Deste ponto de vista, uma variedade de mudanças morfológicas induzidas pelo homem tem atraído um interesse considerável durante as últimas décadas. Entretanto, nosso conhecimento dos efeitos da interferência humana no processo e balanços sedimentares é ainda muito limitado devido à complexidade inerente do problema, bem como o déficit de cobertura de dados, especialmente para as escalas regional e decadal.

Perturbações humanas em processos de transporte de sedimentos a longo prazo e em larga escala podem ser classificados em duas categorias de acordo com a localização do impacto. O primeiro tipo do impacto humano está relacionado aos desenvolvimentos costeiros. Por exemplo, a construção de estrutura de proteção de costa, portos pesqueiros, e dragagens de canais de navegação têm alterado significativamente um número de linhas de costa pela interrupção do transporte de sedimentos litorâneos. O segundo tipo de impactos humano está relacionado às modificações na bacia do rio. Por um longo tempo, práticas agrícolas e uso da terra nas bacias dos rios alteraram a quantidade de sedimentos que atingem os sistemas costeiros do rio.

Mais recentemente, a continuidade de transporte de sedimentos é interrompida com frequência pela construção de barragens e/ou remoção de sedimentos do canal do rio pela mineração; estas alterações podem afetar o ambiente costeiro rio a baixo por anos até mesmo décadas. Uma avaliação precisa deste tipo de impacto é frequentemente muito difícil e incerta. Esforços contínuos e mais detalhados são necessários para se estabelecer um elo entre a gestão da bacia hidrográfica e a evolução costeira.

No último século, alterações extensas do sistema fluvial, tais como barragens, mineração de água e esquemas de desvios de água, reduziram substancialmente o volume de areia atingindo o oceano a nível global. Um dos exemplos mais catastróficos das atividades humanas das atividades interiores do ser humano afetando o ambiente costeiro foi à construção da barragem do Alto Assuão e outras, no rio Nilo no Egito. Pela redução das taxas de sedimentos pela barragem, a

erosão costeira foi acelerada e a costa recuou de 30 a 50 m/ano. Nos Estados Unidos, a retenção de terra pela barragem impactou seriamente a costa sul da Califórnia.

MASATOSHI, 2008 estudou as mudanças morfológicas em longo prazo e em larga escala na bacia hidrográfica integrada da bacia do rio Tadori até a Costa de Ishikawa, Japão, este estudo foi examinado baseado em registros de pesquisa em uma longa escala de tempo, abrangendo mais de 40 anos. Dados contemporâneos da evolução costeira e dos leitos dos rios foram compilados e comparados no intuito de avaliar a influência das modificações antrópicas da bacia do rio no processo sedimentar regional sobre uma escala de tempo de décadas. O autor apresentou que passado os anos a descarga de sedimentos foi reduzida pelas modificações antrópicas tais como mineração de terra e/ou construção de barragens na bacia do rio. Devido aos efeitos combinados de causas naturais e artificiais, o litoral recuou aproximadamente 200m de 1892 a 1970. Medidas preventivas, como uma série de estruturas costeiras, tais como quebra-mares destacados e/ou quebra-mares submersos, foram construídas a partir dos anos 70. Devido aos efeitos dessas estruturas costeiras, a recessão da linha de costa tem sido mitigada durante as últimas décadas.

Na bacia hidrográfica do Rio São Francisco as barragens também proporcionaram uma redução da carga de sedimento continental. Além disso, reduziram a velocidade das correntes e, conseqüentemente, a capacidade de transporte de sedimentos pelo rio, acarretando a deposição desses sedimentos dentro de seus reservatórios.

Na década de 90 a hidrelétrica de Paulo Afonso I em 1955 entra em operação ocasionando um efeito significativo em longo prazo (da ordem de décadas) na redução da carga sedimentar da bacia do rio São Francisco. Com a construção da hidrelétrica, a capacidade de transporte de sedimentos foi reduzida, ocasionando a erosão da costa ao norte da foz deste rio (BANDEIRA, *et al.*, 2008).

Em 1978, foi construída a hidrelétrica de Sobradinho e, posteriormente, as hidrelétricas de Itaparica e Xingó, a jusante de Sobradinho, construções que contribuíram ainda mais para a diminuição da carga sedimentar.

Já na década de 1990, a erosão da margem direita do rio São Francisco destruiu a vila de pescadores de Cabeço (município localizado na foz do rio São Francisco). A primeira vítima a sentir esse processo de erosão severa foi o farol, construído no século passado. Este evento ocorreu somente depois da operação do complexo Hidrelétrico de Paulo Afonso de I a IV, situadas na parte baixa da bacia, a 50 km a jusante da hidrelétrica de Itaparica.

Observe na Figura 42 a evolução histórica da destruição da linha de costa na foz do São Francisco, margem direita, localizada no Estado de Sergipe.

Em 1979 o Farol do Cabeço, SE encontrava-se localizado na praia do município de Cabeço, SE. Em meados da década de 90 o mar avançou sobre a esta costa destruindo casas, igrejas, cemitérios e outras construções presentes nesta comunidade, além construções, pessoas foram atingidas pela força dessas águas.

O recuo da linha de costa ao longo destes anos indicado pelo farol da Vila de Cabeço, SE causou a destruição do povoado existente, bem como a destruição da praia de Sergipe que nos tempos antigos era a fonte de renda e a moradia da pequena comunidade pesqueira. Este povoado se afasta do mar à medida que ele avança sobre a costa.

A construção mais significativa desta região é o farol do cabeço, o mesmo representa a marca histórica do recuo da linha de costa do município de Cabeço, SE, pois até a presente data o mesmo permanece resistente a esta erosão. Em 2004 a imagem de satélite obtida do Google mostra que o farol encontrava-se próximo de 240m da costa e em 2009 o mesmo encontrava-se distante aproximadamente 423m da costa. Então podemos perceber que ao longo destes anos o mar vem avançando sobre esta costa, ou seja, as imagens de 2004 a 2009 revelam a ocorrência de um recuou da linha de costa estimado em 183m. Informo que estas distâncias não são precisas, pois não constam os níveis de água para estas localidades. O objetivo foi mostrar que visivelmente a linha de costa vem se afastando ao longo dos anos.



Foto tirada em 1989 do farol do Cabeço presente na praia do município de Cabeço – SE – Brasil



Foto do mar avançando sobre o farol e o município de Cabeço – SE – Brasil em 1998



Em 2001 o oceano tomou conta de toda área adjacente ao farol



O farol em 2002 encontra-se mais afastado da costa do município de Cabeço - SE



Em 2004 o farol encontrava-se afastado 240m da costa do município de Cabeço – SE – Brasil



Esta imagem mais atual de 2009 revela que a posição do farol encontra-se afastado da costa do município de Cabeço – SE – Brasil aproximadamente 423m.

Figura 42. Estimativa da evolução histórica do recuo da linha de costa na foz do rio São Francisco (BANDEIRA,2008 E GOOGLE, 2011).

BANDEIRA, *et al.*, 2008, calculou a evolução do processo erosivo descrito acima, com base na posição da linha de costa em relação ao farol e também em função da cronologia da operação de Paulo Afonso I, em 1955, e das demais hidrelétricas construídas ao longo do curso do Rio. Foi estimada a média de regressão anual da linha de costa para diferentes períodos, medindo-se os impactos morfológicos em longo prazo na foz do rio São Francisco pela retenção de sedimentos de origem continental. Os dados apresentados na Tabela 12 revelaram um aumento de 4,8 vezes da taxa média de

regressão, comparando-se o período de 1955 a 1998 com o período de 1998 a 2007. Estima-se que tal aumento tenha ocorrido como fruto do início da operação de Sobradinho, construída em 1978.

Tabela 12 - Média de regressão da linha de costa (BANDEIRA *et al.*, 2008).

Intervalo de tempo	Regressão da linha de costa (m)	Velocidade média de regressão (m/ano)	Observações
1955 a 2007	500	9,6	Desde a construção da hidrelétrica de Paulo Afonso até 2007
1955 a 1998	250	5,8	Desde Paulo Afonso até o farol na linha de costa
1998 a 2007	250	27,8	Do farol da linha de costa até 2007

O farol da vila de Cabeço, inclinado e a uma distância de 250 m da costa (Figura 43), ilustra esta dramática erosão na região da foz do rio São Francisco. As principais conseqüências da retenção de sedimentos dentro dos reservatórios das hidrelétricas construídas no Rio São Francisco seriam:

- a) Diminuição da quantidade populacional de peixes: o baixo estuário e a região da foz experimentaram uma drástica diminuição na quantidade populacional de peixes, devido à redução da contribuição de sedimentos finos, nutrientes e matéria orgânica.
- b) Erosão na foz do rio São Francisco: em função da redução do aporte continental de sedimentos, a costa ao norte da foz do rio São Francisco no Estado de Sergipe vem sofrendo severas erosões. O sedimento de origem continental chega à foz e logo é carregado na direção NE (costa do Estado de Sergipe), devido ao transporte dominante de Sudoeste.

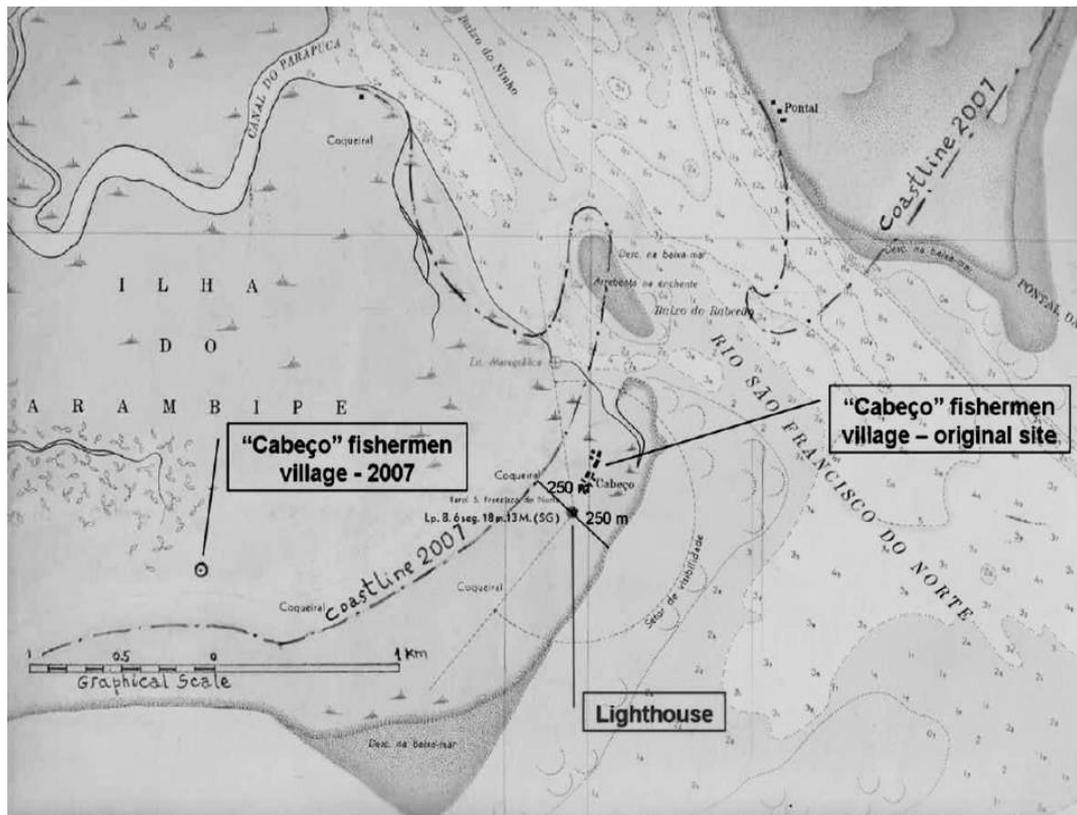


Figura 43. Cálculo da evolução da foz do rio São Francisco (BANDEIRA *et al.*(2008))

4. RECUPERAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS NA REGIÃO DO BAIXO SÃO FRANCISCO

4.1. Controle de sedimentos

O controle dos sedimentos surge a partir da necessidade de proteger as obras e o patrimônio envolvido, bem como, a natureza sob os aspectos ambientais. Normalmente esse controle é efetuado pela entidade interessada. Em inúmeros casos, a abordagem do problema implica na ocorrência em toda a bacia hidrográfica ou a montante da obra, sendo área de terceiros ou do governo, ficando difícil ao interessado tomar as devidas providências adequadas de controle (CARVALHO, 2008).

Desta maneira, têm-se obras de controle da erosão em cidades, quais sejam aquelas de proteção de encostas ou dos cursos d'água que atravessam o centro urbano. Nas estradas e na agricultura, procura-se evitar a erosão ou corrigir problemas decorrentes do sedimento. Outra forma de controle é que a formação de reservatórios por construção de barragem obedece a um plano de controle de sedimentos cujo

objetivo envolve até mesmo a manutenção ou a formação de floresta ciliar do lago, evitando, assim, a erosão de margens e impedindo a afluência lateral de sedimentos. Para o caso de transporte fluvial, o curso d'água deve apresentar condições de navegabilidade, o que, de certa forma, impõe manter profundidades mínimas.

Diante dessa realidade, as medidas abrangentes de proteção da bacia hidrográfica se tornam necessidades imperativas, ou seja, essas medidas têm que ser planejadas dentro de um programa de trabalho de responsabilidades de entidades do governo federal e estadual. Essas entidades devem procurar estabelecer um plano de gerenciamento da bacia hidrográfica, objetivando o seu uso efetivo para múltiplas finalidades, estabelecendo o controle do sedimento na bacia como uma de suas importantes metas.

Geralmente o controle de sedimentos pode ser realizado utilizando medidas preventivas e corretivas, sendo as primeiras mais eficientes e econômicas. Medidas corretivas geralmente são aplicadas por falta de previsão e adotadas em condições tais que os prejuízos materiais e financeiros já eram intoleráveis (CARVALHO, 2008).

As medidas de controle do sedimento se fazem necessárias em todas as fases da sedimentologia. Dentre as mais eficientes e adequadas, destacam-se as que efetuam o controle da erosão. Evitar a erosão ou reter o sedimento antes de entrar no curso d'água deve ser as primeiras providências. Desde que o sedimento esteja sendo transportado, é recomendado que se procure adotar soluções de minimização dos efeitos do conseqüente depósito. O sedimento depositado em posições impróprias necessita de remoção ou de uma solução adequada, que nem sempre é adotada em função dos altos custos. Por outro lado, o sedimento erodido pode deixar o solo empobrecido para culturas ou, no mínimo, uma área desprotegida, sujeita a maiores problemas erosivos.

A seguir será descrito o controle de sedimentos em cursos d'água e o controle de sedimentos em reservatórios ambos no intuito de recuperar a carga sedimentar a jusante destes empreendimentos hidrelétricos, sob os quais a região do Baixo São Francisco em estudo vendo sofrendo influência ao longo dos anos.

4.2. Controle de sedimentos em cursos de água

Os cursos de água estão sujeitos à erosão do leito e, principalmente, à erosão de margens, ocasionado pela ação de correntes e pequenas ondas (DURLO, *et al.*, 2005). Além disso, estão sujeitos ao assoreamento do leito devido ao depósito por redução da velocidade.

A proteção das margens contra erosão pode ser realizada de inúmeras formas, devendo a solução a ser adotada conforme sua extensão, custos econômicos, dentre outros. A proteção mais eficiente e mais atual de margens dos rios é a vegetação ciliar, composta por árvores, arbustos e gramíneas, que deve ser mantida ou recomposta em quaisquer circunstâncias (CARVALHO, 2008).

O revestimento das margens por obras de enrocamento é uma solução quando as correntes e pequenas ondas incidem diretamente, não sendo a vegetação uma solução eficaz (Figura 55) (VANONI, 1977). Na maioria dos casos, no lugar do enrocamento, obras estruturais de concreto ou de madeira são, muitas das vezes, justificáveis, pois o controle da erosão marginal, através dos enrocamentos, é bastante oneroso, impossibilitando o seu uso de forma ampla, em toda a margem do rio (HOLANDA *et al.*, 2008).

Construções de espigões, formados de um lado da margem, protegem o trecho da ação erosiva e desviam a corrente adequadamente, protegendo também a jusante (Figuras 44 e 45) (VANONI, 1977). Por outro lado, os segmentos de rios assoreados podem ter depósitos removidos com o direcionamento das correntes por estes espigões.

Diques construídos ao longo das margens aumentam a velocidade da corrente e a retirada dos depósitos para jusante (CARVALHO, 2008).

A dragagem dos rios é uma prática eficiente, pois há de diversos métodos de realizá-la, com o uso dos mais variados tipos de dragas. A escolha do local para a colocação do material dragado é um ponto importante na solução do problema, uma vez que a simples deposição nas margens pode provocar o retorno do material para a calha

na época chuvosa. Consolidar o depósito, revestindo-o com vegetação, colocando-o em depressões ou removendo-o para local distante são soluções usuais.

Atualmente, na região do Baixo São Francisco em estudo, os ribeirinhos se têm valido de várias soluções para conter o processo erosivo acelerado das margens e linha de costa, como o uso de pneus, palha de coco, sacos de areia e vários materiais sintéticos, mantas de polietileno, que além de não produzirem o efeito desejado no controle da erosão, trazem problemas para a recuperação da vegetação ciliar e degradam a paisagem, importante atrativo turístico na região (BANDEIRA, 2005).

Em face da realidade do curso baixo do São Francisco, descrita nos capítulos anteriores deste trabalho, o controle de sedimentos dos cursos d'água da Bacia é necessário, como forma de evitar a erosão ou mesmo o assoreamento à jusante destas hidrelétricas construídas desde a década de 40.

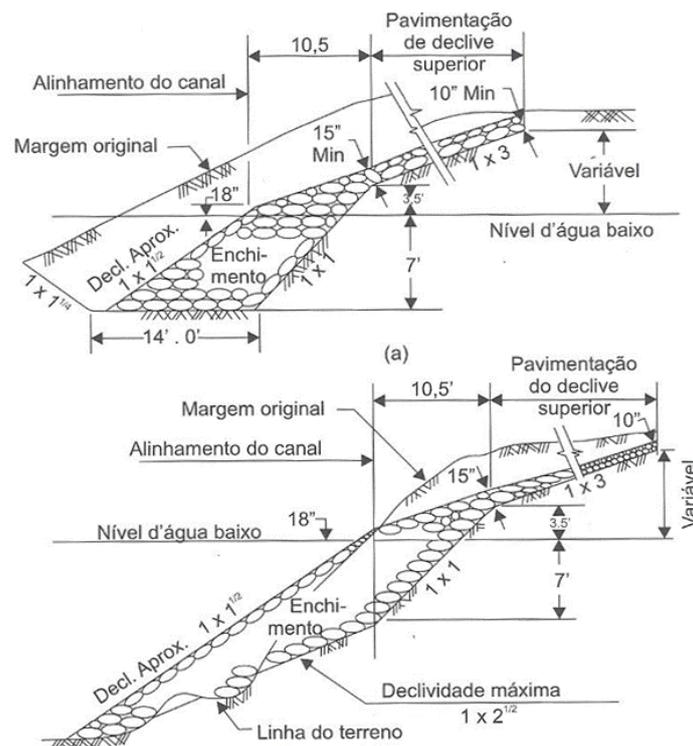


Figura 44. Revestimento de margem de rio com enrocamento (VANONI, 1977).

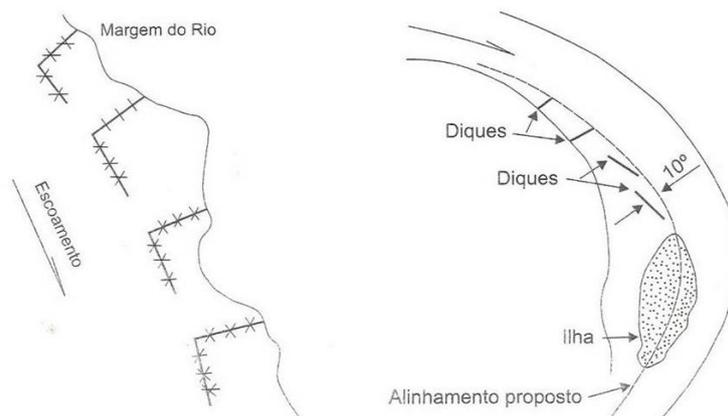


Figura 45. Espigões posicionais ao longo da margem de um rio para direcionar a corrente e proteger contra a erosão (CARVALHO, 2008).

4.3. Controle de sedimentos nos reservatórios

4.3.1. Medidas Preventivas

As medidas preventivas são as mais eficientes no controle de sedimentos em reservatórios, pois procuram controlar a erosão na bacia e evitar que o sedimento entre no sistema fluvial para se depositar no reservatório. Entretanto, tais medidas, em sua maioria, exigem uma interferência fora do controle dos engenheiros de barragens, em áreas fora do domínio da empresa, o que torna difícil essa solução (ICOLD, 1989).

Por outro lado, as que estão dentro do controle do engenheiro de barragem devem ser adotadas, aumentando a vida útil do reservatório, bem como, proporcionando menor impacto ambiental a jusante destes empreendimentos. Incluem a proteção das margens do reservatório com vegetação ciliar e outras medidas, como dispor a barragem de descarregador de fundo ou um canal de adução com desarenador, quando for o caso. Tais medidas devem ser previstas e adotadas nas várias fases do empreendimento, desde o planejamento nas fases de inventário, viabilidade e projeto, até a fase de operação do reservatório (CARVALHO, 2008).

Outras soluções que devem ser previstas são as aberturas com comportas de descarga de material de fundo e de correntes de densidade. Estes descarregadores deverão ser adequadamente posicionados para uma boa eficiência na retirada do sedimento. Faz-se necessária sua operação periódica de forma a não sofrerem problemas por falta de uso, sendo recomendada a operação com maior frequência no período

chuvoso, pois nesta época sobra água. Apesar de não retirar todo o sedimento do reservatório, o descarregador de fundo adequadamente posicionado, próximo e abaixo da tomada d'água, garante a retirada do sedimento, de tal forma a manter o nível do depósito inferior ao nível da soleira da tomada. Esta operação do descarregador de fundo deverá recompor parte da carga sólida para jusante, não é recomendável escoar muita quantidade de sedimento de uma só vez para não sacrificar a calha ou o meio ambiente.

Outra medida de controle de sedimentos nos reservatórios são os condutos e canais de derivação, tipo by-pass, que podem ser construídos para desviar o sedimento na ocasião de enchentes, com escoamentos a partir da área logo a montante da cabeceira do reservatório. O by-pass pode ser construído em túnel, como no reservatório Amsteg (Figura 46) ou em galeria ou canal, como no reservatório Palagnedra, ambos na Suíça (Figura 47).

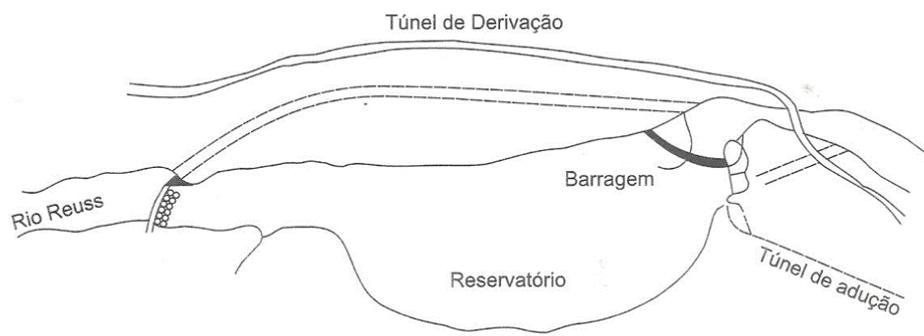


Figura 46. Esquema de solução de escoamento do sedimento por obra de derivação (by-pass), em túnel, para o reservatório Amsteg, Suíça (BRUK, 1985)

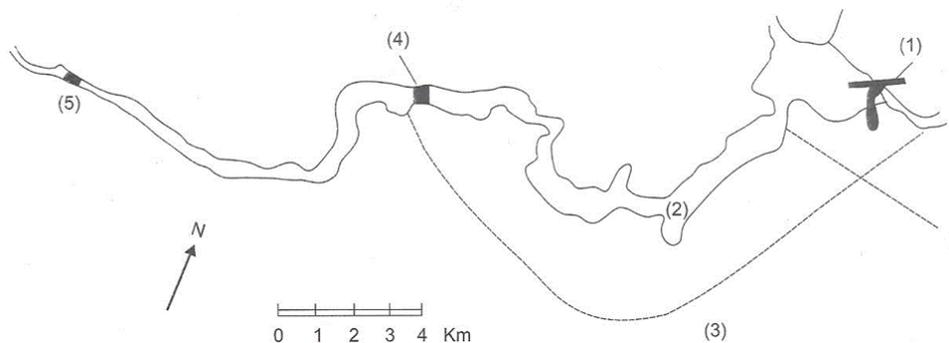


Figura 47. Esquema de solução de escoamento do sedimento por obra de derivação (by-pass), em galeria ou canal, para o reservatório Palagnedra, Suíça (BRUK, 1985).

O método da depleção do reservatório, com a finalidade de reduzir a quantidade de sedimento, é muito utilizado, especialmente em aproveitamentos hidrelétricos. A eficiência de escoar sedimento depende da posição do reservatório, da capacidade e posição dos condutos de escoamento e vertedouros, das características do sedimento afluente, do modo de operação do reservatório, do tempo de escoamento e da vazão escoada (BRUK, 1985).

A presença de descarregadores de fundo juntamente com condutos e canais de derivação, tipo by-pass, previsto como medida preventiva na construção de reservatórios hidrelétricos para transferência de sedimentos de montante para jusante é uma excelente medida tanto para um melhor funcionamento do reservatório quanto para reposição do sedimento rio a baixo.

É importante ressaltar que os sedimentos são responsáveis pela formação e manutenção de praias de rios, pelo equilíbrio do fluxo sólido e líquido entre o continente e o oceano, além disso, constituem fator fundamental na dinâmica dos cursos d'água, transportam nutrientes que servem de alimento para ictiofauna (LIMA. *et al*, 2001).

4.3.2. *Medidas Corretivas*

As medidas corretivas são utilizadas nos reservatórios, geralmente, em condições críticas, ou mesmo, quando se processa com prejuízo. Por falta de previsão, de conhecimento do problema, descaso, ou ausência de recursos, as dificuldades alcançam condições insustentáveis tanto à montante quanto a jusante do reservatório.

Uma medida corretiva praticada na Suíça para remoção do sedimento é o by-pass, também usado como preventiva. A tomada da estrutura deve ser colocada na posição do início do delta do reservatório, numa altura que promova o escoamento com facilidade. É importante frisar que grande quantidade de sedimentos pode ser escoada na ocasião de níveis altos.

Outro sistema muito utilizado para remoção é a sifonagem. Esse sistema é relativamente eficiente, mas utiliza bastante água. A vazão de sifonagem de $1\text{m}^3/\text{s}$ pode retirar 15kg de sedimento, sendo usado com vantagem (Figuras 48 e 49).

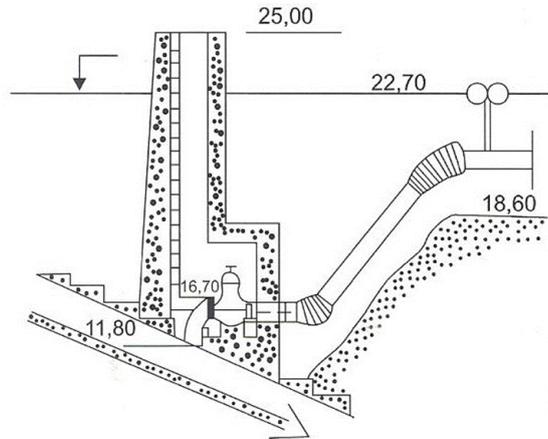


Figura 48. Dispositivo de sifonagem hidráulica usada no reservatório Rioumajou, França.(BRUK, 1985)

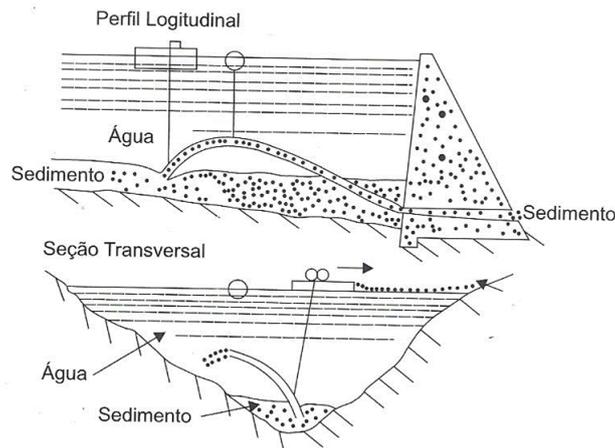


Figura 49. Diagrama de disposição para retirada de sedimento de reservatório por sifonagem. (BRUK, 1985)

As medidas corretivas referentes ao transporte de sedimento dos reservatórios podem ser utilizadas na área do Baixo São Francisco em estudo, visto que os sedimentos retidos nesses reservatórios causam impactos na dinâmica fluvial e marinha do seu baixo curso. A transferência do sedimento à jusante do reservatório através do by-pass, sifonagem, ou mesmo do descarregador de fundo, poderiam ser opções de solução da problemática, pois pode transportar quantidades necessárias de sedimento como medida de contenção do avanço do processo erosivo das margens e linha de costa na região do baixo São Francisco.

A erosão ocorrida neste segmento do rio pode ser causada tanto pela retenção de sedimento quanto pela redução da vazão nesses reservatórios hidrelétricos situados rio acima. Para saber a quantidade suficiente de sedimento e de vazão transportada á jusante é necessário que antes seja feito um estudo hidrodinâmico e sedimentológico desse sistema hídrico, como medida de evitar possíveis danos econômicos, sociais e ambientais.

4.4. Aplicabilidade da bioengenharia de solos no controle da erosão marginal

O conhecimento das exigências e características biológicas da vegetação e, especialmente, de sua capacidade para solução de problemas técnicos de estabilização de margens e de encostas, combinado com a construção de obras de grande simplicidade, denomina-se bioengenharia, engenharia biológica, engenharia biotécnica, também denominada de construção verde ou ainda construção viva (DURLO, *et al.*, 2005).

Estas biotécnicas surgiram como uma alternativa promissora à algumas técnicas tradicionais. A engenharia civil está reconhecendo cada vez mais a importância da vegetação nos trabalhos de construção, sobretudo pelo efeito estético que se pode ter com esse tipo de obra, que usam elementos mecânicos (estruturas), combinados com elementos biológicos (vegetação), para deter e prevenir os deslizamentos e a erosão.

Os registros mais antigos que tratam das propriedades técnicas da vegetação datam do Império Romano. Leonardo da Vinci (1452–1519) já teria feito referência à importância do sistema radial dos salseiros para fixação das margens dos canais.

Na Europa, os primeiros trabalhos referentes a esta técnica, tradicionalmente empregada no controle dos processos erosivos em morros e encostas, datam do século XVII; ela consiste no uso de elementos biologicamente ativos em obras de estabilização do solo e sedimentos.

Nos últimos 20 anos, principalmente nos Estados Unidos e Europa, as técnicas de bioengenharia vêm sendo utilizadas e reconhecidas cada vez mais como

excelentes alternativas no combate a erosão (CARVALHO, 2008). As agências ambientais européias e americanas vêm pleiteando introduzir proteções de margens utilizando recursos naturais existentes na bacia fluvial e que viabilizem o reflorestamento ripariano e dos terraços fluviais.

A estabilidade de um talude fluvial pode ser buscada, reduzindo-se a velocidade da água e, assim, o seu potencial de erosão, aumentando sua força de resistência. As biotécnicas podem produzir tanto um quanto outro destes efeitos ou os dois, simultaneamente (DURLO, *et al.*, 2005). As obras biotécnicas dividem-se em duas:

1) *Obras transversais*: têm como principal objetivo a redução da velocidade da água através do desenvolvimento de um perfil de compensação que modifica a inclinação original do leito e, conseqüentemente, força o depósito de sedimentos, consolidando o leito e estabilizando as margens

2) *Obras longitudinais*: não alteram a declividade do leito, sua função é basicamente para reconstruir, proteger e estabilizar as margens.

As obras transversais são oriundas da construção das barragens de consolidação (Figura 50), soleiras ou cintos basais (Figura 51), normalmente são inertes, mas, por vezes, podem ser complementadas por medidas vegetativas. Já as obras longitudinais são originadas tanto a partir do revestimento vegetal e/ou físico das margens (Figura 52), quanto pela construção de ramprolas ou espigões transversais (defletores) (Figura 53) que visam, igualmente, reduzir a velocidade da água e forçar o depósito de sedimentos no local desejado (próximo a margem em tratamento), porém sem alterar a declividade do leito (DURLO *et al.*, 2005).

Como os solapamentos das margens ocorrem em virtude de erosões localizadas nos pés de talude, são indicados os denominados defletores de fluxo, reorientados entre 15° e 30° em relação à correnteza. Os defletores de fluxo poderão ser construídos com rochas sobrepostas ou caixas de madeira fixadas no leito. A inflexão da corrente, ocasionada pelos defletores, impede o ataque aos pés do talude pela água e provoca uma corrente transversal que minimiza a formação de bancos de areia (CODEVASF, 1984).

Estes revestimentos conferem aos taludes maior resistência à força da água e podem ir de um simples enrocamento com pedras, passando pelo uso de cilindros inertes e gabiões (Figura 54), até a construção de paredes de madeira roliça, ferro ou concreto, combinados com modelos especiais de revegetação.

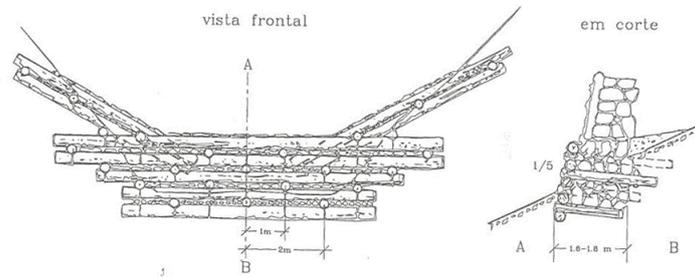


Figura 50. Barragens de consolidação construídas em madeiras e pedras (DURLO, *et al.*, 2005)

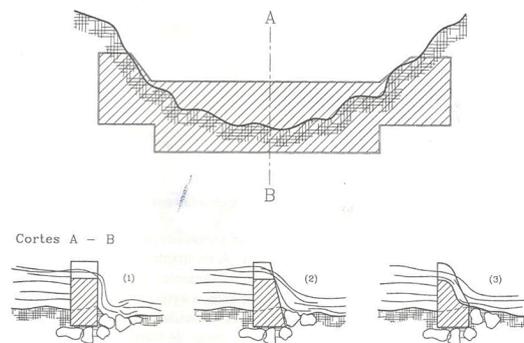


Figura 51. Cinto basal saliente, em vista frontal e em cortes transversais (retilíneo, inclinado e sinoidal) (DURLO, *et al.*, 2005)

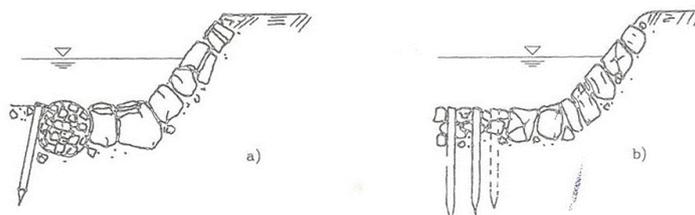


Figura 52. Vista transversal do revestimento de taludes fluviais (DURLO, *et al.*, 2005)

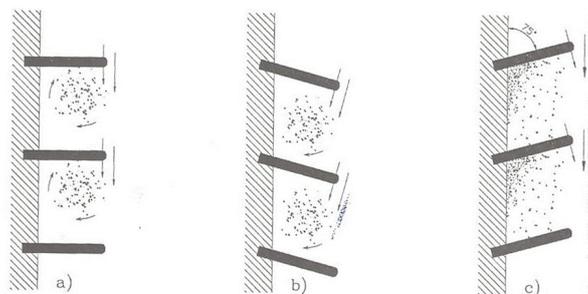


Figura 53. Diferentes posições de depósitos de materiais para râmprolas: a) perpendiculares, b) declinantes, e c) inclinantes (DURLO, *et al.*, 2005).

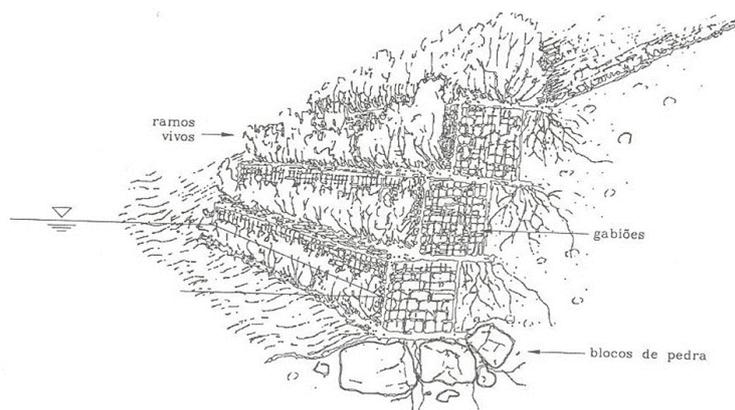


Figura 54. Revestimento de talude fluvial, com gabiões

Na Tabelas 13 estão descritas as principais formas de plantio utilizadas pela bioengenharia como medida de contenção de processos erosivos.

Deve-se levar em consideração não somente a solução do problema, mas também, é necessário considerar os critérios ecológicos, econômicos e estéticos. Assim, procura-se manter a morfologia do canal natural, com meandros e perfis transversais assimétricos, sugerindo-se a preservação ou criação de habitats naturais para a flora e a fauna. Além disso, recomenda-se evitar construções grandes e pesadas, procurando-se modificar o mínimo as condições naturais preexistentes.

A seleção da técnica de plantio é função de diferentes fatores, como das características biotécnicas da vegetação a ser utilizada, das propriedades do substrato, da frequência, do volume e da velocidade das vazões, bem como da profundidade do curso de água. À medida em que as encostas ou taludes fluviais se tornam mais abruptos e/ou instáveis, tanto mais é necessária a utilização de formas e arranjos especiais para revegetação (sementes, estacas simples, tranças, esteiras e feixes vivos), como também, o emprego e a combinação de estruturas inertes como pedras, madeira, telas, paredes de madeira e outros, juntamente com a vegetação.

Em margens de cursos de água, a erosão acontece frequentemente pela retirada da base de apoio do talude, devido à força da correnteza, ao turbilhonamento e à ação das ondas junto à faixa que acompanha o nível normal da água. Esta região merece

atenção especial, principalmente pelo emprego de materiais inertes em sua base, que auxiliarão o futuro estabelecimento da vegetação.

Tabela 13. Métodos aplicados pela bioengenharia para contenção de processos erosivos

Nome	Descrição	Principal função
Método Vegetativo		
Estacas	Estacas simples, com cerca de 40 cm, que são cravadas no talude.	Fácil implementação, preparo e transporte do material vegetal. Resultados menos imediatos. As estacas podem ser facilmente levadas pela força da água.
Feixes	Ramos longo, amarrados, formando feixes. São usados parcialmente enterrados e fixados com estacas e pedras, dispostos ao longo da margem.	Além do efeito normal, esperado pelo desenvolvimento da vegetação, produz imediatamente uma proteção física. É a forma ideal para ser usada entre os vãos das estruturas de madeira.
Esteiras	Ramos no seu máximo comprimento são dispostos acompanhando a inclinação do talude e com as suas bases dentro da água, firmemente presas por pedras e/ou trocos. Pilotos de madeiras com varas de bambu ou arame são usados para fixar os ramos contra o talude, sendo tudo coberto por uma fina camada de solo.	Restringe-se a taludes fluviais e requer uma grande quantidade de material vegetal. Quando possível de ser implementado, produz os efeitos protetivos mais rápidos. Muito eficiente em taludes nos quais a força da água é de impacto frontal. Logo após a implantação, já suporta tenções muito altas.
Tranças	Ramos longos têm suas bases encravadas no solo e são trançados entre pilotos (vivos ou inertes)	Produz ótimos efeitos quando usado para proteger a linha da água em pequenos cursos e para reter sedimentos em taludes que não sofram impacto frontal da água.
Método Germinativo		
Sementes	Sementes são lançadas manualmente sobre o talude, previamente modelado.	Suficiente para locais com pequena inclinação. Em taludes fluviais, normalmente uma medida complementar.
Geotêxteis	Malhas construídas com restos culturais ou fibras vegetais degradáveis são impregnadas de sementes e adubos e fixadas, com estacas, contra o talude.	Uma das alternativas mais caras, mas produz estabilização rápida. Podem ser usados em taludes muito íngremes e bastante degradados.
Hidrosemeadura	Sementes são misturadas á água, cola e adubo e lançadas mecanicamente sobre o talude	Método dispendioso técnica e economicamente. Rápido e fácil de ser implantado quando se dispõem dos recursos.

A bioengenharia de solos, através do uso de mantas de fibra de coco recobertas com uma malha de polipropileno fotodegradável, associada a retentores de sedimentos, começa a se apresentar como solução de possível viabilidade no controle da erosão marginal (GOMES *et al.*, 2005).

A experiência mundial mostra que apenas a replantio da vegetação original (ou primitiva) nas margens desnudadas pela erosão não proporciona a estabilização necessária dos taludes, principalmente nos trechos côncavos do rio onde a correnteza mostra-se mais intensa. A alternativa proposta baseia-se na restauração do talude e

proteção do mesmo utilizando mantas ou redes de tecido geossintético, recobertos ou não com fibras vegetais da região, sobre a qual é aplicada a mata ciliar. Estas proteções combinadas reforçam o solo através dos pinos de fixação das mantas e das raízes das espécies riparianas. Outros benefícios são constatados, como: o aumento do atrito proporcionado pela vegetação ciliar; aumento da infiltração de água retida da correnteza e retenção da umidade nas estiagens. A captação de nutrientes, através das mantas e da mata ciliar, fomenta a piscosidade (ocorrência de peixes) do curso fluvial.

Os geotêxteis estão sendo usados para controlar os processos erosivos. Existem vários tipos de redes, feitas com fibras naturais, como juta, e artificiais, como náilon, que são produzidas para o controle da erosão. Estes podem reduzir em até 20% as taxas de erosão, se comparadas com encostas sem proteção (GUERRA, *et al.*, 2009).

HOLANDA *et al.*, 2008, descreve sobre os ensaios experimentais referente a implantação dos elementos de bioengenharia de solos em julho de 2004, iniciada com a suavização manual de todo o talude realizados na margem sergipana do Baixo São Francisco, próximo ao Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba, município de Propriá, estado de Sergipe, Brasil. O autor utilizou o geotêxtil Tela FIBRAX® 400BF e o retentor de sedimentos Bermalonga® D-40. No sítio experimental, o solo possuía uma granulometria composta em mais de 90%, de areia média, fina e muito fina, sendo classificado como Neossolo Flúvico.

As áreas, previamente identificadas com focos de erosão pelo autor, foram avaliadas com relação à possibilidade de implementação das técnicas de bioengenharia de solos associadas à recomposição da vegetação ripária. Os critérios escolhidos para a condução dos ensaios, dentre os vários trechos de margem que apresentam a problemática da erosão, foram área, altura e declividade do barranco, uso do solo, cobertura vegetal, distância do canal principal do rio e textura do solo.

O geotêxtil fotodegradável empregado neste experimento era composto de 100% de fibra de coco, entrelaçada por uma malha de polipropileno fotodegradável e, como característica, garantia a degradação em um período entre 48 e 60 meses, de modo a propiciar proteção inicial e a incorporar matéria orgânica ao solo.

Na porção destinada ao tratamento com uso de bioengenharia de solos foi semeada a gramínea *Brachiaria decumbens*, para promover uma rápida cobertura vegetal do talude e fixação do geotêxtil. Visando à recuperação da vegetação ciliar foram plantadas, dentro do perímetro experimental, mudas de espécies florestais nativas da região: tamboril (*Enterolobium contortisiliquum* (Vellozo) Morong), canafístula (*Cassia grandis* L. f.), pau-ferro (*Caesalpinia leiostachya* (Bentham) Ducke), aroeira vermelha (*Schinus terebinthifolius* Raddi.), pau-pombo (*Tapirira guianensis* Aubl.) e mulungu (*Erythrina velutina* Willd.).

Os retentores de sedimentos utilizados eram compostos por fibras vegetais desidratadas e prensadas, envolvidas pela mesma malha de polipropileno fotodegradável. Esses retentores de sedimentos foram fixados na base do talude, com estacas de maçaranduba. As estacas foram posicionadas na extremidade e inseridas no meio dos retentores de sedimentos, utilizados para promover a redução do impacto do fluxo e refluxo das ondas na base do talude, evitando o solapamento e a exposição às variações diárias da cota do rio produzidas pela UHE Xingó.

HOLANDA *et al.*, 2008 verificou que em função da proteção oferecida ao talude, ocorreu variação no volume de material erodido e que o processo erosivo atua de forma diferenciada no tempo e no espaço. As seções transversais no tratamento sem bioengenharia de solos apresentaram grandes variações em sua forma, ao longo do monitoramento. O rebaixamento do topo do talude foi bastante reduzido quando comparado com o tratamento sem uso de bioengenharia. No tratamento com uso de bioengenharia de solos é perceptível a importância dos elementos vivos e inertes na proteção física do talude contra os efeitos da erosão marginal. O geotêxtil contribuiu para a estabilização do talude e mostrou eficiência no controle da erosão das margens, no período avaliado. Apesar dos danos ocasionados pelo pisoteio de animais de grande porte, a proteção oferecida pelo geotêxtil bem fixado ao solo, associada à presença de vegetação herbácea, propiciou a existência de ambiente favorável à estabilização do talude. O pouco rebaixamento do topo do talude estava intimamente ligado à proteção física oferecida pelos elementos de bioengenharia nos terços inferiores do talude, reduzindo a massa de solo erodido para o curso d'água.

Na região do Baixo São Francisco em estudo outras técnicas de bioengenharia foram desenvolvidas por RIBEIRO, 2008, que confirmou que esta técnica tem demonstrado ser eficiente, controlando a erosão, permitindo a regeneração natural, e conseqüentemente a recomposição da paisagem (Figura 55). A bioengenharia criou condições para que as espécies nativas aos poucos voltassem a povoar a área. A presença da vegetação atrai a fauna, antes ausente na área erodida.



Figura 55. Quatro momentos distintos: (a) a área recoberta pelo geotêxtil e, na base do talude, instalados retentores de sedimentos; (b) em agosto de 2004 ocorreu o desenvolvimento das espécies plantadas; (c) após três meses, a área totalmente povoada e conseqüentemente o processo erosivo controlado; e (d) em janeiro de 2005 a vegetação densa protege o talude antes erodido (RIBEIRO, 2008).

Conclui-se que a bioengenharia de solos é um método facilitador do desenvolvimento da vegetação ciliar além de eficiente ferramenta para diminuição na taxa de erosão e posterior solapamento da base do talude marginal. Por outro lado, o uso de materiais que se degradam gradativamente é interessante, pois possibilita o resgate com a maior fidelidade possível, o equilíbrio geomorfológico e ecológico do rio, tornando a recuperação ambiental das margens mais efetiva.

DURLO, *et al.*, 2005, relata que é necessário ter em mente que as obras de bioengenharia não alcançam sua total efetividade logo após sua implantação. Deve-se aguardar primeiramente a pega e o desenvolvimento radicial e aéreo das plantas. Nesta fase, podem ser imprescindíveis intervenções de reposição vegetal e/ou tratos culturais. Somente na fase de implantação, cuja duração irá depender de diversos fatores, é que as

obras começam a desempenhar integralmente sua ação corretiva e duradoura sobre o problema que se pretende solucionar.

5. CONCLUSÃO

Na região do baixo São Francisco os resultados obtidos nas estações pluviométricas de Piranhas, SE e Piaçabuçu, SE, revelam que na maioria dos anos analisados as variações de precipitações médias mensais e anuais seguiram as condições normais atmosféricas. Somente na estação de Piranhas as precipitações atingiram valores abaixo dos padrões normais climatológicos nos anos de 1999 (29,91 mm), 2000 (37,0 mm) 2001 (33,28 mm) (crise energética em 2001). Nos demais anos analisados as precipitações não variaram de forma significativa. Podemos concluir que pode não haver alteração antrópica dos dados pluviométricos em função dos empreendimentos hidrelétricos, bem como estar correlacionados com os processos erosivos ocorridos na região do baixo São Francisco.

O comportamento da vazão na estação Piranhas revela que a partir de 1994 a vazão foi reduzida e vem se mantendo regularizada em média de 1.672,97 m³/s, com exceção ano de 2004.

Na estação Piaçabuçu, SE a partir do ano de 1994 a vazão foi reduzida e vem se mantendo regularizada em média 1.805,84 m³/s, com exceção 2003 e 2006 onde a vazão apresentou valores mais elevados de 7.981 m³/s e 6.388 m³/s.

O resultado dos dados analisados na estação fluviométrica Traipu, AL revela que a partir do ano de 1994 a vazão foi reduzida e vem se mantendo regularizada em média 1967,87 m³/s, com exceção do ano de 2004 e 2007.

Os dados analisados na estação fluviométrica Propriá, SE revela que a partir de 1994 a vazão máxima mensal foi reduzida e vem se mantendo regularizada em média 2052,19 m³/s, com exceção do ano de 2004 e 2007.

Na região do baixo São Francisco, BR, com base nos dados analisados na estação Piranhas, Pão de Açúcar, Traipu e Propriá, revela que, além da redução das vazões mínimas e médias, os picos de enchentes (vazão máxima) com altas vazões acima de 10.000 m³/s aproximadamente, que ocorriam normalmente nos meses de janeiro a março, foram notavelmente suavizados, com exceções esporádicas de vazões que ultrapassaram a capacidade limite de controle das barragens, tal como em 1979 (acima de 15.000 m³/s), 1985 (acima de 12.000 m³/s), 1992 (acima de 10.000 m³/s).

Vale ressaltar que na estação pluviométrica de Piranhas, SE, localizada a 206 km da foz do São Francisco, no ano de 1999 (29,91 mm), 2000 (37,0 mm) e 2001 (33,28 mm) as precipitações médias anuais foram baixas, sendo consideradas, com base na revisão bibliográfica utilizada neste trabalho, como anormais segundo os padrões climatológicos atmosféricos.

A redução das chuvas neste período (1999-2001) ocasionou uma redução das vazões líquidas na região do baixo São Francisco. Esta situação de escassez não afetou somente a bacia hidrográfica do São Francisco, outras bacias hidrográficas também tiveram suas vazões líquidas reduzidas e conseqüentemente esta situação de escassez de água propiciou o desenvolvimento da crise energética de 2001.

Quanto a variação nas descargas sólidas, a estação sedimentométrica de Piranhas revela que a descarga líquida máxima foi de 2.979 m³/s no ano de 2007 e a mínima de 1.038 m³/s no ano de 2008, a descarga sólida máxima foi de 1.356 ton/dia no ano de 2008 e a mínima de 342 ton/dia no ano de 2007 e a concentração de sedimentos em suspensão máxima foi de 15 mg/l no ano de 2008 e a mínima foi de 1,3 mg/l no ano de 2007. A média das descargas líquidas, sólidas e a concentração de sedimentos em suspensão foram respectivamente de 2.286 m³/s, 935 ton/dia e 6,1 mg/l no período em estudo.

Na estação Traipu a descarga líquida máxima foi de 2.633 m³/s no ano de 2006 e a mínima de 1.189 m³/s no ano de 2001; a descarga sólida máxima foi de 8.022 ton/dia no ano de 2003 e a mínima de 295 ton/dia no ano de 2001 e a concentração de sedimentos em suspensão máxima foi de 32,32 mg/l no ano de 2008 e a mínima foi de

2,7 mg/l no ano de 2004. A média das descargas líquidas, sólidas e a concentração de sedimentos em suspensão foram respectivamente de 1.935 m³/s, 2.115 ton/dia e 13,33 mg/l no período em estudo.

Na estação Propriá a descarga líquida máxima foi de 2.633 m³/s no ano de 2006 e a mínima de 919 m³/s no ano de 2001; a descarga sólida máxima foi de 4.214 ton/dia no ano de 2004 e a mínima de 606 ton/dia no ano de 2001 e a concentração de sedimentos em suspensão máxima foi de 38,82 mg/l no ano de 2004 e a mínima foi de 5,26 mg/l no ano de 2000. A média das descargas líquidas, sólidas e a concentração de sedimentos em suspensão foram respectivamente de 1.797 m³/s, 1938 ton/dia e 12,76 mg/l no período em estudo.

Ao analisar o comportamento médio das descargas líquidas, sólidas e da concentração de sedimentos verificou-se que as descargas líquidas foram reduzidas em direção a foz e as descargas sólidas e a concentração de sedimentos aumentou em direção a foz. Este fato pode comprovar que os sedimentos presentes na região do baixo São Francisco não são de origem do rio e sim podem ser oriundos de sedimentos erosivos das margens do seu baixo curso ou mesmo de sedimentos aportados da contribuição de seus pequenos afluentes (Ipanema, Traipu, Gararu e Capivara).

De maneira geral a concentração de sedimentos em suspensão (C_{ss}) nas três Estações analisadas (Piranhas, Traipu e Propriá) apresentou concentrações muito baixa, pois segundo a classificação da ANA, 2001 concentrações menores que 50 mg/L são consideradas muito baixa.

Ao analisarmos os dados fluviométricos e sedimentométricos das estações presentes na região do baixo São Francisco observamos que as descargas líquidas, sólidas e as concentrações de sedimentos em suspensão ao longo dos anos estudados neste trabalho foram reduzidas. Estas alterações estão associadas à construção de barragens hidrelétricas rio acima, pois ao reter carga sedimentar em seus reservatórios e regular o controle das vazões a jusante destes empreendimentos, impactos como o recuo de margens e linha de costa vem sendo observados na região em estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA/GEF/PNUMA/OEA, **Mapeamento Temático de uso da terra no baixo São Francisco**, 2002, p 162.

ANA/GEF/PNUMA/OEA, **Determinação da carga de nutrientes do rio São Francisco na região de sua foz**, 2003, p 79.

Agência Nacional de Águas (ANA), **Hidro, Sistema de Informações Hidrológicas, Manual do Usuário, versão 1.0**, Brasília, 2002.

Agência Nacional de Energia Elétrica, **Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos**, 3 ed., Brasília, 2001, p 328.

BANDEIRA, A. A., **Avaliação de eficiência dos enrocamentos no controle da erosão nas margens do Baixo São Francisco, Sergipe**, Dissertação de M. Sc., Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2005.

BANDEIRA, V.J.; Salim, H. I.; Acosta, E.C., "Long-term morphological impacts on the coastline of Seripe State, Brazil, caused by the construction of dams in the São Francisco river basin" COPEDEC VII, No B-04, Dubai, UAE, 2008.

BAXTER, R. M., **Environmental effects of dams and impoundments**. *Annu Rev Ecol Syst* 8:255-283. 1977.

BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J. G. L., *et. al*, **Introdução à engenharia ambiental**, 2 ed., São Paulo, Pearson Prentice Hall, 2005.

BRANDT, S . A., Classifications of geomorphological effects downstream of dams, *Catena*, 40, 375-401, 2010.

BRUK, S., **Methods of computing sedimentation in lakes and reservoirs**, UNESCO, Prais, 1985.

CAMPOS, E. M., **O assoreamento do baixo curso do rio de Contas: uma abordagem hidáulico-sedimentar**, Dissertação de M.Sc., Universidade Federal da Bahia, 2001.

CARVALHO, N. O., **Hidrossedimentologia prática**, 2 ed, ver. atual. e ampliada, Rio de Janeiro, Interciência, 2008.

CASADO A. P. B, **Estudo do processo erosivo na margem direita do Rio São Francisco (Perímetro Irrigado Contiguiba-Pindoba – Baixo São Francisco sergipano) Sergipe – Brasil**, Dissertação de M.Sc., Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2000.

CEEIVASF (Comitê Executivo de Estudos Integrados da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco), **Análise das causas e repercussões da enchente ocorrida no mês de abril de 1985 na região do São Francisco e recomendações para o seu controle**. Recife: CEEIVASF, 1985.

CHRISTOFOLETTI, A., **Geomorfologia**, 12^a ed., São Paulo, Editora Blucher, 2009, p 185.

CODEVASF, **Plano Diretor para o aproveitamento dos recursos hídricos da bacia do rio São Francisco no Estado de Sergipe**, Brasília, 1984.

DOMINGUEZ, J.M.L.; MARTIN, L.; BITTENCOURT, A.C.S.P. Sea-level history and Quaternary evolution of river mouth-associated beach-ridge plains along the eastsoutheast Brazilian coast: a summary. In: **NUMEDAL, D.; PILKEY, O.H.; HOWARD, J.D. (eds.): Sea-level fluctuation and coastal evolution, SEPM Special Publication**. 41. 1987. p.115–127.

DOMINGUEZ, J.M.L., The São Francisco strandplain: a paradigm for wave-dominated deltas, In: **Geology of Siliciclastic Shelf Seas. Eds. Geological Society Special Publication**, 1996, p 217-231.

DURLO, M. A; SUTILI, F. J. **Bioengenharia: manejo biotécnico de cursos de água**, 1 ed., Porto Alegre, 2005, p 189.

ESTEVEES, F. A., **Fundamentos de Limnologia**, 3ed. Rio de Janeiro, 2011, p 790.

FONTES, L. C. S. **Erosão marginal associada a impactos ambientais a jusante da barragem: O caso do baixo curso do Rio São Francisco**, Dissertação de M.Sc., Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2002.

GOMES, L.G.N., **A bioengenharia como ferramenta para restauração ambiental das margens rio São Francisco**, Dissertação de M.Sc., Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2005.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B., **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**, 9 ed, Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 2009, p 474.

HAY, W. W., “Detrital fluxes from continents to the oceans”, **Chem Geol**, n. 145, pp 287-323, 1998.

HOLANDA, F.S.R, **Relatório do Estudo do processo erosivo na margem direita do rio São Francisco: Perímetro irrigado Cotinguiba/Pindoba - Baixo São Francisco Sergipano**, In: Projeto Rio São Francisco, ANA/GEF/PNUMA/OEA, São Cristóvão, 2002.

HOLANDA, F.S.R., SANTOS, L.G. da C., SANTOS, C. M. dos S., et al, “Riparian vegetation affected by bank erosion in the Lower São Francisco River, Northeastern Brazil”, **Revista Árvore**, v. 29 n. 2. pp. 327-336, 2005.

HOLANDA, F. S. R., SANTOS, C. M., GUIMARÃES, M. F. R., et al, “Monitoramento da Erosão em Margens de Cursos D’Água: O Caso do Rio São Francisco”, **Revista da Fapese**, v.4, n.2, pp 37-52, 2008.

HOLANDA, F. S. R., ROCHA, I. P., OLIVEIRA, V. S., “Estabilização de taludes marginais com técnicas de bioengenharia de solos no Baixo São Francisco”, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.6, pp 570-575, 2008.

ICOLD – International Commission on Large Dams (2000), <http://genepi.louis-jean.com/cigh/Index.html> . Acessado em 05/2010.

KNOPPERS, B., MEDEIROS, P.R.P., SOUZA, W. F.L., et al, “The São Francisco Estuary, Brazil”, **Hdb Env Chem**, v.5, pp 4-17, 2005.

LEINZ, V., AMARAL, S. E., **Geologia Geral**, 14 ed., São Paulo, Editora Nacional, 2003, p 393.

LIMA, J. E. F. W., SANTOS, P., M. C., CHAVES, A. G. DE M., et al., **Diagnóstico do fluxo de sedimentos em suspensão na Bacia do Rio São Francisco**, 1 ed., Planaltina, Brasília, DF, 2001, p 108.

MAKKAVEIEV, N. I. The impact of large water engineering projects on geomorphic processes in stream valleys. **Geomorfologiya**, n. 2, pp. 28-34, 1970.

MASATOSHI, Y.,” Impact of anthropogenic modifications of a river basin on neighboring coasts: case Study”, **Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering**, Vol. 134, No. 6, November 1, 2008.

MEDEIROS, P. R. P., KNOPPERS, B. A., SANTOS JÚNIOR, R. C., et al, “Aporte fluvial e dispersão de matéria particulada em suspensão na zona costeira do rio São Francisco (SE/AL)”, **Geochimica Brasiliensis**, v. 21, n. 2, pp 212 – 231, 2007.

MEDEIROS, P.R.P., **Aporte fluvial, transformação e dispersão da matéria em suspensão e nutrientes no estuário do rio São Francisco, após a construção da usina hidroelétrica do Xingó (AL/SE)**, Tese de D.Sc., Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2003.

MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; KJERFVE, B.; **Princípios de Oceanografia Física de Estuários**, 1 ed., São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo, 2002, p 413.

MOTTA, V. F., **Processos Sedimentológicos em Estuários**. Rio de Janeiro, 1978, p 9.

OLIVEIRA, A.M., **Estudo hidrodinâmico-sedimentológico do baixo São Francisco, estuário e zona costeira adjacente (AL/SE)**, In: Relatório Final: Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do São Francisco, GEF São Francisco, ANA/GEF/PNUMA/OEA, Maceió, 2003.

PROJETO SRH/GEF/PNUMA/OEA, **Contribuição para a presença da proposta para o programa de gerenciamento integrado da bacia do rio São Francisco e de sua zona costeira**, Brasília, 1998.

REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B., TUNDISI, J. G., “Hidreletricidade”, In: Kelman, J.; Pereira, M. V. F., Araújo Neto, T. A.; *et al.*, **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**, 3 ed., São Paulo, Escrituras Editora, 2006, p 748.

REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B., TUNDISI, J. G., “A reforma institucional do poder de recursos hídricos”, In: Braga, B., Flecha, R., Pena, D. S.; *et al.*, **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**, 3 ed., São Paulo, Escrituras Editora, 2006.

REZENDE, L. P., **Dano moral & licenciamento ambiental de barragens hidrelétricas**, 5ª ed., Curitiba, Juruá Editora, 2006, 138p.

REZENDE, L. P., **Avanços e contradições do licenciamento ambiental de barragens hidrelétricas**, 1 ed., Belo Horizonte, Editora Fórum, 2007, p 269.

RIBEIRO, L. F., Alterações da paisagem em margens de curso d'água: os casos do rio São Francisco e Paramopama, Sergipe, Tese de D.Sc., Universidade Federal de Sergipe, Sergipe, 2008. p 109.

ROCHA, I. P., Relação entre a erosão marginal, atributos físicos do solo e variáveis hidrológicas e climáticas no baixo São Francisco sergipano, Dissertação de M.Sc., Universidade Federal de Sergipe, Sergipe, 2009. p 64.

ROTHMAN, F.D.*et al.*, Projeto de Pesquisa Análise Interdisciplinar da Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) no Licenciamento Ambiental de Usinas Hidrelétricas na Zona da Mata de Minas Gerais: alcance e limitações, 1999.

SANTOS, C. M. dos, **A erosão no Baixo São Francisco Sergipano e os mecanismos de desmobilização dos taludes na margem do rio**, Dissertação de M.Sc., Universidade Federal de Serviço, 2002.

SANTOS, E. S., **Aplicação de marcadores geoquímicos para a avaliação dos impactos das barragens nos sedimentos do estuário do Rio São Francisco (AL/SE)**, Tese de D.Sc., Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2007.

SANTOS JÚNIOR, R. C., MEDEIROS, P.R.P., KNOPPERS, B.A., Comportamento do material em suspensão na zona de mistura do estuário do rio São Francisco (AL/SE), Brasil, In: **XII Congresso Latino-Americano de Ciências do Mar – XII COLACMAR**, Florianópolis, abril, 2007.

SEGUNDO, G.H.C., **Caracterização Hidrodinâmica-Sedimentológica do estuário e delta do Rio São Francisco**, Dissertação de M;Sc., Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2001.

SHIELDS, A., Anwendung der ahnlichkeitsmechanik und turbulenzforschung auf die geschiebebewegung. Mitteil. Preuss. Versuchsanst Wasser, Erd, Schiffsbau, Berlin, n.26, 1936.

SOUZA, W.F.L., & KNOPPERS, B., “Fluxos de águas e sedimentos a costa leste do Brasil: Relação entre a tipologia e as pressões antrópicas”, **Geochim. Brasil**, v.17, n. 1, pp 057-074, 2003.

SUVALE, **Baixo São Francisco Informações Gerais**, Brasília, 1973.

TUCCI, C. E. M., **Hidrologia, ciência e aplicação**, 2 ed., Porto Alegre, 2001, p 939.

TUNDISI, J. G., **Água no Século XXI: Enfrentando a escassez**, 1 ed., São Carlos, RiMa, 2003, p 248.

VANONI, V.A, **Hidrossedimentologia prática**, 2 ed, Rio de Janeiro, Interciência, 2008, p 593.