



Revista Brasileira de Geomorfologia - Ano 8, nº 2 (2007)

ANÁLISE MULTITEMPORAL E CARACTERIZAÇÃO DOS PROCESSOS EROSIVOS NO BAIXO SÃO FRANCISCO SERGIPANO

Francisco Sandro Rodrigues Holanda

*Universidade Federal de Sergipe - Departamento de Engenharia Agrônômica - Laboratório de Erosão e Sedimentação
Av. Marechal Rondon s/n, Jardim Rosa Elze, 49100-000, São Cristovão, SE
fholanda@infonet.com.br*

Cícero Marques dos Santos; Ana Patrícia Barreto Casado

*CEFET-SE - Av. Gentil Tavares 1166 - Coordenadoria de Meio Ambiente, Getúlio Vargas, 49055260 - Aracaju, SE
cmarquesan@gmail.com; apbcasado@bol.com.br*

Arilmara Abade Bandeira

*Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, SENAI
arilmara@se.senai.br*

Vandemberg Salvador de Oliveira

*Escola Agrotécnica Federal de Senhor do Bonfim - EAFSB. Estrada da Igara km 04, Zona Rural, 49870-000 - Senhor do Bonfim, BA
vandemberg@ufs.br*

Luiz Carlos da Silveira Fontes

*Universidade Federal de Sergipe, UFS, Núcleo de Geologia
luizfontes@gmail.com*

Igor Pinheiro da Rocha

*Universidade Federal de Sergipe, UFS, Núcleo de Estudos em Recursos Naturais, NEREN
rochaigor@hotmail.com*

Renisson Neponuceno de Araújo Filho; Suzilane Santos Góis; Thiago Roberto Soares Vieira

*Universidade Federal de Sergipe - Departamento de Engenharia Agrônômica - Laboratório de Erosão e Sedimentação
Av. Marechal Rondon s/n, Jardim Rosa Elze, 49100-000, São Cristovão, SE
renisson@ufs.br; suzilane_gois@hotmail.com; albaz_floresta@yahoo.com.br*

Resumo

A erosão das margens do baixo curso do rio São Francisco é uma das causas mais visíveis das alterações na dinâmica do sistema fluvial e se destaca pela sua amplitude, ampla distribuição e conseqüências sócio-econômicas. O objetivo desse trabalho foi apresentar uma análise multitemporal dos processos erosivos no baixo curso do rio São Francisco, à jusante da UHE Xingo. Foram realizados estudos do comportamento dos taludes marginais a partir da instrumentação em seções localizadas no Perímetro Irrigado Cotínguiba Pindoba, localizado no município de Própria, Estado de Sergipe, assim como caracterização da erosão na margem do rio até a sua foz. Os métodos de investigação utilizados foram levantamentos e observações diretas no

campo, e análise dos dados hidrológicos e sedimentológicos primários. A variação das taxas de erosão ocorreu em função da localização das seções monitoradas, da composição granulométrica do solo dos taludes, da altura, da ação dos ventos, da velocidade do fluxo próximo à margem e do fluxo hidráulico nos taludes, direcionado do solo para o rio. A análise das causas imediatas e dos fatores intervenientes na erosão marginal revelou que o recuo das margens é o resultado de um fenômeno complexo, que envolve processos diretamente relacionados à dinâmica do canal e ao comportamento geotécnico da margem fluvial. O recuo também está relacionado às oscilações artificiais promovidas pela operação das barragens a montante de Xingó, que estabeleceram um novo regime hidrosedimentológico e induziram um novo comportamento morfodinâmico para o rio.

Palavras-chave: erosão marginal, rio São Francisco, recuo da margem.

Abstract

Bank erosion in the Lower São Francisco is one of the most cause of the changes in the fluvial dynamic system, and important due to its amplitude, broad distribution and socio-economic consequences. The objective of this work was to process a multitemporal analysis and characterization of the bank-erosion in the Lower São Francisco river margin, downstream from Xingó dam. Studies related to the behavior of the river's banks from sites instrumentation were conducted at Cotinguiba Pindoba Irrigated area, located at the municipality of Propriá, in Sergipe state, and also the characterization of the bank erosion toward the mouth of the river. The research techniques were composed by field survey and direct observations of hydrological and sedimentological primary data analysis. Erosion rate variation was identified as a function of sampling sites localization, bank soil texture, bank height, water waves, water flux speed near the margin and also due to the bank's hydraulic flux, from the soil toward the river. The causes analysis and the intervenient factors on the erosion, has revealed that the margin retreat can be regarded to a very complex phenomenon, involving simultaneously the dynamic of the river channel and processes related to the geotechnical behavior. It was also found that the main channel in the Lower Sao Francisco River has experienced morphohydrological adjustments as a result of environmental impacts caused by power plants operation upstream from Xingó.

Keywords: river-bank erosion, São Francisco river, margin retreat.

1. Introdução

Os estudos sobre erosão marginal assumem um papel muito importante uma vez que são registrados prejuízos financeiros e impactos sociais negativos representados pela perda de terrenos cultiváveis em áreas agrícolas, desvalorização das terras ribeirinhas, comprometimento ou destruição de estruturas de engenharia próximas ao leito do canal fluvial (estradas, pontes, barragens, diques, casas, etc.), aumento de custo de projetos de irrigação e contribuição ao assoreamento do canal, etc. (Walker, 1999). A erosão das margens dos cursos d'água é uma das manifestações mais visíveis do complexo reajuste da morfologia do canal em busca de um novo equilíbrio dinâmico do sistema fluvial que promove a escavação na base da margem côncava, onde a velocidade é maior, e de deposição na parte convexa (Christofolletti, 1981; Guerra e Cunha, 2003). Os processos erosivos ocorrem quando a resultante de todas as forças atuantes sobre o material erodível excede o resultado efetivo de todas as forças que tendem a conservar o material no próprio local (Simons, 1982).

A erosão marginal no Baixo São Francisco se apresenta bastante acelerada, alterando a paisagem e avançando em

direção aos lotes dos Perímetros Irrigados Cotinguiba-Pindoba e Betume, localizados nos Municípios de Propriá e Neópolis, respectivamente, no Estado de Sergipe. As conseqüências para as populações ribeirinhas se apresentam na diminuição das suas áreas agricultáveis, restrição do lazer, além da ocorrência de problemas para o acesso ao seu leito, por criar dificuldades à navegação, em razão do conseqüente assoreamento da calha do rio (Holanda et al., 2005).

Os reservatórios existentes à montante da região do Baixo São Francisco têm causado a modificação do regime fluvial e da carga de sólidos em suspensão, que, aliados as oscilações da maré, alteraram o equilíbrio morfológico que existia naquele trecho do rio. Conseqüentemente, o regime de escoamento 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, o que vem sendo observado em toda região do Baixo São Francisco (Casado et al, 2002).

Uma das formas que o rio encontra para retornar ao equilíbrio anterior refere-se à intensa erosão das margens,

assim como, à mudança na topografia do fundo do leito (Guerra e Cunha, 2000), ocorrendo o deslocamento de grandes volumes de massa de solos. Os movimentos de massa envolvem um volume de solo ou rocha que se desloca em conjunto, aliado à força da gravidade (Penteado, 1983; Maciel Filho, 1997).

Os termos corrasão, desmoronamento e escorregamento rotacional são utilizados para descrever os movimentos de massa que envolvem o processo de erosão marginal e estão relacionados com a lenta remoção, grão a grão, dos sedimentos que compõem o barranco (Fernandez, 1995). Weigel & Hagerty (1983) relatam que outros importantes mecanismos que causam colapso do talude são a saturação durante a inundação e a rápida queda no nível de água no rio causada pelo recuo da inundação.

Os desmoronamentos são movimentos de massa rápidos com a queda livre de blocos por ação da gravidade a partir de uma elevação, com ausência de superfície de movimentação, podendo haver tanto a queda isolada de um bloco como o colapso de enormes complexos rochosos. (Guidicini & Nieble, 2003). Pode ocorrer o desmoronamento por cisalhamento, quando o bloco, devido ao solapamento da base, desmorona, seguindo um plano vertical, promovido pelo excesso de peso, e desmoronamento por basculamento, quando o bloco de terra perde o equilíbrio e desmorona sem um prévio solapamento, acompanhado pela formação de fendas (Fernandez & Fulfaro, 1993).

Procurando compreender o desencadeamento e a evolução da erosão na margem do rio, este trabalho teve como objetivo apresentar uma análise multitemporal dos processos erosivos no baixo curso do rio São Francisco, à jusante da UHE Xingó.

2. Material e Métodos

Caracterização da Área de Estudo

O rio São Francisco tem uma extensão de aproximadamente 2.700 km, dividindo-se em quatro trechos: o Alto, o Médio, o Sub-médio e o Baixo São Francisco (BSF). No seu baixo curso, promove a divisa entre os Estados de Bahia e Pernambuco e de Alagoas e Sergipe, percorrendo um total de 274 km, com diminuição de altitude de 220 m em 40 km, para alcançar a baixa planície do litoral, quando flui para o oceano (CODEVASF, 2001). A área estudada compreende trechos no baixo curso do rio São Francisco, que corresponde ao Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba, além de um trecho com extensão aproximada de 40 km e largura superior a 500 metros, desde a cidade de Propriá até a foz do rio.

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 feverei-

ro/março (SEPLANTEC, 1997). O clima na região é megatérmico semi-árido brando, com temperatura média anual de 26 °C e período chuvoso compreendendo os meses de março a agosto, com precipitação média anual de 806,1 mm/ano (SEPLAN, 1979).

Segundo Santos et al. (1998), o substrato rochoso da faixa cortada pelo rio São Francisco, entre os Municípios de Propriá e a foz do rio é formado por granitóides do tipo Propriá e pelas formações Bananeiras (do Jurássico) e Serraria (da idade neojurássica e eocretácica) pertencentes ao grupo Perucaba; Barra Itiúba e Penedo (Cretácio inferior), ambas do grupo Coruripe. Essas formações são unidades da Bacia Sedimentar Sergipe Alagoas, recobertas ao longo da margem direita do rio, por sedimentos superficiais recentes inconsolidados (coberturas Quaternárias Holocênicas) e, em alguns locais, por sedimentos Terciários do Grupo Barreiras, que formam os platôs ligeiramente inclinados em direção à costa.

De acordo com SEPLAN-SUPES (1989) e SEPLANTEC (1997) a geomorfologia do município de Propriá possui um relevo dissecado dos tipos colina e tabular e planície fluvial. Aprofundamento de drenagem variando de muito fraca a fraca e extensão máxima de suas formas de 750 m. Suas coberturas fanerozóicas são quaternário: QI, QFL; terciário: TB; cretáceo: KBI, KPO; permiano: PA; carbonífero: CBB, CBM e complexo cristalino proterozóico: PUPF; rochas graníticas: PGGD. Com a aproximação da foz identificam-se planícies fluviais e fluvio-marinhas, relevo dissecado do tipo tabular, aprofundamento de drenagem fraca e extensão máxima de suas formas menor ou igual a 250 m. Possui coberturas fanerozóicas quaternário: QT2; Grande planície fluvio-marinha com coberturas fanerozóicas quaternário: QPM, QFL.

A classe de solo dominante na margem do rio, em todo trecho sedimentar, é o NEOSSOLO FLÚVICO, conforme classificação da EMBRAPA (1999), com granulometria composta em mais de 90% por areia média, fina e muito fina, de muito baixa coesão e baixa resistência ao cisalhamento (Casado et al., 2002).

Coleta de dados no campo

Foram realizados deslocamentos em embarcações ao longo do rio, percurso com veículo nas estradas ribeirinhas, além de caminhadas ao longo da margem do rio em inúmeras campanhas de campo, em diferentes épocas para abranger as mais variadas condições climáticas e hidrológicas, com as seguintes atividades: (a) descrição e mensuração das características dos focos de erosão; (b) instrumentação dos taludes; e (c) observações qualitativas visando identificar e descrever as variáveis atuantes, os processos de erosão marginal e de recuo do talude marginal e o grau relativo de importância de cada um deles.

A avaliação multitemporal considerou dados levantados por Casado (2000), Santos (2002), Fontes (2002), Bandeira (2005) e Oliveira (2006) em trabalhos realizados pelo Grupo de Pesquisa em Gestão Hidroambiental do Baixo São Francisco.

As atividades de campo foram realizadas entre fevereiro de 1999 e dezembro de 2005 e constaram de 41 levantamentos topográficos, 12 sondagens a trado, investigações expeditas e instrumentação dos taludes. Foram realizados levantamentos planialtimétricos para a medição da linha de recuo, a determinação da altura e o traçado dos taludes, com teodolito e estação total.

As sondagens a trado constaram de uma perfuração manual de pequeno diâmetro, executada de acordo com a norma ABNT NBR 9603, com trado tipo cunha, utilizado para investigação de solo de baixa a média resistência ao nível de reconhecimento para profundidades de até 7,0 m. Essas sondagens permitiram uma rápida perfilagem do material atravessado, retirada de amostras deformadas para a realização dos ensaios de laboratório e melhor conhecimento da estratigrafia do terreno.

Cálculo do volume de material erodido

Para a instrumentação dos taludes foram escolhidos três trechos na margem do rio denominadas de Trechos 1, 2 e 3 (Figura 1). Esses trechos já vinham sendo monitorados em estudos iniciados por Casado (2000). A partir dos recuos registrados foi calculada a erosão média de cada trecho, com o objetivo de se conhecer o volume total de material erodido. O volume aproximado de material erodido para cada trecho da margem estudada foi calculado usando a seguinte fórmula (Fernandez, 1990):

$$ME = H \cdot E_r \cdot E_m \quad (1)$$

Onde:

ME: volume de material erodido (m³/ano);

H: altura da margem (m);

E_r: erosão média anual (m/ano);

E_m: extensão lateral instrumentada (m).

Instrumentação dos Taludes

A instrumentação dos taludes foi necessária para a identificação dos agentes, causas e condicionantes que atuam no processo de instabilização existente ou potencial, para a obtenção de dados de superfície e de subsolo, bem como os movimentos de massa observados nos taludes. A caracterização geotécnica necessária para a identificação dos agentes, causas e condicionantes que atuam no processo de instabilização envolveram planejamento, levantamento de dados já existentes, investigação de superfície, com vistoria

na área de estudo, levantamentos geológico-geotécnicos, topográficos e fotogramétricos, além de realização de ensaios em laboratório.

Análise da Estabilidade dos Taludes

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. Buscou-se verificar a condição de segurança dos taludes estudados (Trechos 1, 2 e 3) (Figura 1). O FS é resultante do quociente de forças resistentes e forças atuantes, tratando-se de um método iterativo. Com essas definições, considera-se que um talude é instável para valores de FS inferiores à unidade. O cálculo utilizado para a obtenção dos dados de estabilidade dos taludes neste trabalho foi o de BISHOP/JANBU, utilizando o aplicativo XSTABL, o qual possibilita a análise de solos heterogêneos e com posição variável de nível de água (Bishop, 1955; Aranha et al., 2006). O método de análise consistiu em arbitrar uma superfície circular, com raio e centro definidos. O aplicativo permite calcular o FS de uma superfície pré-estabelecida bem como procurar a superfície crítica dentro de uma faixa a ser estudada. O FS foi determinado pela seguinte expressão:

$$FS = \left(\frac{1}{\sum W \sin \alpha} \right) \cdot \frac{\sum [c \cdot b + (W - u \cdot b) \tan \phi]}{m_\alpha} \quad (2)$$

$$m_\alpha = \cos \alpha \left(1 + \tan \alpha \cdot \frac{\tan \phi}{FS} \right) \quad (3)$$

Onde:

W = $\gamma \cdot h \cdot b$ = peso da fatia

u = u/l = poropressão na base

h = altura da fatia

H = altura do talude

α = inclinação da base da fatia

i = inclinação do talude

c = coesão do solo

ϕ = ângulo de atrito do solo

Sua análise foi realizada através do método de equilíbrio limite, (FS = 1). Os materiais das camadas do solo, envolvidos na ruptura, são normalmente caracterizados pela sua resistência ao cisalhamento de Mohr-Coulomb.

3. Resultados e Discussão

Uma das principais causas da erosão das margens do BSF é o fluxo e refluxo entre o aquífero e a calha do rio durante

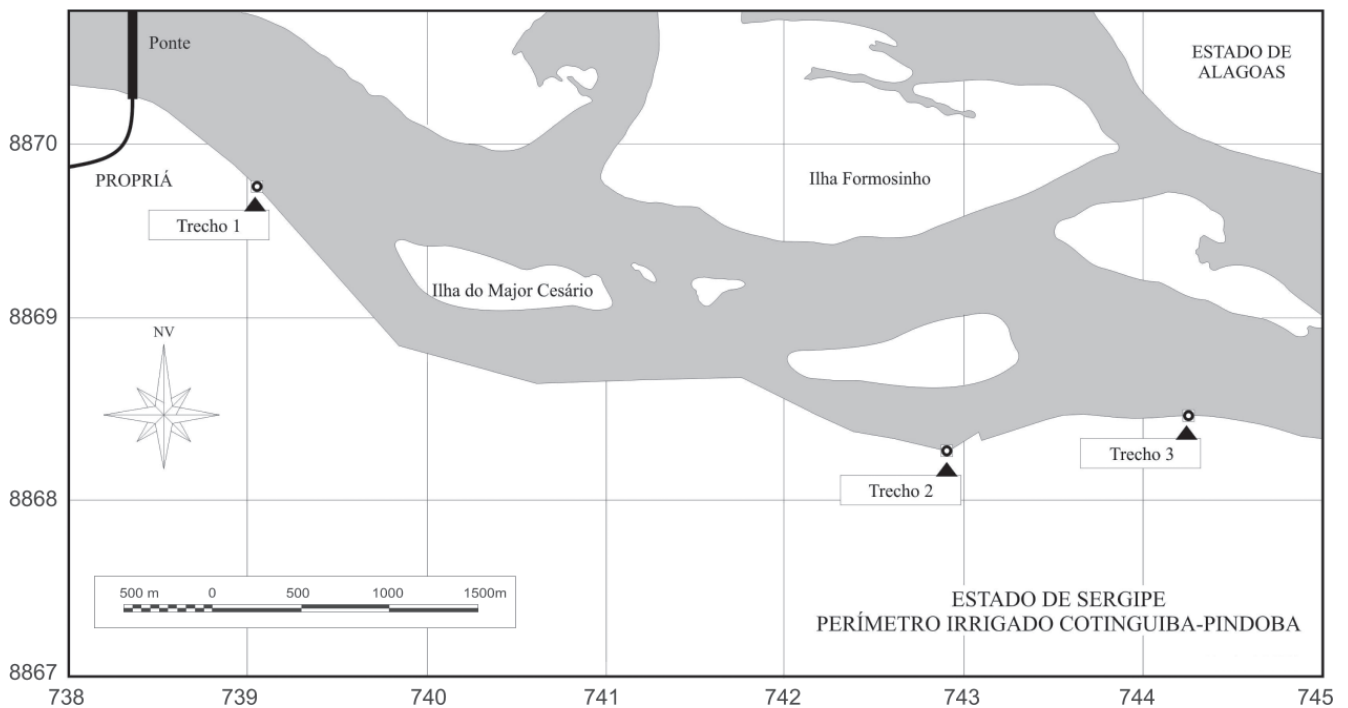


Figura 1. Trechos instrumentados para estudo da erosão marginal.

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 frequentes 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).

De acordo com Fontes (2002), ocorre uma pequena variação sazonal das vazões que se traduzem em variações centimétricas diárias no nível de água do rio ao longo do ano, que embora estejam muito aquém dos valores anteriormente alcançados durante os períodos das enchentes, contribuem para a ocorrência da erosão marginal ao produzir marés artificiais.

Classificação das margens do BSF

O BSF apresenta três classes de margens: margens em erosão, margens em acreção e margens estáveis.

Margens em erosão são aquelas que apresentam evidências de estarem sendo submetidas atualmente à atuação significativa de processos erosivos acelerados, apresentam

recuos constantes e formam barrancos com faces quase verticais (também aqui referidos como taludes marginais ou barrancos). As mais frequentes ocorrem na área do Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba, onde foram implantados os sítios de monitoramento da erosão no BSF.

As margens estáveis são constituídas por sedimentos fluviais, litorâneos ou por afloramentos de rochas sedimentares da Bacia Sergipe-Alagoas, principalmente por folhelhos da Formação Barra do Itiúba, e arenitos e folhelhos da Formação Penedo, identificadas em largas extensões da margem do rio na região de Neópolis. É comum o desenvolvimento de plantas aquáticas na base dessas margens.

Margens em acreção são aquelas em que a taxa de deposição supera a taxa de erosão, resultando na formação de depósitos fluviais recentes, seja na forma de praias fluviais ou na forma de barras laterais. As barras laterais, arenosas e móveis, com o tempo têm evoluído para ilhas fixas e vegetadas e terminam por se anexar à margem do rio. Ocorrem nos trechos em que é possível identificar um canal de padrão anastomosado, bem característico da área estudada.

Estabilidade das margens

Foi realizada uma avaliação quantitativa da estabilidade, buscando fornecer informação útil como base para uma melhor compreensão do comportamento e da sensibilidade do talude. Neste tipo de análise foi considerado que a super-

fície de ruptura é previamente conhecida ou arbitrada; e que a massa de solo encontra-se em condições iminentes de ruptura generalizada, isto é, equilíbrio-limite (FS = 1).

Foram estudados os taludes nos três trechos 1, 2 e 3, e em cada trecho foram realizadas análises de estabilidade, para duas condições de níveis de água no solo. A primeira condição de análise correspondeu ao nível mínimo do lençol freático registrado no trecho correspondente (Tabela 1) e a segunda, para a condição de nível máximo do lençol freático. Em cada análise foi encontrado um FS mínimo.

Excepcionalmente, no talude do trecho 1, a estabilidade foi verificada para duas situações de geometria. A primeira para o caso do talude no seu estado natural, ou seja, antes do retaludamento que resultou na diminuição da sua inclinação pelo uso de tratores. Os principais dados de entrada para a análise de estabilidade foram: topografia; geologia; características do material das camadas do solo e água subterrânea.

Os mecanismos de instabilização dos taludes propostos neste trabalho foram formulados a partir da observação do comportamento diferenciado das camadas componentes dos taludes, em relação ao processo erosivo na margem do rio.

De forma resumida e esquemática, são mostrados na Figura 2 os processos instabilizadores e as formas com que a erosão se manifesta nos taludes marginais do Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba.

Em todos os trechos instrumentados (1, 2 e 3), o movimento de massa predominante foi a corrasão lateral, realizado principalmente pelo solapamento da base do talude nas margens côncavas do rio. Neste caso, ocorre uma lenta remoção, grão a grão, dos sedimentos que compõem a base do barranco. Ocorreram também pequenos desmoronamentos na face desprotegida dos taludes, causados pela ação dos ventos. Nos trechos 2 e 3, ocorreu o desmoronamento por basculamento de uma pequena escarpa que se formou, com o retaludamento, no topo dos barrancos, e que, com a ausência

Tabela 1. Classificação da estabilidade dos taludes nos trechos 1, 2 e 3.

Trecho	Fator de Segurança (FS)	Estabilidade
1 (antes do retaludamento)	0,453	Instável
	0,473	
1 (após o retaludamento)	1,256	Estável
	1,306	
2	0,660	Instável
	0,667	
3	0,975	Instável

de vegetação, tiveram sua superfície exposta ao vento e à luz do sol, facilitando a perda de umidade do solo e a ação da gravidade, permitindo que suas partículas, com baixa coesão, fossem removidas mais rapidamente. Segundo Fernandez & Fulfaro (1993), o desmoronamento por basculamento ocorre quando o bloco de solo perde o equilíbrio e desmorona sem um prévio solapamento, acompanhado pela formação de fendas que podem ser originadas da contração do material que compõe o talude. Também nos taludes, próximo aos trechos instrumentados, foi possível perceber que com o solapamento da base do barranco, o material que compõe o talude é carregado, tornando-o instável. Ocorrendo, 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. A superfície de ruptura passa por onde a resistência ao cisalhamento do solo é mobilizada pelos esforços cisalhantes.

Recuo da Margem

Considerando os dados apresentados por Casado (2000) é possível afirmar que o recuo da margem em função da erosão variou dependendo do trecho e do mês monitorado, estando condicionado às características do barranco em cada ponto da margem e a intensidade dos eventos hidrológicos e climáticos em cada época do ano.

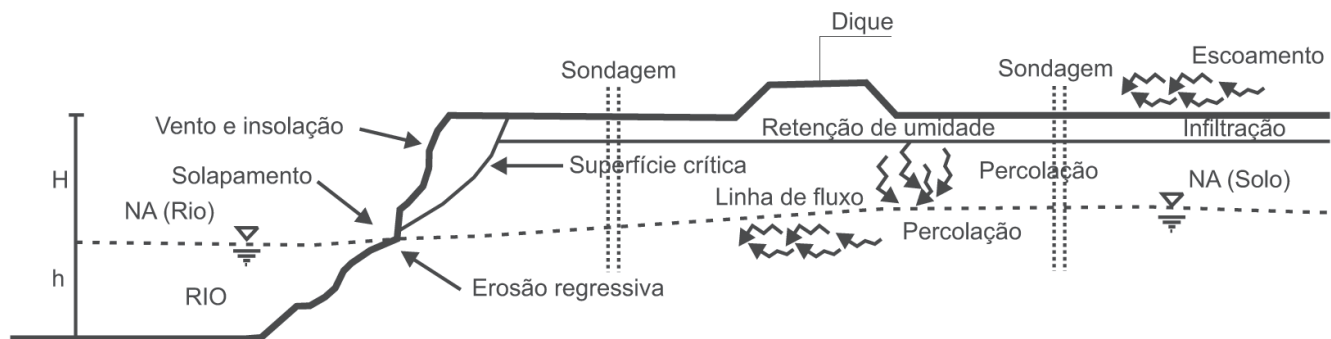


Figura 2. Representação esquemática dos principais mecanismos de desestabilização dos taludes marginais estudados no Baixo São Francisco.

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. Foi observado que nos trechos onde o embate ocorre perpendicularmente são originados grandes desmoronamentos, provocando o rápido recuo da linha de margem, e quando a corrente é paralela, predominam os pequenos desmoronamentos, gerando recuos menores.

A erosão marginal também depende da magnitude dos eventos climáticos, principalmente a intensidade do vento e dos eventos hidrológicos, como a variação da vazão, no BSF, mesmo considerando que se trata de um rio com vazão regularizada. Também esta condicionada à variação da cota e a velocidade do fluxo. Isso, associado às características do barranco em cada ponto, fez com que o recuo da margem fosse maior em determinados meses do ano (Tabela 2).

Santos (2002) observou o recuo da margem correspondente a 9,47 m no trecho 1, 38,66 m no trecho 2 e 3,70 m no trecho 3 durante o período de dezembro de 1999 a outubro de 2001. Isso possibilita afirmar que, neste período de tempo, os fatores que atuaram sobre cada um dos taludes foram os mesmos, porém as características inerentes a cada um dos barrancos, facilitando ou dificultando a erosão, foram

Tabela 2. Recuo mensal e anual da margem sergipana do rio São Francisco nos três trechos monitorados no período de fevereiro de 1999 a janeiro de 2000.

Mês	Trecho 1	Trecho 2	Trecho 3
Fevereiro	0,00	0,18	0,00
Março	0,00	0,18	0,03
Abril	0,00	5,11	0,13
Mai	4,33	1,33	0,34
Junho	0,86	0,00	0,08
Julho	0,05	4,38	0,08
Agosto	0,40	3,41	0,00
Setembro	0,25	4,54	0,00
Outubro	0,00	0,14	0,00
Novembro	0,00	4,73	0,00
Dezembro	0,00	3,81	1,79
Janeiro	1,41	5,49	0,00
Total	7,30	33,30	2,45

responsáveis por esse comportamento. Em toda a extensão do Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba afetado pela erosão o volume erodido total estimado foi de 201.231,00 m³.

Oliveira (2006) constatou que o recuo da margem é variável, com valores entre 309,15 m (maior distância) e 12,26 m (menor distância) em um período de 30 anos. Esta variabilidade observada nas distâncias do recuo está relacionada à morfometria do canal, a declividade e o tipo de solo da margem (coesivo ou incoesivo) e a ausência de vegetação ciliar. No ponto de maior recuo da margem (309,15 m), além da proximidade com o eixo do rio, o barranco encontra-se exposto, sem cobertura vegetal e a declividade é superior a 60%. Considerando que uma declividade superior a 30% compõe uma categoria muito forte e suscetível a erosão (Ross, 1996), a margem neste ponto, pode ser classificada como de altíssima fragilidade, com média anual do recuo de 12,36 m e mensal de 1,03 m. Vale destacar que Oliveira (2006) apresenta na Figura 3, o recuo da margem referente ao período de 1975 a 2005.

Os dados sugerem que as maiores taxas de recuo da margem estão relacionadas com a composição granulométrica do barranco que apresenta maiores porcentagens de material arenoso e menores porcentagens de silte e argila e com a altura do barranco, pois constatou-se que nos mais altos ocorreram maiores taxas de erosão.

Volume de material erodido

Casado (2000) mostra valores de volume do material erodido nos trechos segundo metodologia de Fernandez (1990), no período de fevereiro de 1999 a janeiro de 2000. O trecho 1 apresentou um valor de 456,40 m³, o trecho 2 de 2.541,46 m³ e o trecho 3 de 114,95 m³. Para o cálculo do volume erodido foi usada a altura média do barranco e o valor de 12 (doze) metros de extensão lateral da área monitorada (Tabela 3).

Santos (2002) calculou que o volume total de material erodido no trecho 1 foi de 542,00 m³, no trecho 2 de 6.678,40

Tabela 3. Médias mensais do volume erodido nos trechos em estudo em m³/mês.

Trecho	Fev/1999 a Jan/2000*	Dez/1999 a Out/2001**	Mar/2004 a Fev/2005***	Jul/2005 a Dez/2005****
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)

** Santos (2002)

*** Bandeira (2005)

**** Oliveira (2006)

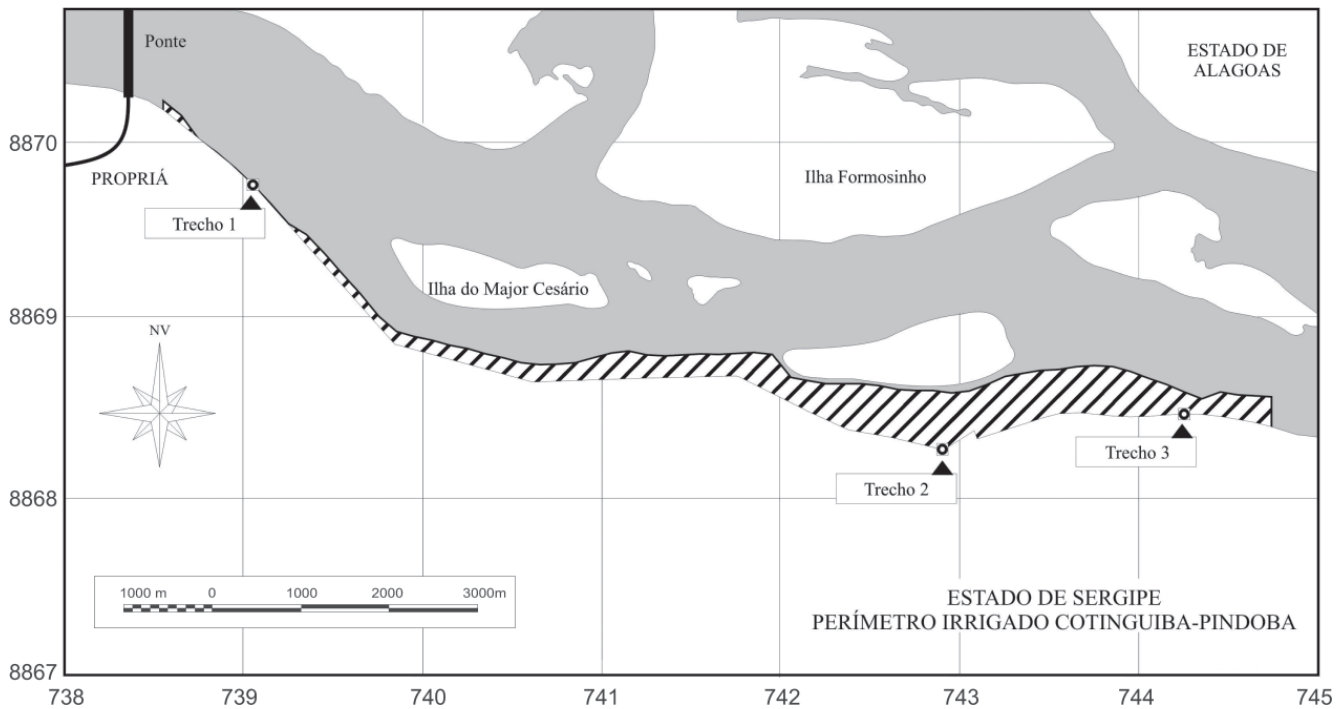


Figura 3. Mapa do recuo da linha de margem e localização dos sítios experimentais (Período de 1975 a 2005).

m³ e no trecho 3 de 281,20 m³, no período de dezembro de 1999 a outubro de 2001. No trecho 1, ocorreu ação antrópica com a utilização de máquinas para suavização do talude para posterior enrocamento, promovendo uma eventual desaceleração no processo erosivo nesta seção. Nessa situação, o talude ganhou uma nova feição, diminuindo a possibilidade, mesmo que eventual de novos desmoronamentos e, conseqüentemente levando a apresentação de erosão com intensidade menor do que o esperado, sem tais alterações.

De acordo com Bandeira (2005), os resultados confirmaram o maior volume de terra erodida para o trecho 2, apresentando maior taxa de erosão (médias mensal de 2,0 m e anual de 24 m), possivelmente por ser a base do barranco constituída por um material arenoso (95,31 % de areia). A ação das ondas provocou o solapamento da base, ocasionando o desmoronamento do material da margem do rio. A erosão no trecho 3, na época dos levantamentos realizados por Casado (2000) e Santos (2002), se deu, em razão do maior aprofundamento do canal e da aproximação do talveg à margem, provocando o solapamento da base do talude e posteriores desmoronamentos. As variações identificadas nos trechos 1 e 2, possivelmente devem estar relacionadas com a ocorrência de cheias no período de coleta de dados por Bandeira (2005), que contribuíram sensivelmente para relevantes alterações nas características morfológicas dos taludes marginais.

Oliveira (2006) apresenta o trecho 1, com as seguintes características morfométricas: altura do barranco 4,03 m, declividade média 40,95% e largura média 10,02 m, com volume de material erodido foi 175,70m³. O barranco neste trecho apresenta 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 ocorre progressiva e abruptamente, por solapamento da base, com grande movimento de massa caracterizado por desmoronamento de grandes blocos. No segundo trecho, não foi possível coleta de dados de erosão no período de julho a dezembro de 2005, pois o mesmo estava em fase de preparação para a implantação do enrocamento. O trecho 3 apresentou as seguintes características morfométricas: altura do barranco 2,63 m, declividade de 43,03% e largura média 6,34 m. O volume de material erodido foi de 165,40 m³. Este trecho da margem do rio é formado por um misto de camadas com material mais coesivo (silte e argila) e incoesivo (areia), tão característico da variabilidade vertical identificada nos Neossolos Flúvicos, tendo sua cobertura vegetal dominada por gramíneas, apresentando o menor volume de material erodido entre os trechos monitorados no período de julho a dezembro de 2005.

4. Conclusões

1) Os resultados obtidos na caracterização morfométrica efetuada nos três trechos avaliados, orientam que em função

das características geotécnicas de cada trecho monitorado, há uma variação no volume de material erodido e que o processo erosivo atua de forma diferenciada no tempo e no espaço.

2) A pouca variação do nível d'água devido à regularização da vazão faz com que exista uma faixa de solo onde as ondas entram em choque com a base do talude por longos períodos, provocando o solapamento, desagregação e arraste do material de base e ponto de confluência ou afloramento do fluxo de água subterrânea na interface do talude entre o rio e o aquífero.

3) A estabilidade dos taludes marginais, determinada pelo método BISHOP/JANBU, medido pelo fator de segurança FS, mostrou que os taludes nas condições naturais foram considerados instáveis e, portanto, vulneráveis aos processos erosivos;

4) Os mecanismos mais atuantes do processo erosivo na desestabilização dos taludes marginais, foram a inversão do fluxo hidráulico na direção do solo para o rio (erosão regressiva) e o choque das ondas, ambos atuando na base dos taludes;

5) O volume de terra erodido é bastante representativo com a constatação da rapidez com que o processo erosivo ocorre, causando danos econômicos, sociais e ambientais à região, uma vez que o material erodido é proveniente de áreas irrigadas ou ocupadas por outra atividade econômica, sendo carregado para o canal do rio, causando sérios problemas de assoreamento, e assim promovendo a formação de extensos bancos de areia, além de deslocamento do canal principal para a margem sergipana.

Referências Bibliográficas

- Aranha, P.R.A.; Parizzi, M.G.; Sobreira, F.G.; Galvão, T.C. de Brito & Beirigo, E.A. (2006) Aplicação do GPR na análise da estabilidade de taludes na região metropolitana de Belo Horizonte. *Revista de Geologia*. Fortaleza, 19 (1): 87-98.
- Bandeira, A.A. (2005) *Evolução do processo erosivo na margem direita do rio São Francisco e eficiência dos enrocamentos no controle da erosão*. 183 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pósgraduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA), Universidade Federal de Sergipe (UFS), São Cristóvão, Sergipe.
- Bishop, A.W. (1955) The Use of Slip Circle In: Stability analysis of slopes. *Geotechnique*, 5 (1): 7-17.
- Casado, A.P.B. (2000) *Estudo do processo erosivo na margem direita do rio São Francisco: Perímetro irrigado Cotinguiba/Pindoba Baixo São Francisco Sergipano*. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA), Universidade Federal de Sergipe (UFS), São Cristóvão, Sergipe.
- Casado, A.P.B.; Holanda, F.S.R.; Araujo Filho, F.A.G. & Yaguiu, P. (2002) Bank erosion evolution in São Francisco River. Viçosa, Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, (26):231-239.
- CODEVASF – Companhia do Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba. (2001) *Baixo São Francisco Sergipano: Estudo Interdisciplinar das subbacias hidrográficas*. Aracaju: CODEVASF. CD-ROM.
- Christofolletti, A. (1981) *Geomorfologia fluvial. Volume I – O canal fluvial*. São Paulo: Edgard Blücher, 313p.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (1999) *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Brasília: Embrapa produção de informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 412p.
- Fernandez, O.V.Q. (1990) *Mudanças no canal Fluvial do rio Paraná e processos de erosão nas margens: região de Porto Rico, PR*. 86 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Programa de Pós-Graduação em Geociências - Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, São Paulo.
- Fernandez, O.V.Q. (1995) *Erosão marginal no lago da UHE Itaipu (PR)*. Rio Claro (SP): UNESP, 113 p.
- Fernandez, O.V.Q. & Fulfaro, V.J. (1993) Magnitudes e processos da erosão marginal no rio Paraná, trecho de Porto Rico, PR. *Geografia*. Rio Claro, 18:97-114.
- Fontes, L.C.S. (2002) *Erosão marginal associada a impactos ambientais a jusante de grandes barragens: O caso do baixo curso do rio São Francisco*. 321 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA), Universidade Federal de Sergipe (UFS), São Cristóvão, Sergipe.
- Guidicini, G. & Nieble, C.M. (2003) *Estabilidade dos Taludes naturais e de escavação*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 216 p.
- Guerra, A.J.T. & Cunha, S.B. (2000) *Geomorfologia e Meio Ambiente*. 3. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 394 p.
- Guerra, A.J.T. & Cunha, S.B. (Org.). (2003) *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 472 p.

- Holanda, F.S.R.; Santos I.G. da C.; Santos C.M. dos S.; Casado, A.P.B.; Pedrotti, A. (2005) Riparian fragments affected by bank erosion in the Lower São Francisco River, Northeastern Brazil. *Revista Árvore*, 29 (2): 148-152.
- Maciel Filho, C.L. (1997) *Introdução à geologia de engenharia*. 2ª ed. Santa Maria (RS): Editora da UFSM, 284 p.
- Oliveira, A.M. (Coord.). (2003) *Estudo hidrodinâmico-sedimentológico do Baixo São Francisco, estuário e zona costeira adjacente (AL/SE). Relatório Final. Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do São Francisco - GEF São Francisco*. Maceió: ANA/GEF/PNUMA/OEA, 35 p.
- Oliveira, V.S. (2006) *Erosão marginal no Baixo curso do rio São Francisco e seus efeitos nos agroecossistemas*. 64 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pósgraduação em Agroecossistemas, Universidade Federal de Sergipe (UFS), São Cristóvão, Sergipe.
- Penteado, M.M. (1983) *Fundamentos de Geomorfologia*. 3ª ed. Rio de Janeiro: Secretaria de Planejamento da Presidência da República. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 180 p.
- Ross, J.L.S. (1996) Geomorfologia aplicada aos EIAs RIMAs In: CUNHA, S.B. e GUERRA, A.J.T. (org.). *Geomorfologia e Meio Ambiente*. Rio de Janeiro: Ed. Bertrand Brasil, p. 291-336.
- Santos, C.M. (2002) *A erosão no Baixo São Francisco Sergipano e os mecanismos de desestabilização dos taludes na margem do rio*. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA), Universidade Federal de Sergipe (UFS), São Cristóvão, Sergipe.
- Santos, R.A. dos; Martins, A.A.; Neves, J.P. & Leal, R.A. (Orgs.). (1998) *Geologia e Recursos Minerais do Estado de Sergipe*. Brasília: CPRM - CODISE, 156p.
- Simons, D.B. & Li, R.M. (1982) *Engineering Analysis of Fluvial Systems*. Fort Collins, Colorado: Simons, Li & Associates. 1130 p.
- Secretaria de Estado do Planejamento de Sergipe – SEPLAN. (1979) Atlas de Sergipe. Aracaju (SE): SEPLAN/UFS, 180p.
- Secretaria de Estado do Planejamento de Sergipe- SEPLAN. Superintendência de Estudos e Pesquisas - SUPES. (1989) Informações geoeconômicas dos Municípios Sergipanos. Aracaju (SE): SUPES, 150p.
- Secretaria de Estado do Planejamento e da Ciência e Tecnologia - SEPLANTEC (1997). *Perfis municipais*. Aracaju (SE): SEPLANTEC, 75 p.
- Walker, J. (1999) The application of Geomorphology to the management of river-bank erosion. *Journal of Chartered Institution of Water and Environmental Management*, 13(4):297-300.
- Weigel, T.A. & Hagerty, D.J. (1982) Riverbank change – Sixmile Island, Ohio river, USA. *Engineering Geology*, 19 (2): 119-132