



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE



- 1998 -



**LABORATÓRIO DE EROSÃO
E SEDIMENTAÇÃO - DEA/UFS**



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
NÚCLEO DE PÓS-GRADUAÇÃO E ESTUDOS EM RECURSOS NATURAIS**



RELAÇÃO ENTRE A EROSÃO MARGINAL, ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS E CLIMÁTICAS NO BAIXO SÃO FRANCISCO SERGIPANO

IGOR PINHEIRO DA ROCHA

2009



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
NÚCLEO DE PÓS-GRADUAÇÃO E ESTUDOS EM RECURSOS NATURAIS**



IGOR PINHEIRO DA ROCHA

**RELAÇÃO ENTRE A EROÇÃO MARGINAL, ATRIBUTOS
FÍSICOS DO SOLO E VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS E
CLIMÁTICAS NO BAIXO SÃO FRANCISCO SERGIPANO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Sergipe, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Agroecossistemas, área de concentração Sustentabilidade em Agroecossistemas, para obtenção do título de “Mestre”.

Orientador

Prof. Francisco Sandro Rodrigues Holanda

**SÃO CRISTÓVÃO
SERGIPE – BRASIL
2009**

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

R672r Rocha, Igor Pinheiro da
Relação entre a erosão marginal, atributos físicos do solo e variáveis hidrológicas e climáticas no baixo São Francisco sergipano / Igor Pinheiro da Rocha. – São Cristóvão, 2009.
74 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) – Núcleo de Pós-Graduação e Estudos em Recursos Naturais, Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa, Universidade Federal de Sergipe, 2009.

Orientador: Prof. Francisco Sandro Rodrigues Holanda

1. Solos - Erosão. 2. Geomorfologia. 3. Física do solo. 4. Rio São Francisco/SE I. Título.

CDU 551.3.053(813.7 Rio São Francisco)

IGOR PINHEIRO DA ROCHA

**RELAÇÃO ENTRE A EROSÃO MARGINAL, ATRIBUTOS
FÍSICOS DO SOLO E VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS E
CLIMÁTICAS NO BAIXO SÃO FRANCISCO SERGIPANO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Sergipe, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Agroecossistemas, área de concentração Sustentabilidade em Agroecossistemas, para obtenção do título de “Mestre”.

APROVADA em 15 de maio de 2009.

Prof. Dr. Gilson Moura Filho
Universidade Federal de Alagoas

Dr. Marcus Aurélio Soares Cruz
Embrapa Tabuleiros Costeiros

Prof. Dr. Francisco Sandro Rodrigues Holanda
Universidade Federal de Sergipe
(Orientador)

**SÃO CRISTÓVÃO
SERGIPE – BRASIL**

Dedicatória

A minha filha Sophia, quem aguardo ansiosamente e que mesmo sem ter chegado já traz tantas alegrias. Este trabalho é uma brisa de esperança para que você e sua geração possam ter dias felizes.

*Eu sei que vou te amar
Por toda a minha vida eu vou te amar
Em cada despedida eu vou te amar
Desesperadamente, eu sei que vou te amar
E cada verso meu será
Prá te dizer que eu sei que vou te amar
Por toda minha vida.
Tom Jobim*

Agradecimentos

Esta é uma obra construída por vários artífices, a estes quero deixar o meu agradecimento.

A Deus, o arquiteto, que de forma magnífica concebeu o mundo para nós desvendá-lo.

À Universidade Federal de Sergipe, por oportunizar esta caminhada pelas searas do saber com todo deleite e lassidão que este nos traz.

Ao Núcleo de Pós-Graduação e Estudos em Recursos Naturais – NEREN, pelos desafios, inquietações e amizades do curso de mestrado em Agroecossistemas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal – CAPES, pela concessão de uma bolsa de estudos.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa – CNPq, pelo financiamento deste projeto.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, na pessoa de Maria Cristina Costa, por fornecer os dados meteorológicos essenciais ao estudo.

Ao professor Francisco Sandro Rodrigues Holanda, um verdadeiro pai dentro e fora dos tapumes da academia, pela orientação deste trabalho e numerosos exemplos de conduta na tão almejada vida acadêmica.

Aos colegas do Grupo de Pesquisa em Gestão Hidroambiental do Baixo São Francisco, uma grande equipe de operários do saber, sem a qual este trabalho sequer teria sido realizado, quiçá com tanto primor: Thiago Roberto, Renisson Neponuceno, Rogério Chagas, Mykael Bezerra, Karen Viviane, Marcela Battesini, Helber Gualberto, Fagner Góes, Gilberto Silveira, Suzilane Góis, Joel Conceição, Tiago Santos, Luisa Ferreira, Simone Santana, Alysson Santos, Ronildo César, Wellma Santos, Fabrício Macedo, Luciano Sobral e Thiago Tavares.

Aos professores Arisvaldo Mello, Alceu Pedrotti, Genésio Ribeiro e Erinaldo Hilário, pela colaboração intelectual neste trabalho.

Aos Técnicos Laboratoristas Marcus Vinicius (Lab. Água e Solo/DEA), José Willami Santos e Washington Santos (Lab. Geotecnia/DEC), pelo precioso tempo empenhado nas análises, pelo zelo e dedicação a este estudo.

Aos ribeirinhos Sr. Zé de Mano, Sr. Pedro de Luíza, Sr. Bebé, Sr. Orângio e Dona Maria de Lourdes pelo conhecimento e força.

A Júnior e Thiago, meus irmãos, por me compartilharem sua jovialidade.

À minha irmã Alessandra, Marcelo e Marcelinho, pelo carinho.

Aos meus pais, por mais uma vez acreditarem que os sonhos podem ser realizados e pelo incentivo permanente.

À Hertaline, minha esposa, por tornar esta caminhada ainda mais agradável com sua tenra e incondicionalmente amável companhia.

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
CAPÍTULO 1	1
1 Introdução Geral	1
2 Referencial Teórico	5
2.1 Sustentabilidade e Agroecossistemas	5
2.2 A Bacia Hidrográfica do São Francisco	6
2.3 Geomorfologia Fluvial	7
2.4 Efeito do Vento	9
2.5 Atributos Físicos do Solo	11
3 Referências Bibliográficas	14
CAPÍTULO 2: Resistência do solo aos processos erosivos na margem direita do rio São Francisco, no seu Baixo curso	21
1 Resumo	21
2 Abstract	22
3 Introdução	23
4 Materiais e Métodos	26
5 Resultados e Discussão	28
6 Conclusões	37
7 Referências Bibliográficas	38
CAPÍTULO 3: Influência de variáveis climáticas e hidrológicas na ocorrência da erosão marginal do Baixo São Francisco	43
1 Resumo	43
2 Abstract	44
3 Introdução	45
4 Materiais e Métodos	48
4.1 Variáveis determinantes do processo erosivo	51
4.2 Variáveis Hidrológicas	51
4.3 Variáveis Climáticas	52
5 Resultados e Discussão	52
6 Conclusões	60
7 Referências Bibliográficas	61

RESUMO

ROCHA, I. P. Relação entre erosão marginal, atributos físicos do solo e variáveis hidrológicas e climáticas no Baixo São Francisco. 2009. 64p. (Dissertação – Mestrado em Agroecossistemas). Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE.

Em consequência da implantação de grandes projetos hidrelétricos no canal do rio São Francisco, a alteração do regime hídrico no seu baixo curso, tem provocado um avançado processo erosivo em função da vulnerabilidade do solo do talude da margem do rio e do caráter amplificado que algumas variáveis climáticas e hidrológicas. A consequência deste acelerado processo erosivo é traduzida num quadro de insustentabilidade ambiental, econômica e social para a região, devido aos impactos negativos na ictiofauna, navegabilidade, obras civis e redução de área agricultável dos agroecossistemas locais. O objetivo deste trabalho foi verificar a influência dos atributos físicos do solo e o efeito das variáveis hidrológicas e climáticas nos processos erosivos da margem direita do Baixo São Francisco. A partir da realização de ensaios laboratoriais, procurou-se conhecer os principais atributos físicos do solo que compõe o talude da área de estudo, e estabelecer as relações com a vulnerabilidade desse talude à erosão marginal. Séries históricas de variáveis hidrológicas e climáticas foram investigadas a fim de se observar a correlação entre estas variáveis e as taxas de erosão. O principal atributo do solo que contribuiu para sua desagregação foi a composição granulométrica, representada na maior parte, por partículas grosseiras. Foi possível observar que o talude estudado é vulnerável à erosão marginal por não apresentar agregação necessária das suas partículas de solo, que caracterize a estabilidade do mesmo. As precipitações pluviais ocorridas na região pouco contribuíram diretamente para o incremento da erosão marginal, no entanto, esta variável influencia a direção dos ventos. Também se constatou a correlação entre os aumentos da vazão e da velocidade do fluxo com o expressivo aumento da erosão marginal, que, também sofre influência da reorientação da frente de ondas naturais ao se chocar contra o talude marginal.

Palavras-chave: Erosão, Rio São Francisco e Coesão do solo.

Orientador: Francisco Sandro Rodrigues Holanda – UFS

ABSTRACT

ROCHA, I. P. Relationship between riverbank erosion, Soil physical characteristics and hydrological and climatic variables in Lower São Francisco river. 2009. 64p. (Dissertation – Master Program in Agroecosystems). Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE.

Changes in the hydrological regimen of the Lower São Francisco River, caused by the installation of big hydroelectric plants in the river channel, have provoked an advanced erosion process by the riverbank vulnerability and also to the amplified character of some hydrological and climatic variables in this part of the river basin. The consequence of this fast erosion process is translated in an environmental, economic and social lack of sustainability to the region, which had negative impacts in fish assemblages, navigation, civil construction and reduction of agroecosystem's productive area. The objective of this work was to verify the influence of the soil physical characteristics and the hydrological and climatic variables in the erosion process in the right margin of the Lower São Francisco River. Through labs assays of soil samples, it was possible to know the main soil physical characteristics of the bank slope and establish the relations with the vulnerability to the riverbank erosion. Historical series of hydrological and climatic variables has been investigated in order to verify a correlation between these variables and the erosion rates. The main soil characteristic that contribute to its disaggregation was the soil texture, mainly composed by coarse particles. It was observed that slope is vulnerable to the riverbank erosion, that doesn't possess a necessary particles aggregation, what characterize stability. The regular rain season in the region has a little contribution to the increase of bank erosion. However, this variable influences the wind direction. Also, it was recognized a correlation between the river's discharge increase and water flux velocity, with a remarkable increase of riverbank erosion, what suffers influences from the reorientation of the natural waves front, shocking against the slope.

Keywords: Erosion, São Francisco River and Soil Cohesion.

Adviser: Francisco Sandro Rodrigues Holanda – UFS

CAPÍTULO 1

1 Introdução Geral

O interesse nos sistemas hídricos, particularmente em rios, é mais que mera curiosidade, muitas nações são dependentes do manejo sustentável de rios que possuem papel vital na economia da maioria das sociedades. Eles são responsáveis pelo provimento de recursos fundamentais – água (uso doméstico, industrial e irrigação), energia, navegação, alimentos, acesso a serviços e recreação. Ademais, os rios também prestam relevantes serviços ecológicos ao desenvolvimento da vegetação ripária e ictiofauna. Embora a agricultura seja o maior usuário de água do mundo, responsável por aproximadamente 70% do seu consumo, a geração de energia elétrica tem um papel particularmente importante no desenvolvimento econômico de muitos países (PETTS e AMOROS, 1996). Além do uso múltiplo da água de um rio, as áreas sob sua influência conhecidas como planícies de inundação abrigam diversas formas de sistemas agrícolas, conhecidos como agroecossistemas, que são responsáveis pela produção de alimentos e manutenção da comunidade que deles fazem uso. Esta dependência econômica tem feito com que os sistemas hídricos venham sendo manejados de acordo com o interesse humano.

Em um sistema fluvial, a compreensão de suas numerosas variáveis e suas inter-relações está condicionada ao olhar que é dado ao sistema. Corradini et al (2006) explicam que na abordagem tradicional, um rio é estudado sob dois focos principais: os aspectos físico e ecológico, e consideram os rios como sistemas unidirecionais. Segundo os autores, o aspecto físico inclui a hidrologia e a geomorfologia com a base nos conhecimentos de geologia, geografia e engenharia, pode-se conhecer e quantificar como o fluxo, a carga sedimentar e a forma de canal variam da cabeceira à foz do rio, estudadas em escalas temporais que variam de horas, dias, anos, séculos e milênios. O aspecto ecológico é embasado na biologia e na ciência da pesca, e examina as mudanças à jusante de estruturas e funcionamento das comunidades biológicas sob escalas que vão do micro-habitat até o rio como um todo.

Petts e Amoros (1996) e Montgomery (1999), explicam que um rio também pode ser entendido como um hidrossistema onde os fluxos não são apenas unidirecionais das cabeceiras para a foz, mas inclui fluxos laterais que mostram a

interação do canal com as margens e a planície de inundação, além de um fluxo vertical onde se desenvolve a água subterrânea, igualmente, dentro de uma escala temporal. Este pensamento representa o conceito de *Continuum*, inicialmente proposto por Vannote et al (1980), que relaciona as variações longitudinais às mudanças sistemáticas nos gradientes fluviais, abordando o rio como um ecossistema dinâmico.

Os processos e alterações (de origem natural ou antrópica) que ocorrem nas bacias hidrográficas são refletidos diretamente nos cursos d'água. Assim, a qualidade ambiental de um curso d'água está diretamente relacionada com a qualidade ambiental da sua bacia hidrográfica como um todo, refletindo diretamente na quantidade e qualidade dos benefícios oferecidos aos agroecossistemas nela presente. Uma das variáveis utilizadas para medir a saúde ambiental de um curso d'água é o grau de degradação dos solos de suas margens, principalmente no que diz respeito à erosão.

A bacia do rio São Francisco é, sem dúvida, uma das mais importantes bacias hidrográficas do país, tanto pela sua importância hídrica como pelo desenvolvimento gerado para a Região Nordeste. Em toda sua extensão, desde a sua cabeceira no Estado de Minas Gerais até sua foz nos Estados de Alagoas e Sergipe, o rio São Francisco contribui ao longo dos seus 2.700 km para o desenvolvimento econômico de aproximadamente 13 milhões de pessoas, o equivalente a 8% da população do País (ANA, 2005). De acordo com ANA (2002), somente no baixo curso do rio São Francisco existe uma área irrigada de aproximadamente 18.000 ha. Também é possível observar dentro do sistema de produção da região, o crescimento da agricultura de sequeiro para produção de milho (sobretudo com base na agricultura familiar), da pecuária, com ênfase na bovinocultura e caprinocultura, da pesca e aqüicultura, da indústria e agroindústria, das atividades minerais, e do turismo e lazer (ANA, 2009), alocados principalmente nas áreas marginais, que são mais planas e oferecem condições mais apropriadas para o estabelecimento destes empreendimentos. Lopes e Freitas (2003) apresentam a irrigação, consumo humano, consumo animal e indústria (incluindo a geração de energia), nesta ordem, como os setores mais significativos na demanda hídrica do Baixo São Francisco, sendo este o trecho de maior demanda hídrica para a irrigação da bacia. Ao contrário do Alto e Médio São Francisco, onde grande parte das águas é destinada a geração de energia e consumo humano.

A consequência da política de desenvolvimento estabelecida para a bacia do rio São Francisco, que priorizou o uso das águas para a geração de energia a partir dos

projetos hidrelétricos, foi a criação de diversos problemas sócio-ambientais causados principalmente pela construção de barragens e regularização da vazão ao longo do seu curso diretamente na região que compreende o Baixo São Francisco. Entre estes problemas observa-se a retenção dos sedimentos pelas barragens, a degradação da vegetação ciliar; e o avançado processo erosivo das margens; (FONTES, 2002; BANDEIRA, 2005; OLIVEIRA, 2006; SANTANA, 2008; HOLANDA et al, 2008), causando diversos prejuízos sociais para a população ribeirinha instalada nos agroecossistemas às margens do rio.

Dentre os impactos ambientais negativos manifestados em um curso d'água a erosão de suas margens é o reflexo mais expressivo do elevado grau de degradação que se encontra. Os processos erosivos causam impactos diretos sobre os recursos hídricos e ocasionam modificações, principalmente, na hidráulica e na dinâmica de sedimentação fluvial (CHRISTOFOLETTI, 1981; CUNHA, 1995; GUERRA E CUNHA, 2003). As alterações morfológicas nas margens e no canal são responsáveis pelo assoreamento dos rios, e conseqüentemente, provocam uma série de impactos, tais como: redução da produção primária dos agroecossistemas, em razão da perda de área agricultável; diminuição dos recursos pesqueiros devido a redução das condições ambientais favoráveis à reprodução da ictiofauna; aumento da frequência das inundações e a ampliação das áreas atingidas por elas, devido ao alargamento do curso d'água; comprometimento da qualidade e do volume das águas, em função do aumento da turbidez (HOLANDA et al, 2005).

Embora seja um fenômeno natural de ajuste dos canais fluviais, a erosão marginal é potencializada por ações antrópicas que resultam em alterações fluviais diretas e indiretas transmitidas ao longo do curso d'água. As modificações ocorridas diretamente no canal fluvial estão relacionadas com a construção de barragens para geração de energia elétrica ou para controlar vazões, enquanto que as alterações indiretas estão relacionadas a atividades ligadas ao uso e ocupação do solo: remoção da vegetação, emprego inadequado de práticas agrícolas e urbanização (GRAF, 2006; MANIARY e CARVALHO JÚNIOR, 2007; COELHO, 2008). Normalmente a erosão marginal não é um grave problema em cursos d'água com dimensões reduzidas, é de fácil compreensão e pode ser mitigada ou controlada com simples soluções de engenharia ou bioengenharia de solos. No entanto, quando se trata de grandes rios, algumas variáveis hidrológicas e ambientais que influenciam no processo erosivo

passam a ter relevante participação neste processo, enquanto outras assumem proporções amplificadas. Com isso, a compreensão desse processo de degradação necessita de uma abordagem sistêmica e exige técnicas de controle mais elaboradas.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma análise e discussão reflexiva sobre as variáveis que contribuem para o incremento da erosão marginal no Baixo São Francisco sergipano, relacionadas com a vulnerabilidade do solo do talude do rio e a influência de variáveis climáticas e hidrológicas na dinâmica dos processos erosivos.

O trabalho está dividido em três capítulos, os quais são descritos a seguir:

O primeiro capítulo consiste na apresentação da problemática da erosão marginal para os agroecossistemas ribeirinhos e apresenta o Estado da arte a cerca da temática abordada nos capítulos subsequentes, fundamentando as informações identificadas na literatura pertinente.

O segundo capítulo consiste de uma investigação sobre a vulnerabilidade do solo da margem direita do rio São Francisco, importante para a compreensão do comportamento do solo quando submetido às forças de arraste das partículas ocasionadas pela erosão marginal.

O terceiro capítulo aborda a influencia de variáveis climáticas e hidrológicas que contribuem para o aumento do processo erosivo das margens por meio da avaliação de uma série histórica de dados.

2 Referencial Teórico

2.1 Sustentabilidade e Agroecossistemas

Agroecossistemas são ecossistemas modificados pelo homem com o propósito de produzir alimentos e outras matérias-primas. São sistemas dinâmicos, que respondem, continuamente, a fatores ambientais, socioeconômicos, culturais e biológicos, de acordo com o manejo adotado (ARMANDO, 2002).

Hart (1980) define agroecossistema como sendo um ecossistema com presença de pelo menos uma população agrícola. Portanto, pode ser entendido como uma unidade de trabalho, que difere fundamentalmente dos ecossistemas naturais por ser regulado pela intervenção humana na busca de um determinado propósito.

Conway (1987), sugere que os agroecossistemas possuem quatro propriedades (produtividade, estabilidade, sustentabilidade e equidade) que avaliam se os objetivos do sistema, que é aumentar o bem-estar econômico e os valores sociais dos produtores, estão sendo atingidos. A produtividade significa a produção de determinado produto por unidade de recurso que entra numa área. Estabilidade é a manutenção da produtividade tendo em vista que eventos não controláveis podem ocorrer. A propriedade sustentabilidade é a capacidade de um agroecossistema manter sua produtividade quando exposta a um grande distúrbio, enquanto equidade é definida como a distribuição da produtividade do agroecossistema. Marten (1988) adiciona a autonomia como uma quinta propriedade, esta considerada como a capacidade do agroecossistema manter-se ao longo dos anos independente de oscilações. A sustentabilidade dos agroecossistemas depende da manutenção da entrada de energia e insumos, da eliminação dos resíduos gerados e de sua capacidade para controlar as perdas, principalmente no que diz respeito aos recursos ambientais (MARTINS, 1999).

Quando os agroecossistemas estão localizados em margem de cursos d'água estão mais susceptíveis à erosão hídrica, pois nesta região normalmente ocorre o predomínio de Neossolos Flúvicos, colocando em risco sua sustentabilidade por afetar principalmente as propriedades estabilidade e produtividade. Casado et al (2002) e Santos (2002), caracterizam este tipo de solo como sendo de muito baixa coesão, baixa resistência ao cisalhamento e alto ângulo de atrito interno das partículas de solo (entre 17 a 25°), com Fator de Segurança (FS) menor que 1,0, sendo então classificado como

Instável, por isso possui alta susceptibilidade a erosão e alta probabilidade de ocorrência de movimentos de massa.

2.2 A Bacia Hidrográfica do São Francisco

Os sistemas fluviais formam unidades indissociáveis e interdependentes com as respectivas bacias hidrográficas (HYNES, 1975; CUMMINS, 1992; PETTS, 1994), que são áreas do continente onde a água precipitada é drenada para uma saída comum ou ponto terminal (GUERRA e CUNHA, 2003). Formam-se redes que drenam água contendo material sólido e dissolvido das partes mais altas, que são os limites da bacia, para a mais baixa, que pode ser outro rio de hierarquia igual ou superior, lago ou oceano.

A bacia hidrográfica é um sistema aberto onde ocorre entrada e saída de energia (GUERRA e CUNHA, 2003; PINTO et al, 2005), e como tal ela se encontra, mesmo quando não perturbada, em contínua flutuação, num Estado de equilíbrio transacional ou dinâmico. Ou seja, a adição de energia e a perda de energia do próprio ecossistema encontram-se sempre em delicado balanço.

A bacia hidrográfica do rio São Francisco possui uma área de aproximadamente 640.000 Km² (CODEVASF, 2003), corresponde a 7,4% do território brasileiro, abrangendo parte dos Estados de Minas Gerais, Goiás, Bahia, Sergipe, Alagoas e Pernambuco além do Distrito Federal. Esta bacia, que é fisiograficamente dividida em Alto, Médio, Sub-médio e Baixo São Francisco, possui grande diferença latitudinal, com 2.700 Km se estendendo da latitude 21° S em sua nascente, sudeste do Brasil até 7° S, sua foz na região Nordeste, entre os Estados de Sergipe e Alagoas. O Alto e o Médio São Francisco são responsáveis por quase 80% da vazão do rio (ANA, 2006). Os diferentes climas e tipos geológicos configuram diferentes biomas, fisiografia do canal bastante distintas e características hidrológicas peculiares (ANA, 2006). O rio São Francisco possui 168 afluentes, dos quais apenas 19 são perenes (CODEVASF, 2003).

O Baixo São Francisco estende-se de Paulo Afonso (BA) à foz, no Oceano Atlântico, estando presente nos Estados da Bahia, Pernambuco, Sergipe e Alagoas. A altitude varia de 200 m até o nível do mar, embora, na periferia, algumas serras atinjam 500m (MMA, 2006). O baixo curso abrange uma área de 19.986,67 km², equivalente a 3,14 % da área total da bacia. No Estado de Sergipe ocupa área de drenagem de 7.181

km², sendo 5.619 km² na região do semi-árido, 616 km² na região do agreste, 946 km² na região litorânea, abrangendo 22 municípios do Estado (CODEVASF, 1991). De acordo com Fontes (2002), de Propriá até Neópolis (SE), desenvolve-se sobre a unidade morfoestrutural terrenos sedimentares mesozóicas e o relevo circundante ao vale fluvial é constituído por tabuleiros costeiros. O autor afirma que a partir deste ponto o rio corre sobre terrenos quaternários no qual se desenvolveu uma feição do tipo deltaica, formada por depósitos aluviais e litorâneos que constituem a planície costeira.

O clima da região é quente, do tipo semi-úmido, com temperatura média anual de 25 °C, e apresenta estação chuvosa entre os meses de março e setembro com precipitação pluvial de 800 a 1.300 mm, ou seja, no inverno, enquanto no restante da bacia as chuvas se verificam no verão (CONEJO, 2003).

O perfil longitudinal do baixo curso do rio São Francisco pode ser dividido em dois trechos com declividades distintas. O primeiro está entre Paulo Afonso (BA) e Piranhas (AL), possui aproximadamente 65 km de extensão, onde ocorre uma declividade média de 1,8 m.km⁻¹, já o segundo, de Piranhas até a foz, possui cerca de 200 km com declividade média de 0,5 m.km⁻¹ (Fontes, 2002). A calha do rio está contida na unidade geomorfológica Planície do Rio São Francisco, que corresponde ao fundo do vale do rio. Trata-se de uma superfície de acumulação gerada por processos fluviais (CODEVASF, 2000).

Por se tratar de uma porção meandrante, característica predominante nos Baixos cursos, os rios descrevem curvas sinuosas, largas, harmoniosas e semelhantes entre si, ocorre um processo contínuo de escavação na margem côncava, onde a velocidade do fluxo é maior, e de deposição na margem convexa, local de menor velocidade do fluxo (CHRISTOFOLETTI, 1981).

2.3 Geomorfologia Fluvial

A Geomorfologia Fluvial, como sugerem Guerra e Cunha (2001), representa uma temática de destaque na ciência geomorfológica, pelo seu caráter condicionante da própria vida humana, a qual depende em larga escala dos rios desde a Antiguidade. Engloba tanto o estudo das bacias hidrográficas, como dos cursos de água, sendo que em relação a este último, dedica-se aos estudos dos processos fluviais e das formas resultantes do escoamento das águas.

Christofoletti (1981) afirma que os vales fluviais se modificam como consequência dos efeitos dos processos de erosão, transporte e sedimentação. Tendo em vista a maior atividade do processo erosivo nas cabeceiras, espera-se que ocorra uma gradativa redução do declive, tornando-o mais suave nas porções mais baixas dos cursos d'água que nas regiões mais altas. Concomitantemente a calha do rio sofre um processo de alargamento, devido ao aumento da sedimentação nas porções mais baixas.

São três as fases de evolução de um curso d'água: fase juvenil, caracterizada pelos rios de perfil longitudinal irregular e declive acentuado, predominando as ações de erosão; fase madura, caracterizada pelos rios de perfil longitudinal com declive menos acentuado e vales abertos e profundos, com grande capacidade de transporte de sedimentos; e fase senil, que tem por característica um perfil longitudinal de fraco declive e conseqüentemente, fraca capacidade de transporte, predominando o trabalho de sedimentação. A fase senil apresenta vales de grande largura e vertentes muito desgastadas e cobertas por depósitos aluviais freqüentemente espessos (SUGUIO e BIGARELLA, 1990).

Os principais fatores que condicionam os processos de erosão, transporte e sedimentação nos rios são, de acordo com Christofoletti (1999), a velocidade da corrente; as características físicas dos sedimentos, especificamente o seu tamanho, densidade e forma; a existência de acidentes ou obstáculos no leito e as variações da vazão do rio, que por sua vez, estão diretamente relacionados com as variações climáticas.

Em um canal natural, os fatores que mais diretamente afetam o grau de estabilidade das margens, a taxa de avanço e a duração da erosão marginal são as características hidrodinâmicas do fluxo nas proximidades das margens, a geometria do canal, as ondas provocadas pelo vento e os fatores climáticos e biológicos (SIMONS et al, 1982; THORNE e TOVEY, 1981; PIMENTEL, 2004). A partir de uma mesma situação hidrodinâmica, a erosão de uma margem passa a depender, sobretudo, das características do barranco (altura, geometria, estrutura, propriedades mecânicas de seus constituintes).

A intensidade do processo erosivo está vinculada às magnitudes dos eventos climáticos, principalmente à intensidade do vento e dos eventos hidrológicos, bem como a variação da vazão, a variação da cota e a velocidade do fluxo. Isso, associado às

características físicas do barranco em cada ponto, faz com que as taxas erosivas sejam maiores em determinados meses do ano (HOLANDA et al, 2005).

2.4 Efeito do Vento

Os ventos surgem como uma compensação para equilibrar os gradientes de pressão originados da diferença de densidade do ar ocasionada pelas alterações de temperatura na atmosfera, e sofrem influências também do movimento de rotação da Terra e da força centrífuga ao seu movimento (TUBELIS e NASCIMENTO, 1984).

Ventos são os principais formadores de ondas em superfície líquida, e segundo Brighetti e Martins (2001) o tráfego de embarcações e a variação brusca de vazão se apresentam como os outros agentes formadores de ondas. As ondas podem ser classificadas como ondas naturais quando são formadas por ventos, e antrópicas quando são formadas por qualquer alteração humana na superfície. A formação da onda natural se dá quando o vento, atuando sobre a superfície da água, transfere energia para a massa líquida, dependendo de outros fatores como a profundidade, o fetch (pista de atuação do vento no sentido da formação de ondas), a velocidade e a permanência do vento (PIMENTEL, 2004). De acordo com US Army Corps of Engineers (1983), pista de vento (fetch) é a área de geração de ondas, e é definida como sendo a região na qual a velocidade e direção do vento podem ser consideradas aproximadamente constantes. Esta velocidade é considerada constante quando as variações não excedem $2,5 \text{ m.s}^{-1}$ com relação à velocidade média.

Brighetti e Martins (2001) ainda afirmam que em águas profundas, a altura efetiva das ondas é proporcional à profundidade, velocidade do vento e comprimento do fetch. Já em águas rasas, a energia transferida pelo vento compete com o efeito do atrito com o leito limitando a altura das ondas. Marques (2005) também afirma que quando a onda é gerada pela ação do vento, sua altura traduz o montante de energia resultante, no entanto, é condicionada a três fatores relacionados ao vento: a velocidade, a duração e a pista sobre a qual ele sopra. Na grande maioria dos métodos empregados, a determinação do comprimento da pista de vento é uma importante etapa na estimativa da altura das ondas.

Hughes et al (2007) observaram o efeito da direção predominante dos ventos com velocidades superiores a 10 m.s^{-1} produzindo ondas com alturas superiores a 0,8 m.

Nestes termos os autores indicam que o processo erosivo responde diretamente a ondas formadas por ventos. Embora não tenham quantificado em valores, De Jonge e Van Beusekom (1995) observaram a relação entre o aparecimento de fortes ondas durante períodos de alta velocidade dos ventos.

Segundo Marques (2005), o estudo sobre geração, propagação e transformação de ondas em cursos d'água com grandes superfícies, como é o caso de lagos e lagoas, foi motivado pelo problema gerado em função da ação destas ondas sobre a estabilidade de barragens. Por outro lado, o aumento no tráfego em hidrovias gerou a necessidade de proteger as margens dos corpos d'água contra os efeitos da erosão fluvial.

A taxa de erosão e o recuo da linha da margem estão diretamente relacionados à energia da onda incidente no talude que, por sua vez, depende da pista de vento, área coberta por vegetação, batimetria do leito e composição do solo (ELLIS et al, 2002; HUGHES et al, 2007). Holanda et al (2008), em estudos realizados no Baixo São Francisco, atribuíram as alterações em seções transversais principalmente a ação do embate das ondas na base do talude marginal.

Casado (2000) e Pimentel (2004) explicam que quando a direção dos ventos coincide com o sentido da corrente, o processo erosivo ocorre com maior magnitude devido a potencialização na formação das ondas. Brighetti e Martins (2001), Hughes et al (2007), concordam que o vento é um fator importante na formação de ondas que eleva o poder de embate das mesmas provocando o solapamento progressivo dos barrancos e conseqüente desmoronamento da suas partes superiores.

A escassez de trabalhos que relatam a influência das características das ondas, em especial a altura, na erosão em margens de rios faz com que sejam utilizados como referência trabalhos realizados em margens costeiras ou margens de reservatórios de barragens. Gatto e Doe III (1987) expõem que a erosão das margens de reservatórios localizados no norte dos Estados Unidos são ocasionadas predominantemente por ondas geradas por ventos. A aplicação direta de métodos já validados em águas oceânicas tem sido uma das soluções empregadas para determinar a influência de ondas nos cursos d'água interiores sem levar, portanto, em consideração, o efeito de restrição espacial oferecido pelas margens (MARQUES et al, 2007). Neste sentido, Kalra e Deo (2007) afirmam que o WRB (Wave Rider Buoy) é o instrumento mais utilizado na obtenção de dados de ondas oceânicas, e seu funcionamento se dá flutuando sobre a superfície do

mar. Entretanto, os autores informam que um fator que dificulta sua utilização, sobretudo em países em desenvolvimento, é o alto custo relativo a coleta de dados e manutenção do equipamento.

Outro tipo de onda que pode afetar a estabilidade dos taludes marginais são as ondas geradas por embarcações, que possuem princípios genéticos diferentes das ondas geradas por ventos (BRIGHETTI e MARTINS, 2001), porém possuem potencial desagregador inferior às ondas naturais. Hughes et al (2007) comparando ondas naturais (geradas pelo vento) e ondas antrópicas (geradas por embarcações) observaram que este último tipo de ondas normalmente estão dispostas em sequência (trem de ondas) liderada por uma onda de baixa amplitude e baixa frequência, seguida de um ou mais grupos com grande amplitude e alta frequência, com duração máxima de 5 segundos.

O efeito das ondas pode ser amortecido, ocorrendo dissipação da sua energia, se existir algum elemento que possibilite esta situação. Bonham (1983), Coops et al (1996), Mendez e Losada (2004) e Lima et al (2007) estudaram o efeito de campos de vegetação e concluíram que porcentagens significativas da energia das ondas gravitacionais são dissipadas a depender do tipo da vegetação. Contudo, a ausência da vegetação na margem de um curso d'água se reflete numa maior quantidade de energia que a onda leva ao se chocar contra a base do talude.

2.5 Atributos Físicos do Solo

Um dos atributos mais importantes para caracterizar os solos quanto a resistência à erosão é a associação entre coesão e ângulo de atrito das suas partículas sólidas, resultando na resistência ao cisalhamento (ORTIGÃO, 1995; PINTO, 2000; BRAIDA et al, 2007). Esta resistência foi definida por Silva e Cabeda (2005) como a tensão máxima cisalhante que o solo pode suportar sem sofrer ruptura. É influenciada pela forma e distribuição de partículas do solo, estrutura, densidade, teor de água, tipo de argilomineral, tipo e quantidade de cátions presentes e forças de repulsão e atração entre partículas (McCORMACK e WILDING, 1979; THORNE, 1981; BRAIDA et al, 2007).

Lebert e Horn (1991) explicam que em solos arenosos, a resistência ao cisalhamento depende basicamente do atrito entre as partículas, distribuição de diâmetro dos grãos e grau de compactação do solo. Enquanto que para solos argilosos, a resistência ao cisalhamento depende não só do atrito entre partículas, mas também da

coesão do solo e da sua estabilidade estrutural.

A resistência do solo ao cisalhamento (τ) pode ser expressa pela equação de Coulomb ($\tau = c + \sigma \tan \Phi$) (THORNE, 1981; VARGAS, 1989; SILVA e CARVALHO, 2007; PARKER et al, 2008). Nessa equação, os parâmetros c e Φ representam a coesão e o coeficiente de atrito entre as partículas do solo, respectivamente. Vargas (1989), Lebert e Horn (1991), Rocha et al (2002) e Silva et al (2004) explicam que estes parâmetros são intrínsecos ao solo, sendo determinados por suas propriedades e atributos, tais como textura, estrutura, teor de matéria orgânica, densidade, mineralogia e teor de água.

De forma generalista a coesão pode ser definida como a força de atração entre as superfícies das partículas do solo. Parker et al (2008) explicam que a coesão pode ser dividida em coesão específica e coesão aparente. A primeira é resultado do efeito dos agentes cimentantes, como teor de óxidos de Fe e Al e de argilas silicatadas, bem como o resultado da atração entre partículas próximas por forças eletrostáticas (Mitchell, 1976). A coesão aparente, normalmente é atribuída à solos não saturados e pode ser definida como o resultado da tensão superficial da água nos poros do solo, formando menisco capilares de água entre as partículas dos solos aproximando-as. Muitas vezes emprega ao solo uma coesão que não é própria dele, porém quando o mesmo perde umidade a coesão aparente diminui (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

Pinto (2000) define ângulo de atrito como o ângulo máximo que a força transmitida ao solo pode fazer com a força normal à superfície de contato, sem que haja o cisalhamento do solo no plano de ruptura. Este ângulo representa as características friccionais entre as partículas do solo, e é dependente de fatores como densidade do solo, percentagem e tipo de argilomineral, tamanho e forma dos grãos de areia do solo. O ângulo de atrito interno é alterado quando a densidade do solo é modificada. Braida et al (2007) identificaram menores valores de ângulo de atrito para amostras com maiores teores de matéria orgânica. Da mesma forma, quanto maior for a presença da fração argila, menor será o ângulo de atrito interno das partículas do solo (Al-SHAYEA, 2001; SILVA e CARVALHO, 2007; PARKER et al, 2008).

O método mais empregado para aferir a resistência ao cisalhamento de solos foi proposto por Lambe (1951), denominado de Direct Shear Test (DST) – Teste de Cisalhamento Direto – que consiste no deslizamento da metade superior do corpo de

prova do solo em relação à inferior, determinando-se, assim, para cada tensão normal (σ_n) aplicada à superfície de deslizamento, o valor da força cortante (τ) necessária para provocar a deformação contínua do solo até à ruptura do corpo de prova.

Hooke (1979) comenta que um dos fatores contribuintes para a erosão das margens de rios é a umidade do solo. Parker et al (2008) explicam que isto ocorre porque quando o teor de água está elevado aumenta o efeito lubrificante entre as partículas de solo, fazendo com que as mesmas estejam mais separadas. Neste sentido os solos aluviais estão mais susceptíveis a erosão fluvial por apresentarem baixa coesão e plasticidade (THORNE, 1981). Este fenômeno é mais comum na base do talude marginal, pois é área que está em contato direto com a lâmina d'água. Os resultados encontrados por Arvidsson et al (2001), Silva e Cabeda (2005) e Braida et al (2007) evidenciam o efeito da umidade na coesão do solo. Fredlund e Rahardjo (1993) explicam que a diminuição do teor de água no solo reduz a distância entre as partículas, havendo um conseqüente aumento da atração entre elas, resultando num acréscimo da coesão do solo.

Com relação a densidade do solo, Zhang et al (2001), Rocha et al (2002) e Silva e Cabeda (2005) identificaram maiores valores da resistência ao cisalhamento nos solos cultivados em relação aos solos ainda não mecanizados. Segundo os autores, este fato pode estar relacionado ao tráfego de máquinas nas atividades de cultivo, uma vez que o aumento da densidade aproxima as partículas do solo e faz com que o ângulo de atrito interno seja reduzido.

A cobertura vegetal é um dos fatores que também influenciam na manutenção dos atributos físicos dos solos das margens. A presença da vegetação ciliar e o seu gradiente é um componente importante para cursos d'água, a manutenção do gradiente natural exerce um papel vital na estruturação do solo, devido a maior profundidade e arquitetura do sistema radicular, o que pode contribuir para a redução da erosão marginal (HUBBARD e LOWRANCE, 1997).

3 Referências Bibliográficas

AL-SHAYEA, N. A. The combined effect of clay and moisture content on the behavior of remolded unsaturated soils. **Engineering Geology**, v. 62, 2001, p. 319-342.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Plano Nacional de Recursos Hídricos** – Documento Base de Referência. Brasília: Superintendência de Planejamento, 2002.

_____. **Projeto GEF – São Francisco**. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br>>. Acesso em: 03 jul. 2006.

_____. **Macrozoneamento ecológico-econômico da bacia do Rio São Francisco: subsídios para o diagnóstico**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2005.

ARVIDSSON, J.; TRAUTNER, A.; VAN DEN AKKER, J.J.H.; SCHJONNING, P. Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden. II. Soil displacement during wheeling and model computations of compaction. **Soil and tillage research**, v. 60, 2001, p. 79-89.

ARMANDO, M. S. **Agrodiversidade: Ferramenta para uma agricultura sustentável**. Brasília: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 2002.

BANDEIRA, A. A. **Evolução do processo erosivo na margem direita do Rio São Francisco e eficiência dos enrocamentos no controle da erosão no trecho em estudo**. 2005. 183 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Núcleo de Pós-graduação e Estudos do Semi-Árido, Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, SE, 2005.

BONHAN, A. J. The management of wave-spendig vegetation as bank protection against boat wash. **Landscape Planning**, v. 10, 1983, p. 15-30.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SOARES, J. M. D. Coesão e atrito interno associados aos teores de carbono orgânico e de água de um solo franco arenoso. **Ciência Rural**, v. 37, n. 6, 2007, p. 1646-1653.

BRIGHETTI, G.; MARTINS, J. R. S. **Estabilização e Proteção de Margens** – PHD 5023 – Obras Hidráulicas. São Paulo: Escola Politécnica / Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, 2001.

CASADO, A. P. B. **Estudo do processo erosivo na margem direita do rio São Francisco: Perímetro irrigado Cotinguiba/Pindoba – Baixo São Francisco Sergipano**. 139 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Núcleo de Pós-graduação e Estudos do Semi-Árido, Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, SE, 2000.

- CASADO, A. P. B.; HOLANDA, F. S. R.; ARAUJO FILHO, F. A. G.; YAGUIU, P. Bank erosion evolution in São Francisco River. **Revista brasileira de ciência do solo**, v.26, n.1, 2002, p. 231-239.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia fluvial**. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1981.
- _____. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.
- CODEVASF – Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco e Parnaíba. **Inventário dos Projetos de Irrigação**. 2ª ed. Brasília: CODEVASF, 1991.
- _____. **Incidência de desmoronamento das barrancas do rio São Francisco na faixa de domínio do perímetro irrigado Cotinguiba/Pindoba**. Brasília: CODEVASF, 2000.
- _____. **Projeto básico de proteção da margem direita do rio São Francisco no perímetro de irrigação Cotinguiba/Pindoba, 4ª SR Sergipe**. Brasília: CODEVASF, 2003.
- COELHO, A. L. N. Geomorfologia fluvial de rios impactados por barragens. **Caminhos de Geografia**, v. 9, n. 26, 2008, p. 16-32.
- CONEJO, J. G. L. (coord.). **Programa de Ações Estratégicas para o Gerenciamento Integrado da Bacia do Rio São Francisco e da sua Zona Costeira – PAE**. Relatório Final. Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do São Francisco - GEF São Francisco (ANA/GEF/PNUMA/OEA). Subprojeto 4.5 B – Formulação de um Programa de Gerenciamento Integrado da Bacia do rio São Francisco e da sua Zona Costeira. Brasília: 2003.
- CONWAY, G. R. The properties of Agroecosystems. **Agricultural Systems**. v. 24, 1997, p. 95-117.
- COOPS, H., GEILEN, N., VERHEIJ, H. J., BOETERS. R., VAN DER VELDE, G. Interactions between waves, bank erosion and emergent vegetation: an experimental wave tank. **Aquatic Botany**, v. 53, 1996, p. 187-198.
- CORRADINI, F. A.; FACHINI, M. P.; STEVAUX, J. C. Controle geomorfológico da distribuição da vegetação ripária do rio Paraná: parte I – unidades geomórficas da planície de inundação. **Revista UnG – Geociências**. v. 5, n. 1, 2006, p. 13-21.
- CUMMINS, K. W., 1992. **Catchment characteristics and river ecosystems**. In: BOOM, P. J.; CALOW, P; PETTS, G.E. (Eds.). *River Conservation and Management*. Chichester: John Wiley & Sons, 1992, p. 125-135.
- CUNHA, S. B. Impactos **das Obras de Engenharia Sobre o Ambiente Biofísico da**

Bacia do Rio São João (Rio de Janeiro – Brasil). Rio de Janeiro: Instituto de Geociências – UFRJ, 1995.

DE JONGE, V. N.; VAN BEUSEKOM, J. E. E. Wind- and tide-induced resuspension of sediment and microphytobenthos from tidal flats in the Ems estuary. **Limnology and Oceanography**, v. 40, n. 4, 1995, 766-778.

ELLIS, J.T.; SHERMAN, D.J.; BAUER, B.O.; HART, J. Assessing the Impact of an Organic Restoration Structure on Boat Wake Energy. **Journal of coastal research**, Special issue 36, 2002, p. 256-265.

FONTES, L. C. S. **Erosão marginal no baixo curso do rio São Francisco: um estudo de caso de impactos geomorfológicos à jusante de grandes barragens.** 2002. 321 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente). Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2002.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils.** New York: John Wiley, 1993.

GATTO, L. W.; DOE III, W. W. Bank conditions and erosion along selected reservoirs. **Environmental Geology and Water Sciences**, v. 9, n. 3, 1987, p.143-154.

GRAF, W. L. Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers. **Geomorphology**, v. 79, n. 1, 2006, p. 336-360.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Org.). **Geomorfologia – uma atualização de bases e conceitos.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001.

_____. **Geomorfologia e meio ambiente.** 4^a ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003.

HART, R. D. **Agrosistemas; Conceitos básicos.** Turrialba: CATIE, 1980.

HOLANDA, F. S. R.; SANTOS, L. G. C.; SANTOS, C. M.; CASADO, A. P. B.; PEDROTTI, A.; RIBEIRO, G. T. Riparian vegetation affected by bank erosion in the Lower São Francisco River, Northeastern Brazil. **Revista árvore**, v. 29, n. 2, 2005, p. 327-336.

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, 2008, p. 570-575.

HOOKE, J. M. An analysis of the processes of river bank erosion. **Journal of Hydrology**, v. 42, 1979, p. 39-62.

HUBBARD, R. K.; LOWRANCE, R. R. Assessment of forest management effects on nitrate removal by riparian buffer systems. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 40, n. 2, 1997, p. 383-391.

HUGHES, Z. J.; FITZGERALD, D. M.; HOWES, N. C.; ROSEN, P. S. Impact of Natural Waves and Ferry Wakes on Bluff Erosion and Beach Morphology in Boston Harbor, USA. **Journal of coastal research**, Special issue 50, 2007, p. 497-501.

HYNES, H. B. N. The stream and its valley. **Verhandlungen der Internationalen Vereinigung fur Theoretische und Angewandte Limnologie**, v. 19, 1975, p. 1-15.

KALRA, R.; DEO, M. C. Derivation of coastal wind and wave parameters from offshore measurements of TOPEX satellite using ANN. **Coastal Engineering**, v. 54, n. 3, 2007, p. 187-196.

LAMBE, T. W. **Soil testing for engineers**. New York: John Wiley, 1951.

LEBERT, M; HORN, T. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil Tillage Research**, v. 19, 1991, p. 275-286.

LIMA, S. F.; NEVES, C. F.; ROSAURO, N. M. L. Amortecimento de ondas gravitacionais por campos de vegetação flexível. parte I: formulação do modelo teórico. **Revista brasileira de recursos hídricos**, v. 12, 2007, p. 151-162.

LOPES, A. V. ; FREITAS, M. A. S. Avaliação das demandas e ofertas hídricas na bacia do rio São Francisco usando modelo de rede de fluxo. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 15., 2003, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.

MANYARI, W. V.; CARVALHO JUNIOR, O. A. Environmental considerations in energy planning for the Amazon region: Downstream effects of dams. **Energy Policy**, v. 35, n. 12, 2007, p. 6526-6534.

MARQUES, M. **Sistema automatizado para estimativa de ondas geradas por vento em reservatórios de barragens**. 2005. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2005.

MARQUES, M.; MACIEL, G. F.; SOBRINHO, M. D. Estimativa das máximas pistas de vento no reservatório da barragem de Ilha Solteira, Estado de São Paulo. **Acta Scientiarum Technology**, v. 29, n. 1, 2007, p. 79-84.

MARTEN, G. G. Productivity, Stability, Sustainability, Equitability and Autonomy as properties for agroecosystem assessment. **Agricultural Systems**, v. 26, 1988, p. 291-316.

- MARTINS, S. R. Sustentabilidade na agricultura: dimensões econômicas, sociais e ambientais. **Revista Científica Rural**, v. 4, n. 2, p. 175-187, 1999.
- McCORMACK, D. E.; WILDING, L. P. Soil properties influencing strength of Cranfield and Geeburg soils. **Soil science society american journal**, v. 43, 1979, p. 167-173.
- MENDEZ, F. J.; LOSADA, I. J. An empirical model to estimate the propagation of random breaking and nonbreaking waves over vegetation fields. **Coastal Engineering**, v. 51, 2004, p. 103-118.
- MITCHELL, J. K. **Fundamentals of soil behavior**. New York: John Wiley, 1976.
- MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Caderno da Região Hidrográfica do São Francisco**. Brasília: 2006. 148 p.
- MONTEGOMERY, D. R. Process domains and the river continuum. **Journal of the American Water Resource Association**, v. 35, n. 2, 1999, p. 397-410.
- OLIVEIRA, V. S. **Erosão marginal no baixo curso do rio São Francisco e seus efeitos nos agroecossistemas**. 2006. 63 f. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas). Núcleo de Pós-Graduação e Estudos em Recursos Naturais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2006.
- ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à mecânica dos solos dos Estados críticos**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1995.
- PARKER, C.; SIMON, A.; THORNE, C. R. The effects of variability in bank material properties on riverbank stability: Goodwin Creek, Mississippi. **Geomorphology**, v. 101, n. 4, 2008, p. 533-543.
- PETTS, G. E. **Rivers: dynamic components of catchment ecosystems**. In: CALOW, P.; PETTS, G. E. (Eds.). *The Rivers Handbook*, volume 2. Oxford: Oxford Scientific Publications, 1994, p. 3-22.
- PETS, G. E.; AMOROS, C. **The fluvial system**. In: PETS, G. E.; AMOROS, C. (Eds.). *Fluvial Hydrossistemas*. London: Chaman & Hall, 1996, p. 1-36.
- PIMENTEL, V. C. R. **Alternativas de solução para os impactos físicos de barragens**. 2004. 349 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica). Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

- PINTO, L. V. A.; FERREIRA, E.; BOTELHO, S. A.; DAVIDE, A. C. Caracterização física da bacia hidrográfica do ribeirão Santa Cruz, Lavras, MG e uso conflitante da terra em suas áreas de preservação permanente. **Cerne**, v. 11, n. 1, 2005, p. 49-60.
- ROCHA, W. W.; DIAS JÚNIOR, M. S.; LIMA, J. M.; MIRANDA, E. E. V.; SILVA, A. R. Resistência ao cisalhamento e grau de intemperismo de cinco solos na região de Lavras (MG). **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 26, n. 2, 2002, p. 297-303.
- SANTANA, S. A. **Relações entre estabilidade de taludes e os processos erosivos no Baixo São Francisco**. 2008. 114 f. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas). Núcleo de Pós-Graduação e Estudos em Recursos Naturais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2008.
- SANTOS, C. M. **A erosão no Baixo São Francisco sergipano e os mecanismos de desestabilização dos taludes na margem do rio**. 2002. 143 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente). Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2002.
- SILVA, R. B.; DIAS JÚNIOR, M. S.; SANTOS, F. L.; FRANZ, C. A. B. Resistência ao cisalhamento de um Latossolo sob diferentes usos e manejo. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 28, n. 1, 2004, p. 165-173.
- SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V. Influência de diferentes sistemas de uso e manejo na coesão, resistência ao cisalhamento e óxidos de Fe, Si e Al em solo de tabuleiro costeiro de Alagoas. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 29, n. 3, 2005, p. 447-457.
- SILVA, A. J. N.; CARVALHO, F. G. Coesão e resistência ao cisalhamento relacionadas a atributos físicos e químicos de um Latossolo Amarelo de tabuleiro costeiro. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 31, n. 5, 2007, p.853-862.
- SIMONS, I and ASSOCIATES. *Engineering Analysis of Fluvial Systems*. Fort Collins: Simons, I and Associates, 1982.
- SUGUIO, K.; BIGARELLA, J. J. **Ambientes fluviais**. 2ª ed. Florianópolis: UFSC / UFPR, 1990.
- THORNE, C. R. Field measurements of rates of bank erosion and bank material strength. In: *Erosion and Sediment Transport Measurement Symposium*, 1981, Florence. **Anais...** Florence: International Association of Hydrological Sciences, 1981. p. 503-512.
- THORNE, C. R.; TOVEY, N. K. Stability of composite river banks. **Earth surface**

processes and landforms, v. 6, 1981. p. 469-484.

TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F. C. L. **Meteorologia descritiva. Fundamentos e aplicações brasileiras**. São Paulo, Nobel, 1984.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Shore protection manual**. 3^a ed. Washington D.C.: Department of the Army Corps of Engineers, 1983.

VANNOTE, R. L.; MINSHALL, G. W.; CUMMINS, K. W.; SEDELL, K. R.; CUSHING, C. E. The River Continuum Concept. **Canadian journal of fisheries and aquatic sciences**, v. 37, 1980, p.130-137.

VARGAS, M. **Introdução a mecânica dos solos**. São Paulo: McGraw-Hill, 1989.

ZHANG, B.; ZHAO, Q. G.; HORN, R.; BAUMGARTL T. Shear strength of surface soil as affected by soil bulk density and soil water content. **Soil tillage research**, v. 59, 2001, p. 97-106.

CAPÍTULO 2: Resistência do solo aos processos erosivos na margem direita do rio São Francisco, no seu Baixo curso

1 Resumo

O equilíbrio ambiental do Baixo São Francisco tem sido alterado com o impacto promovido pela operação da cascata de barragens para geração de energia, assim como pela supressão da vegetação ciliar. Estas modificações 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 tão ricos em biodiversidade. A velocidade com que o processo erosivo da margem direita ocorre, está intimamente relacionada aos atributos físicos do solo. A sua compreensão possibilita a tomada de decisão para a adoção das melhores alternativas para a adequada proteção dos taludes marginais. Dois parâmetros são reconhecidamente importantes: coesão e ângulo de atrito interno, que juntos exprimem a resistência do solo ao cisalhamento. Estes parâmetros sofrem influência direta de outros atributos do solo, a exemplo da composição granulométrica, umidade, natureza dos minerais, índices de vazios, graus de saturação, massa específica e índice de plasticidade. Este trabalho teve como objetivo verificar a influência dos atributos físicos de um Neossolo Flúvico quanto à vulnerabilidade a erosão de um talude da margem direita do Baixo São Francisco. Foram realizadas duas amostragens de solo na área de estudo, sendo a primeira, composta por 18 amostras deformadas, utilizadas na caracterização geotécnica do talude. A segunda amostragem foi composta por cinco amostras indeformadas, e submetidas à ensaio de cisalhamento direto. Também foram verificados os Limites de Atterberg para cada amostra. A camada composta pelo solo da amostra 4 se apresentou mais vulnerável à erosão em relação às demais, por apresentar o maior ângulo de atrito ($35,180^\circ$), e os valores identificados para o Peso específico médio do solo seco foram considerados muito baixos. Nesse trabalho, o ângulo de atrito se mostrou o parâmetro mais confiável para indicar o grau de vulnerabilidade do solo à erosão marginal, por se tratar de um solo com mais de 90% de partículas de areia, na maioria das amostras. Os valores de coesão encontrados foram considerados baixos (inferiores a 0,705 KPa), enquanto os valores de ângulo de atrito foram considerados predominantemente altos (maior que $28,190^\circ$). Somente a amostra 3 apresentou plasticidade ($IP = 8$; $LL = 24$), demonstrando a marcante vulnerabilidade do solo deste talude à erosão marginal, atribuída, principalmente, à granulometria grosseira das partículas.

Palavras chave: Cisalhamento Direto, Coesão, Erosão Marginal.

CHAPTER 2: Resistance of the right margin to the erosion in the Lower São Francisco river basin

2 Abstract

The environmental balance of the Lower São Francisco River has been significantly modified by the operation of the electric power dams's cascade and the suppression of the riparian vegetation. These changes have been shown by advanced and progressive bank erosion, in a slope mainly composed by soil low cohesion, what currently threatens important agricultural enterprises, civil constructions and ecosystem's biodiversity. The development of the right riverbank erosion is mostly related to physical soil characteristics, and its comprehension make possible to decision makers to choose the best option to control it. Two parameters are recognized as important ones, such as soil cohesion and angle of internal friction, that together result in the shear stress resistance. These parameters suffer direct influence from other soil characteristics such as soil texture, soil moisture, type of composed minerals, index of emptiness, degrees of saturation, specific mass and index of plasticity. The objective of this work was to verify the influence of the physical characteristics of a Neossolo Flúvico to the erosion vulnerability in a right bank of the Lower São Francisco River. Two soil sampling were done. The first one was composed by 18 deformed samples, used in the slope geotechnical characterization. The second was composed by five not deformed samples, submitted to direct shear stress assays. Also the Atterberg's Limits to each sample has been verified. The soil layer composed by the sample number 4 is more vulnerable to erosion when compared to the others, presenting a higher fraction angle ($35,180^\circ$) and the values to average soil specific weight was considered very low. In this work the fraction angle is considered the most reliable parameter indicating the vulnerability degree to river bank erosion, once the soil is mainly composed by more than 90% of coarse particles. The values of soil cohesion were considered low (less than 0,705 KPa), and the angle of internal friction data was considered high (higher than $28,190^\circ$). The sample number 3 was the only one that presented soil Plasticity (IP = 8; LL = 24), indicating that the vulnerability to erosion in this riverbank is attributed, mainly, to the coarse particles.

Keywords: Direct Shear Test, Cohesion, Riverbank Erosion.

3 Introdução

Os processos erosivos causam impactos diretos sobre os recursos hídricos e promovem modificações, principalmente, na hidráulica e na dinâmica de sedimentação fluvial (CHRISTOFOLETTI, 1981; CUNHA, 1995; GUERRA E CUNHA, 2003). As alterações morfológicas nas margens e no canal são responsáveis pelo assoreamento dos rios, e conseqüentemente, provocam uma série de impactos, tais como: redução da produção primária dos agroecossistemas, por conta da perda de área agricultável; diminuição dos recursos pesqueiros devido a redução das condições ambientais favoráveis a reprodução da ictiofauna; aumento da frequência das inundações e a ampliação das áreas atingidas, devido ao alargamento do canal fluvial e ocupação indevida da planície de inundação; comprometimento da qualidade e do volume das águas, em função do aumento da turbidez (HOLANDA et al, 2005)

Embora a erosão marginal seja um fenômeno natural de ajuste dos canais fluviais, ela é acelerada por atividades antrópicas que resultam em alterações fluviais diretas e indiretas reproduzidas ao longo do curso d'água. As modificações ocorridas diretamente no canal fluvial estão relacionadas com a construção de barragens para geração de energia elétrica ou para controlar vazões, enquanto que as alterações indiretas estão relacionadas às atividades ligadas ao uso e ocupação indevido do solo: remoção da vegetação, emprego inadequado de práticas agrícolas e urbanização (GRAF, 2006; MANIARY e CARVALHO JÚNIOR, 2007; COELHO, 2008).

No caso do rio São Francisco, ao longo de seu curso, as históricas intervenções realizadas, principalmente a construção e operação das barragens para geração de energia elétrica, causaram sérios impactos sócio-ambientais para a população ribeirinha. Especificamente no Baixo curso, região mais afetada da bacia, a principal causa destes impactos foi a regularização da vazão, que proporcionou a retenção dos sedimentos pelas barragens, degradação da vegetação ciliar e expressivo processo erosivo das suas margens (FONTES, 2002; BANDEIRA, 2005; OLIVEIRA, 2006; SANTANA, 2008; HOLANDA et al, 2008), afetando diretamente a produção agrícola e a sustentabilidade econômica dos perímetros irrigados e outros agroecossistemas instalados nas margens do rio.

Em canais naturais, os fatores que diretamente afetam o grau de estabilidade das margens, a taxa de avanço e a duração da erosão marginal são as características

hidrodinâmicas do fluxo nas proximidades das margens, a geometria do canal, as ondas provocadas pelo vento e os fatores climáticos e biológicos (SIMONS et al, 1982; THORNE e TOVEY, 1981; PIMENTEL, 2004). A partir de uma mesma situação hidrodinâmica, a erosão de uma margem passa a depender, sobretudo, das características do barranco (altura, geometria, estrutura, propriedades mecânicas de seus constituintes). Os barrancos das margens dos rios são geralmente dominados por Neossolos Flúvicos, que apresentam camadas, sem orientação pedogenética, com sedimentos resultando da deposição sucessiva promovida pelos fluxos de alta intensidade durante os períodos de cheias que naturalmente ocupam a planície de inundação correspondente (EMBRAPA, 2005; IBGE, 2006). Essa variabilidade de composição das camadas desses solos tanto horizontal como verticalmente, justificam uma cuidadosa avaliação dos atributos físicos desses solos.

Um dos atributos mais importantes para caracterização dos solos quanto à susceptibilidade a erosão é a associação entre coesão e ângulo de atrito das suas partículas sólidas, resultando na resistência ao cisalhamento (ORTIGÃO, 1995; PINTO, 2000; BRAIDA et al, 2007), definida por Silva e Cabeda (2005) como a tensão máxima cisalhante que o solo pode suportar sem sofrer ruptura. A resistência ao cisalhamento pode ter três origens: a primeira por efeito de um cimento natural aglutinando as partículas do solo entre si (matéria orgânica e óxidos de Fe e Al), a segunda por efeito de eventual ligação entre as partículas, por proximidade umas das outras, e a terceira por efeito da pressão capilar na água intersticial, quando o solo sofre um esforço de ruptura (VARGAS, 1989). É influenciada pela forma e distribuição de partículas do solo, estrutura, densidade, teor de água, tipo de argilomineral, tipo e quantidade de cátions presentes e forças de repulsão e atração entre partículas (McCORMACK e WILDING, 1979; THORNE, 1981; BRAIDA et al, 2007).

A resistência do solo ao cisalhamento (τ) pode ser expressa pela equação de Coulomb (THORNE, 1981; VARGAS, 1989; SILVA e CARVALHO, 2007; PARKER et al, 2008). Nesta equação, são expressos os parâmetros coesão e coeficiente de atrito entre as partículas do solo. Vargas (1989), Lebert e Horn (1991), Rocha et al (2002), Silva et al (2004) explicam que estes parâmetros são intrínsecos ao solo, sendo determinados por suas propriedades e características citadas acima.

A coesão pode ser definida como a força de atração entre as superfícies das partículas do solo. Parker et al (2008) explicam que a coesão pode ser dividida em

coesão específica e coesão aparente. A primeira é resultado do efeito dos agentes cimentantes, como teor de óxidos de Fe e Al e de argilas silicatadas, bem como o resultado da atração entre partículas próximas por forças eletrostáticas (Mitchell, 1976). Já a coesão aparente normalmente é atribuída a solos não saturados e pode ser definida como o resultado da tensão superficial da água nos poros do solo, formando menisco capilares de água entre as partículas sólidas aproximando-as. Muitas vezes emprega ao solo uma coesão que não é própria dele, porém quando o mesmo perde umidade a coesão aparente diminui (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

Pinto (2000) define ângulo de atrito como o ângulo máximo que a força transmitida ao solo pode fazer com a força normal à superfície de contato, sem que haja o cisalhamento do solo no plano de ruptura. Este ângulo representa as características friccionais entre as partículas do solo, e é dependente de fatores como densidade do solo, percentagem e tipo de argilomineral, tamanho e forma dos grãos de areia do solo. Adicionalmente deve-se considerar a vegetação, ou sua ausência, como fator que influencia no ângulo de ruptura do solo (GRAY e SOTIR, 1996).

Quando ocorre, o cisalhamento do solo, que é a ruptura das forças de ligação entre suas partículas, pode desencadear movimentos de massa com desmoronamento de blocos seguindo um plano vertical, promovido pelo excesso de peso (FERNANDEZ e FULFARO, 1993; HOLANDA et al, 2007).

O método mais empregado para aferir a resistência ao cisalhamento de solos foi proposto por Lambe (1951), denominado de Direct Shear Test (DST) – Teste de Cisalhamento Direto – que consiste no deslizamento da metade superior do corpo de prova do solo em relação à metade inferior, determinando-se para cada tensão normal (σ_n) aplicada à superfície de deslizamento, o valor da força cortante (τ) necessária para provocar a deformação contínua do solo até à ruptura do corpo de prova.

A vulnerabilidade de um talude aos processos erosivos está relacionada com a natureza coesiva das partículas do solo que o compõe (SHIELDS, 1936) associada à altura e inclinação do barranco que são responsáveis por sua estabilidade, que é definida pelo Fator de Segurança (FS). Holanda et al (2007) definem Fator de Segurança como a resultante do quociente entre forças resistentes e forças atuantes, desta forma considera-se um talude como instável quando o valor de FS é inferior à unidade.

Outra propriedade importante quanto à vulnerabilidade dos solos aos processos

erosivos é o Índice de Plasticidade do solo. De acordo com Santos (2002) este índice é determinado pela diferença entre o Limite de Plasticidade (LP) e o Limite de Liquidez (LL) e indica a faixa de valores em que o solo se apresenta com comportamento plástico, e diz respeito ao menor teor de umidade com o qual o solo se torna quebradiço.

O objetivo deste trabalho foi verificar a influência dos atributos físicos de um Neossolo Flúvico na vulnerabilidade à erosão de um talude da margem direita do Baixo São Francisco.

4 Materiais e Métodos

Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Água e Solo do Departamento de Engenharia Agrônômica e no Laboratório de Geotecnia e Pavimentação do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Sergipe, a partir de amostras de um Neossolo Flúvico coletadas na margem direita do baixo curso do rio São Francisco, mais especificamente no município de Propriá, Estado de Sergipe, (coordenadas UTM 744.301,092 E e 8868.461,918 N). O clima da região é quente, do tipo semi-úmido, com temperatura média anual de 25 °C, e apresenta estação chuvosa entre os meses de março e setembro com precipitação de 800 a 1.300 mm, ou seja, no inverno, enquanto no restante da bacia as chuvas se verificam no verão (CONEJO, 2003). A altura média do talude marginal é de 2,63 metros, largura média de 6,34 metros e comprimento de 100,00 metros, perfazendo uma área de 888,05 m², com declividade média de 43,03% (Figura 1).

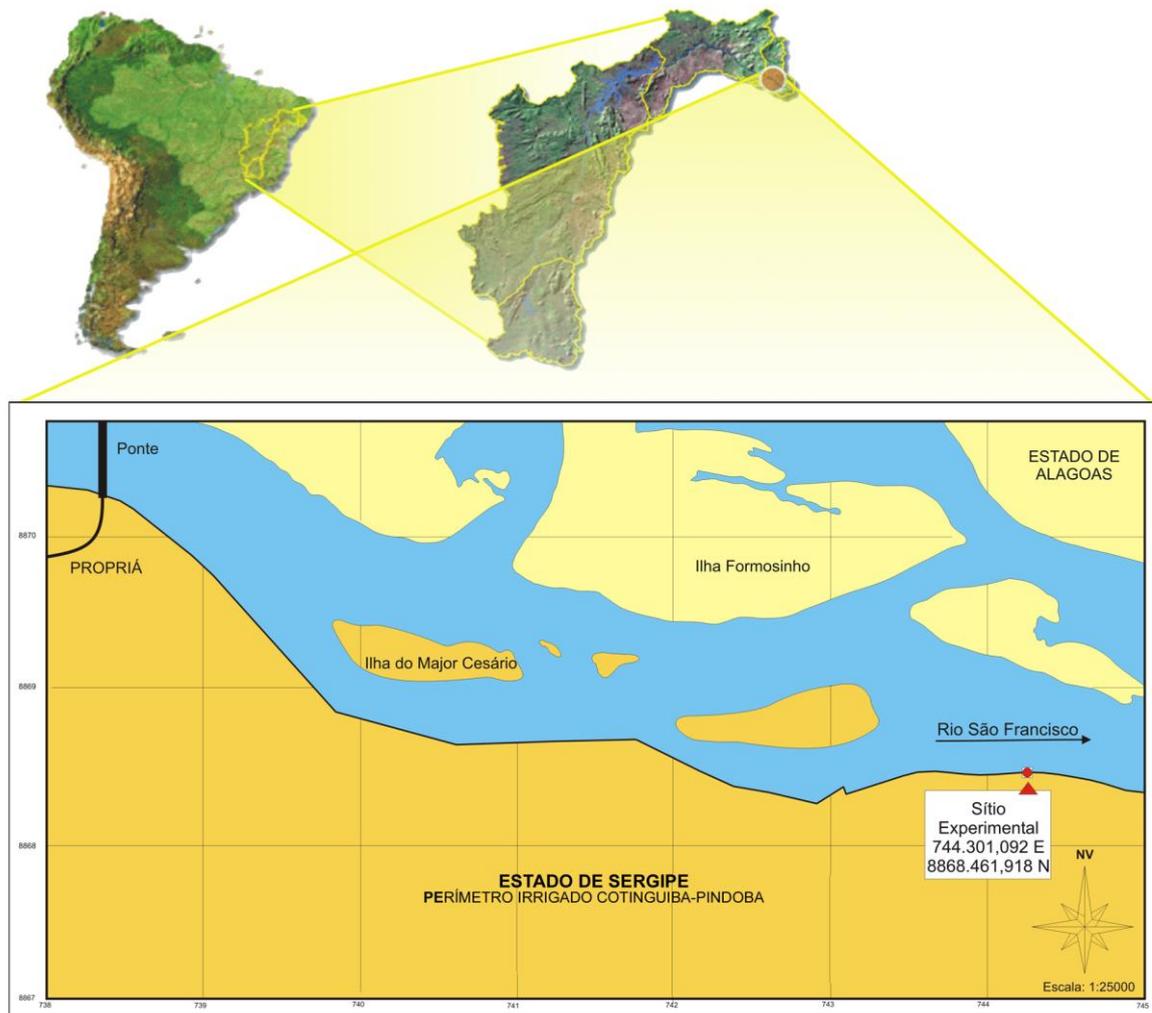


Figura 1. Localização da área de estudo. Adaptado de Holanda et al (2007).

Foram realizadas duas coletas de solo. A primeira, composta por amostras deformadas para a caracterização física do solo, ocorreu no mês de junho de 2008, quando foram realizadas, no total, 18 (dezoito) sondagens escalonadas a trado, até que o nível d'água fosse alcançado, em 5 (cinco) seções transversais do talude marginal equidistantes 20,0 metros, demarcadas por Santana (2008). Para verificação da umidade gravimétrica, granulometria e densidade das partículas foram conduzidos ensaios laboratoriais em triplicata com base nos métodos estabelecidos por EMBRAPA (1997). A partir de dados topográficos previamente mensurados e dos resultados da caracterização do solo então foi gerado o Modelo Digital do Terreno em ambiente CAD, do qual foi possível extrair o perfil geotécnico. Este perfil foi usado para orientar a segunda coleta, realizada no mês de Setembro de 2008 com um total de 05 (cinco)

amostras indeformadas, retiradas com o auxílio de cilindros de aço com 0,15 m de diâmetro e 0,20 m de altura, nos pontos que apresentaram classes texturais distintas. Somente estas foram submetidas ao ensaio de cisalhamento direto, sendo identificadas de acordo com a localização de sua seção transversal e profundidade de coleta e classificadas no Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e em Classes Texturais conforme Santos et al (2005).

Os ensaios de resistência do solo ao cisalhamento foram realizados de acordo com a MSL-15 da CESP – Companhia Energética de São Paulo – com uso de uma prensa de cisalhamento direto Marca Wille Geotechnik, modelo LO 2900. A velocidade horizontal de deslocamento empregada nos ensaios foi de $8,3 \times 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$, sendo as leituras realizadas nos intervalos de 15, 30 segundos e a cada minuto, com a amostra sendo saturada (sob inundação) aos 30 segundos.

O intercepto de coesão (c), coeficiente de atrito ($tg\Phi$) e, por conseguinte, a tensão cisalhante (τ) foram determinados em três corpos de prova retirados das amostras indeformadas do solo e submetidos a três níveis de tensão normal (σ_n): 25, 50 e 100 KPa, estimadas em função do peso específico médio dos grãos multiplicado pela altura do barranco. Para cada nível de tensão normal (σ_n) foi obtida a tensão cisalhante máxima (τ), assim, ajustou-se uma reta usando a Equação de Coulomb (Equação 1), que permitiu obter o intercepto de coesão (c) e o coeficiente de atrito ($tg\Phi$).

$$\tau = c + \sigma_n tg\Phi \quad (1)$$

A fim de conhecer o Índice de Plasticidade (IP) das amostras (Equação 2), foram conduzidos ensaios para identificar os Limites de Atterberg seguindo as normas NBR 7180 (ABNT, 1984a) e NBR 6459 (ABNT, 1984b) da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, para determinar o Limite de Liquidez (LL) e o Limite de Plasticidade (LP), respectivamente.

$$IP = LL - LP \quad (2)$$

5 Resultados e Discussão

O perfil geotécnico apresentado na Figura 2 mostra a presença de quatro classes texturais de solo e sua distribuição espacial na área experimental, e a partir desta informação foi possível selecionar os pontos de coleta das amostras destas classes

texturais, que foram submetidas ao ensaio de cisalhamento direto.

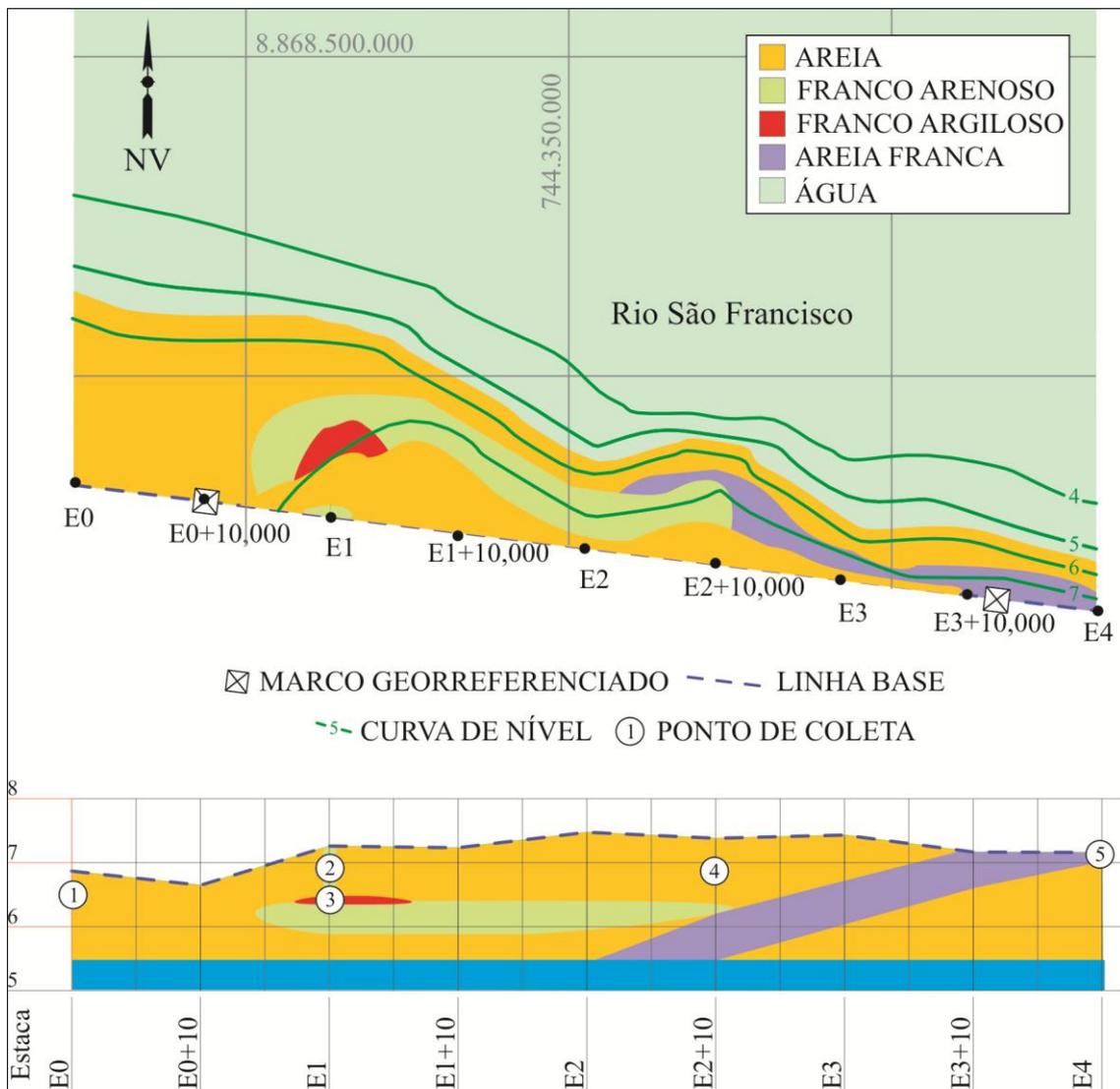


Figura 2. Perfil Geotécnico do sítio experimental apresentando as diferentes classes texturais.

A disposição das camadas com granulometria diferenciada apresentada no perfil geotécnico, evidencia o processo de deposição neste trecho do rio, caracterizando a esperada ausência de orientação pedogenética dos Neossolos Flúvicos. Somente na classe textural Areia foram estabelecidos dois pontos de coleta, pois esta classe apresentou ampla distribuição no talude (Tabela 1).

Tabela 1. Resultado da Caracterização das amostras selecionadas para o ensaio de cisalhamento direto. Universidade Federal de Sergipe, 2009.

Amostra	Estaca/ Profundidade	Umi- dade (kg.kg ⁻¹)	Granulometria (%)								SUCS ¹	Classe Textural ²
			Areia Muito Grossa	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Areia Muito Fina	Areia total	Silte	Argila		
1	E0 (0 - 80)	0,156	0,02	0,14	3,64	55,37	30,39	89,54	8,06	2,39	SW-SM	Areia
2	E1 (0 - 120)	0,224	0,01	0,04	2,38	50,13	21,20	73,76	13,31	12,93	SM	Franco arenosa
3	E1 (120 - 140)	0,270	0,05	0,20	2,65	13,88	19,71	36,49	31,95	31,56	SM	Franco argilosa
4	E2+10 (0 - 210)	0,686	0,01	0,04	5,36	77,03	11,45	93,89	5,19	0,91	SW-SM	Areia
5	E4 (0 - 90)	0,199	0,18	0,25	1,69	53,71	28,02	83,84	12,16	4,00	SM	Areia franca

1 Sistema Unificado de Classificação do Solo.

2 Santos et al (2005).

Verificou-se a predominância da fração areia em todas as amostras, com baixos teores de finos (silte e argila), exceto na amostra 3, que apresentou teores similares das três frações de sólidos. Quando o solo apresenta predominância de partículas grosseiras, ocorre a formação de uma maior quantidade de espaços vazios com dimensões maiores entre as partículas (macroporos), devido sua estrutura química e mineralógica que não proporcionam atração dos agentes cimentantes responsáveis pela agregação das partículas do solo (KIEHL, 1979; BRADY, 1989).

O tamanho das partículas do solo é um dos atributos que mais influencia na resistência ao cisalhamento, por alterar o ângulo de atrito, que aumenta proporcionalmente com o tamanho da partícula (AL-SHAYEA, 2001; SILVA e CARVALHO, 2007; PARKER et al, 2008). A predominância de partículas grosseiras nas amostras analisadas faz com que o ângulo de atrito entre as partículas aumente, diminuindo sua resistência ao cisalhamento e conseqüentemente aumentando sua vulnerabilidade a erosão. Esse comportamento de maior intensidade do processo erosivo, poderá ser observado nas camadas do talude que contenha amostra com granulometria mais grosseira.

A umidade do solo é um outro atributo relevante a ser considerado na avaliação da vulnerabilidade à erosão do talude da margem do rio. As amostras de solo, em geral, apresentaram como padrão, elevados teores de umidade devido à precipitação de 14,4 mm registrada na estação pluviométrica Cotinguiba-Pindoba, durante a coleta. Entretanto, as amostras 3 e 4 apresentaram valores diferentes do padrão das demais amostras analisadas. O maior teor de umidade apresentado pela amostra 3 é explicado

pela sua composição granulométrica que possibilita uma estrutura do solo com maior quantidade de poros de armazenamento de água (microporos) face à predominância de partículas finas. Como observado na Tabela 1, a amostra 4 apresentou o menor valor de umidade entre as demais amostras, mesmo apresentando classificação textural igual a amostra 1. Isto pode ser explicado pela maior quantidade da fração areia, 93,81% e 89,54 % respectivamente, e menor quantidade da fração argila, 0,91% e 2,39% respectivamente, sugerindo que a amostra 4 possui melhor drenagem interna. Além disso, por estar mais próximo da superfície, o teor de água no solo da amostra 1 pode ter sido influenciado pela maior composição de matéria orgânica proveniente da cobertura vegetal e do seu sistema radicular, que tende a reter mais umidade. Situação semelhante foi identificada por Wagner Junior et al (2006) que observaram maiores teores de umidade nas camadas mais superiores dos solos que apresentavam cobertura vegetal, sendo este valor decrescente à medida em que a profundidade aumentava.

É possível afirmar que a camada composta pelo solo da amostra 4 é mais vulnerável à erosão em relação às demais amostras, por apresentar excessiva drenagem interna, não havendo a possibilidade de agregação entre as partículas de solo. A presença de água entre as partículas ocasiona um fenômeno conhecido como tensão superficial, que tende a aproximar as partículas e proporcionar ao solo uma força coesiva que não é própria dele, conhecida como coesão aparente (REICHARDT e TIMM, 2004). A coesão aparente é frequentemente referida às areias devido a sua facilidade para secagem e saturação (SANTOS, 2002). Embora contribua para a agregação do solo, esta força é insuficiente para manter suas partículas próximas quando submetidas a uma força externa, por exemplo o embate das ondas na margem do rio. Outro aspecto que contribui para a vulnerabilidade da camada que contém o solo da amostra 4, é o fato de estar mais próxima do nível da água (210 cm de profundidade), podendo ser atingida mais frequentemente pela oscilação da cota do rio. Parker et al (2008) afirmam que quando o teor de água está elevado aumenta o efeito lubrificante entre as partículas de solo, fazendo com que as mesmas estejam mais separadas, diminuindo sua coesão. Assim, este fenômeno é mais comum na base do talude marginal, ou na sua faixa de oscilação, pois é área que está em contato permanente com a lâmina d'água, tornando os solos aluviais mais susceptíveis a erosão fluvial por apresentarem baixa coesão (THORNE, 1981).

O comportamento das amostras durante a etapa de adensamento do ensaio de

cisalhamento direto mostra que a composição granulométrica foi o principal atributo do solo que influenciou os resultados. Os corpos de prova submetidos às tensões de 25, 50 e 100 KPa, apresentaram diferentes resultados (Figura 3).

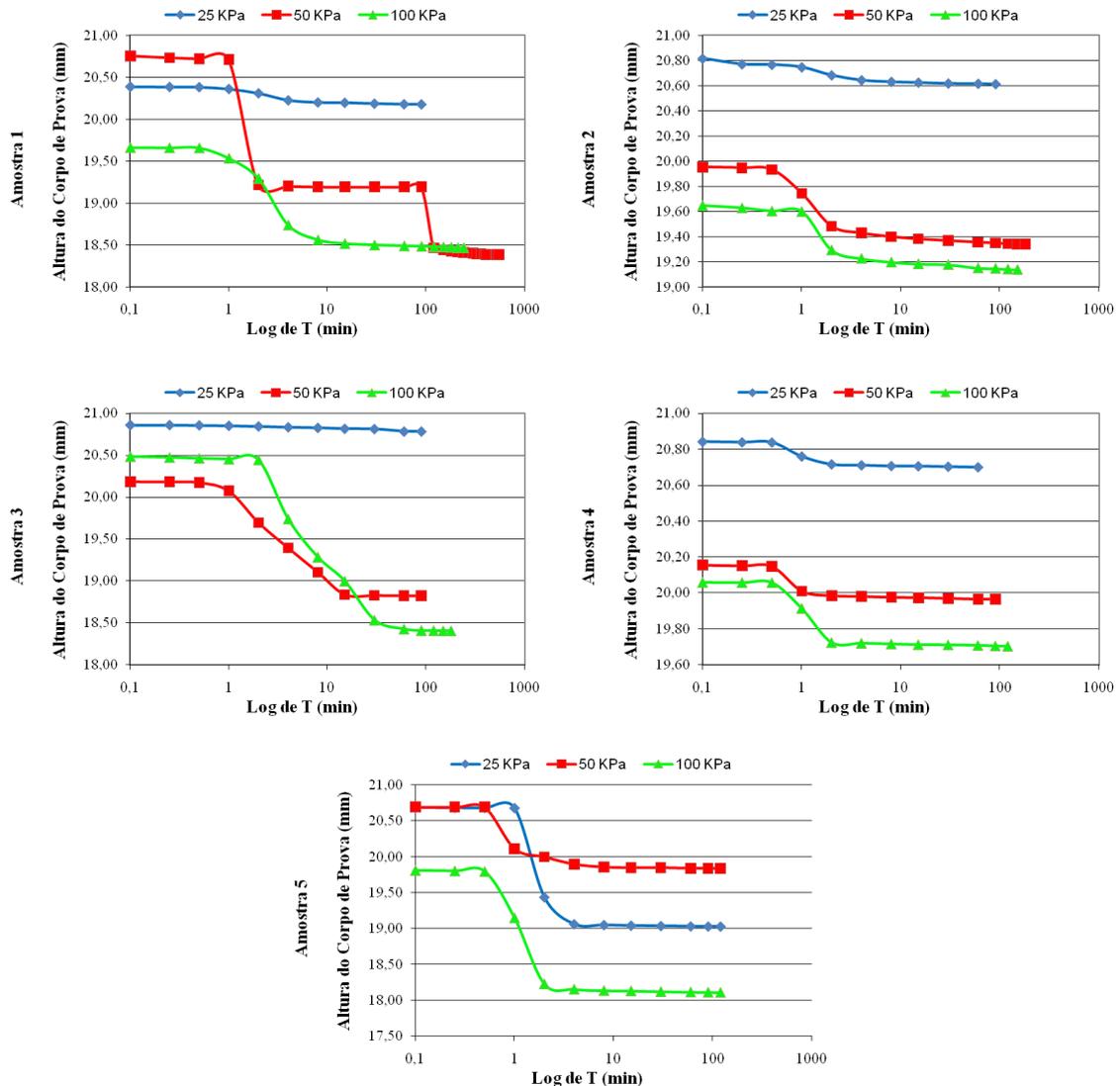


Figura 3. Comportamento da altura dos corpos de prova em função do tempo nas tensões normais de 25, 50 e 100 KPa para as amostras ensaiadas.

A fase de adensamento foi considerada rápida, durou em média 2 horas e reflete a capacidade que o solo tem de responder a uma determinada carga impressa sobre ele. Autores relatam que a fase de adensamento em solos com teor de finos acima de 80% duram em média 12 horas. A velocidade do adensamento reflete a expulsão da água retida entre as partículas de solo e é dada pelo índice de vazios inicial do solo, que sofre

influência direta da granulometria, sendo mais rápida quando este índice é mais elevado (TERZAGUI et al, 1996; CODUTO, 1999; SILVEIRA, 2008).

As amostras avaliadas apresentaram índice de vazios inicial próximos de 1,0 (Tabela 2), que é quando o volume de espaços vazios é igual ao volume de sólidos, com exceção da amostra 5 que apresentou o menor índice de vazios inicial. Do mesmo modo, o grau de saturação das amostras se comportou conforme o esperado, uma vez que quanto menor o índice de vazios, mais facilmente os espaços porosos são preenchido com água (VARGAS, 1989; ORTIGÃO 1995).

Como os ensaios foram realizados sob inundação (amostras saturadas), as amostras apresentaram diferentes valores para os atributos: Peso específico médio do solo seco, Peso específico dos grãos, Índice de vazios inicial, Índice de vazios final, Grau de saturação inicial e Grau de saturação final. Estes atributos reunidos, associados aos Índices de Atterberg, representam o comportamento geotécnico das amostras (Tabela 2).

Tabela 2. Parâmetros físicos das amostras submetidas ao ensaio de cisalhamento direto nas tensões de 25, 50 e 100 KPa.

Amostra	Tensões Normais	Peso específico médio do solo seco	Peso específico médio dos grãos (g.cm ⁻³)	Índice de vazios inicial (e ₀)	Índice de vazios final (e ₁)	Grau de saturação inicial (%)	Grau de Saturação final (%)	Consistência	
								LL	IP
	- KPa -	- g.m ⁻³ -	- g.m ⁻³ -						
1	25			0,840	0,769	16,100	94,600		
	50	1,416	2,501	0,719	0,462	18,800	164,940	NL	NP
	100			0,743	0,562	18,200	118,637		
2	25			0,794	0,763	23,800	90,165		
	50	1,430	2,533	0,731	0,578	25,400	112,979	NL	NP
	100			0,732	0,559	25,400	118,024		
3	25			0,632	0,617	34,300	146,215		
	50	1,427	2,558	0,932	0,679	23,300	213,984	24	8
	100			0,840	0,572	25,800	138,428		
4	25			0,709	0,685	13,700	83,159		
	50	1,437	2,635	1,268	1,217	7,600	47,279	NL	NP
	100			0,639	0,587	15,200	97,485		
5	25			0,509	0,368	42,500	135,615		
	50	1,345	2,010	0,479	0,346	45,200	163,964	NL	NP
	100			0,494	0,265	43,800	160,476		

Os valores encontrados para o Peso específico médio do solo seco para as amostras avaliadas são considerados muito baixos, e pode ser explicado pelo Índice de vazios inicial, reafirmando Terzagui et al (1996) e Coduto (1999) que caracterizam solos com estes teores, como solos moles (com baixa capacidade de suporte e alta compressibilidade). No entanto, os valores de Peso específico dos grãos diferem dos

valores esperados para solos com altos teores da fração areia, exceto a amostra 4. Solos com predomínio de material arenoso devem possuir peso específico em torno de $2,65 \text{ g.cm}^{-3}$, devido à natureza mineralógica das partículas que os compõem (KIEHL, 1979; BRADY, 1989; VARGAS, 1989; ORTIGÃO, 1995). A divergência quanto aos dados encontrados é explicada pela natureza peculiar de formação dos Neossolos Flúvicos, que não possuem orientação geneticamente definida, resultante da deposição de sedimentos aluviais.

Em solos arenosos a resistência ao cisalhamento é mais influenciada pelo ângulo de atrito das partículas do que pela coesão (Lebert e Horn, 1991). Assim, o parâmetro mais confiável para indicar o grau de vulnerabilidade do solo à erosão marginal é o ângulo de atrito, pois estão diretamente relacionados. A coesão do solo e o ângulo de atrito das partículas variaram entre as classes texturais evidenciando a influência da composição granulométrica neste atributo do solo (Tabela 3).

Tabela 3. Valores obtidos nos ensaios de cisalhamento direto e plasticidade para as amostras.

Amostra	Profundidade (m)	Classificação textural	Coesão (KPa)	Ângulo de atrito (°)	Consistência	
					LL	IP
1	0,8	Areia	0,172	9,759	NL	NP
2	1,2	Franco Arenoso	0,536	28,190	NL	NP
3	1,4	Franco Argiloso	0,539	28,240	24	8
4	2,10	Areia	0,705	35,180	NL	NP
5	0,9	Areia Franca	0,600	30,960	NL	NP

Os valores de coesão encontrados foram considerados baixos, enquanto os ângulos de atrito identificados foram considerados altos. Os baixos valores de coesão evidenciam a fraca agregação deste solo, pois os agregados não apresentam resistência suficiente para produzir mudanças significativas na inclinação do ângulo de atrito e na coesão, podendo ser rompidos com pequenas pressões normais. O efeito real deste comportamento é a alta probabilidade de colapso do solo que compõe este talude marginal, podendo ocorrer na forma de desmoronamentos por cisalhamento, que ocorre quando o bloco, devido ao solapamento da base, desmorona seguindo um plano vertical, sendo restrito a materiais arenosos de baixa coesão (FERNANDEZ e FULFARO, 1993). A amostra 1 (Areia) apresentou o menor ângulo de atrito, embora seja composta por pouco mais de 10% de finos. Já a amostra 4, de mesma classificação textural, apresentou maior ângulo de atrito, mais uma vez demonstrando a vulnerabilidade do

solo desta amostra à erosão marginal. Na prática, esta diferença pode ser explicada pelo fato de a amostra 1 possuir maior quantidade de finos que a amostra 4 (Tabela 1). Além disso, vale ressaltar que a amostra 1 foi coletada numa profundidade menor, passível de sofrer influência da proximidade do sistema radicular e da decomposição da matéria orgânica. Braida et al (2007), pesquisando sobre coesão e ângulo de atrito interno em solo franco arenoso, identificaram menores valores de ângulo de atrito interno nas amostras que continham maiores teores de matéria orgânica e associaram este comportamento à redução do peso específico do solo, que por sua vez significa redução do número de pontos de contato entre as partículas.

Do ponto de vista experimental, foi possível identificar um ajuste bastante satisfatório da equação linear para o ensaio de cisalhamento direto (Figura 4).

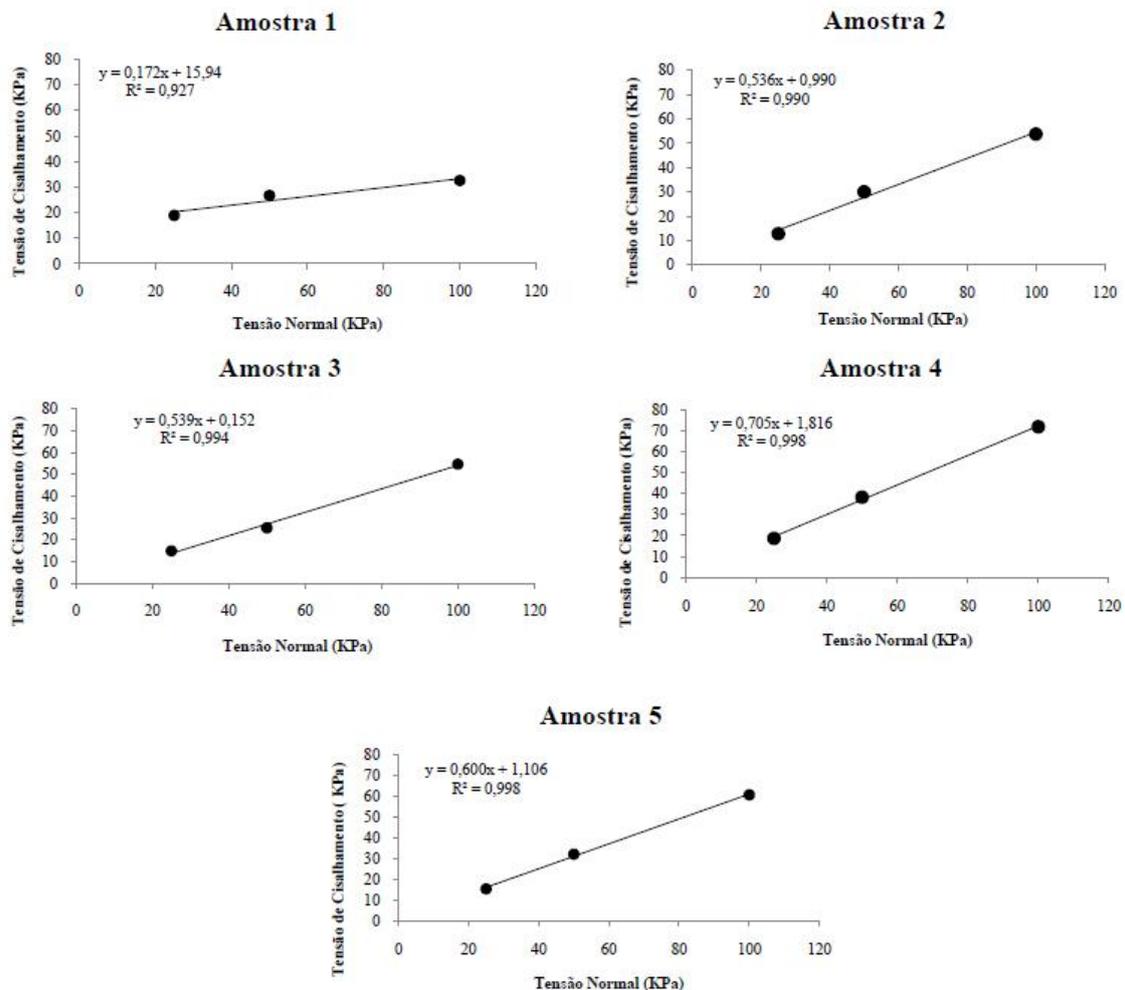


Figura 4. Relação linear simples entre a tensão normal (σ_n) e tensão cisalhante (τ) das Amostras, com seus respectivos parâmetros de intercepto de coesão e coeficiente de atrito.

Nas amostras com elevados teores de areia, os espaços porosos são maiores e as forças capilares relativamente desprezíveis, fazendo com que as camadas compostas por este material seja denominada de não-coesivas. Já no caso da camada que apresenta maior quantidade de finos (amostra 3), os espaços entre as partículas são pequenos, com isso, ocorre a formação de filmes d'água de pequena espessura e aumento da pressão capilar, tornando essa camada mais coesiva, sugerindo que esta camada possua maior resistência à erosão que as demais, pois a resistência ao cisalhamento aumenta com a elevação da pressão capilar na água intersticial, quando o solo sofre um esforço de ruptura (VARGAS, 1989).

Quanto aos índices de Atterberg, com exceção da amostra 3 que apresentou índice de plasticidade igual a 8 (Figura 5), as demais amostras foram classificadas como Não Plástica (NP). Menezes et al (2003), consideram um material com índice de plasticidade acima de 15% como altamente plástico.

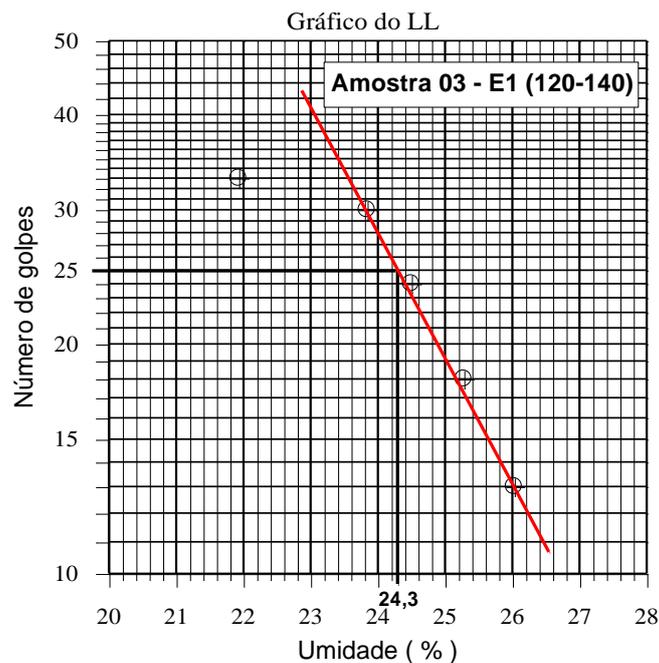


Figura 5. Gráfico do Limite de Liquidez da amostra 3.

A influência positiva das partículas finas no comportamento do solo da amostra 3 está condicionada à umidade que esta amostra consegue reter, já que na propriedade da plasticidade a água orienta as partículas coloidais na direção do fluxo. O efeito, na prática, é uma maior resistência mecânica do solo que compõe a camada da amostra 3,

devido às moléculas de água estarem presas às partículas do solo por meio das pontes de hidrogênio, com isso ocorre a ligação das partículas coloidais entre si (RAWET e SANTOS, 1980, citados por FLORES et al, 2007).

Pode-se dizer que a vulnerabilidade do solo deste talude à erosão marginal é definida, principalmente, pela granulometria grosseira das partículas que o compõe, e conseqüentemente influencia negativamente nos demais atributos avaliados, sobretudo sobre os elevados valores do ângulo de atrito interno do solo.

6 Conclusões

A predominância de partículas grosseiras faz com que o ângulo de atrito interno do solo aumente, diminuindo sua resistência ao cisalhamento e aumentando sua vulnerabilidade a erosão.

A camada composta pelo solo da amostra 4 é mais vulnerável à erosão em relação às demais por apresentar maior ângulo de atrito interno, ter excessiva drenagem interna e por estar mais susceptível à oscilação do nível da água do rio.

O peso específico médio do solo seco para as amostras avaliadas é considerado muito baixo, enquanto o peso específico dos grãos difere dos valores esperados para solos com altos teores da fração areia, exceto para amostra 4.

Os baixos valores de coesão de todas as amostras evidenciam a fácil ruptura dos agregados quando submetidos a pequenas pressões normais.

A camada composta pelo solo da amostra 3 possui maior resistência a erosão que as demais camadas por apresentar maior quantidade de finos e plasticidade.

7 Referências Bibliográficas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7180: Determinação do limite de liquidez de solos, Rio de Janeiro (1984a).

_____. NBR 6459: Determinação do limite de plasticidade de solos, Rio de Janeiro (1984b).

AL-SHAYEA, N. A. The combined effect of clay and moisture content on the behavior of remolded unsaturated soils. **Engineering Geology**, v. 62, 2001, p. 319-342.

BANDEIRA, A. A. **Evolução do processo erosivo na margem direita do Rio São Francisco e eficiência dos enrocamentos no controle da erosão no trecho em estudo**. 2005. 183 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Núcleo de Pós-graduação e Estudos do Semi-Árido, Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, SE, 2005.

BRADY, N. C. **Natureza e propriedade dos solos**. 7ª ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1989.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SOARES, J. M. D. Coesão e atrito interno associados aos teores de carbono orgânico e de água de um solo franco arenoso. **Ciência Rural**, v. 37, n. 6, 2007, p. 1646-1653.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia fluvial**. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1981.

CODUTO, D. P. **Geotechnical engineering, principles and practices**. Upper Saddle River: Prentice Hall Publishing, 1999.

COELHO, A. L. N. Geomorfologia fluvial de rios impactados por barragens. **Caminhos de Geografia**, v. 9, n. 26, 2008, p. 16-32.

CONEJO, J. G. L. (coord.). **Programa de Ações Estratégicas para o Gerenciamento Integrado da Bacia do Rio São Francisco e da sua Zona Costeira – PAE**. Relatório Final. Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do São Francisco - GEF São Francisco (ANA/GEF/PNUMA/OEA). Subprojeto 4.5 B – Formulação de um Programa de Gerenciamento Integrado da Bacia do rio São Francisco e da sua Zona Costeira. Brasília: 2003.

CUNHA, S. B. **Impactos das Obras de Engenharia Sobre o Ambiente Biofísico da Bacia do Rio São João (Rio de Janeiro – Brasil)**. Rio de Janeiro: Instituto de Geociências – UFRJ, 1995.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de**

- análise de solo**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1997.
- _____. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2005.
- FERNANDEZ, O. V. Q.; FULFARO, V. J. Magnitude e processos da erosão marginal no rio Paraná, trecho de Porto Rico, PR. **Geografia**, v. 18, n. 1, 1993, p. 97-114.
- FLORES, O. J. U.; MENDEZ, L.; PRETTE, A. L. G.; FREDEL, M. C.; AL-QURESHI, H. A.; ZOTA, D. . In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 51., 2007, Salvador. **Anais...** Salvador: Associação Brasileira de Cerâmica, 2007.
- FONTES, L. C. S. **Erosão marginal no baixo curso do rio São Francisco: um estudo de caso de impactos geomorfológicos à jusante de grandes barragens**. 2002. 321 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente). Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2002.
- FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. New York: John Wiley, 1993.
- GRAF, W. L. Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers, **Geomorphology**, v. 79, n. 1, 2006, p. 336-360.
- GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia e meio ambiente**. 4ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003.
- GRAY, D. H.; SOTIR, R. **Biotechnical and soil Bioengineering Slope Stabilization**. New York: John Wiley, 1996.
- HOLANDA, F. S. R.; SANTOS, L. G. C.; SANTOS, C. M.; CASADO, A. P. B.; PEDROTTI, A.; RIBEIRO, G. T. Riparian vegetation affected by bank erosion in the Lower São Francisco River, Northeastern Brazil. **Revista árvore**, v. 29, n. 2, 2005, p. 327-336.
- HOLANDA, F. S. R.; SANTOS, C. M.; CASADO, A. P. B.; BANDEIRA, A. A.; OLIVEIRA, V. S.; FONTES, L. C.; ROCHA, I. P.; ARAUJO FILHO, R. N.; GOIS, S. S.; VIEIRA, T. R. S. Análise multitemporal e caracterização dos processos erosivos no Baixo São Francisco Sergipano. **Revista brasileira de geomorfologia**, v. 8, n. 2, 2007, p. 85-94.
- 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, 2008, p. 570-575.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico de Pedologia**.

2ª Ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2006.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**. São Paulo: Ceres, 1979.

LAMBE, T. W. **Soil testing for engineers**. New York: John Wiley, 1951.

LEBERT, M; HORN, T. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil Tillage Research**, v. 19, 1991, p. 275-286.

MANYARI, W. V.; CARVALHO JUNIOR, O. A. Environmental considerations in energy planning for the Amazon region: Downstream effects of dams. **Energy Policy**, v. 35, n. 12, 2007, p. 6526-6534.

McCORMACK, D. E.; WILDING, L. P. Soil properties influencing strength of Cranfield and Geeburg soils. **Soil science society american journal**, v. 43, 1979, p. 167-173.

MENEZES, R. R.; FERREIRA, H. S.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. Caracterização de argilas plásticas do tipo "ball clay" do litoral paraibano. **Cerâmica**, v. 49, n. 311, 2003, p. 120-127.

MITCHELL, J. K. **Fundamentals of soil behavior**. New York: John Wiley, 1976.

OLIVEIRA, V. S. **Erosão marginal no baixo curso do rio São Francisco e seus efeitos nos agroecossistemas**. 2006. 63 f. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas). Núcleo de Pós-Graduação e Estudos em Recursos Naturais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2006.

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à mecânica dos solos dos Estados críticos**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1995.

PARKER, C.; SIMON, A.; THORNE, C. R. The effects of variability in bank material properties on riverbank stability: Goodwin Creek, Mississippi. **Geomorphology**, v. 101, n. 4, 2008, p. 533-543.

PIMENTEL, V. C. R. **Alternativas de solução para os impactos físicos de barragens**. 2004. 349 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica). Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, Planta e Atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. São Paulo: Manole, 2004.

ROCHA, W. W.; DIAS JÚNIOR, M. S.; LIMA, J. M.; MIRANDA, E. E. V.; SILVA, A. R. Resistência ao cisalhamento e grau de intemperismo de cinco solos na região de

- Lavras (MG). **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 26, n. 2, 2002, p. 297-303.
- SANTANA, S. A. **Relações entre estabilidade de taludes e os processos erosivos no Baixo São Francisco**. 2008. 114 f. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas). Núcleo de Pós-Graduação e Estudos em Recursos Naturais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2008.
- SANTOS, C. M. **A erosão no Baixo São Francisco sergipano e os mecanismos de desestabilização dos taludes na margem do rio**. 2002. 143 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente). Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2002.
- SANTOS, R. D.; LEMOS, R. D.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. **Manual de Descrição e Coleta de solo no Campo**. 5ª ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005.
- SHIELDS, I. A. **Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement**. In: OTT, W. P.; VAN UCHELEN, J. C. (Eds.). *Hydrodynamics Laboratory Publication*, v. 167. Pasadena: California Institute of Technology, 1936.
- SILVA, R. B.; DIAS JÚNIOR, M. S.; SANTOS, F. L.; FRANZ, C. A. B. Resistência ao cisalhamento de um Latossolo sob diferentes usos e manejo. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 28, n. 1, 2004, p. 165-173.
- SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V. Influência de diferentes sistemas de uso e manejo na coesão, resistência ao cisalhamento e óxidos de Fe, Si e Al em solo de tabuleiro costeiro de Alagoas. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 29, n. 3, 2005, p. 447-457.
- SILVA, A. J. N.; CARVALHO, F. G. Coesão e resistência ao cisalhamento relacionadas a atributos físicos e químicos de um Latossolo Amarelo de tabuleiro costeiro. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 31, n. 5, 2007, p.853-862.
- SILVEIRA, R. M. **Comportamento de geotécnico de um solo coluvionar de São Vendelinho (RS)**. 2008. 301 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- SIMONS, I and ASSOCIATES. *Engineering Analysis of Fluvial Systems*. Fort Collins: Simons, I and Associates, 1982.
- TERZAGHI, K.; PERCL, R. B.; MESRI, G. **Soil mechanics in engineering practice**. 3ª ed. New York: John Wiley Sons, 1996.

THORNE, C. R. Field measurements of rates of bank erosion and bank material strength. In: Erosion and Sediment Transport Measurement Symposium, 1981, Florence. **Anais...** Florence: International Association of Hydrological Sciences, 1981. p. 503-512.

THORNE, C. R.; TOVEY, N. K. Stability of composite river banks. **Earth surface processes and landforms**, v. 6, 1981. p. 469-484.

VARGAS, M. **Introdução a mecânica dos solos**. São Paulo: McGraw-Hill, 1989.

WAGNER JUNIOR, A.; PIMENTEL, L. D.; MORGADO, M. A. D.; SILVA, J. O. C.; SOUZA, C. M.; BRUCKNER, C. H. Influência do manejo da cobertura vegetal sobre a umidade do solo e crescimento do porta-enxerto de pessegueiro “Okinawa”. **Revista brasileira de agrocência**, v. 12, n. 1, 2006, p. 99-103.

CAPÍTULO 3: Influência de variáveis climáticas e hidrológicas na ocorrência da erosão marginal do Baixo São Francisco

1 Resumo

As características fisiográficas de um curso d'água estão em contínua mudança em função da ação permanente das inúmeras variáveis que compõem este sistema. Dentre os processos que evidenciam estas alterações, a manifestação da erosão marginal é considerada como o mais agressivo e tem o homem como principal agente indutor. Diversas variáveis influenciam os processos erosivos em margens de cursos d'água, no entanto este fenômeno tem sido unicamente relacionado à velocidade do fluxo. Em grandes rios, como o São Francisco, as variáveis envolvidas no processo de erosão das margens ganham amplitude, com a regularização da sua vazão. Este trabalho teve como objetivo analisar a distribuição temporal das variáveis climáticas e hidrológicas no rio São Francisco, que divide os Estados de Sergipe e Alagoas no seu baixo curso, e verificar sua relação com os processos erosivos na margem direita. A área de abrangência deste estudo compreende o trecho sedimentar da margem sergipana, no Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba. Foram avaliadas séries históricas das variáveis Precipitação, Vazão, Velocidade do Fluxo, Velocidade e Direção Predominante dos Ventos, obtidas a partir de estações meteorológica, pluviométrica e fluviométrica localizadas no município de Propriá. A influência das variáveis no processo erosivo foi avaliada comparando-se as taxas de erosão mensais obtidas em estudos prévios, com os dados mensais coletados no período de desenvolvimento desse estudo. As chuvas que ocorrem na região são consideradas não erosivas, pois 96,2% dos eventos possuem intensidade menor que $25,0 \text{ mm.h}^{-1}$. A evolução das taxas de erosão nos meses de março e abril de 2004 é explicada pelo aumento da vazão no mês de fevereiro, com pico de $9.894.50 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, e consequente aumento da velocidade do fluxo na área estudada. Observou-se que as precipitações locais interagem com a variável Vento, que se originam predominantemente no Leste no período seco, e no Sudeste no período chuvoso, atingindo velocidades máximas de $8,0$ e $5,5 \text{ m.s}^{-1}$, respectivamente. As frentes de ondas naturais são formadas a partir da direção Leste, e são reorientadas para a direção Sul, ou Sudoeste, onde se chocam contra a margem sergipana. Observou-se também que nos locais onde o canal principal do rio se aproxima da margem, o processo erosivo é mais intenso.

Palavras chave: Erosão, Vento, Vazão.

CHAPTER 3: Influence of climatic and hydrological variables in riverbank erosion at Lower São Francisco river

2 Abstract

The physiographic pattern of water courses is changing by the permanent action of the great number of variables composing this complex system. Among processes that evidence these changes, the riverbank erosion is considered the most aggressive by anthropic actions. Many variables influence the erosion processes in the margin of water courses, however this phenomenon has been solely related to the velocity of the flow. In rivers as big as São Francisco river, the variables involved in bank erosion get amplitude, mainly in regulated river's discharge. The objective of this work was to analyze the seasonal distribution of the climatic and hydrological variables in the São Francisco river what divides the states of Sergipe and Alagoas in the lower part, and to verify the relation with the erosion processes in the right margin, at Sergipe state. The related area comprehends the sedimentary part of the Lower São Francisco river, located at the Irrigated Perimeter Cotinguiba-Pindoba. Historical series of variables such as rainfall, River discharge, Velocity of the Flow, Speed and Predominant Direction of the Winds, were collected from rainfall and fluviometric meteorological stations, located in the Municipality of Propriá. Rains that occur in the region are considered not erosive, therefore 96.2% possess lesser intensity that $25,0 \text{ mm.h}^{-1}$. The evolution of erosion in March and April of 2004 is explained by the increase of the outflow in the February month, with 9,894.50 peak of $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$, and consequent increase of the flow velocity. The rainfall regimen interacts with the wind variable, what occurs predominantly from East direction in the dry season and from southeast during the rainy season, reaching 5.5 and $8,0 \text{ m.s}^{-1}$ maximum speeds, respectively. The natural wave's front are formed from East direction, and reoriented to the South, or Southwest direction, where they shock against the riverbank, at Sergipe state. It was observed that at the places where the talweg is closer to the riverbank, the erosion process is more intense.

Keywords: Erosion, Wind, River discharge.

3 Introdução

A erosão marginal não é um grave problema em cursos d'água com dimensões reduzidas, sendo a sua dinâmica de fácil compreensão e pode ser mitigada ou controlada com simples soluções sejam de engenharia ou de bioengenharia de solos. Embora a maioria dos achados sobre erosão em margens de cursos d'água, associem à regência deste fenômeno unicamente a velocidade do fluxo d'água (FERNANDEZ e SOUZA FILHO, 1995; ROCHA, 1996; BORGES, 2004), entende-se que outras variáveis também influenciam esse processo erosivo. Algumas variáveis hidrológicas e ambientais passam a ter relevante participação, enquanto outras assumem proporções amplificadas quando se trata de grandes rios, demandando uma abordagem sistêmica e uso de técnicas de controle mais elaboradas.

De acordo com Christofolletti (1999) os principais fatores que condicionam os processos de erosão, transporte e sedimentação nos rios são a velocidade da corrente, as características físicas dos sedimentos, a ocorrência de acidentes ou obstáculos no leito, e as variações da vazão do rio, que por sua vez, estão diretamente relacionados com as variações climáticas.

Em um canal natural, os fatores que mais diretamente afetam o grau de estabilidade das margens, a taxa de avanço e a duração da erosão marginal são as características hidrodinâmicas do fluxo nas proximidades do talude, a geometria do canal, as ondas provocadas pelo vento e os fatores climáticos e biológicos (SIMONS et al, 1982; THORNE e TOVEY, 1981).

Embora a erosão marginal seja um fenômeno natural de ajuste dos canais fluviais, ela é potencializada por atividades antrópicas que resultam em alterações fluviais diretas transmitidas ao longo do curso d'água. Dentre estas atividades, destaca-se no rio São Francisco, a operação de barragens para produção de energia ocasiona a regularização da vazão à jusante destas estruturas (GRAF, 2006; MANIARY e CARVALHO JÚNIOR, 2007; COELHO, 2008). Casado et al (2002) explicam que este fato faz com que a lâmina d'água permaneça na mesma cota por longos períodos, fazendo com que ondas incidam sempre sobre o mesmo local, onde a força exercida pela correnteza sobre as margens, potencializa os efeitos naquele nível do barranco e promove a remoção das partículas do solo. A demanda energética da UHE Xingó faz com que ocorra oscilações diárias na vazão defluente no canal do rio São Francisco,

embora tenha seu fluxo regularizado. Esta pequena variação sazonal das vazões pode ser mensurada em centímetros, no nível do rio ao longo do ano (FONTES, 2002) e embora se apresentem muito aquém dos valores alcançados durante os períodos das enchentes antes da construção das barragens, contribui para a ocorrência da erosão marginal, ao produzir marés artificiais. Bandeira (2005) explica que a erosão marginal no baixo curso do rio São Francisco ocorre, em grande parte, em condições normais do dia-a-dia, sem cheias ou outros eventos atmosféricos que a justifiquem. Em seus trabalhos a autora concluiu que é possível perceber em poucos dias a magnitude do processo erosivo e recuo da margem.

De acordo com Oliveira (2003) uma das principais causas da erosão das margens do Baixo São Francisco é 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. É produzido um fluxo subterrâneo no terço inferior da margem durante o rápido rebaixamento do nível de água do rio, retirando alguns materiais finos, tornando os taludes marginais ainda mais suscetíveis a deslizamentos frequentes e ao desmoronamento de suas partes superiores. Isto foi confirmado por Holanda et al (2007), que monitoraram essa variação do nível do lençol freático com a finalidade de caracterizar os processos erosivos da região. Em um trecho do Baixo São Francisco Casado et al (2002) associou a variação das taxas de erosão marginal entre pontos diferentes numa mesma margem ao fato de que a ação das ondas e das correntes também não são iguais na extensão de uma margem.

Coops et al (1996) compararam o efeito de ondas sobre margem de curso d'água artificial em tratamentos com e sem proteção de vegetação e concluíram que ocorreram maiores valores de erosão nas margens desprotegidas. Do mesmo modo Holanda et al (2008), em estudos realizados no Baixo São Francisco, atribuíram as alterações em seções transversais principalmente a ação do embate das ondas na base do talude marginal.

Casado (2000) explica que quando a direção dos ventos coincide com o sentido da corrente, o processo erosivo ocorre com maior magnitude devido a potencialização na formação das ondas. Brighetti e Martins (2001), Ellis et al (2002), Hughes et al (2007), concordam que o vento é um fator importante na formação de ondas que elevam o poder de embate das mesmas, provocando o solapamento progressivo dos barrancos e conseqüente desmoronamento da suas partes superiores. Fernandez (1990) concluiu que

as ondas provocadas pela navegação também influenciam na ocorrência da erosão marginal. Brighetti e Martins (2001) afirmam que este tipo de onda possui princípios genéticos diferentes das ondas geradas por ventos e potencial desagregador inferior às ondas naturais. Hughes et al (2007) comparando ondas naturais (geradas pelo vento) e ondas antrópicas (geradas por embarcações) observaram que este último tipo de onda normalmente está disposta em sequência (trem de ondas) liderada por uma onda de baixa amplitude e baixa frequência, seguida de um ou mais grupos com grande amplitude e alta frequência, e duração máxima de 5 segundos, levando a uma grande transferência de energia para as margens. Porém, elas ocorrem com uma frequência muito menor em comparação às ondas naturais.

Christofoletti (1999) afirma que os principais fatores que condicionam os processos de erosão, transporte e sedimentação nos rios são: a velocidade da corrente; as características físicas dos sedimentos, especificamente o seu tamanho, densidade e forma; a existência de acidentes ou obstáculos no leito e as variações da vazão do rio, que por sua vez, estão diretamente relacionadas com as variações climáticas. Casado et al (2002) explicam que a erosão marginal no Baixo São Francisco também tem uma importante distribuição temporal, não é contínua e está vinculada à magnitude dos eventos climáticos, como precipitação e a intensidade e direção dos ventos, bem como dos eventos hidrológicos, como a variação da vazão e a velocidade do fluxo.

A velocidade da corrente é considerado como um fator chave para o desenvolvimento da erosão e cursos d'água, pois, de maneira geral, seu aumento é proporcional ao volume de solo erodido, principalmente quando este é constituído por material arenoso (ROCHA e SOUZA FILHO, 1999; GUERRA e CUNHA, 2003). Em estudos realizados no rio Paraná, Souza Filho e Stevaux (2000) concluíram que a velocidade do fluxo é a principal variável que influencia a taxa de erosão marginal.

A forma do canal fluvial é uma outra variável importante que reflete o ajustamento do rio à escavação de material, considerando que é resultante da ação exercida pelo fluxo sobre os materiais componentes do leito e das margens (Christofoletti, 1981). A distância entre o canal e a margem é outro fator que exerce influência no processo de desestabilização dos taludes marginais (FONTES, 2002). Entre os critérios estabelecidos por Rosgen (1994) para classificar rios quanto à suas características morfológicas e hidráulicas estão a forma do canal, a velocidade e a vazão do fluxo, o que evidencia a importância destas variáveis nos processos geomorfológicos

dos rios.

A vazão do curso d'água principal, especialmente nos baixos cursos, é reflexo do somatório das vazões dos tributários à montante, e é influenciada principalmente pela precipitação pluvial que ocorre nas cabeceiras da bacia (TUCCI, 2000) e possui estreita relação com a velocidade da corrente. De acordo com Borges (2004) o aumento da vazão reflete o aumento da velocidade da corrente, fator que explica o registro de maiores taxas erosivas no período de cheia, quando as vazões são maiores do que nos demais períodos. Porém, a baixa oscilação da vazão se traduz num grave problema na região do Baixo São Francisco, trecho em que a vazão do rio é regularizada. Holanda et al (2007) condicionaram o recuo da margem em determinados pontos do rio à permanência do fluxo d'água com velocidade constante, com mínima variação da cota, por um longo período.

O objetivo deste trabalho foi analisar a distribuição temporal das variáveis ambientais e hidrológicas no Baixo São Francisco e verificar sua influência na ocorrência dos processos erosivos da margem direita neste trecho do rio.

4 Materiais e Métodos

A área estudada está localizada no Perímetro Irrigado Cotinguiba-Pindoba, município de Propriá, Estado de Sergipe (Figura 1).

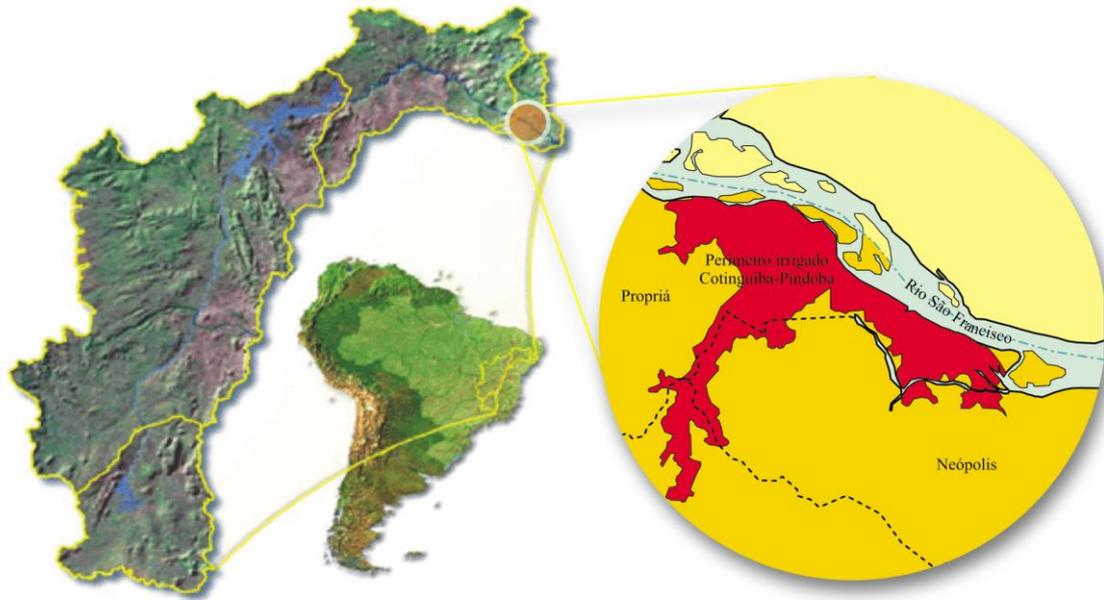


Figura 1. Localização do perímetro irrigado Cotinguiba-Pindoba no Baixo São Francisco, adaptado de CODEVASF (1997).

O clima do trecho sedimentar do Baixo São Francisco é classificado por Köppen como do tipo Am (Megatérmico úmido e sub-úmido), com temperatura média anual 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.

Segundo ANA (2009), a precipitação pluvial média anual registrada na estação meteorológica de Propriá (01036048) variou entre 37,5 e 1.407,0 mm.ano⁻¹, com a média mínima e máxima correspondente aos anos 1990 e 1914, respectivamente. A precipitação média anual é de 744,0 mm.ano⁻¹, ocorrendo nítida mudança na distribuição das chuvas com o período chuvoso estabelecido entre os meses de março a agosto e o período seco entre os meses de setembro a fevereiro (Figura 2).

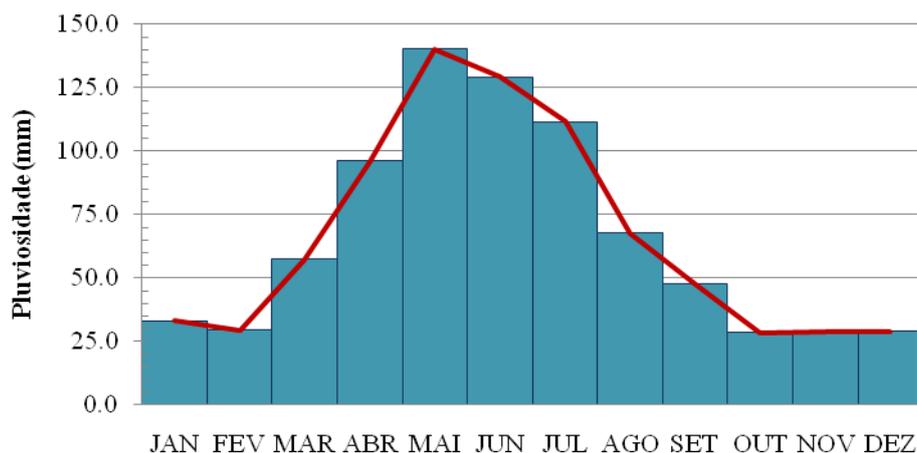


Figura 2. Histograma da precipitação média mensal na estação meteorológica de Propriá (01036048) no período 1912-1999.

De acordo com Casado et al (2000) a classe de solo dominante na margem do rio, e em todo trecho sedimentar é o NEOSSOLO FLÚVICO, com granulometria composta em mais de 90% por areia média, fina e muito fina. Solos com esta característica normalmente apresentam valores de coesão muito baixos e baixa resistência ao cisalhamento.

A vegetação original é composta por três tipificações fisiográficas: Caatinga no trecho mais alto, Mata Atlântica e manchas de Restinga, na região costeira. Todos estes ecossistemas encontram-se fortemente ameaçados pelo desmatamento para implantação da atividade pecuária ou agricultura irrigada.

Na área de estudo (Coordenadas UTM 8868.461,918 N / 744.301,092 E) foi identificada uma grande concentração de focos de erosão, em margem quase que completamente desmatada, em talude apresentando as dimensões de 127 m de comprimento, 11 m de largura e declividade média de 43,03 %, com área de 1.397 m² e perímetro igual a 276 m (HOLANDA et al, 2008).

A margem do trecho estudado foi classificada por Fontes (2002) como sendo “Tipo F (Cotinguiba-Pindoba)” que apresenta como principais características recuo acentuado da linha de margem, composição granulométrica na qual ocorre o predomínio das frações espessas de areia fina e média, muito friáveis e proximidade com o talvegue do rio (Figura 3).

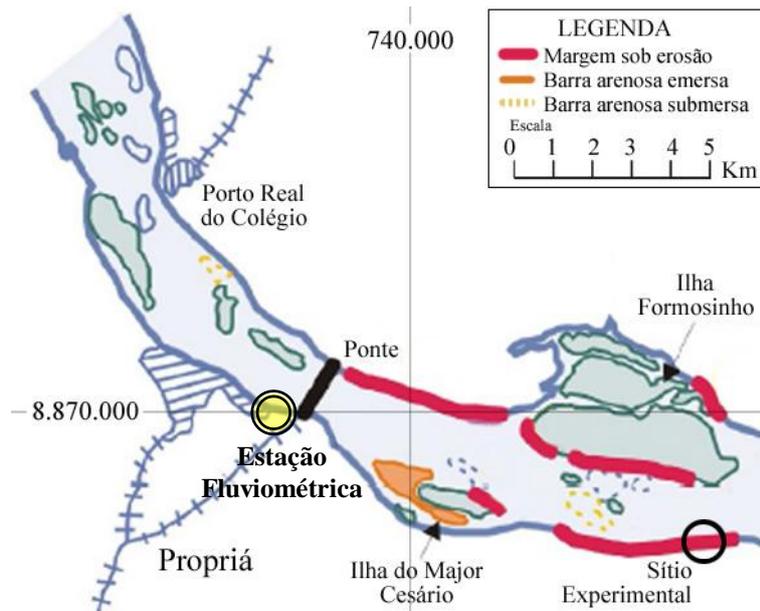


Figura 3. Segmento do rio com trechos de margem “Tipo F (Cotinguiba-Pindoba)” em processo de erosão, adaptado de Fontes (2002).

4.1 Variáveis determinantes do processo erosivo

Para verificar a influência das variáveis no processo erosivo foram comparadas as taxas de erosão mensais obtidas nos estudos de Casado (2000) e Bandeira (2005) com os dados mensais das variáveis observadas neste trabalho.

4.2 Variáveis Hidrológicas

Para melhor compreensão dessas variáveis foram utilizados dados obtidos a partir de médias diárias, para compor as médias mensais de cada ano, e por fim as médias mensais para o período analisado. As séries com os dados das variáveis vazão e cota foram assumidas e obtidas a partir da estação fluviométrica convencional de Propriá (49705000), (Coordenadas UTM 8.870.010,209 N / 738.236,275 E), gerenciada pela ANA – Agência Nacional de Águas – e operada pela CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – no período de 1990 a 2007, sendo os dados de cota amarrados à RN IBGE 2541U, localizada na ombreira direita da ponte que liga o município de Propriá, no Estado de Sergipe ao município de Porto Real do Colégio, no Estado de Alagoas. Os dados de velocidade média do fluxo foram obtidos a partir da

relação entre a vazão medida e a área da seção, conforme a Equação 1 (Santos et al, 2001). Como a área da seção não é constante devido às alterações na calha do rio, foi necessário utilizar a série histórica dos perfis transversais da mesma estação para o mesmo período, obtidos através do software Hidro 1.0.8 (ANA, 2002). $Q \cdot A^{-1}$

$$\bar{V} = Q/A \quad (1)$$

Onde \bar{V} é a velocidade média do fluxo (m.s-1), Q é a vazão medida (m³/s) e A é a área da seção medida (m²).

4.3 Variáveis Climáticas

Entre estas variáveis destacam-se a precipitação pluvial média anual, a velocidade e a direção predominante dos ventos. A série com os dados de precipitação foi obtida a partir da estação pluviométrica convencional de Propriá (01036048) (Coordenadas UTM 8.869.978,450 N / 738.388,286 E) gerenciada pela ANA e operada pela CPRM, no período compreendido entre os anos 1912 e 2008, da qual foi possível elaborar o gráfico de precipitação pluvial média mensal, a partir dos dados diários.

A série de dados diários de direção predominante e velocidade do vento compreendeu o período entre os anos 1998 e 2007, disponibilizada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), e obtida da estação meteorológica de Propriá (83097) no Estado de Sergipe, nos horários sinóticos de 00 e 12 TMG. Os dados foram tabulados no software Excel 2007 e processados no software WRPLOT 5.9, do qual foi possível elaborar os gráficos diurnos e noturnos referente à rosa dos ventos para os períodos seco e chuvoso.

5 Resultados e Discussão

Embora considerada como crucial para outras formas de erosão hídrica (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2008), a contribuição da precipitação no processo erosivo marginal no Baixo São Francisco pode ser considerada nula ou muito pequena, uma vez que na área estudada não foram identificadas evidências de erosão hídrica superficial. Este fato pode ser explicado pela alta capacidade de drenagem do solo, possibilitada pela composição granulométrica (mais de 90% de areia), permitindo que mesmo durante o período chuvoso a água precipitada infiltre com facilidade no solo da

margem, sem causar erosão superficial. Outro aspecto relevante que isenta a precipitação local da influência direta nos processos erosivos marginais é o fato de 96,2% dos eventos pluviométricos isolados que foram registrados na região, não serem considerados erosivos por possuírem baixa intensidade (Figura 4). Hudson (1973) explica que uma chuva individual só é considerada erosiva quando possui pelo menos um segmento de intensidade maior ou igual a 25,0 mm.h⁻¹.

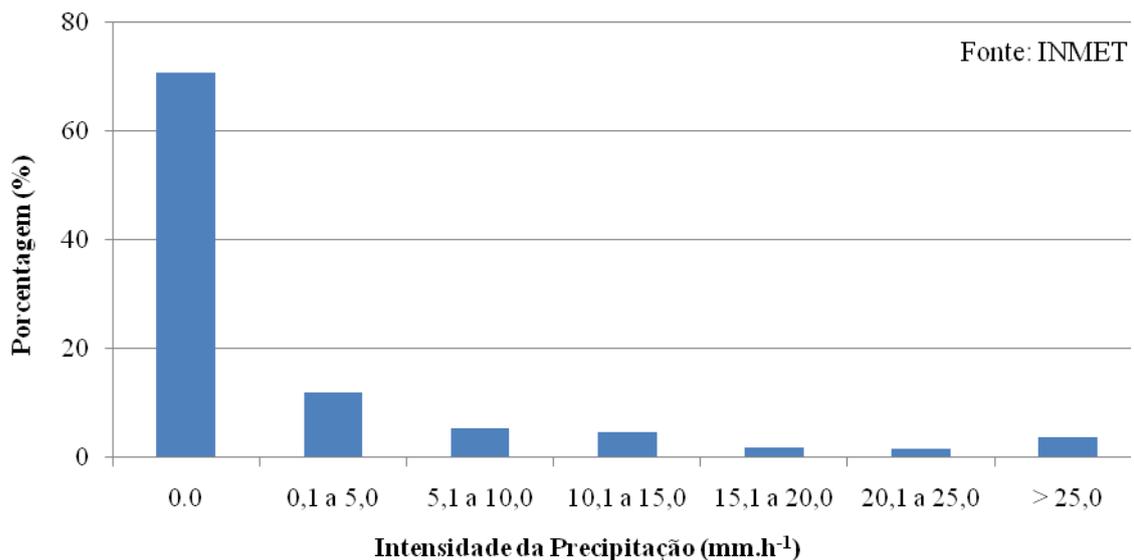


Figura 4. Intensidade das chuvas na estação meteorológica de Propriá (01036048) no período 1998-2007.

Comparando os dados relativos às taxas de erosão medidas por Casado et al. (2002) e Bandeira (2005) no trecho estudado, é possível afirmar que durante os meses do período chuvoso o processo erosivo se apresenta com menor intensidade, embora as altas taxas de erosão apresentadas por Bandeira (2005) se apresentem dentro do período chuvoso (Figura 5).

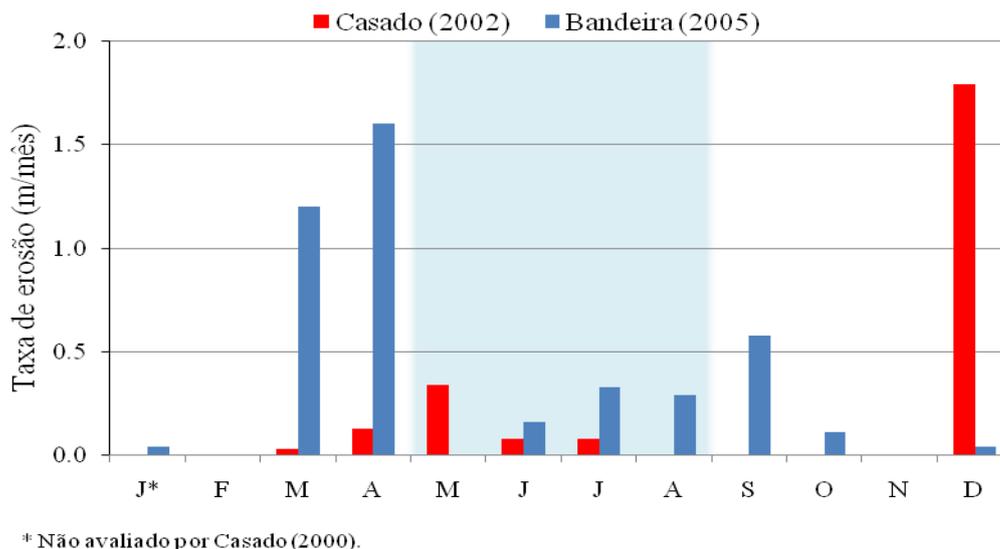


Figura 5. Taxa de erosão marginal mensal do trecho de estudo, adaptado de Casado (2000) e Bandeira (2005).

Sugere-se que estas taxas não estão relacionadas às precipitações e sim à cheia ocorrida no Baixo São Francisco em Fevereiro de 2004. Esta cheia foi ocasionada pelo aumento das precipitações nos trechos Alto e Médio São Francisco, onde ocorre a maior precipitação média anual da bacia (PEREIRA et al, 2007), e foi consequência do aumento da vazão do rio. É possível visualizar este fenômeno comparando-se os hidrogramas da estação fluviométrica de Pirapora-Barreiro, localizada ao final da área de drenagem do Alto curso, e da estação fluviométrica de Propriá, localizada no início do trecho sedimentar do Baixo curso (Figura 6).

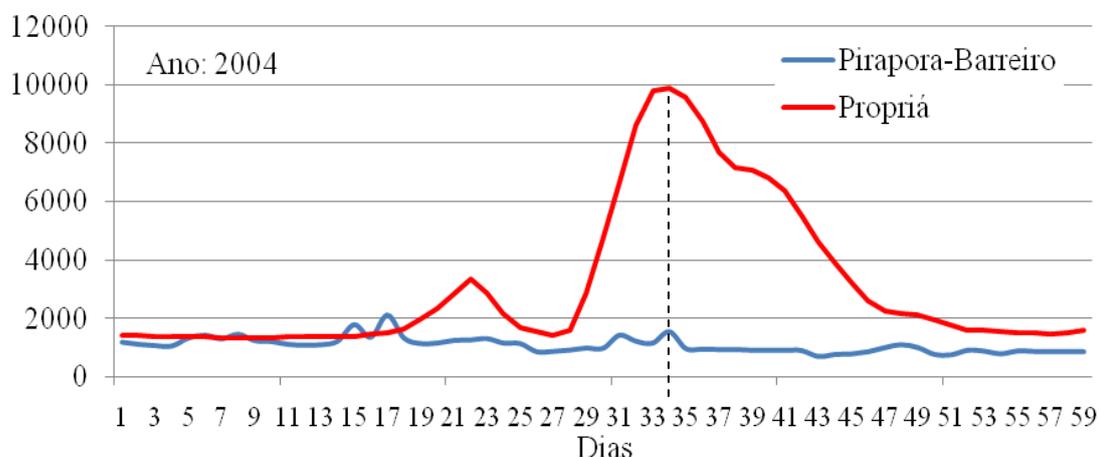


Figura 6. Hidrograma das estações fluviométricas de Pirapora-Barreiro e Propriá para os primeiros 60 dias do ano de 2004.

O pico da vazão na estação de Pirapora-Barreiro foi registrado no dia 17 de Janeiro ($2.090,78 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$), enquanto na estação de Propriá foi registrado 19 dias após, em 3 de Fevereiro ($9.894.50 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$), devido à reposição de um volume de água, no tempo corrido, no reservatório de Sobradinho, localizado à montante de Propriá.

O aumento expressivo do pico de vazão, em comparação à vazão média na estação de Propriá ($2.266,34 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$), foi o principal responsável pelas elevadas taxas de erosão. Dessa forma fica evidente o vínculo entre as taxas de erosão identificadas por Casado (2000) e Bandeira (2005), aumento da vazão e consequente aumento da velocidade do fluxo do rio.

Os maiores valores para vazão média e máxima estão relacionados ao período compreendido entre os meses de Janeiro a Abril. Isto ocorre como consequência das intensas precipitações ocorridas nos trechos Alto e Médio do rio. A vazão média do rio São Francisco oscilou entre $1.947,8$ e $2.961,5 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ durante o período analisado, esta alta oscilação, observada também para os valores de vazões máximas e mínimas, não condiz com o comportamento de um rio com vazão regularizada quando considerados dados diários e mensais, e é atribuída ao evento atípico ocorrido no mês de março de 1992, possivelmente em decorrência do aumento da precipitação nas cabeceiras devido ao fenômeno El Niño, que fez com que a vazão do rio São Francisco chegasse ao pico de $11.917,0 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ na estação de Propriá (Figura 6).

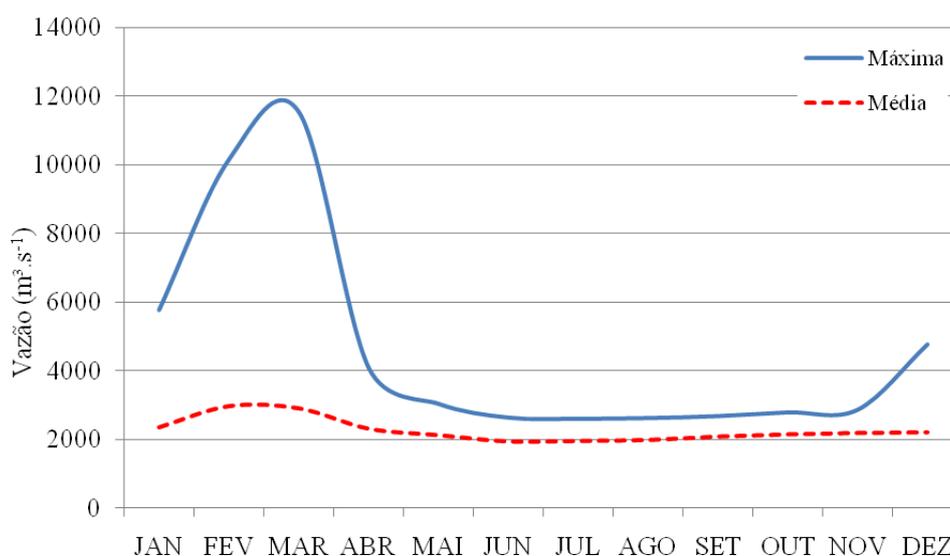


Figura 6. Vazões máximas e médias mensais na estação fluviométrica de Propriá entre 1990 e 2007.

Como são variáveis dependentes, a velocidade do fluxo acompanhou o comportamento da vazão, com seus valores médios oscilando entre 1,30 e 1,97 m.s⁻¹, com pico coincidindo ao evento ocorrido no mês de março de 1992, quando atingiu a velocidade de 7,95 m.s⁻¹ (Figura 7).

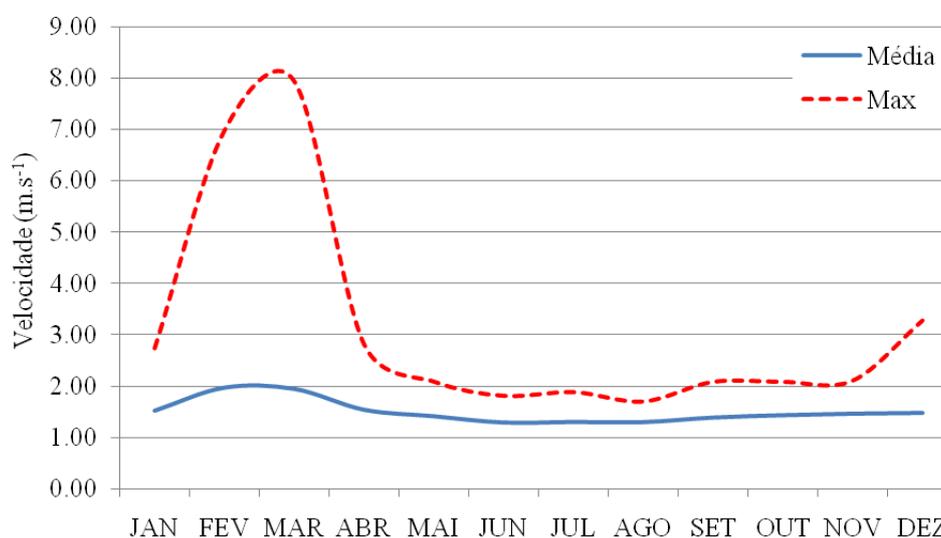


Figura 7. Velocidades máximas e médias mensais do fluxo na estação fluviométrica de Propriá entre 1990 e 2007.

Na comparação com os dados de Casado (2000) e Bandeira (2005) observa-se que nos meses em que a vazão e a velocidade atingiram valores máximos, muito acima da média, ocorreu aumento na taxa de erosão do solo da margem. Este fato evidencia a influência dessas variáveis na desagregação do solo, que é o rompimento das forças de ligação entre as partículas sólidas, e pode ser explicado pelo aumento do poder cisalhante do fluxo do rio em função do aumento da sua velocidade, traduzida em energia cinética. Situação semelhante foi descrita por Rosgen (1994) ao identificar relação entre a velocidade do fluxo e o seu poder de desagregação do solo. No caso do Baixo São Francisco a situação é agravada devido a granulometria do solo da margem apresentar elevada quantidade de material arenoso.

Também é possível afirmar que no Baixo São Francisco a influência dos eventos pluviométricos está relacionada principalmente à variável vento, relacionados diretamente com a velocidade e direção predominante do vento, sendo observada pela diferença no comportamento dos ventos entre os períodos seco e chuvoso. Melo Junior et al (2006) identificaram relações semelhantes entre a distribuição de frequência de

chuvas e as direções predominantes do vento. Neste sentido, ocorre interação entre os ventos e o regime de chuvas na região do Baixo São Francisco, predominando ventos de origem Leste no período seco e ventos de origem Sudeste no período chuvoso (Figura 8).

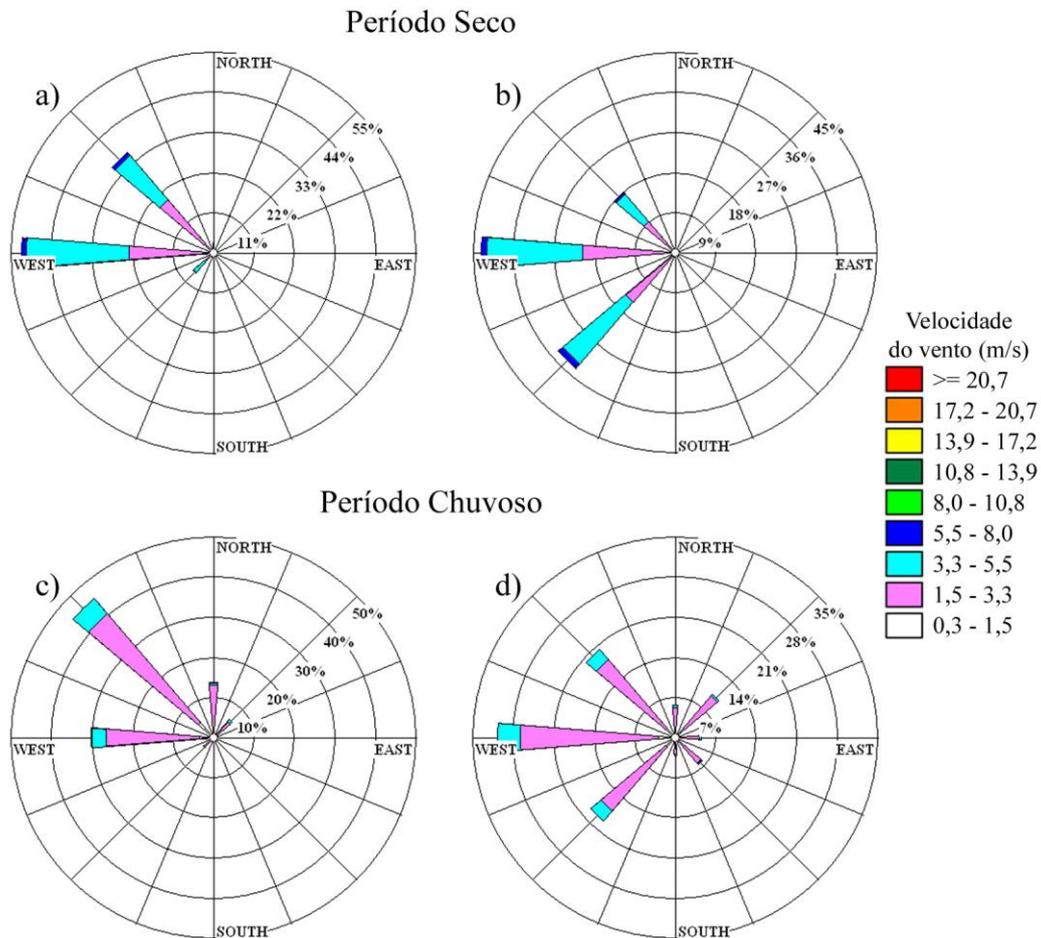


Figura 8. Rosa dos ventos diurnos “a” e “c”, e noturnos “b” e “d”, na região do Baixo São Francisco, registrados na estação meteorológica de Propriá (83097) no período 1998-2007.

Também observa-se ligeira mudança no comportamento dos ventos em função do período do dia. Os ventos diurnos apresentam velocidade média maior que os ventos noturnos, devido ao rápido aquecimento da superfície terrestre no período diurno, que ocasiona uma rápida mudança do gradiente de pressão, em função da alteração da densidade do ar. No período noturno, como o resfriamento da superfície terrestre é lento, a mudança no gradiente de pressão se dá de forma lenta, gerando ventos com

velocidades menores (TUBELIS e NASCIMENTO, 1984; PEREIRA et al, 2003). Resultados semelhantes foram identificados por Prudente et al (2006) e Munhoz e Garcia (2008) ao observarem que os ventos diurnos suplantaram os ventos noturnos nos meses mais quentes, sendo esta diferença reduzida nos meses mais frios. Porém, a velocidade dos ventos diurnos se apresentam maiores que os noturnos. Prudente al (2006) afirmam que a tendência de velocidades de ventos diurnos maiores que os noturnos, é um comportamento natural ocasionado pelo aumento de turbulência na atmosfera.

Velocidade e direção do vento quando associadas com a pista de vento (Fetch) e o atrito com a superfície da água são considerados fatores primordiais na formação de ondas naturais em cursos d'água. A velocidade exerce grande influência nos processos erosivos marginais, sobretudo quando o ângulo de incidência das ondas é paralelo à margem. Fontes (2002) observou que há neste trecho do rio São Francisco uma forma específica de atuação conjunta entre ondas e a corrente fluvial, e essa interação resulta na formação de margem com uma morfologia caracterizada por reentrâncias, onde ocorrem as maiores taxas de recuo.

Supõe-se que no Baixo São Francisco as frentes de ondas vindas de Leste, devido a predominância dos ventos desta direção, são reorientadas para o sentido Sul, ou Sudoeste, devido à resistência empregada pelo fluxo do rio (Figura 9), embora ainda não se tenha quantificado a energia das ondas que se chocam com o talude desprotegido do rio. As observações registradas nesse trabalho sugerem que as ondas naturais são responsáveis pela remoção de grande parte do volume de solo erodido, também por Holanda et al (2008), tendo como consequência uma mudança no padrão geomorfológico do rio, promovendo a deposição de sedimentos no seu leito, e formando zonas de acréscimo como pequenas ilhas e bancos de areia.

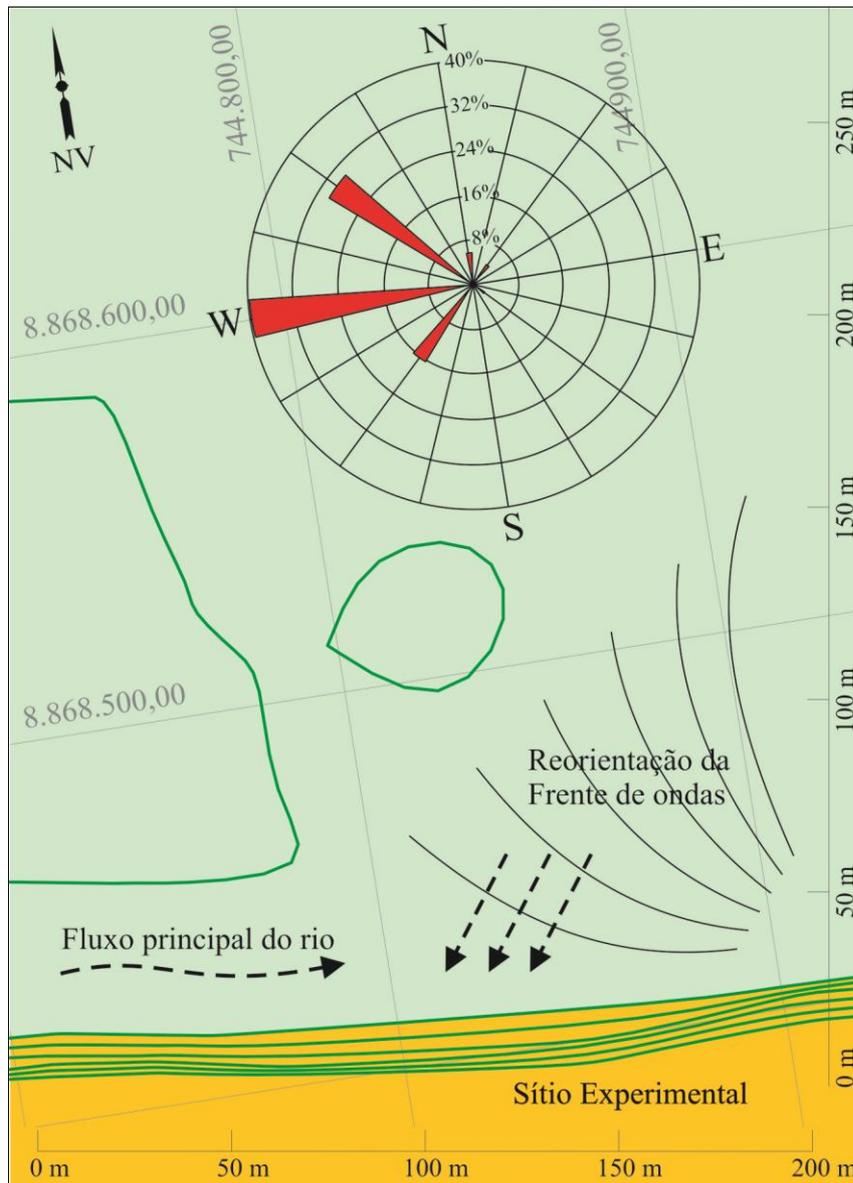


Figura 9. Topobatimetria da área de estudo apresentando a rosa dos ventos predominantes e reorientação da frente de ondas.

Observa-se que o efeito erosivo do fluxo mais intenso do curso d'água (Talvegue) é tanto maior quanto mais próximo este estiver da margem. Esta é a zona de maior turbulência, onde ocorre a maior velocidade do fluxo, acumulando maior energia para desagregar o solo da margem. No entanto, o ângulo de incidência da corrente de água na margem, possui variação temporal e espacial devido ao padrão meandrante característico do Baixo São Francisco, permitindo que, numa escala temporal não determinada, os processos erosivos migrem de um local para outro e oscilem quanto a

sua magnitude. Leinz e Amaral (1978) e Rosgen (1994) relatam este fato em seus trabalhos e afirmam que grandes desmoronamentos são originados quando o fluxo do rio se posiciona paralelamente às margens, provocando o rápido recuo da linha de margem.

Do ponto de vista geomorfológico o efeito das variáveis estudadas pode ser encarado como um ajuste na forma do canal e do traçado do rio, evidenciando a dinâmica do curso d'água. Como este trecho do rio apresenta ampla largura e baixa profundidade, comportamento característico dos baixos cursos, a energia proveniente da corrente se concentra numa estreita faixa de cota marginal, promovendo a desagregação dos solos da margem, concordando com Jiongxin (2008), que correlacionou a composição do material do leito com o montante de energia empregado pelo fluxo do canal.

6 Conclusões

A pluviosidade do Baixo São Francisco pouco contribui para o processo erosivo na margem estudada.

O aumento nas taxas de erosão pode ser explicado pelo aumento significativo da vazão do rio e consequente aumento da velocidade do fluxo.

Existe interação entre ocorrência de ventos e o regime de chuvas na área estudada, predominando ventos de origem Leste no período seco e ventos de origem Sudeste no período chuvoso.

As frentes de ondas são provenientes da direção Leste, e são reorientadas para a direção Sul, ou Sudoeste, quando se chocam contra a margem sergipana, onde ocorrem as maiores taxas de erosão.

O processo erosivo é mais intenso nos locais onde o talvegue (canal principal) se aproxima da margem do rio.

7 Referências Bibliográficas

- ANA – Agência Nacional de Águas. **Sistema de informações Hidrológicas**, versão 1.0.8: Project planning software, 2002. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/>>. Acesso em: 24 fev. 2009.
- BANDEIRA, A. A. **Evolução do processo erosivo na margem direita do Rio São Francisco e eficiência dos enrocamentos no controle da erosão no trecho em estudo**. 2005. 183 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Núcleo de Pós-graduação e Estudos do Semi-Árido, Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, SE, 2005.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 6ª ed. São Paulo: Ícone, 2008.
- BORGES, C. Z. **Erosão marginal no rio Paraná após a conclusão do Reservatório da UHE Sérgio Motta (Porto Primavera) a jusante da barragem**. 2004. 50 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual de Maringá. Maringá, PR, 2004.
- BRIGHETTI, G.; MARTINS, J. R. S. **Estabilização e Proteção de Margens** – PHD 5023 – Obras Hidráulicas. São Paulo: Escola Politécnica / Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, 2001.
- CASADO, A. P. B. **Estudo do processo erosivo na margem direita do rio São Francisco: Perímetro irrigado Cotinguiba/Pindoba – Baixo São Francisco Sergipano**. 139 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Núcleo de Pós-graduação e Estudos do Semi-Árido, Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, SE, 2000.
- CASADO, A. P. B.; HOLANDA, F. S. R.; ARAUJO FILHO, F. A. G.; YAGUIU, P. Bank erosion evolution in São Francisco River. **Revista brasileira de ciência do solo**, v.26, n.1, 2002, p. 231-239.
- CODEVASF – Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco e Parnaíba. **Ficha técnica do perímetro Cotinguiba/Pindoba**. Aracaju: CODEVASF, 1997.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia fluvial**. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1981.
- _____. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.
- COELHO, A. L. N. Geomorfologia fluvial de rios impactados por barragens. **Caminhos de Geografia**, v. 9, n. 26, 2008, p. 16-32.

- COOPS, H., GEILEN, N., VERHEIJ, H. J., BOETERS. R., VAN DER VELDE, G. Interactions between waves, bank erosion and emergent vegetation: an experimental wave tank. **Aquatic Botany**, v. 53, 1996, p. 187-198.
- ELLIS, J.T.; SHERMAN, D.J.; BAUER, B.O.; HART, J. Assessing the Impact of an Organic Restoration Structure on Boat Wake Energy. **Journal of coastal research**, Special issue 36, 2002, p. 256-265.
- FERNANDEZ, O. V. Q. **Mudanças no canal do rio Paraná e processos de erosão nas margens: região de Porto Rico (PR)**. 96 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, SP, 1990.
- FERNANDEZ, O. V. Q., SOUZA FILHO, E. E. Efeitos do regime hidrológico sobre a evolução de um conjunto de ilhas no Rio Paraná, PR. **Boletim Paranaense de Geociências**, n. 43, 1995, p. 161-171.
- FONTES, L. C. S. **Erosão marginal no baixo curso do rio São Francisco: um estudo de caso de impactos geomorfológicos à jusante de grandes barragens**. 2002. 321 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente). Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2002.
- FONTES, L. C. S. (Coord.). **Estudo do processo erosivo das margens do Baixo São Francisco e seus efeitos na dinâmica de sedimentação do rio. Relatório Final. Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do São Francisco - GEF São Francisco (ANA/GEF/PNUMA/OEA)**. Subprojeto 2.4 – Estudo do processo erosivo das margens do Baixo São Francisco e seus efeitos na dinâmica de sedimentação do rio. Aracaju: UFS/FAPESE, 2003.
- GRAF, W. L. Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers. *Geomorphology*, v. 79, n. 1, 2006, p. 336-360.
- GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia e meio ambiente**. 4ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003.
- HOLANDA, F. S. R.; SANTOS, C. M.; CASADO, A. P. B.; BANDEIRA, A. A.; OLIVEIRA, V. S.; FONTES, L. C.; ROCHA, I. P.; ARAUJO FILHO, R. N.; GOIS, S. S.; VIEIRA, T. R. S. Análise multitemporal e caracterização dos processos erosivos no Baixo São Francisco Sergipano. **Revista brasileira de geomorfologia**, v. 8, n. 2, 2007, p. 85-94.
- 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, 2008, p. 570-575.

HUDSON, N. W. **Soil conservation**. 2.ed. Ithaca: Cornell University Press, 1973. 320p.

HUGHES, Z. J.; FITZGERALD, D. M.; HOWES, N. C.; ROSEN, P. S. Impact of Natural Waves and Ferry Wakes on Bluff Erosion and Beach Morphology in Boston Harbor, USA. **Journal of coastal research**, Special issue 50, 2007, p. 497-501.

JIONGXIN, X. Comparison of flow shear stress and energy expenditure between sand- and gravel-bed rivers and some geomorphological implications. **Chinese science bulletin**, v. 4, n. 13, 2008, p. 1224-1228.

LEINZ, V.; AMARAL, S. E. **Geologia geral**. 7ª. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1978.

MANYARI, W. V.; CARVALHO JUNIOR, O. A. Environmental considerations in energy planning for the Amazon region: Downstream effects of dams. **Energy Policy**, v. 35, n. 12, 2007, p. 6526-6534.

MELO JUNIOR, J. C. F.; SEDIYAMA, G. C.; FERREIRA, P. A.; LEAL, B. G.; MINUSI, R. Distribuição espacial da frequência de chuvas na região hidrográfica do Atlântico, Leste de Minas Gerais. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v. 10, n. 2, 2006, p. 417-425.

MUNHOZ, F. C.; GARCIA, A. Caracterização da velocidade e direção predominante dos ventos para a localidade de Ituverava-SP. **Revista brasileira de meteorologia**, v. 23, n. 1, 2008, p. 30-34.

OLIVEIRA, A. M. (Coord.). **Estudo Hidrodinâmico-Sedimentológico do Baixo São Francisco 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 (ANA/GEF/PNUMA/OEA). Subprojeto 1.1.A Estudo Hidrodinâmico-Sedimentológico do Baixo São Francisco e Zona Costeira Adjacente (AL/SE). Alagoas: UFAL, 2003.

OLIVEIRA, V. S. **Erosão marginal no baixo curso do rio São Francisco e seus efeitos nos agroecossistemas**. 2006. 63 f. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas). Núcleo de Pós-Graduação e Estudos em Recursos Naturais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2006.

PEREIRA, S. B.; PRUSKI, F. F.; NOVAES, F. L.; SILVA, D. D.; RAMOS, M. M. Distribuição espacial das variáveis hidrológicas na bacia do rio São Francisco. **Engenharia na agricultura**, v. 11, n. 1, 2003, p. 32-42.

- PEREIRA, S. B.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; RAMOS, M. M. Estudo do comportamento hidrológico do Rio São Francisco e seus principais afluentes. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v.11, n.6, 2007, p. 615-622.
- PRUDENTE, C. N.; RAIA, A.; REIS, R. J. Comportamento do Vento na Região Metropolitana de Belo Horizonte. In: Congresso Nacional de Meteorologia, 14., 2006. . Florianópolis **Anais...** Florianópolis: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2006. Disponível em: < <http://www.cbmet.com/>>. Acesso em: 23 fev. 2009.
- ROCHA, P. C. Erosão marginal em canais associados ao rio Paraná na região de Porto Rico-PR. *Revista Ciências*, v. 44, 1996, p. 97-115.
- ROCHA, P. C.; SOUZA FILHO, E. E.; FERNANDEZ, O. V. Q. Intensity of erosive processes at channel banks of up Parana river, Porto Rico Town area, Parana State, Brazil. *Boletim goiano de geografia*, special issue, 1999, p. 56-59.
- ROSGEN, D. L. A classification of natural rivers. *Catena*, v. 22, 1994, p. 169-199.
- SANTOS, I.; FILL, H. D.; GUGAI, M. R. V. B.; BUBA, H.; KISHI, R. T.; MARONE, E.; LAUTERT, L. F. **Hidrometria aplicada**. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, 2001.
- SANTOS, C. M. **A erosão no Baixo São Francisco sergipano e os mecanismos de desestabilização dos taludes na margem do rio**. 2002. 143 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente). Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2002.
- SIMONS, I e ASSOCIATES. **Engineering Analysis of Fluvial Systems**. Fort Collins, Colorado, USA, 1982.
- SOUZA FILHO, E. E.; STEUX, J. C. **O componente físico da planície alagável do alto rio Paraná**. In: AGOSTINHO, A. A.; THOMAZ, S. M.; NAKATANI, K. A Planície alagável do Alto rio Paraná: estrutura e processos ambientais. Maringá: Universidade Estadual de Maringá, 2000. p. 13-60. Disponível em: <<http://www.peld.uem.br/Relat2000/>>. Acesso em: 23 dez. 2008.
- THORNE, C. R.; TOVEY, N. K. Stability of composite river banks. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.6, 1981, p. 469-484.
- TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F. C. L. **Meteorologia descritiva**. Fundamentos e aplicações brasileiras. São Paulo: Nobel, 1984.
- TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: EdUFRGS, 2000.