

Uso de técnicas de sensoriamento remoto na análise da dinâmica morfológica da foz do rio São Francisco no período de 1979 a 2008

Miguel Fernandes Felipe¹
Brenner Henrique Maia-Rodrigues¹
Antônio Pereira Magalhães Junior¹

¹Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG
Av. Antônio Carlos, 6627 – 31270-901 – Belo Horizonte, MG Brasil
felippego@yahoo.com.br; bhmrodrigues@yahoo.com.br; magalhaesufmg@yahoo.com.br

Abstract: This work applies techniques of remote sensing to estimate the area of emerged fluvial-marine bars in the São Francisco River's outfall. A sequence of satellite images was got to verify the modifications of the outfall morphology through the years. Also hydrological data of the river were analyzed to be compared with the area of the bars. A retrospective of almost 30 years was made, both for the hydrological data and for the area of the bars. The quantitative results were converted to the same scale to allow the comparison, then, the graphs were made and interpreted. Besides, the morphological dynamics of the outfall was interpreted by the fluvial flows, what guide to the comprehension of the processes involved in the fluvial-marine depositions. So, the objective of this work is to analyze the morphologic dynamics of the São Francisco river's outfall through the lasts three decades, spacializing the modification of the river's margins and the appearance of fluvial-marine bars. The preliminary results show that there is a continue growth of the emerged areas in the basin outfall. Two hypotheses were raised and verified: or the depth of the river is decreasing, or the dynamics of sediments in the channel is being transformed. The Pearson coefficient shows no clear relation with the river flow, guiding to the possibility of the erosion/deposition dynamics. Although, new questions are formulated that may influence future works.

Palavras-chave: fluvial-marine bars, fluvial geomorphology, space-time studies; barras fluvio-marinhas, geomorfologia fluvial, estudos espaço-temporais.

1. Introdução

A partir da década de 1950, as intervenções na calha fluvial, sobretudo para aproveitamento hidrelétrico, engatilharam uma série de impactos na dinâmica do rio São Francisco. A alteração na energia das águas do São Francisco, ocasionada pelos sucessivos represamentos, modificam a dinâmica sedimentar do canal (Cunha, 2006; Fontes, 2003; Lima *et al.* 2001). Além disso, a retirada de água para irrigação, o desmatamento, conseqüentemente a intensificação dos processos erosivos, a impermeabilização do solo, entre outros, possuem como resultantes modificações na dinâmica fluvial.

Uma nova dinâmica hidrossedimentológica é criada a partir da influência antrópica sobre os processos naturais. As intervenções no espaço da bacia promovem alterações significativas na energia do rio que podem ser sintetizados pela transformação nos locais de erosão e deposição na calha fluvial. Nesse sentido, têm sido verificadas, pelo meio acadêmico, pela imprensa e pela população local, modificações significativas na morfologia da foz do rio São Francisco.

A área estudada compreende a região do baixo São Francisco, mais especificamente a região estuária, incluindo a porção oceânica diretamente influenciada pelo canal fluvial. Trata-se de uma área extremamente dinâmica do ponto de vista geomorfológico, cuja evolução é condicionada por inúmeras variáveis

Mais precisamente, a área de estudo engloba a foz do rio São Francisco, entre os municípios de Piaçabuçu (AL) e Brejo Grande (SE), adentrando alguns quilômetros pelo continente. A região da foz do Rio São Francisco encontra-se, geomorfológicamente, na planície costeira – com altitudes inferiores a 100 metros – e nos tabuleiros do Grupo Barreiras – com altitude entre 200 e 100 metros. Além das feições modeladas no Grupo Barreiras

existem também na planície flúvio-marinha e aluvial do rio, sedimentos quaternários (dunas e aluviões) e algumas manchas de sedimentos cretáceos (Medeiros, 2003).

O objetivo deste trabalho é aplicar técnicas de sensoriamento remoto na verificação das alterações na dinâmica morfológica da foz do rio São Francisco nas últimas três décadas. Como objeto de estudo, encontram-se as barras flúvio-marinhas analisadas neste trabalho em função da dinâmica deposicional que as condiciona.

2. Procedimentos Metodológicos

Tendo como foco a comparação do crescimento/decrescimento da área das barras flúvio-marinhas na foz do rio São Francisco, com a cota da lâmina d'água, buscou-se dados que permitissem o cruzamento das informações, contribuindo para o avanço dos conhecimentos sobre o assunto. A cota foi a variável hidrológica escolhida por estar diretamente associada ao surgimento de barras em contextos naturais. É eminente e clara a idéia que quanto mais baixa a cota, maior a possibilidade de emersão de barras.

Assim, com o intuito de determinar períodos de maior e menor profundidade da água no canal do rio São Francisco, foram obtidos dados de duas estações fluviométricas¹ a partir do sistema de informações hidrológicas – *Hidroweb* – da Agência Nacional de Águas – ANA. Assim, foi realizada a análise da evolução da variável “cota” do rio São Francisco no período 1979-2007. A utilização de duas estações aumenta a confiabilidade dos dados, permitindo interpretar com maior clareza a dinâmica fluvial no período.

Posteriormente, obtiveram-se quinze imagens dos satélites CBERS 2, CBERS 2B, Landsat 2, Landsat 3 e Landsat 5, de acordo com a disponibilidade no catálogo do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. As datas das imagens correspondem aproximadamente às datas apontadas na avaliação das mais elevadas e reduzidas cotas. Todavia, ajustes foram necessários devido à impossibilidade de trabalho com algumas imagens, mormente pela grande concentração de nuvens.

No programa ArcGIS 9.1 as imagens obtidas foram trabalhadas a fim de viabilizar a vetorização das barras flúvio-marinhas. Buscou-se a melhoria no contraste pela alteração de seus histogramas. O método estatístico de alteração do contraste foi o desvio padrão, na maioria das vezes calculado para duas vezes seu valor. Com isso, a distinção entre as terras emersas e imersas foi facilitada.

Para a individualização das barras arenosas, foi realizado o procedimento de vetorização manual. Não se acredita que a vetorização automática possa apresentar melhores resultados, devido às limitações impostas pela resolução espectral das imagens e à incompatibilidade promovida pelos diversos sensores utilizados.

Após a vetorização, foi calculada a área total das barras flúvio-marinhas em cada imagem. Isso possibilita avaliar o crescimento – ou decrescimento – das barras, contribuindo para a interpretação dos processos que modelam a foz do rio São Francisco. A espacialização desses sedimentos é, também, de suma importância, posto que as alterações na energia das águas podem mudar os locais preferenciais de sedimentação e erosão.

As três variáveis estudadas – tempo, área das barras e cotas do Rio – foram organizadas em uma tabela. A verificação da correlação entre as variáveis foi um instrumento importante na construção e refutação de hipóteses para as mudanças morfológicas que estão em curso. Por fim, foi realizada uma avaliação da dinâmica morfológica da foz do rio São Francisco, entre 1979 e 2007, em função das cotas e de intervenções humanas, sobretudo as de grande magnitude, na dinâmica fluvial.

¹ Pelo critério de proximidade com a foz, foram selecionadas as estações de Brejo Grande-SE, código 49775000 e Penedo-AL, código 01036005.

3. Alterações na dinâmica fluvial do rio São Francisco

Ao longo do rio São Francisco existem diversas intervenções estruturais, dentre as quais se destacam as barragens das usinas hidrelétricas. A diminuição da vazão e a redução da descarga de sedimentos invariavelmente resultam na redução da produtividade primária, na perda de recursos pesqueiros, na desestabilização da costa e na intrusão de águas marinhas na região do estuário (Lorenzetti et al, 2007). Além disso, ocorre uma perda significativa da água dos reservatórios por evaporação e por infiltração.

A deposição dos sedimentos nas represas gera impactos em toda a dinâmica dos processos erosivos a jusante, visto que os sedimentos são os responsáveis pelo atrito que promove a retirada de material (Christofolleti, 1981). A regularização do baixo curso do rio eliminou as fortes correntezas das enchentes, reduzindo assim a potencialidade cíclica do rio de transportar sedimentos até a foz (Oliveira, 2003). O trecho a jusante de Xingó, por exemplo, possui uma declividade acentuada, com presença de corredeiras e turbulências, o que associado à pequena quantidade de sedimentos em suspensão, propicia a erosão do leito do rio com cascalho. Oliveira (2003) afirmam que os perfis batimétricos transversais ao rio, na região de Piranhas (AL), que possuíam a forma de V com sedimentos em seu leito, atualmente indicam o aprofundamento do talvegue do rio em função da intensificação de processos erosivos e a remoção dos sedimentos anteriormente encontrados. Sendo assim, o canal atualmente apresenta um perfil em forma de U.

Durante o período de 1980 a 2000 a vazão do Rio São Francisco foi reduzida em cerca de 30%. Nesse período as concentrações, cargas e as descargas específicas de matéria em suspensão foram reduzidas de 70 a 5 mg/l, de 7 a $0,3 \times 10^6$ t/ano e de 4,2 a 0,2 t/km²/ano, respectivamente, em função da retenção de materiais pelas barragens (LORENZZETTI et al, 2007).

A variação das cotas do rio São Francisco registradas na estação fluviométrica de Penedo mostra a existência de dois comportamentos bem distintos (GRAFICO 1). Do final da década de 1970 até o início da década de 1990 verifica-se a alternância entre períodos de baixas com cotas, com outros de altas.

A partir de 1994 observa-se a estabilização da lâmina d'água, visto que os valores não apresentam grandes mudanças como outrora. Esse período coincide com o início da ativação da hidrelétrica de Xingó, o que permite o estabelecimento de relações entre sua construção e a dinâmica de transporte de sedimentos.

Nota-se que após esse ano (1994), a regularização da cota na estação de Penedo é nítida. As variações se limitam entre 200 e 300 centímetros. Somente em 2004 houve uma ruptura dessa lógica, promovendo a elevação da cota a aproximadamente 600 cm. Antes da construção da hidrelétrica de Xingó, essa dinâmica era mais constante, sobretudo nos anos anteriores a 1987, quando a vazão do rio São Francisco ainda não se encontrava de tal maneira controlada pelos represamentos.

Ressalta-se que os valores verificados no Gráfico 1 possuem uma nítida correlação com aqueles registrados à montante, em Brejo Grande (SE), cujos valores também foram utilizados no presente trabalho e somente não foram apresentados graficamente por simplificação.

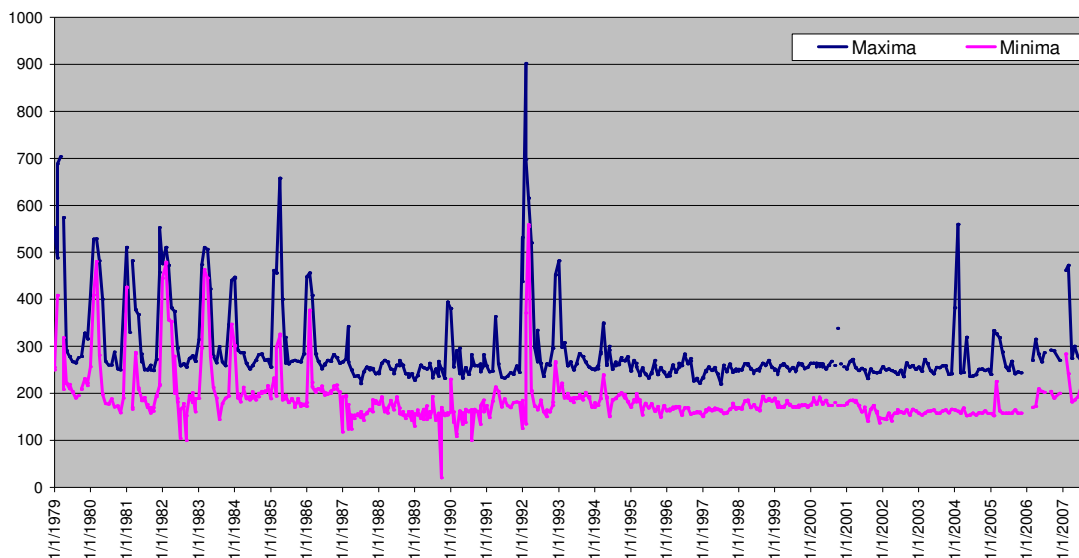


Gráfico 1: Variação das cotas (cm) do Rio São Francisco na estação fluviométrica de Penedo-AL

Fonte: ANA – Hidroweb. Estação fluviométrica de Penedo-AL

4. Modificações morfológicas da foz do rio São Francisco no período 1979-2008

A dinâmica hidrossedimentológica fluvial, associada à deriva litorânea, modificou em larga escala a morfologia da foz do rio São Francisco. As conseqüências se evidenciam, sobretudo na década de 2000, com o aumento da área emersa formada por barras fluvio-marinhas. Todavia, esse processo não é exclusivamente atual. A intensidade das mudanças, por outro lado, se intensifica na última década.

No estuário, os fluxos do rio tendem a possuir baixa energia e depositar os sedimentos carregados. Em concomitância, os fluxos marinhos também contribuem para a alocação da carga, já que promovem alterações na energia da foz. Tal dinâmica promove, normalmente, o espraiamento dos sedimentos na plataforma continental em todas as direções.

Na foz do rio São Francisco é muito claro o limite dessa dispersão, como mostraram Lorenzetti et al (2007). Há um arco de deposição nítido que abarca todas as direções a partir da foz. A formação das barras fluvio-marinhas ocorre, justamente, sobre esse arco que marca a maior distância de deposição. Mesmo em épocas em que a quantidade de barras emersas não é grande – como em 1979, 1980 e 2005 – a turbidez das águas indica a existência de sedimentos imersos. Percebe-se, também, que o raio do arco varia no tempo em função de possíveis variações na energia das águas fluviais e marinhas.

Existe um fluxo de energia principal no rio, cuja direção é sudoeste. Esse fluxo coincide com a formação da maior barra fluvio-marinha cartografada, à jusante da margem direita. Essa barra não é aparente em todas as datas estudadas, encontrando-se emersa em 1979, 1980, 1990, 2007 e 2008. A posição que ela ocupa em relação à foz, também não é constante; todavia os deslocamentos verificados são pequenos. Além disso, essa barra coincide com a ponta da margem direita formada no ano de 1984. Tal dinâmica não pode ser explicada pelas variáveis analisadas neste estudo; acredita-se que a dinâmica marinha contribua significativamente para tais processos.

Apesar da impossibilidade de se explicar, no momento, os processos envolvidos na dinâmica dessas barras, as modificações na morfologia da foz são evidentes. A forma da grande barra no ano de 2007 – concavidade voltada para o mar – indica que há um

deslocamento em direção ao oceano. Isso pode indicar que, ao menos nesse período, a energia do rio era suficiente para deslocar os sedimentos em maiores distâncias.

Em princípio, poder-se-ia afirmar que as causas das modificações na morfologia da foz do São Francisco estariam relacionadas às alterações – naturais ou induzidas – nas cotas do rio. Os resultados encontrados se distanciam dessa idéia (Tabela 1). Verifica-se que entre 1979 e 1990 a área das barras possui uma relação mais próxima com as cotas; ou seja, épocas de menores cotas correspondem às maiores áreas emersas.

Tabela 1: Relação das imagens selecionadas e respectivas cotas diárias e área total das barras emersas

Imagens		Cotas (cm)			Área (Km ²)
Satélite	Data	Penedo	Brejo	Média	
L3 - MSS	26/3/1979	542	550	546	0,09332
L2 - MSS	31/10/1980	183	291	237	0,23358
L5 - TM	10/6/1984	228	335	281,5	0,108661
L5 - TM	5/6/1988	210	363	286,5	0,30074
L5 - TM	11/6/1990	209	375	292	0,167473
L5 - TM	15/5/1992	263	376	319,5	0,245644
L5 - TM	3/8/1992	230	375	302,5	0,07321
L5 - TM	9/6/1995	215	292	253,5	0,167678
L5 - TM	18/9/1997	246	402	324	0,407517
L5 - TM	24/7/2000	181	303	242	0,456026
CB2 - CCD	4/12/2003	205,5	297	251,25	0,122063
CB2 - CCD	12/9/2004	246,5	347	296,75	0,283992
CB2 - CCD	21/7/2005	237	381	309	0,231786
L5 - TM	18/2/2007	458	459	458,5	0,380012
CCD	26/2/2008	-	-	-	0,502935

Fonte: ANA, Hidroweb; INPE, Catálogo de Imagens

O Gráfico 2 mostra uma ruptura na continuidade das curvas de área a partir de 1995, o que coincide com o início da influência da usina hidrelétrica de Xingó na sedimentologia do São Francisco. Destarte, as cotas permanecem relativamente contínuas, marcando a ação das demais hidroelétricas na regularização da vazão do rio.

Após 1992, entretanto, essa relação não se mantém. Este ano é, inclusive, marcado por uma inversão na lógica: entre maio e agosto a cota apresentou uma redução de 5,4% enquanto a área total das barras reduziu 70,2%.

Em agosto de 1992 foi registrada a menor área total das barras, conforme mostra a Figura 1. As datas seguintes mostram, novamente, que essa relação é incipiente. As áreas tendem a serem maiores, mesmo em cotas mais elevadas. O caso de 2007 é flagrante: mesmo no verão – fevereiro – e com uma cota elevada – 458,5 cm, segunda maior registrada – a área das barras flúvio-marinhas emersas é 0,38 km².

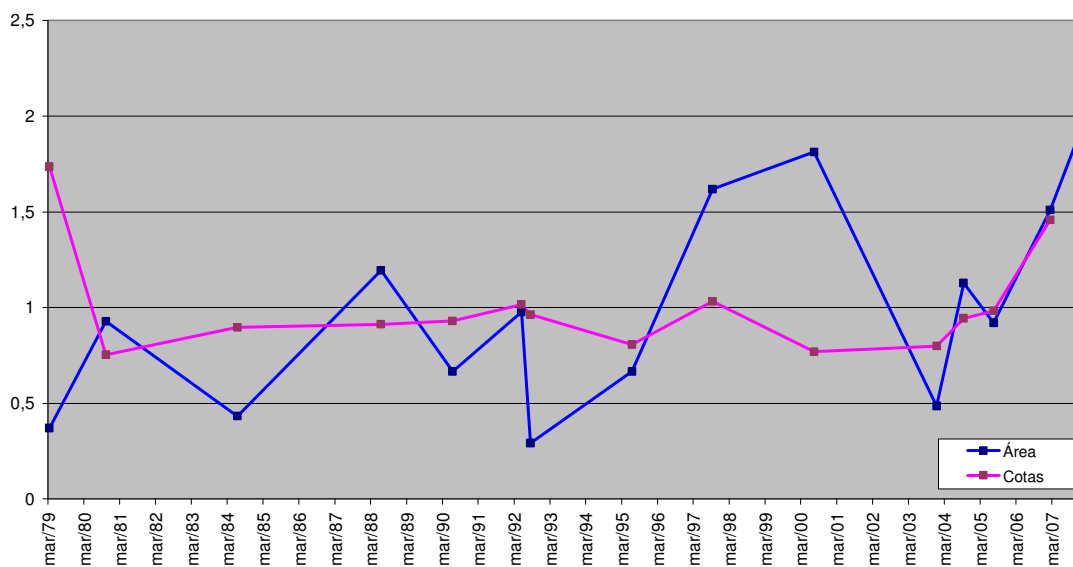


Gráfico 2: Relação entre a área das barras e as cotas ajustadas pelas respectivas médias

Fonte: ANA, *HidroWeb*; INPE, Catálogo de Imagens.

A constatação corrobora a idéia que não há uma dinâmica de emersão de barras, mas sim de aumento da deposição nesses locais. Todavia, devido à dificuldade de comparação entre períodos curtos – determinada pela resolução temporal dos satélites, bem como pela disponibilidade de imagens gratuitas – não se pode afirmar que essa dinâmica de aumento da deposição é responsável pelas modificações em todo o período estudado.

No ano 2000 a elevada área de barras fluvio-marinhas emersas é condicionada (Figura 2), também, pela baixa cota da lâmina d'água, o que de forma alguma exclui a hipótese de aumento na carga de sedimentos.

Como forma de verificar a correlação entre os valores das áreas das barras e das médias das cotas das estações fluviométricas verificadas (Tabela 1), foi calculado o Coeficiente de Pearson. O resultado mostrou-se surpreendente, com forte tendência à inexistência de correlação, tendo o valor do coeficiente mostrado-se negativo, porém, próximo a zero (-0,07). O mesmo procedimento foi realizado separadamente para os meses de inverno e verão, resultado em valores da mesma forma inexpressivos, respectivamente -0,11 e 0,03.

Porém, a correlação entre as datas e a área das barras mostrou-se consideravelmente mais significativa, alcançando 0,56. Isso mostra que apesar de sutil, a influência do fator tempo no aumento da área das barras flúvio-marinhas é presente.

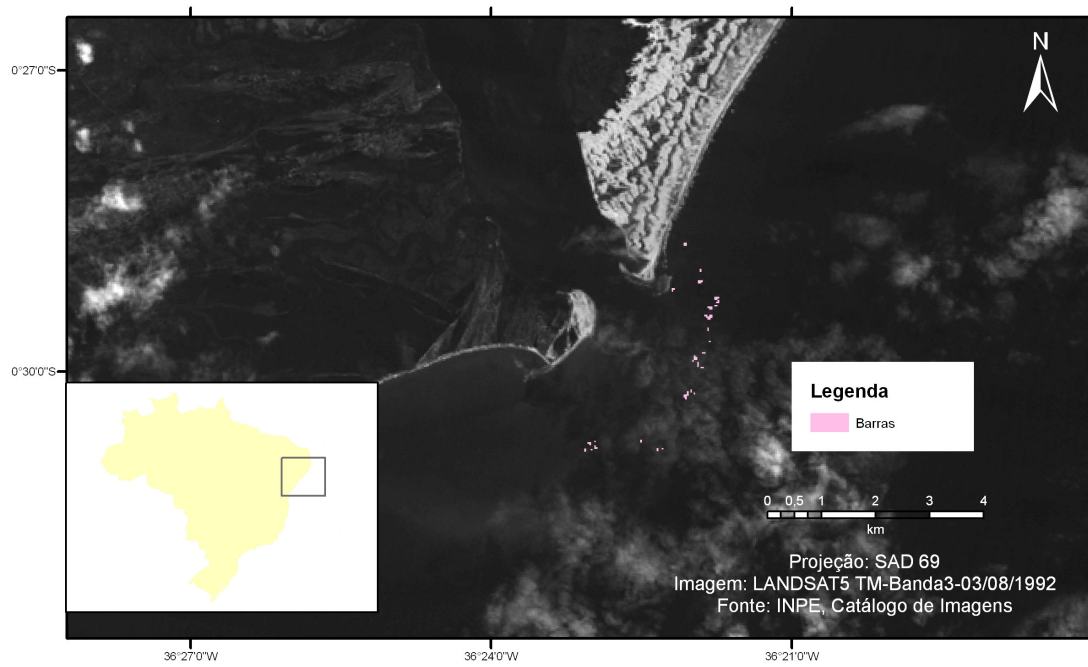


Figura 1: Imagem da Foz no período com as menores barras fluvio-marinhas (03/08/1992)

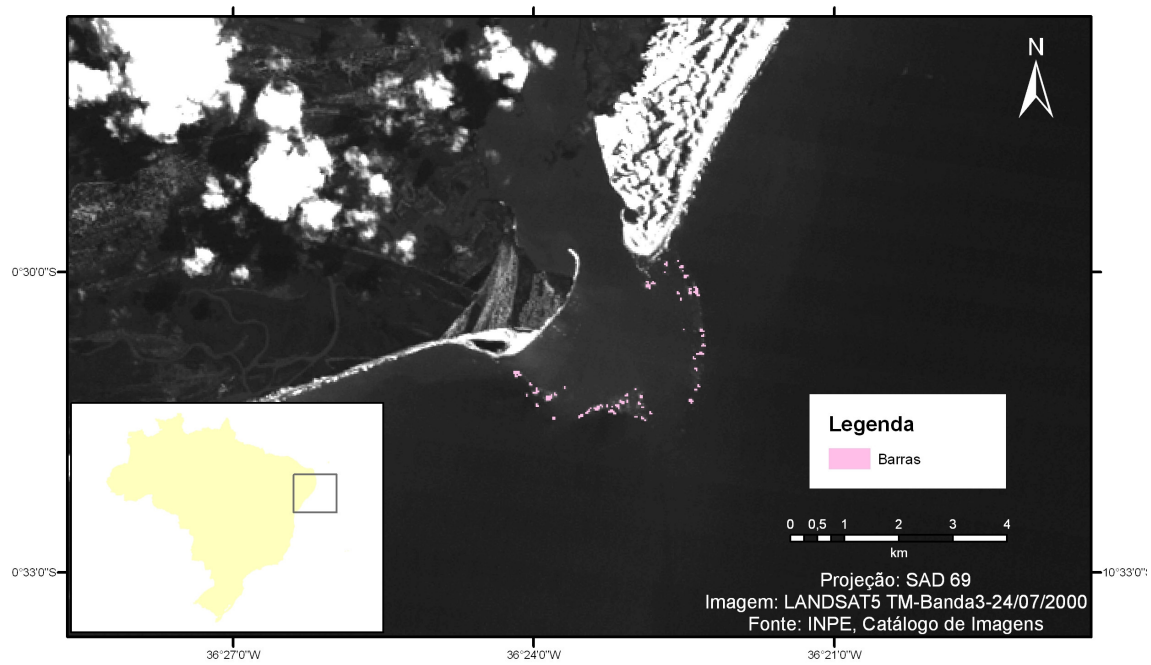


Figura 2: Imagem da Foz no período com as maiores barras fluvio-marinhas (24/7/2000)

5. Considerações Finais

Os resultados obtidos nesse trabalho confirmaram a viabilidade da metodologia aplicada – cruzamento de informações de imagens de satélites e dados hidrográficos – para a avaliação das modificações morfológicas na foz do rio São Francisco. Fica claro que não há uma relação clara entre a área das barras emersas e a cota da lâmina d'água.

Essa constatação indica que o aumento constante da área das barras fluvio-marinhas emersas, bem como do número destas, não é resultado de uma diminuição das cotas ou da vazão do São Francisco. O processo parece ser resultado de um aumento na carga sedimentar do rio, em relação a sua energia, que promove a alocação de uma maior quantidade de sedimentos no limite do arco de deposição na foz. Tais modificações são mais evidentes a partir de 1997, o que leva a crer que podem ser fruto das alterações promovidas pela construção da Usina Hidrelétrica de Xingó, que entra em atividade em 1994.

Foi verificado, também, a partir da interpretação das mudanças morfológicas na foz, que houve uma grande alteração na dinâmica de energia do rio nesse mesmo período, muito provavelmente relacionada à Usina de Xingó. Como resultantes dessas modificações, verificar-se o aumento da área emersa das barras, que está diretamente relacionado ao aumento da carga fluvial e à energia marinha.

Por fim, longe de responder às complexas indagações referentes às mudanças na morfologia da foz do São Francisco, este trabalho contribui com novas questões que buscam romper com discursos sem o devido embasamento que têm sido veiculados pela mídia. Adicionalmente, sugerem-se linhas de pesquisas futuras que poderiam contribuir para a evolução do conhecimento sobre os processos na foz do São Francisco, como estudos sobre a dinâmica erosiva a jusante de reservatórios; e análises sobre a influência das correntes marinhas na deposição de sedimentos fluviais em estuários.

6. Referências

Christofolletti, A. **Geomorfologia fluvial**. Edgar Blucher Ltda., São Paulo. 121p.

Cunha, S. B. Impactos geomorfológicos da barragem de Xingó – baixo curso do rio São Francisco. In: Santos, M. et al. **Território, territórios: ensaios sobre o ordenamento territorial**. DP&A; PPGEO/UFF, Rio de Janeiro, 2ª ed. 2006. p.355-376.

Fontes, L. C. da S. (coord.). **Estudo do processo erosivo as margens do baixo São Francisco e seus efeitos na dinâmica de sedimentação do rio**. Aracaju: Universidade Federal de Sergipe, 2003. 98p.

Lima, J. E. F. W., Santos, P. M. C., Chaves, A. G. M., Scilewski, L. R. (2001) **Diagnóstico do fluxo de sedimentos em suspensão na bacia do rio São Francisco**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. 64p.

Lorenzetti, J. A., Negri, E., Knopers, B., Medeiros, P.R.P.) Uso de imagens LANDSAT como subsídio ao estudo da dispersão de sedimentos na região da foz do rio São Francisco. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. Artigos, p. 3429-3436. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.14.21.18/doc/3429-3436.pdf>>. Acesso em: 10 janeiro 2008.

Medeiros, P. R. P. (coord.). **Determinação da carga de nutrientes do rio São Francisco na região de sua foz**. Maceió: Universidade Federal de Alagoas, 2003. 74p.

Oliveira, A. M. de (coord.). (2003) **Estudo Hidrodinâmico-sedimentológico do baixo São Francisco, estuário e zona costeira adjacente-AL/SE**. Maceió: Universidade Federal de Alagoas, 2003. 87p.