

Universidade Estadual de Maringá
Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes
Departamento de Geografia

**Influência da dinâmica de inundação na planície fluvial do Alto rio
Paraná, por meio de dados multitemporais Landsat 5.**

Everton Hafemann Fragal

Maringá
2012

Universidade Estadual de Maringá
Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes
Departamento de Geografia

**Influência da dinâmica de inundação na planície fluvial do Alto rio
Paraná, por meio de dados multitemporais Landsat 5.**

Everton Hafemann Fragal

Monografia apresentada à disciplina de
Trabalho de Conclusão de Curso, para
obtenção do título de bacharel em
Geografia, sob orientação do Professor
Doutor Edvard Elias de Souza Filho.

Maringá
2012

"A mente que se abre a uma nova ideia, jamais volta ao seu tamanho original."

(Albert Einstein)

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Edvard Elias de Souza Filho pela amizade, confiança, paciência e apoio moral e financeiro ao longo da minha vida acadêmica.

A CNPq pelas concessões de bolsas de Iniciação Científica.

Aos meus amigos Édipo Henrique Cremon e Otávio Cristiano Montanher pela ajuda inicial e constante no desenvolvimento de trabalhos científicos sobre o rio Paraná, Ilhas e planície fluvial. Além dos momentos de descontração.

Ao amigo Fabio Correa Alves, pelo companheirismo e momentos de “cachaça”, discutindo sobre nossos trabalhos de Iniciação Científica e outros assuntos.

Ao Hiran Zani e Guilherme Okuda Landgraf pela ajuda em outros trabalhos científicos, que proporcionaram melhor desempenho no desenvolvimento do presente trabalho.

Aos professores do GEMA (Grupo de Estudos Multidisciplinares do Ambiente) José Cândido Stevaux, Manoel Luís dos Santos, Nelson Vicente Lovatto Gasparetto e Marta Luzia de Souza pela atenção, ajuda e longas conversas durante o café.

Aos amigos Thomas Cosin, Paulo Miguel de Bodas Terrasi, Thalita Dal Santo, Nayara Medeiros, Karoline Bueno, Marco Henrique de Abreu, José Antônio Thomaz Junior (O COXA), Rômulo César, Mario Cesar, Luis Marcelo pelos momentos de ajudas e descontração.

Aos amigos do GEMA Manoel David, Bruno Aurélio Camolezi, Eduardo Souza de Moraes, Fabiana Cristina Meira, Carina Petsch, Fernanda Bortolatto, Karine Vargas, Diego Turullo, Isabel Terezinha Leli, Marta Sala, Carol Pinheiro, Alma Isbel Ariza Ramírez, Fernando, Vanderlei, Orlando Donini e José Antonio Arenas Ibarra (Pepe).

Aos demais amigos que contribuíram indiretamente no desenvolvimento deste trabalho, na qual não foram nomeados, pois precisaria de muitas páginas para escrevê-los.

Aos meus irmãos Vanessa Hafemann Fragal, Vanderson Hafemann Fragal e Elizângela Hafemann Fragal pela parceria e incentivos morais em vários momentos.

E por último, minha mãe Regina Hafemann, que condicionou apoio de todas as maneiras possíveis para que eu pudesse alcançar os meus objetivos.

RESUMO

O segmento fluvial do Alto rio Paraná situado a jusante da UHE de Porto Primavera teve sua dinâmica fluvial modificada e as relações rio-planície fluvial foram afetadas. Um dos efeitos causados pela barragem foi a modificação dos níveis hidrológicos do rio, que alterou as relações das áreas inundáveis com a vegetação e formas geomorfológicas. O objetivo do trabalho foi verificar a relação dos níveis hidrológicos dos rios Paraná e Ivinhema com a variabilidade de áreas inundáveis, da cobertura vegetal e das formas da planície fluvial do Alto rio Paraná em período anterior e posterior a barragem de Porto Primavera. Para alcançar isso, foram utilizados nível hidrológico do rio Paraná, na visualização da variação do nível da água e imagens do satélite Landsat 5, sensor TM somadas a técnicas de sensoriamento remoto para geração dos produtos de hidroperíodo (frequência de inundação) e vegetação na associação das relações cabíveis. Os resultados obtidos apresentaram que a relação da área inundável e nível fluviométrico inferior a 4 metros (m) antes da barragem obteve controle pelo rio Ivinhema e depois a barragem pelo rio Paraná, sendo em limite superior a 4 m o rio Paraná controlou os dois períodos. A quantidade de área de água na planície elevou-se até o nível de 5,5 m do rio Paraná, seguido por declínio em relação ao período anterior a barragem. Pela frequência de inundação a região a montante aumentou a área não inundada e nas áreas centrais e sudoeste diminuíram a frequência de inundação. A área de vegetação higrófila depois da barragem pode ser calculada por meio da equação $A \text{ (km}^2\text{)} = 358,5985 - 39,1993 \cdot \text{Nível do rio Paraná}$ e para vegetação herbácea anteriormente a barragem por $A \text{ (km}^2\text{)} = 210,5365 - 19,2566 \cdot \text{Nível do rio Paraná} + \text{Nível do rio Ivinhema}$. Ocorreu elevada correlação entre as áreas inundadas com a vegetação e formas geomorfológicas na planície, em que o micro relevo têm como fundamental controlador da dinâmica da distribuição da água nas áreas baixas.

Palavras chave: Sensoriamento remoto, nível hidrológico, áreas inundáveis, Rio Paraná.

ABSTRACT

The segment of Upper Parana River located downstream of Porto Primavera Hydroelectric has been modified fluvial dynamics and the relation of river-fluvial plain were affected. The effects caused by dam was the modification of level water of Parana and Ivinhema Rivers with the flooded area, vegetation cover and geomorphologic forms of Upper Parana River, in the period before and after Porto Primavera dam. For reach of goals were used level water of Parana River in overview of level water variation and Landsat 5 images, sensor TM. Additionally the techniques of remote sensing for generation of hydroperiod (flood frequency) and vegetation products in association of possible relations. The results obtained showed that relation of flooded area and level water less the 4 meter (m) before dam has been controlled by Ivinhema River and after the dam by Parana River. In the over limit of 4 m level the Parana River controlled the both periods. The amount of area of water in fluvial plain increased until 5.5 m level of Parana River, following by decreased in relation of period before dam. By flood frequency the upstream increased region non water area and in central and southwest areas decreased hydroperiod. The area of hygrophilous vegetation after dam can be calculated by the equation $A \text{ (km}^2\text{)} = 358,5985 - 39,1993 \times \text{Parana level}$ and for herbaceous vegetation before dam by $A \text{ (km}^2\text{)} = 210,5365 - 19,2566 \times \text{Parana level} - \text{Ivinhema level}$. Occurred high correlation between flooded area with vegetation and geomorphologic forms in plain, in that micro relief has fundamental control of dynamics the distribution of water in low areas.

Keywords: Remote Sensing, Hydrological level, floodplain, Parana River.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Localização da área de estudo. Composição colorida falsa R7 B2 B1.....5
- Figura 2: Unidades de conservação existentes na área do Alto rio Paraná. Composição colorida falsa R7 G2 B1.....5
- Figura 3: Variação da média mensal-anual da serie histórica das cotas fluviométricas dos rios Paraná e Ivinhema. (A) Variação da média mensal-anual das cotas fluviométricas no período anterior a barragem (1985 à 1998). (B) Variação da média mensal-anual das cotas fluviométricas no período posterior a barragem (1999 à 2011). (C) Variação da média mensal-anual das cotas fluviométricas do rio Ivinhema de 1985 à 2011.....6
- Figura 4: Quadrante da imagem Landsat 5 e localização das estações fluviométricas de Porto São José e Ivinhema. A imagem de fundo é um mosaico composto pela composição R7 G4 B2.....13
- Figura 5: Frequência acumulada da cota fluviométrica do rio Paraná antes da barragem (esquerda) e depois da barragem (direita).....16
- Figura 6: Método para a estimativa de frequência de inundação na planície fluvial.....16
- Figura 7: Fluxograma dos métodos utilizados para realização do mapa de hidroperíodo.....17
- Figura 8: Classes de cobertura vegetal encontradas na área de estudo.....17
- Figura 9: Modelo de árvore de decisão. Retirado de (MEDEIROS *et al.*, 2011).....18
- Figura 10: Fluxograma dos procedimentos realizados para obtenção do mapa de cobertura vegetal18
- Figura 11: Variação das cotas fluviométricas do rio Paraná no período de 1985 a 2011 e a data de obtenção das imagens utilizadas. (A) Cotas fluviométricas do período pré barragem (1985 a 1998). (B) Cotas fluviométricas posteriores à barragem (1999 a 2011).....20
- Figura 12: Cotas fluviométricas dos dias das passagens e dos três dias anteriores. Cotas do rio Paraná (A) e do rio Ivinhema (B) no período anterior à barragem e cotas do rio Paraná (C) e do rio Ivinhema (D) no período posterior ela.....21
- Figura 13: Gráficos da análise de regressão linear entre os níveis de Porto São José e a área de água na planície, no período anterior à barragem (A) e posterior a ela (B).....23
- Figura 14: Gráficos resultantes da análise de regressão linear entre os valores de nível inferiores aos de inundação e a área de água na planície no período anterior à barragem, valores de r^2 e as equações obtidas. Em A, nível do rio Paraná (Npsj); em B, nível do rio Ivinhema (Nivi); e em C, soma dos níveis dos dois rios (Npsj+ivi).....23

Figura 15: Gráficos resultantes da análise de regressão linear entre os valores de nível do rio Paraná superiores aos de inundação e a área de água na planície no período anterior à barragem, valores de r^2 e equações obtidas. Em A, resultados da análise com todos os valores; em B, os resultados com os valores mais elevados; e em C, os dois valores mais baixos.....24

Figura 16: Gráficos resultantes da análise de regressão linear entre os valores de nível e a área de água na planície no período posterior à barragem, valores de r^2 e equações obtidas. Em A, resultado da análise de regressão entre os níveis do rio Paraná inferiores a 4 metros em PSJ; em B, resultado dos níveis do rio Paraná superiores a 4 m; e em C, resultado da soma dos níveis quando o rio Paraná encontrava-se acima de 4 m.....26

Figura 17: Variação da área de água na planície, de acordo com a variação do nível fluviométrico (m) da estação Porto São José, no período anterior e posterior à barragem de Porto Primavera. Os valores foram calculados a partir das equações obtidas.....27

Figura 18: Frequência de inundação da planície fluvial do rio Paraná no período anterior à barragem (1) e no período posterior (2). Em A, detalhe da bacia de inundação, lagoas e diques marginais (atual e antigos); em B, detalhe da parte alta do rio Curutuba, e as formas relacionadas a antigos diques marginais, lagoas e bacias de inundação; em C, detalhe do rio Baía, da bacia de inundação, lagoas, diques marginais e leque de rompimento de dique. Ao fundo, imagem de 22/06/2006, composição colorida R7 G4 B2.....28

Figura 19: Drenos artificiais próximos ao rio Baía. (A) Fotografia aérea de 1996 (monocromática). (B) Fotografia aérea de 2009 (Composição colorida verdadeira R3, G2, B1).29

Figura 20: Validação do mapa de hidroperíodo de pós barragem. (A) Localização dos pontos ilustrados pelas fotografias aéreas. (B à E) Áreas alagadas (delimitadas por linha branca), áreas com alta frequência de inundação (delimitada por linha azul clara), com média frequência (delimitada por linha verde) e baixa frequência (delimitada por linha amarela). Recortes de fotografias aéreas coloridas obtidas em junho de 2009.....30

Figura 21: Árvore de decisão utilizada na classificação das imagens.....31

Figura 22: Mapa de cobertura vegetal. (A) Pré barragem, composição colorida R7 G4 B2, imagem de 15/04/1993. (B) Pós barragem, composição colorida R7 G4 B2, imagem de 22/06/2006.....32

Figura 23: Gráfico resultante da análise de regressão linear entre a soma dos níveis das estações (em x) e a área de vegetação herbácea no período anterior á barragem de Porto Primavera.....35

Figura 24: Gráfico resultante da análise de regressão linear entre os níveis do rio Paraná superiores a 4 m e a área de vegetação higrófila no período posterior á barragem de Porto Primavera.....36

Figura 25: Imagem TM de 22/06/06, com a localização das áreas selecionadas. Composição colorida R3 G2 B1.....36

Figura 26: Composição colorida R7/B4/G2 da imagem TM de 22/06/2006, mapa de frequência de inundação e mapa de cobertura vegetal dos recortes EFG e HIJ. Em destaque, a expressão de um paleocanal (1), paleobarras (2), diques marginais (3) e bacia de inundação (4).....37

Figura 27: Composição colorida R7/B4/G2 da imagem TM de 22/06/2006, mapa de frequência de inundação e mapa de cobertura vegetal dos recortes KLM e NOP. Em destaque, leque de rompimento de dique marginal (1), local de rompimento de dique (2), diques marginais (3) e bacia de inundação (4).38

LISTA DE ABREVIATURAS

UHEs Usinas Hidroelétricas

MDE Modelo Digital de Elevação

SRTM Shuttle Radar Topography Mission

SR Sensoriamento Remoto

SVM Suporte Vetor Machine

AD Árvore de Decisão

NDs Números Digitais

RNAs Redes Neurais Artificiais

NDVI Normalized Difference Vegetation Index

AFRI Aerosol Free Vegetation Index

NDWI Normalized Difference Water Index

MLME Modelo Linear de Mistura Espectral

MSS Multi-Spectral Scanner

TM Thematic Mapper

SPOT Satellite Pour l'Observation de la Terre

ASTER Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

AVHRR Advanced Very High Resolution Radiometer

IRS-1B Indian Remote Sensing Satellite

JERS-1 Japanese Earth Resources Satellite 1

ERS-1 Earth Remote Sensing Satellite

ANA Agência Nacional de Águas

INPE Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

USGS United States Geological Survey

GEMA Grupo de Estudos Multidisciplinares do Ambiente

UTM Universal Transverse Mercator

RMS Root Mean Square

IF Imagem Fração

MNDWI Modified Normalized Difference Water Index

TC Tasselled Cap

WEKA Waikato Environment for Knowledge Analysis

K Índice Kappa

IAF Índice de Área Foliar

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características do sensor TM.....	8
Tabela 2 - Informações gerais das imagens selecionadas.....	14
Tabela 3 - Índice Kappa e intervalos de desempenho, de acordo com LANDIS e KOCH (1977).	19
Tabela 4 - Área de água calculada para cada imagem (Km ²).....	22
Tabela 5 - Valores de área das classes de vegetação, obtidas a partir da classificação das imagens.....	34

SÚMARIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 HIPOTESE.....	3
3 OBJETIVOS.....	3
3.1 Objetivos específicos.....	4
4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	4
5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA EM SENSORIAMENTO REMOTO.....	7
5.1 Landsat 5, sensor TM.....	7
5.2 Classificação da cobertura vegetal.....	8
5.3 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).....	10
5.4 MLME (Modelo Linear de Mistura Espectral).....	10
5.5 Sensoriamento remoto aplicado em áreas inudáveis.....	11
6 MATERIAIS e MÉTODOS.....	13
6.1 Materiais.....	13
6.2 Métodos.....	15
6.2.1 Pré-processamentos.....	15
6.2.2 Classificação de áreas inudáveis e mapa de hidroperíodo.....	15
6.2.3 Mapa de cobertura vegetal.....	17
6.2.4 Avaliação estatística do mapa de cobertura vegetal.....	19
7 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	20
7.1 A situação das imagens e o hidroperíodo.....	20
7.2 Os mapas de hidroperíodo.....	27
7.3 Cobertura vegetal.....	30
7.4 Relação das áreas inundáveis com a vegetação e formas geomorfológicas.....	36
8 CONCLUSÃO.....	38
9 REFERÊNCIAS.....	40

1 INTRODUÇÃO

A bacia hidrográfica do rio Paraná é uma das maiores do mundo ocupando 2,4 milhões de quilômetros quadrados ao longo do Brasil, Argentina, Bolívia e Paraguai (STEVAUX, 2012). Essa contém diversas formações geológicas, formas geomorfológicas, tipos climáticos, coberturas vegetais e formas de exploração econômica.

As transformações do rio Paraná foram introduzidas, em grande parte, pelas construções das Usinas Hidroelétricas (UHEs) de Ilha Solteira, Jupiá, Itaipu e de Porto Primavera, finalizada em novembro de 1998. O trecho do rio Paraná entre as UHEs de Porto Primavera e Itaipu ainda situa-se livre de barramentos SOUZA FILHO e STEVAUX (2004), contendo uma extensa planície fluvial que se estende por mais de 150 quilômetros a montante de Guaíra-PR (ROCHA, 2002).

O intervalo entre 1982 e 1998 foi definido como “Período Regulado pelo Efeito Cascata dos Reservatórios” e o intervalo posterior a 1999 foi considerado como “Período Regulado pela UHE Porto Primavera” (ROCHA, 2002 e SOUZA FILHO, 2009). Os efeitos induzidos pela construção da barragem de Porto Primavera são constantemente monitorados, devido à uma série de modificações ocorridas principalmente entre a interação rio-planície fluvial. Segundo SOUZA FILHO, (2011) o barramento diminuiu a duração média de potamofases (período de cheia do rio) e aumentou a frequência de liminofases (período de vazante do rio), minimizando a interação entre as águas do canal e a planície.

Outras pesquisas também abordaram os efeitos da construção da barragem de Porto Primavera como: diminuição da frequência e magnitudes das cheias, permanência de descarga ROCHA, (2002) e SOUZA FILHO, (2009), retenção de sedimentos SOUZA FILHO et al., (2004); SILVA, (2007), redução da concentração da carga suspensa CRISPIM, (2001); ROCHA, (2001), MONTANHER e SOUZA FILHO, (submetido para publicação) cor e transparência da água HAYAKAWA, (2007), modificações da série histórica do nível hidrológico da estação fluviométrica de Porto São José, SILVA, (2007); SOUZA FILHO, (2009) e erosão marginal ROCHA e SOUZA FILHO (2008).

Diversos autores dedicaram esforços para compreensão da variação das áreas inundáveis promovidas pela precipitação local e pela complexa relação entre a descarga fluvial dos rios

Ivinhema, Baía e Paraná. Entre eles, COMUNELLO (2001) identificou a variabilidade de áreas inundáveis na planície de inundação próxima ao canal Ipoitã correlacionando com os diferentes níveis hidrológicos do rio Paraná registrado pela estação fluviométrica de Porto São José no período anterior a barragem de Porto Primavera.

Posteriormente, ROCHA (2002) abordou com maior ênfase a variabilidade de áreas inundáveis na planície fluvial, delimitando em três zonas alagáveis de acordo com os níveis hidrológicos registrados nas estações fluviométricas de Porto São José e Ivinhema. Adicionalmente, o autor definiu distintos níveis hidrológicos que influenciam no desenvolvimento ecológico da planície.

Com o objetivo de mapear a abrangência de áreas alagadas, MEURER, (2004) em sua dissertação, delimita os corpos d'água sobre a planície em distintos níveis hidrológicos (principalmente maiores que 5 m) registrados pela estação fluviométrica de Porto São José. No trabalho foi definida a área de abrangência da água sobre a planície e terraços em período de cheia, e a atuação da elevação do lençol freático nas áreas úmidas. Consecutivamente, CORRADINI, (2006) define níveis hidrológicos pela estação fluviométrica de Porto São José, próximos aos definidos por ROCHA, (2002) e MEURER, (2004) que mapeou a planície em 6 unidades geomorfológicas diferenciadas, por meio das diferenças na distribuição da cobertura vegetal e níveis topográficos, estabelecendo diferentes graus de interação rio-planície.

Segundo os referidos autores, a conexão com os corpos de água da planície começaria a ocorrer a partir da cota fluviométrica de 3,5 m na estação de Porto São José, a inundação da área do rio Corutuba e Ivinhema teria início a partir da cota de 4,6 m, a inundação das partes intermediárias ocorreria a partir da cota de 6 m e a inundação generalizada teria início a partir de 7 m (SOUZA FILHO, 2009).

ANDRADE, (2008) elaborou mapas de feições geomorfológicas da planície fluvial desde Porto Primavera até a foz do canal Ipoitã. O mapa de resíduos produzido pela diferença entre o padrão da topografia regional e a superfície de tendência foi utilizado por SOUZA FILHO, (2011) para a comparação da distribuição dos corpos d'água de acordo com a micro-topografia da planície fluvial. CREMON *et al.*, (2010), identificaram mudanças geomorfológicas na planície por meio de imagens de satélite Landsat 5 e definiram que a entrada de água na planície

fluvial pelos depósitos de rompimento de dique marginal ocorria entre 5 e 5,59 m na régua de Porto São José, antes da barragem de Porto Primavera.

Utilizando o Modelo Digital de Elevação (MDE) proveniente de dados altimétricos Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) e fotografias aéreas digitais, SAMIZAVA, (2009) simulou as interações das águas com a planície em diferentes níveis hidrológicos e avaliou a alteração espaço-temporal da vegetação no período de vazante. COUTO, *et al.*, (2010) observaram a modificação da topografia e cobertura vegetal da planície pela cheia de 1982 a 1983, comparando o período anterior (não inundado) e posterior (recessão da inundação) do evento. FRAGAL *et al.*, (submetido para publicação) avaliaram a distribuição da vegetação ao longo da cheia de 2007, cuja permanência em altas cotas fluviométricas proporcionou a morte da vegetação herbácea e recolonização da mesma a partir da recessão das águas.

Os trabalhos supracitados em geral utilizaram produtos de Sensoriamento Remoto (SR) na avaliação dos processos entre rio e planície fluvial. Contudo, com o avanço dos recursos de SR e ao longo período transcorrido desde a instalação da barragem de Porto Primavera, a planície fluvial do Alto rio Paraná carece de abordagens mais detalhadas, especialmente o que diz respeito à influência da barragem sobre a abrangência das cheias, as modificações geomorfológicas e a distribuição da vegetação.

2 HIPÓTESES

- A relação entre as cotas fluviométricas e as áreas inundáveis na planície fluvial são diferentes nos períodos anterior e posterior à barragem de Porto Primavera.
- Há diferenças na distribuição da vegetação da planície nos dois períodos e elas podem ser comparadas quando em condições hidrológicas similares.
- Mapas de cobertura vegetal e frequência de inundação (hidroperíodo) podem ser ferramentas para o realce das formas geomorfológicas.

3 OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho foi verificar a relação dos níveis hidrológicos dos rios Paraná e Ivinhema com a variabilidade de áreas inundáveis, da cobertura vegetal e das formas da

planície fluvial do Alto rio Paraná em período anterior e posterior a barragem de Porto Primavera.

3.1 Objetivos específicos:

- A) Identificar e classificar os corpos d'água presentes na planície fluvial em diferentes níveis hidrológicos, a partir de imagens Landsat 5.
- B) Mensurar o grau de relação de diferentes cotas fluviométricas com as áreas inundáveis e produzir mapas de frequência de inundação.
- C) Produzir mapas da distribuição da cobertura vegetal com imagens de satélite Landsat 5.
- D) Verificar as formas geomorfológicas da planície fluvial por meio de imagens TM e mapas de frequência de inundação, relacionadas a distribuição da cobertura vegetal.

4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O trecho da planície fluvial em estudo encontra-se localizado entre coordenadas 22° 25' 00" S, 53° 33'00" W e 22° 52'00" S, 52° 59'00"W, limitando-se entre o sudeste do Estado do Mato Grosso do Sul e Noroeste Paranaense (Figura 1). O trecho da planície fluvial em estudo pertence à Unidade de Conservação (UC) da Área de Proteção Ambiental das Ilhas e Várzeas do Rio Paraná, Parque Estadual do Ivinhema e situa-se próxima ao Parque Nacional de Ilha Grande (Figura 2).

Em âmbito geomorfológico/geológico os depósitos sedimentares do Alto curso do rio Paraná limitam-se entre o segmento de Três Lagoas a Guaíra, sendo divididos em três compartimentos: Lagoa São Paulo, Rio Baía e Ilha Grande (SOUZA FILHO, 1993), que representam blocos estruturais delimitados por alinhamentos estruturais. Na região, duas unidades geológicas estão presentes: a Formação Caiuá, na margem esquerda do rio e depósitos de colúvios, sedimentos aluviais e eólicos quaternários na margem direita (STEVAUX e SOUZA, 2004). Mais informações podem ser encontradas em (SOUZA FILHO 1993; STEVAUX 1994; SOUZA FILHO e STEVAUX, 1997).

As feições geomorfológicas da área em estudo foram construídas em eventos pretéritos e atuais do rio Paraná. As principais formas antigas são os diques marginais, os leques de

rompimento de dique (crevasses play) paralelos ao canal, as paleo-barras, as bacia de inundação antigas, os canais ativos, os inativos e as lagoas. As principais formas atuais são os leques de rompimento de dique perpendiculares ao canal e as bacias de inundação atuais. A descrição das características geomorfológicas de cada feição pode ser encontrada em (SOUZA FILHO, 1994; SOUZA FILHO e STEXAUX 1997).

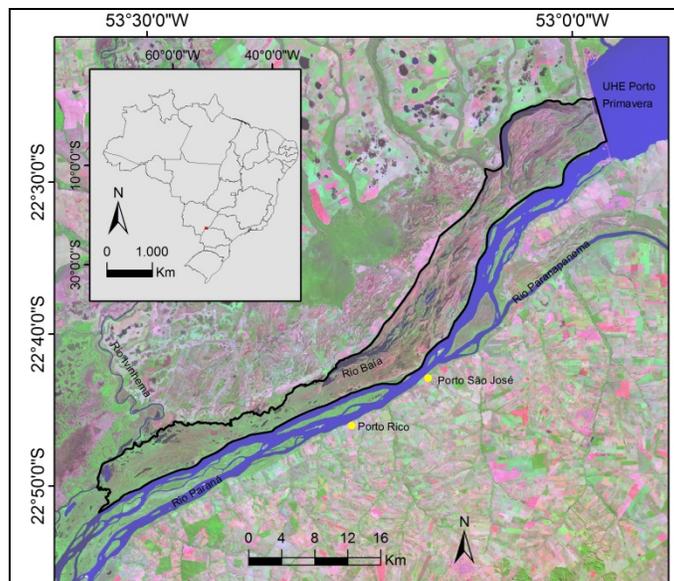


Figura 1: Localização da área de estudo. Composição colorida falsa R7 B2 B1.

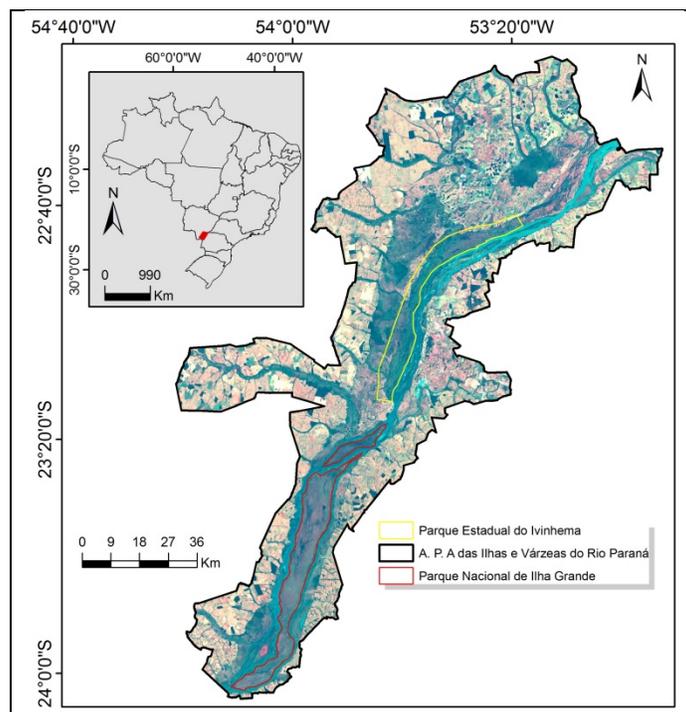


Figura 2: Unidades de conservação existentes na área do Alto rio Paraná. Composição colorida falsa R7 G2 B1.

A vegetação arbórea ocorre nas áreas mais elevadas, como diques marginais e paleo-diques. As paleo-barras e paleo-leques são cobertos por vegetação arbustiva e as áreas mais baixas são cobertas por vegetação higrófila (SOUZA FILHO, 1993; 2011).

O clima é tropical à subtropical com média de temperatura mensal superiores à 15° C e com precipitação acumulada de 1500 milímetros ao ano (IBGE, 1990). Os meses de verão apresentam as maiores precipitações e não é incomum a ocorrência de meses secos no inverno.

A dinâmica de inundação da planície é marcada pela complexa relação entre a descarga do rio Paraná e a dos rios Ivinheima e Baía (COMUNELLO *et al.*, 2003), mas o rio Paraná é o principal controlador desta dinâmica. Em eventos de cheia observa-se a diminuição de velocidade de fluxo dos rios tributários, por afogamento, podendo chegar até a inversão de fluxo dos rios Ivinhema e Baía (ROCHA, 2002). Tais condições começam a ocorrer quando do início das cheias controladas pelo rio Paraná, que têm início a partir da cota fluviométrica de 3,50 m (ROCHA, 2002) e tornam-se efetivas a partir da cota de 5,56 m, quando as águas das cheias alcançam a planície a partir dos rompimentos de dique marginal (CREMON, *et al.*, 2010). Os níveis fluviométricos médios mensais do rio Paraná em Porto São José do período entre 1985 e 1998 (Figura 3A) demonstram que a cheia iniciava-se em dezembro e prolongava-se até maio com máximo em fevereiro.

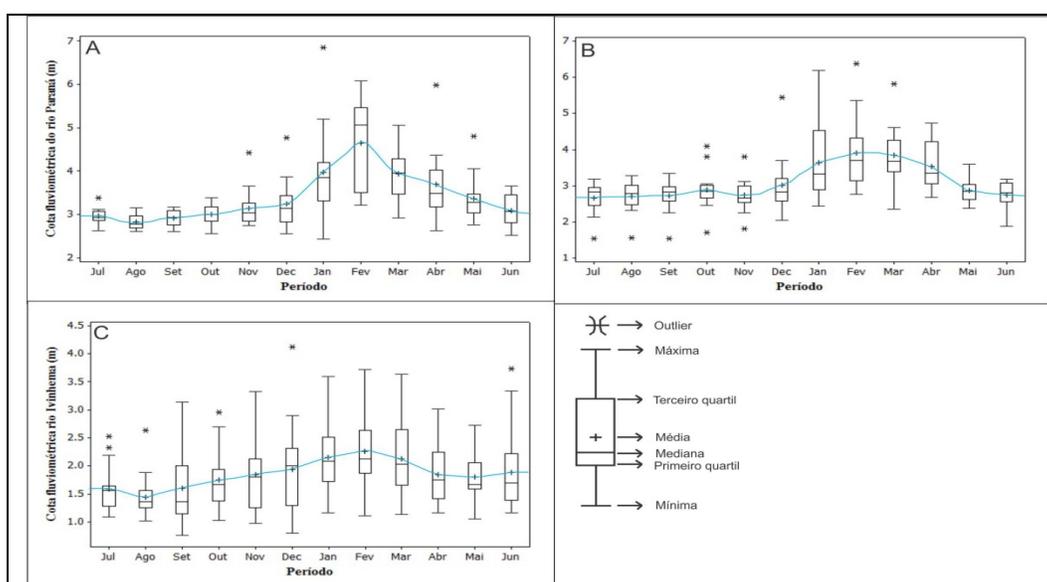


Figura 3: Variação da média mensal-anual da serie histórica das cotas fluviométricas dos rios Paraná e Ivinhema. (A) Variação da média mensal-anual das cotas fluviométricas no período anterior a barragem (1985 à 1998). (B) Variação da média mensal-anual das cotas fluviométricas no período posterior a barragem (1999 à 2011). (C) Variação da média mensal-anual das cotas fluviométricas do rio Ivinhema de 1985 à 2011.

Os valores do período posterior a 1999 (Figura 3B) mostram um período de cheia completamente simétrico, com início em dezembro, máximo em fevereiro e término em abril. Ambas as figuras mencionadas demonstram que depois da barragem, os valores médios dos níveis fluviométricos são maiores em quase todo o ano, mas que no período de cheia eles tornaram-se menores. Isso é resultado do controle efetuado pela barragem, que eliminou os valores extremos, conforme afirmado por SILVA (2007) e SOUZA FILHO (2009).

Os níveis fluviométricos médios mensais da estação Ivinhema (Figura 3C) mostram que em agosto as descargas são as menores do ano e que fevereiro também é o mês em que a cheia atinge seu ápice. Contudo, a variabilidade apresentada pela maioria dos meses indica que não é incomum a ocorrência de ondas de cheia fora do período de maior descarga média (dezembro a abril). Sendo assim, pode haver coincidência das cheias do rio Paraná e do rio Ivinhema, mas também pode haver onda de cheia extemporânea neste último rio. A este respeito, COMUNELLO *et al.* (2003) verificaram que as cheias dos dois rios são coincidentes em 30% dos casos e que as cheias isoladas do rio Ivinhema ocorrem em 28 % das vezes.

5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA EM SENSORIAMENTO REMOTO

Por ser de suma importância a utilização de produtos de sensoriamento remoto no trabalho, as propriedades das imagens de satélite e produtos derivados dela, como a classificação da cobertura vegetal e aplicações em área inundáveis merecem ser salientados.

5.1 Landsat 5, sensor TM

O satélite Landsat 5, sensor TM foi lançado em primeiro de março de 1984. O horário equatorial de passagem do satélite foi às 9:45 horas, com uma inclinação orbital de 98,2°, com posicionamento na órbita em 705 quilômetros (JENSEN, 2009). As propriedades do sensor TM estão sintetizadas na Tabela 1.

O satélite Landsat 5, sensor TM consiste em 7 bandas espectrais limitando-se nos comprimentos de ondas eletromagnéticas do visível, infravermelho de ondas curtas e médias e

infravermelho termal. A resolução espacial nas bandas 1 a 5 e 7 são de 30 metros com exceção da banda 6 com 120 metros (infravermelho termal). O nível de quantização das imagens são de 8 bits, ou seja, a distinção dos alvos da superfície terrestre imageada estabelece nos valores entre os valores de 0 a 256 tons de cinza. A periodicidade de imageamento de um mesmo ponto da superfície terrestre é de 16 dias. O satélite Landsat 5 encontra-se desativado desde novembro de 2011, por problemas no sensor TM.

Tabela 1: Características do sensor TM

Bandas espectrais	Resoluções			
	Espectral (μm)	Espacial (metros)	Radiométrica (bits)	Temporal (dias)
1	0,45-0,52 (azul)	30	8	16
2	0,52-0,60 (verde)	30	8	16
3	0,63-0,69 (vermelho)	30	8	16
4	0,76-0,90 (infravermelho próximo)	30	8	16
5	1,55-1,75 (infravermelho médio)	30	8	16
6	10,4-12,5 (infravermelho termal)	120	8	16
7	2,08-2,32 (infravermelho médio)	30	8	16

5.2 Classificação da cobertura vegetal

Existem diversos tipos de classificadores disponíveis em softwares de processamento digital de imagens e SIGs (Sistema de Informação Geográfica). Esses classificadores são divididos em dois grandes grupos: os supervisionados e os não supervisionados. No primeiro caso, são utilizadas amostras definidas pelo usuário em relação à classe temática escolhida. Essa informação é extraída da própria imagem de satélite, podendo ser coletada a assinatura espectral dos alvos e/ou amostras de pixels na cena escolhida para classificação. Os classificadores que pertencem nesse grupo são: o MAXVER, Paralelepípedo e Mínima Distância.

No grupo dos não supervisionados consideram-se as propriedades estatísticas da imagem para classificação dos pixels, ou seja, não há amostra de treinamento para treinar o classificador na discriminação das classes temáticas. Embora o usuário tenha possibilidade de definir alguns parâmetros, como os números de classes mínimas e máximas, tamanho do agrupamento de pixels e a tipologia de sua classe. Dentre os classificadores que se utilizam deste procedimento, podem ser citados o IsoSeg ou (IsoData) e o K-médias.

Além da divisão desses dois grupos (supervisionado e não supervisionado) os classificadores podem ser divididos em paramétricos e não paramétricos. No primeiro caso, o algoritmo considera a distribuição estatística das classes. Os algoritmos paramétricos geralmente usam imagens multiespectrais, por exemplo, o MAXVER, Paralelepido, K-médias, Suporte Vetor Machine (SVM) e Árvore de Decisão (AD).

No segundo caso (não paramétricos) a utilização da distribuição estatísticas das amostras não é considerada preponderante na rotulação dos pixels. Para a rotulação das classes, os dados são abordados integralmente, sendo que as assinaturas espectrais dos alvos diferenciam as classes temáticas (FERREIRA, 2003). Exemplos deste tipo de classificadores são aqueles por fatiamento dos valores de Números Digitais (NDs) e Redes Neurais Artificiais (RNAs).

O classificador conhecido como Árvore de Decisão (AD) é considerado como supervisionado e paramétrico, que possibilita rotular os pixels das imagens com distribuições estatísticas diferentes da Gaussiana (MEDEIROS *et al.*, 2011). A vantagem na utilização da Árvore de Decisão é a utilização de outros tipos de dados provenientes de diversas origens. Por exemplo, dados altimétricos por meio do Modelo de Elevação Digital (DEM), Índices de Vegetação NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), AFRI (Aerosol Free Vegetation Index) e NDWI (Normalized Difference Water Index), imagens fração geradas pelo MLME (Modelo Linear de Mistura Espectral), Índices de Textura, assim como imagens de diferentes resoluções espectrais e espaciais. Sendo assim, foi adotado o método de classificação por AD no presente trabalho.

Na classificação das mudanças do uso do solo (FRIEDL e BRODLEY, 1997; CLARKE e BITTENCOURT, 2003) constataram excelente desempenho do classificador AD para determinações das classes de temáticas. OTUKEI e BLASCHKE, (2010) avaliou melhor desempenho do AD na discriminação das classes temáticas em relação aos classificadores MAXVER e SVM. Em sua classificação os autores utilizaram imagens multi-espectrais sensor TM, imagens de Principais Componentes, imagens Tasselled Cap (TC), NDVI e Índice de Textura, sendo que os produtos derivados das imagens originais proporcionaram realce de algum alvo presente na cena.

Em relação aos produtos gerados pelas imagens de satélite originais como: NDVI e MLME devem-se ressaltar sobre suas características, por serem utilizados na classificação da cobertura vegetal no presente trabalho.

5.3 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

O Índice de Vegetação NDVI foi desenvolvido por ROUSE *et al.*, (1973), que utiliza o FRB (Fator de Reflectância Bidirecional) de superfície das regiões espectrais do vermelho e no infravermelho próximo consistindo na razão normalizada descrita pela Equação 1.

$$\text{NDVI} = (\text{B4} - \text{B3}) / (\text{B4} + \text{B3}) \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

B3 = FRB de superfície no vermelho;

B4 = FRB de superfície no infravermelho próximo.

Essa matemática de bandas aborda a relação do intervalo de comprimento de onda que apresenta elevada resposta espectral no infravermelho próximo, devido ao espalhamento da radiação eletromagnética pela estrutura celular da folha, com um intervalo na região espectral do vermelho, que apresenta baixa resposta espectral devido à absorção da radiação eletromagnética pelos pigmentos fotossintetizantes (JENSEN, 2009). O produto gerado pela equação apresenta valores adimensionais em intervalo fechado entre -1 e 1, no qual mais próximo de 1, maior é a representatividade de biomassa da vegetação, por exemplo.

O NDVI é normalmente utilizado para realçar as áreas de vegetação e não vegetação (outras classes) e foram utilizadas por PEIXOTO, (2007), FRAGAL e SOUZA FILHO, (2011) em áreas sazonalmente alagáveis para o mapeamento da cobertura vegetal.

5.4 MLME (Modelo Linear de Mistura Espectral)

A resolução espacial de um sensor remoto representa o detalhe com que ele abrange uma porção da superfície terrestre, sendo que uma maior resolução espacial abriga menor área superficial, e vice e versa. Os alvos da superfície terrestre são registrados pela energia eletromagnética refletida e/ou emitida pelos mesmos. Com isso, a composição dos pixels é a junção de vários objetos presentes na cena, detendo maior ou menor mistura espectral, de acordo com a resolução espacial do sensor.

SHIMABUKURO e SMITH, (1991) e PONZONI e SHIMABUKURO, (2007) definem que um alvo presente em uma resolução espacial e resposta espectral em qualquer banda de um sensor, pode ser descrita como uma combinação linear das respostas espectrais de cada componente presente na mistura. Assim, cada pixel da imagem pode assumir um valor de reflectância, contendo informações sobre a proporção e resposta espectral de cada componente (SHIMABUKURO e SMITH, 1991). A equação matemática do MLME é ilustrada na Equação 2.

$$r_i = a \cdot \text{vegei} + b \cdot \text{soloi} + c \cdot \text{águai} + e_i \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

- r_i = resposta do pixel na banda i ;
- a, b, c = proporção de vegetação, solo e sombra/água respectivamente;
- vegei = resposta espectral do componente vegetação na banda i ;
- soloi = resposta espectral do componente solo na banda i ;
- águai = resposta espectral do componente sombra ou água na banda i ;
- e_i = erro na banda i ;
- i = bandas TM (1 a 5 e 7).

Os produtos gerados pelo MLME são as Imagens Frações (IF), IF vegetação, IF solo exposto e IF água/sombra, obtendo resultados que variam de 0 (pixels escuros) a 1 (pixels claros) indicando a menor ou maior proporção dos componentes presentes na imagem fração. Contudo podem ser escolhidos diferentes alvos para aplicação da des-mistura espectral, na qual geraram IF com os respectivos objetos de interesse. Alguns trabalhos utilizaram o MLME para mapear a cobertura vegetal (RENÓ *et al.*, 2011,a; RENÓ, *et al.*, 2011,b, FRAGAL e SOUZA FILHO, submetido para publicação) e mapeamento dos habitats de planície de inundação (NOVO e SHIMABUKURO, 1997).

5.5 Sensoriamento remoto aplicado em áreas inundáveis

O uso de dados provenientes de sensoriamento remoto é uma peça fundamental em abordagem de planícies fluviais, devido ao difícil acesso em áreas encharcadas e a não necessidade de estar em contado direto com o alvo. O uso das imagens orbitais com recobrimento em diversos períodos subsidiam as análises temporais em áreas inundáveis, possibilitando a verificação das diferentes variações espaços-temporais dos objetos presentes na cena.

Em estudos de áreas inundáveis a aplicação de produtos de sensoriamento remoto é amplamente difundida, utilizando diversos tipos de satélites como: Landsat MSS (Multi-Spectral Scanner), Landsat TM (Thematic Mapper), SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre), ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) e MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) sendo comumente aplicáveis nessa abordagem, assim como os satélites NOAA, sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), IRS-1B, LISS-II (Indian Remote Sensing Satellite) e sistemas de radar incluindo JERS-1 (Japanese Earth Resources Satellite 1), ERS-1 (Earth Remote Sensing Satellite) e RADARSAT-1. Segundo SMITH, (1997) e STACY e MARVIN, (2002) a combinação de dados ópticos e de radar fornecem melhores resultados para a identificação e classificação de áreas inundáveis.

Em vários trabalhos voltados para a delimitação das áreas inundáveis são utilizados dados ópticos e/ou de radar, produzindo excelentes resultados, no entanto quando há presença da cobertura de nuvens, árvores e vegetação flutuante os resultados obtidos pelos sensores ópticos são afetados, podendo comprometer a precisão do mapeamento gerado. Contudo na presença de nuvens, as imagens de radar destacam-se por penetrá-las e detectar o estado da água através das plantas aquáticas emergentes e dossel florestal (SMITH, 1997).

Trabalhos utilizando imagens ópticas como os de FREITAS & NOVO, (2005), ANTUNES & ESQUERDO, (2006), e CARDOZO *et al.*, (2009) mostraram excelentes resultados no mapeamento das áreas alagadas da planície de inundação do Amazonas e Pantanal. Contudo, esses trabalhos foram restringidos a imagens de satélite que não apresentam coberturas de nuvens e assim o acervo de imagens para discriminação de vários estágios de inundação pode ser limitado.

O emprego de imagens de radar foi realizado por HESS *et al.*, (2003), BATES *et al.*, (2006) e MATGEN *et al.*, (2007), que obtiveram êxito na delimitação das áreas alagadas na Amazônia, em diversos níveis hidrológicos. Contudo o processamento dos dados de radar depende de um elevado recurso técnico e computacional.

Na planície fluvial do rio Paraná desenvolveram-se vários trabalhos utilizando produtos de sensoriamento remoto, podendo ser destacados os estudos realizados por COMUNELLO *et al.* (2003); MEURER (2004); HAYAKAWA (2007); ANDRADE (2008); SAMIZAVA (2009);

WATANABE *et al.* (2009); FRAGAL (2011; 2012). As imagens orbitais do satélite Landsat 5 sensor MSS e TM foram utilizadas pelos autores supracitados devido o recobrimento desde 1972, permitindo verificar as dinâmicas de inundação da área.

6 MATERIAIS e MÉTODOS

Foram utilizados dados do regime hidrológico dos rios Paraná e Ivinhema entre os anos de 1985 a 2011, imagens de satélite e derivados para geração de produtos temáticos de hidroperíodo (frequência de inundação) e cobertura vegetal. Os materiais e procedimentos utilizados para a realização desses produtos são descritos a seguir.

6.1 Materiais

Foram adquiridos os dados de níveis hidrológicos diários da estação Porto São José, no rio Paraná (registro 64.575.003) e da Estação Ivinhema, no rio homônimo (registro 64.617.000), Figura 4. As séries históricas foram obtidas no portal da Agência Nacional de Águas (ANA), disponível no endereço (<http://www2.ana.gov.br/Paginas/default.aspx>). O mesmo endereço permitiu a obtenção dos dados de precipitação local. As imagens obtidas são da órbita 223 ponto 076 e o quadrante utilizado pode ser observado na Figura 4.

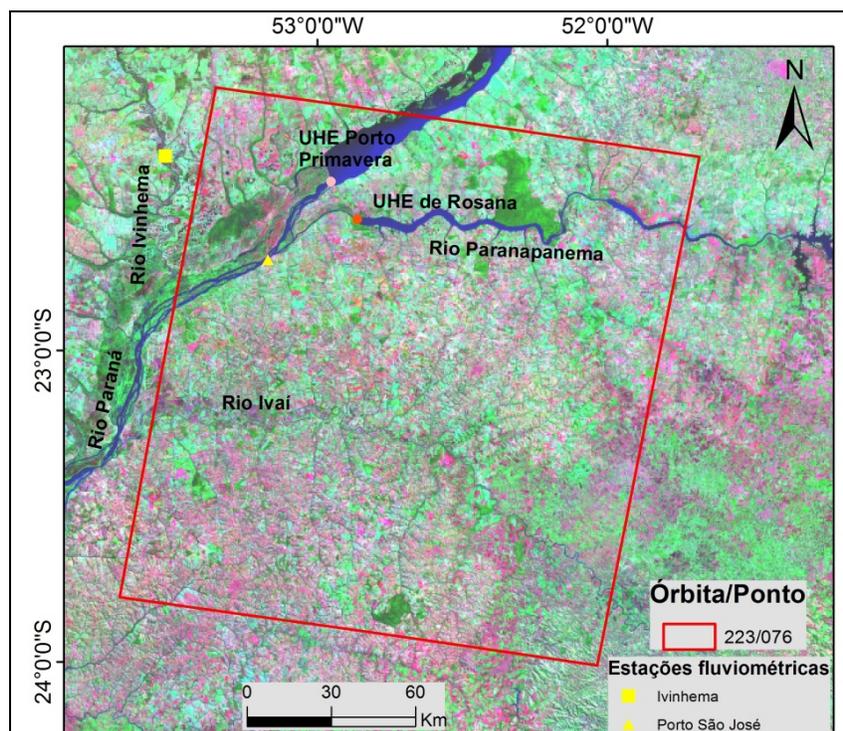


Figura 4: Quadrante da imagem Landsat 5 e localização das estações fluviométricas de Porto São José e Ivinhema. A imagem de fundo é um mosaico composto pela composição R7 G4 B2.

Foram selecionadas 10 imagens LANDSAT, sensor TM do período anterior à barragem e 13 imagens do período posterior. As imagens foram obtidas a partir do site do USGS/GLOVIS (<http://glovis.usgs.gov>) e do DGI/INPE (<http://www.dgi.inpe.br>). Para a escolha das imagens adotou-se os critérios de ausência de cobertura de nuvens e boa qualidade radiométrica. Além disso, optou-se pelas datas de passagem que representavam a situação da planície em diferentes níveis fluviométricos e em um período de relativa estabilidade de descarga fluvial.

A Tabela 2 mostra as imagens selecionadas, os níveis hidrológicos dos rios Paraná e Ivinhema no dia da aquisição da imagem, os valores de precipitação nos três dias anteriores às datas das imagens, a condição em relação à construção da barragem e a fonte do portal de busca das imagens.

Tabela 2: Informações gerais das imagens selecionadas.

Data	Nível rio Paraná(m)	Nível Ivinhema(m)	Precipitação 3 dias antes (mm)	Condição	Fonte
20/02/1985	6,07	2,01	-	Pré barragem	USGS
08/03/1985	4,87	2,60	-	Pré barragem	USGS
24/03/1985	5,59	4,13	-	Pré barragem	INPE
14/03/1987	3,63	1,97	3,30	Pré barragem	USGS
25/07/1989	2,82	1,16	45,8	Pré barragem	INPE
25/03/1991	4,11	2,24	37,2	Pré barragem	INPE
10/04//1991	6,73	1,45	0,00	Pré barragem	INPE
15/04/1993	4,28	2,59	0,00	Pré barragem	INPE
04/05/1994	3,17	1,20	0,00	Pré barragem	INPE
16/10/1996	2,45	1,19	16,8	Pré barragem	INPE
27/02/1999	4,29	2,41	1,20	Pós barragem	INPE
10/07/2001	1,50	1,58	0,00	Pós barragem	INPE
06/10/2004	2,44	1,23	0,00	Pós barragem	USGS
11/02/2005	5,56	2,73	0,00	Pós barragem	INPE
22/08/2005	2,10	0,92	0,00	Pós barragem	INPE
22/06/2006	3,00	1,29	0,00	Pós barragem	USGS
01/02/2007	6,40	3,07	21,2	Pós barragem	INPE
05/03/2007	5,98	3,45	5,00	Pós barragem	INPE
24/04/2008	4,71	2,15	0,00	Pós barragem	INPE
22/02/2009	4,01	1,73	0,00	Pós barragem	INPE
11/04/2009	3,42	1,24	0,00	Pós barragem	USGS
24/01/2010	6,12	3,66	1,10	Pós barragem	INPE

A seleção das imagens levou à criação de um catálogo delas, com os respectivos níveis fluviométricos, abrangendo o período entre 1984 e 2009. O catálogo pode ser acessado no endereço (http://www.gema.uem.br/catalogo_landsat.htm) e os detalhes a seu respeito podem ser encontrados em FRAGAL e CREMON (2012).

6.2 MÉTODOS

6.2.1 Pré-processamento

As imagens Landsat 5 adquiridas pela página do USGS/GLOVIS já encontravam-se georreferenciadas, mas as obtidas a partir do “site” do DGI/INPE não dispunham de qualquer tratamento neste sentido. Por esta razão, foi necessário a realização do georreferenciamento de cada uma delas. Para isso foi utilizado o método de polinômios de primeiro grau e interpolação por vizinho mais próximo, com erro de RMS (Root Mean Square) inferior a 0,5 pixel. No registro das imagens foi adotado a projeção Universal Transverse Mercator (UTM) e o Datum WGS 84. Após o registro, a área de planície (Figura 1) foi recortada e os 23 recortes foram submetidos à classificação. A área delimitada totalizou 397,14 km².

6.2.2 Classificação de áreas inundáveis e mapa de hidroperíodo

A classificação dos corpos d’água foi realizada por meio da utilização do método proposto por (FRAZIER e PAGE, 2000 e ZANI e ROSSETTI, no prelo). Os autores avaliaram os métodos de classificação supervisionada, o MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index), TC (Tasselled Cap) e fatiamento da banda 5 do sensor TM. Assumindo que o fatiamento da banda 5 proporcionou eficiente e rápida delineação. Esse procedimento é executado pelo corte linear dos valores de NDs da imagem que represente os corpos d’água, sendo que o comprimento de onda do infravermelho médio (banda 5), detém elevada absorção pelos corpos d’água (JENSEN, 2009), promovendo baixos valores de ND, para as áreas inundáveis.

Nas 23 imagens foram classificadas as áreas inundáveis (ND=1) e as não inundáveis (ND=0). A classificação permitiu a elaboração de mapas de hidroperíodo do intervalo anterior à

barragem e do posterior a ela. Para isso foi utilizado o método de ZANI e ROSSETI (no prelo). As imagens foram agrupadas de acordo com o gráfico de frequência de acumulação da série histórica das cotas fluviométricas do rio Paraná e classificadas em três classes de abrangência da água sobre a planície fluvial, denominadas “baixa” (cotas $\leq 3,5$ m), “média” (cotas entre 3,5 e 5,56 m) e “alta” (cotas $\geq 5,56$ m), Figura 5.

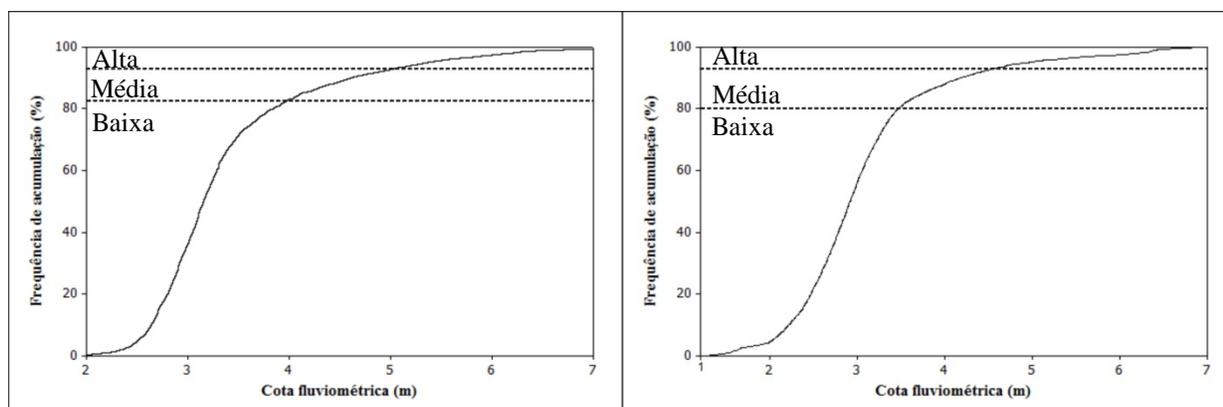


Figura 5: Frequência acumulada da cota fluviométrica do rio Paraná antes da barragem (esquerda) e depois da barragem (direita).

Foram calculadas as médias de cada agrupamento e foi produzida uma imagem com valores variando entre 0 (área não inundável) e 3 (permanência de áreas inundáveis) por meio da soma das imagens de cada classe, Figura 6. Com a variação dos valores de 0 à 3 de cada imagem, foi possível fatiar em valores intermediários que representassem as variações de média frequência de inundação. A Figura 7 sintetiza os procedimentos empregados.

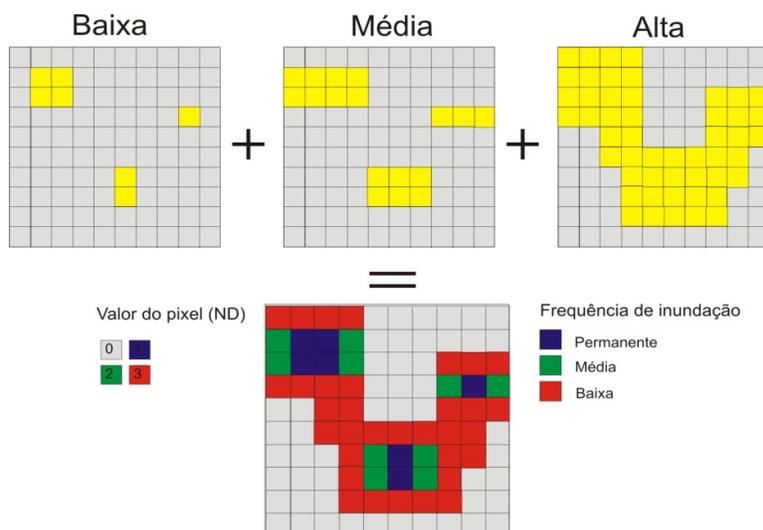


Figura 6: Método para a estimativa de frequência de inundação na planície fluvial.

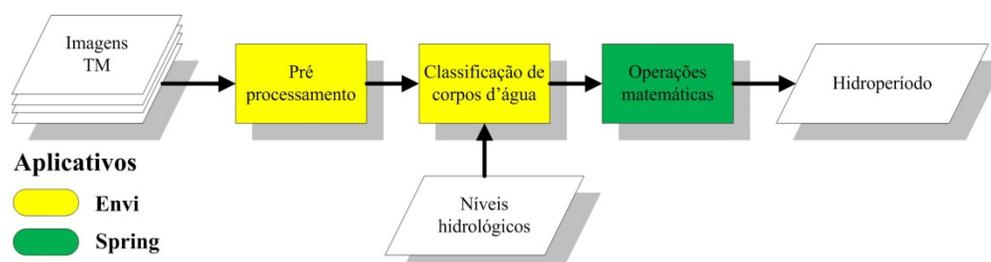


Figura 7: Fluxograma dos métodos utilizados para realização do mapa de hidroperíodo.

6.2.3 Mapa de cobertura vegetal

Para verificar a cobertura vegetal presente na planície fluvial em ambos os períodos foi utilizado o classificador de “Árvore de Decisão” (AD). As classes de cobertura vegetal foram definidas previamente a partir da análise visual de imagens de alta resolução, sendo definidas em: vegetação arbórea, vegetação herbácea, vegetação higrófila, corpos d’água e solo exposto, Figura 8.

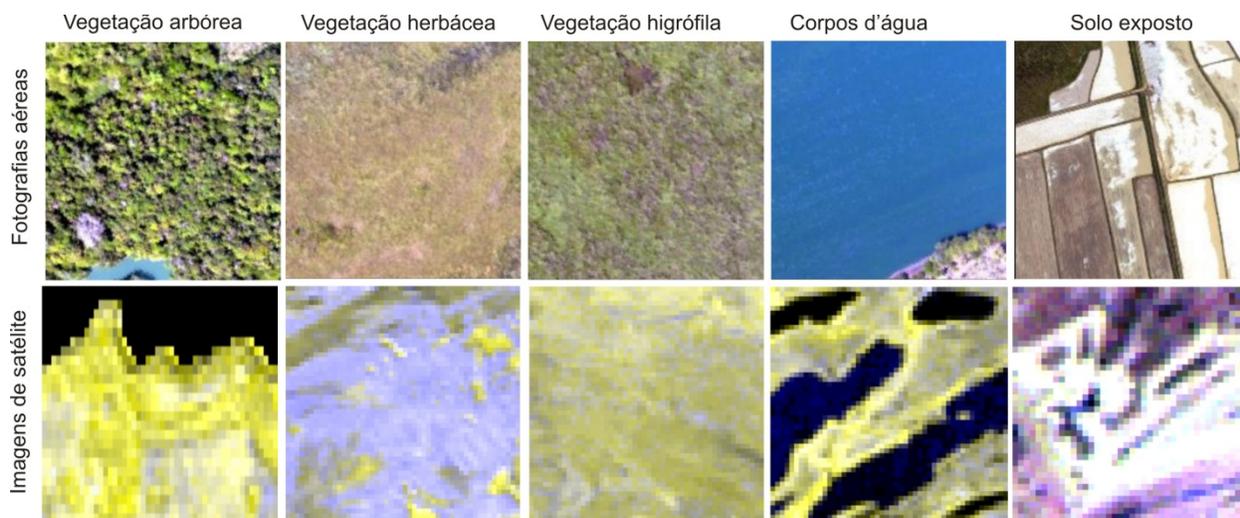


Figura 8: Classes de cobertura vegetal encontradas na área de estudo.

A AD é constituída internamente com nós de decisão que particionam o espaço de atributos através de superfícies de decisão e nós terminais ou “folhas” que permitem associar uma classe a cada objeto (vetor de atributos: x), (MEDEIROS *et al.*, 2011). A classificação é executada pelo processamento de multi-etapas usando uma série de decisões binárias para a discriminação dos pixels, sendo que cada decisão separa pixels pertencentes a um arranjo de imagens, dentro de duas classes baseadas numa determinada expressão. Para cada nova classe gerada é possível subdividi-la em mais duas (SULSOFT, 2009).

A Figura 9 demonstra uma AD com suas regras e respectivas separações dos dados em um espaço de atributos. Em cada nó da árvore o hiperplano de decisão intercepta apenas um dos eixos coordenados e seu modelo para cada atributo x_j é descrito pela Equação 3, onde \mathbf{x} é o vetor de atributos do objeto e o hiperplano intercepta o eixo j em $-w_0$ (MEDEIROS *et al.*, 2011).

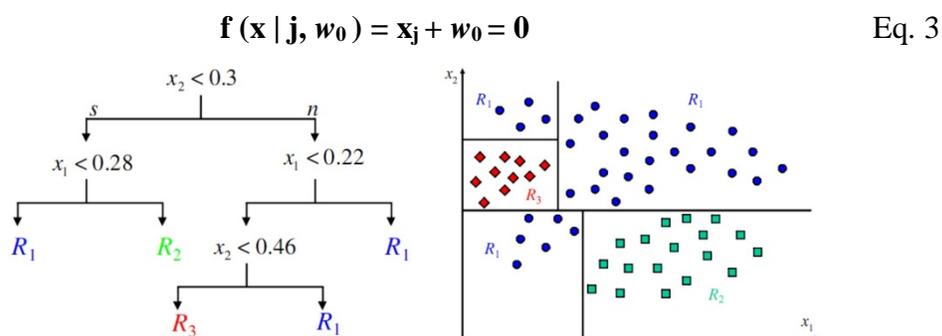


Figura 9: Modelo de árvore de decisão. Retirado de (MEDEIROS *et al.*, 2011).

Para selecionar os atributos que melhor permitem a identificação das classes de cobertura vegetal foi empregado o auxílio da técnica de mineração de dados, pelo algoritmo C4.5, presente no software WEKA (Waikato Environment for Knowledge Analysis), (HALL *et al.*, 2009), sendo usado 500 amostras de cada classe para o treinamento.

Em seguida foi realizada a classificação da cobertura vegetal pelo classificador AD e avaliado a classificação por meio de imagens de alta resolução. A confiabilidade da classificação foi calculada estatisticamente por meio dos métodos da Exatidão Global e do Índice Kappa. A Figura 10 resume os procedimentos realizados.

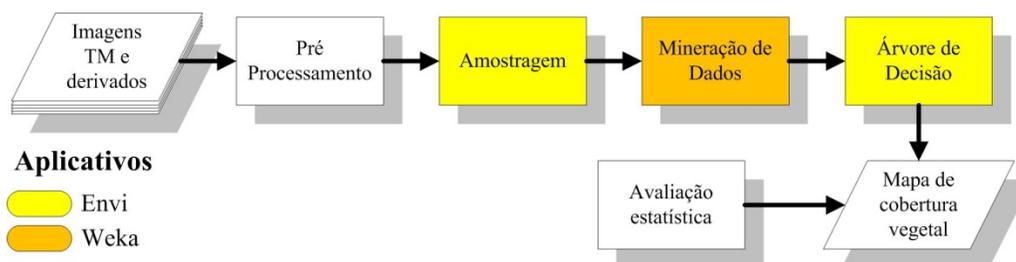


Figura 10: Fluxograma dos procedimentos realizados para obtenção do mapa de cobertura vegetal.

6.2.4 Avaliação estatística do mapa de cobertura vegetal

A avaliação da precisão do mapeamento pode ser realizada pela Exatidão Global, Índice Kappa, entre outros. O primeiro é calculada pela divisão da soma da diagonal principal da matriz de confusão, pelo número de amostras totais (CONGALTON, 1991), Equação 4.

$$G = \frac{\sum_{i=1}^c x_{ii}}{n} \quad \text{Eq. 4}$$

Onde:

G: Exatidão Global;
 x_{ii} : Diagonal principal;
 n: Número de amostras coletadas.

O Índice Kappa (K) mede a diferença entre a concordância real do mapeamento (representados pelos elementos diagonais da matriz) e a concordância casual (representados pelo produto total da linha e coluna), de acordo com a Equação 5. As classes de desempenho encontram-se na Tabela 3.

$$K = \frac{n \sum_{i=1}^c x_{ii} - \sum_{i=1}^c x_{i+} x_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1}^c x_{i+} x_{+i}} \quad \text{Eq. 5}$$

Onde:

K: Índice de Kappa;
 x_{ii} : Valor na linha i e coluna i ;
 x_{i+} : Soma da linha i ;
 x_{+i} : Soma da coluna i da matriz de confusão;
 n: Número total de amostras;
 c: Número total de classes.

Tabela 3: Índice Kappa e intervalos de desempenho, de acordo com LANDIS e KOCH (1977).

Valor de Kappa	Intervalos de desempenho
< 0,00	Péssima
0,00 - 0,20	Ruim
0,20 - 0,40	Razoável
0,40 - 0,60	Boa
0,60 - 0,80	Muito boa
0,80 - 1,00	Excelente

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1. A situação das imagens e o hidroperíodo

Dentre as 10 imagens do período anterior à barragem, três foram obtidas em águas baixas, 4 em níveis iniciais da cheia e 3 em condições de cheia significativa (Figura 11 A). Por sua vez, das imagens do período posterior a 1998, 5 foram obtidas em águas baixas, 3 são de fases iniciais da cheia e 5 são de cheias de grande amplitude (Figura 11 B).

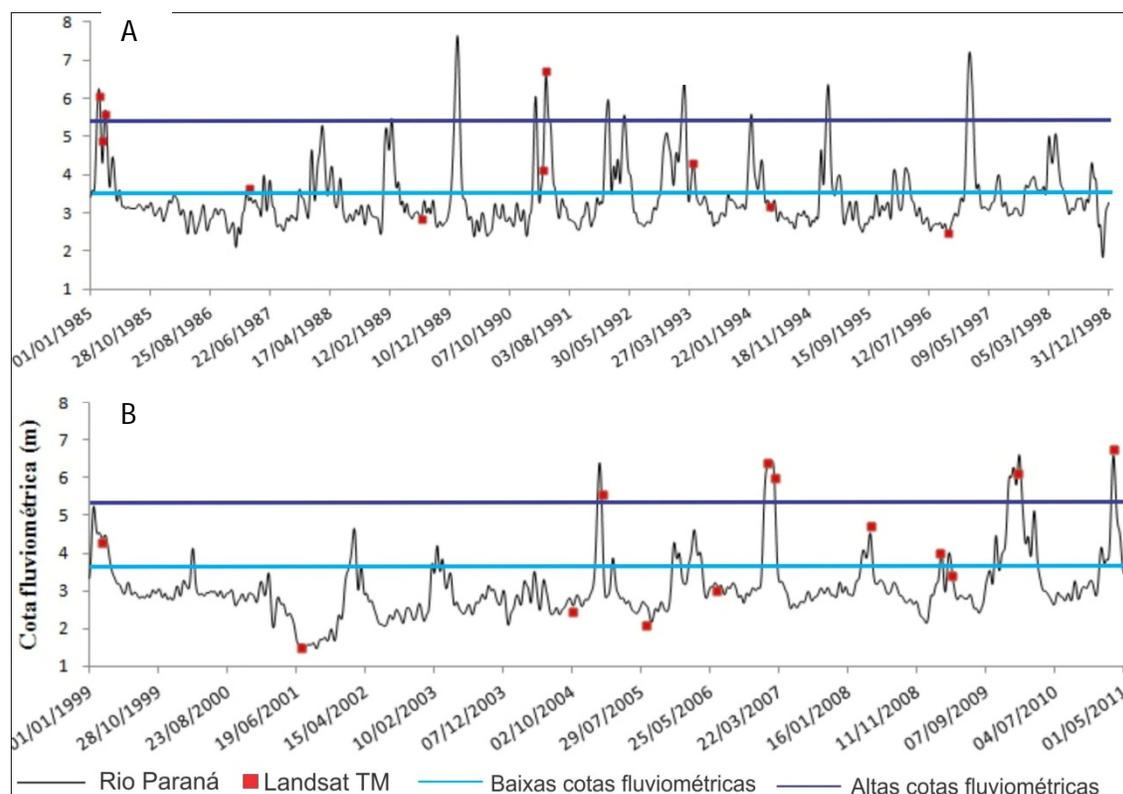


Figura 11: Variação das cotas fluviométricas do rio Paraná no período de 1985 a 2011 e a data de obtenção das imagens utilizadas. (A) Cotas fluviométricas do período pré barragem (1985 a 1998). (B) Cotas fluviométricas posteriores à barragem (1999 a 2011).

A variação das cotas fluviométricas nos três dias anteriores à barragem pode ser verificada na Figura 12. Dentre as imagens escolhidas para o período pré-barragem, aquelas obtidas nos dias 8/03/1985 e 25/03/1991 são as que registram a situação da planície após uma variação significativa de descarga do rio Paraná (Figura 12 A), mas não ocorre tal situação no rio Ivinhema (Figura 12 B). A diferença de variação do nível da água dos dois rios pode ser

resultado da influência das barragens situadas no rio Paraná, à montante da atual UHE de Porto Primavera.

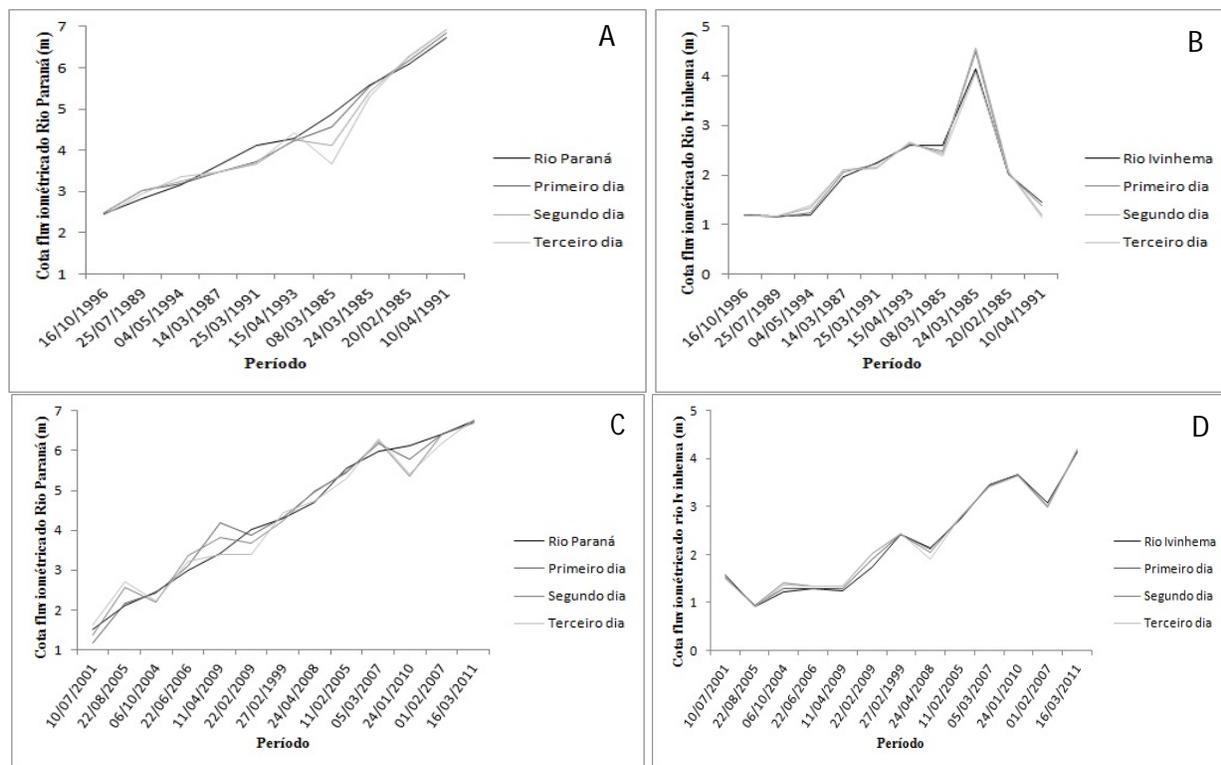


Figura 12: Cotas fluviométricas dos dias das passagens e dos três dias anteriores. Cotas do rio Paraná (A) e do rio Ivinhema (B) no período anterior à barragem e cotas do rio Paraná (C) e do rio Ivinhema (D) no período posterior ela.

No período posterior à barragem, a variação de cotas nos três dias anteriores às passagens do satélite foi significativa em 22/08/2005, 22/02/2009, 11/04/2009 e em 24/01/2010 (Figura 12 C) e também muito pouco significativa no rio Ivinhema (Figura 12 D). A maior frequência de variação significativa da cota fluviométrica pode estar associada à forte variação de descarga imposta pela barragem de Porto Primavera, conforme descrito por SOUZA FILHO (2011).

A variação das cotas fluviométricas nos três dias anteriores a data de aquisição das imagens pode proporcionar erros na avaliação das áreas inundadas, pois caso o nível fluviométrico do dia da passagem for menor que os anteriores, a área de água poderá ser superestimada. Contudo, as datas afetadas pela variação das cotas ou estão na condição de vazante, ou são datas antecedidas por valores mais baixos, como é o caso dos dias 8/03/1985, 25/03/1991 e 24/01/2010. Em águas baixas, não há inundação da planície e em condições de

aumento de nível dificilmente haverá diferença significativa de área de água, uma vez que a comunicação é feita por superfície.

A área de água obtida em cada imagem classificada encontra-se na Tabela 4. Tais dados e os respectivos níveis fluviométricos de ambos os rios (Tabela 2), além da soma dos níveis de ambas as estações, foram tratados por meio de análise de regressão linear. A análise considerou os valores de nível como variável independente e a área de água como variável dependente.

Tabela 4: Área de água calculada para cada imagem (Km²).

Data	Área de água	Data	Área de água
20/02/1985	214,09	27/02/1999	41,30
08/03/1985	52,47	10/07/2001	24,08
24/03/1985	166,11	06/10/2004	24,33
14/03/1987	22,80	11/02/2005	152,10
25/07/1989	22,55	22/08/2005	24,37
25/03/1991	26,62	22/06/2006	24,39
10/04//1991	340,24	01/02/2007	210,13
15/04/1993	27,22	05/03/2007	193,63
04/05/1994	22,56	24/04/2008	84,64
16/10/1996	22,53	22/02/2009	32,35
-	-	11/04/2009	24,70
-	-	24/01/2010	201,20
-	-	16/03/2011	263,22

A análise dos dados das 23 imagens obteve coeficiente de determinação (r^2) de 0,7765 para a regressão entre os níveis medidos na estação de Porto São José e a área de água na planície, mas as duas outras análises apresentaram valores inferiores. Os resultados indicaram que a área de água na planície é controlada principalmente pelo nível fluviométrico do rio Paraná.

Uma vez que se admite que a barragem modificou as relações entre os níveis fluviométricos do rio e a abrangência das cheias na planície, os dados foram divididos em dois grupos (série anterior e série posterior à barragem), tratados separadamente.

A análise de regressão linear dos dados anteriores à barragem obteve r^2 de 0,7803 quando os níveis do rio Paraná e a área de água na planície foram avaliados, enquanto as duas outras análises apresentaram valores menores. A análise dos dados posteriores à barragem obteve um quadro distinto, uma vez que o maior r^2 (0,8999) foi obtido a partir dos dados de nível do rio

Ivinheima, seguido pelos dados da soma dos níveis (0,8946), enquanto o valor mais baixo (0,8301) foi obtido a partir dos dados do rio Paraná. Tais resultados comprovam que a barragem de Porto Primavera modificou as relações entre o nível do rio Paraná e a abrangência das cheias.

Em ambos os conjuntos de dados, as imagens dos dias com nível fluviométrico inferior a 4,0 m apresentaram pequena variação de área de água, enquanto que as imagens obtidas em dias com nível mais alto apresentaram considerável variação desses valores (Figura 13). Ou seja, os valores mais baixos representam a área de água na planície em condições de vazante e os valores mais altos em condições de cheia. Por esta razão, ambas as séries de dados foram divididas em dois conjuntos e cada um deles foi analisado novamente.

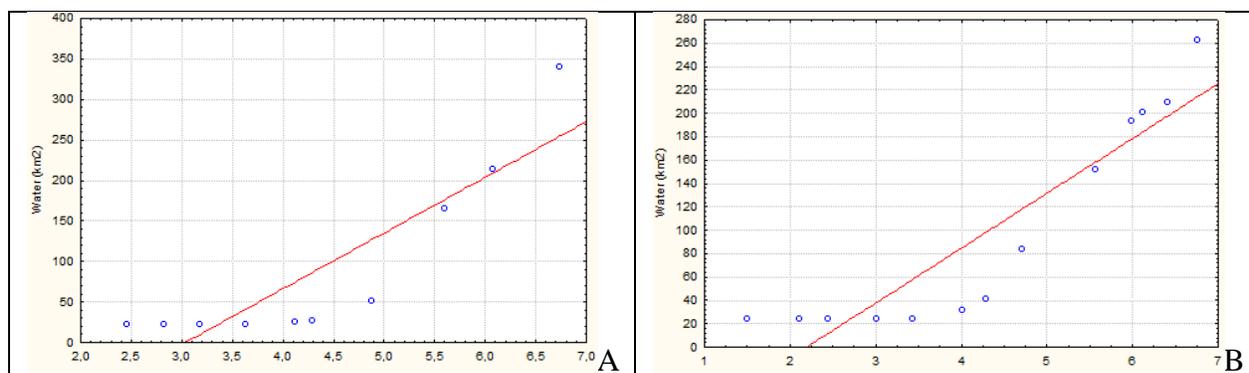


Figura 13: Gráficos da análise de regressão linear entre os níveis de Porto São José e a área de água na planície, no período anterior à barragem (A) e posterior a ela (B).

Os resultados obtidos para os valores inferiores a 4 m do período anterior à barragem (Figura 14) demonstram que quando o rio Paraná encontrava-se em descargas baixas, a área de água na planície era controlada pelo nível do rio Ivinheima. O valor de r^2 resultante da análise de regressão (Figura 14B) sustenta tal afirmação e demonstra que a equação obtida possui confiabilidade alta.

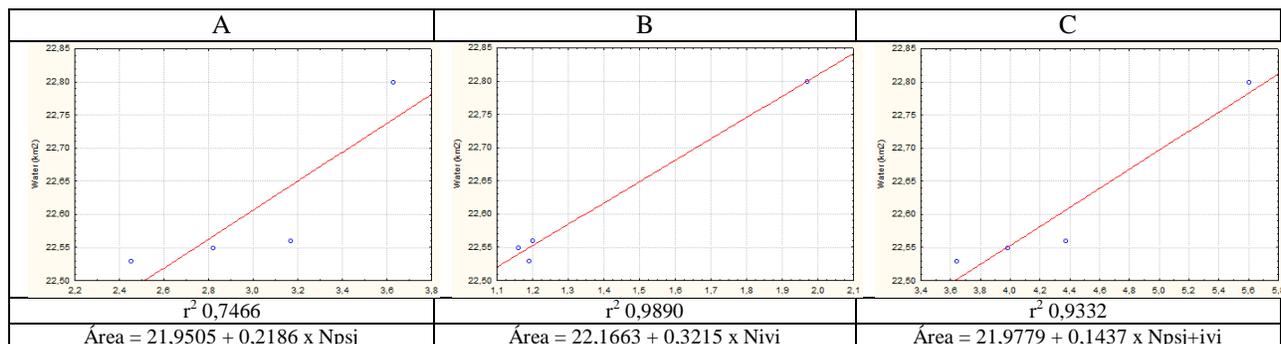


Figura 14: Gráficos resultantes da análise de regressão linear entre os valores de nível inferiores aos de inundação e a área de água na planície no período anterior à barragem, valores de r^2 e as equações obtidas. Em A, nível do rio Paraná (Npsj); em B, nível do rio Ivinheima (Nivi); e em C, soma dos níveis dos dois rios (Npsj+ivi).

Os resultados obtidos para a os valores superiores a 4 m do período anterior à barragem demonstram que a área de água na planície em condições de cheia do rio Paraná era controlada pelo nível deste rio, uma vez que a análise de regressão obteve r^2 de 0,9563 (Figura 15 A), enquanto que os demais valores do coeficiente de determinação foram de 0,1152 (Nivi) e 0,3566 (Npsj+ivi). Contudo, a disposição dos pontos na Figura 15 A demonstra que há um intervalo de transição entre os valores de 4 m e 4,8 m, o que faz com que a equação superestime os valores da área de água nos níveis fluviométricos compreendidos entre 4,9 e 6,1 m e subestime os valores em níveis inferiores e superiores a eles.

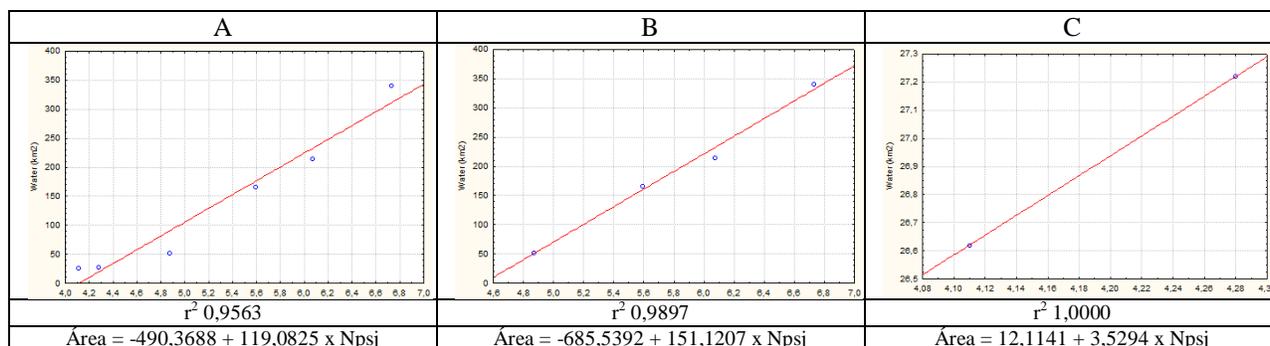


Figura 15: Gráficos resultantes da análise de regressão linear entre os valores de nível do rio Paraná superiores aos de inundação e a área de água na planície no período anterior à barragem, valores de r^2 e equações obtidas. Em A, resultados da análise com todos os valores; em B, os resultados com os valores mais elevados; e em C, os dois valores mais baixos.

Para resolver tal problema, os dados com nível superior a 4,8 m foram analisados separadamente. O resultado obtido encontra-se na Figura 15 B e representa as relações do rio em cheia. Os dois pontos situados entre os níveis de 4,0 e 4,8 m definem a relação entre o nível do rio Paraná e a área de água no estágio de transição. O valor de r^2 obtido (Figura 15 C) não garante a confiabilidade da equação, pois são apenas dois valores. Sendo assim, recomenda-se a realização de estudos adicionais a respeito deste intervalo de descarga.

Os resultados indicam que antes da barragem, a área de água na planície era controlada pelo rio Ivinheima quando o rio Paraná estava com baixa descarga, mas a partir de determinado nível fluviométrico o rio Paraná passava a controlar a área inundada. O nível fluviométrico

necessário para que o rio Paraná assumisse o controle da área de água pode ser obtido por meio da utilização da intersecção das retas definidas pelas equações das Figuras 14 A e 15 A.

A cota fluviométrica obtida por meio dessa intersecção é de 3,94 m e corresponde à área de 22,81 km². Contudo, uma vez que a equação da Figura 15 A superestima a área de água no estágio de transição, o uso da equação da Figura 15 C pode definir a partir de que nível fluviométrico o rio Paraná assumia o controle.

A intersecção entre as equações das Figuras 14 A e 15 C ocorre quando ao nível em PSJ atinge 2,97 m e a área de água na planície é de 22,60 km². É provável que este fosse o nível do início de entrada de água nos corpos lênticos da planície e o aumento da área de água pode ser resultado da expansão das lagoas que não possuem margem definida. Tal dado indica que a comunicação com os corpos de água poderia ter início em cota inferior à definida por ROCHA (2002), que estabeleceu o valor de 3,5 m para o início da conexão.

Por sua vez, o nível do início de inundação pode ser definido pela intersecção das retas das equações das Figuras 15 B e 15 C. A referida intersecção ocorre ao nível de 4,73 m, quando a área de água na planície é de 28,81 km². Neste caso, o valor é próximo ao obtido por ROCHA (2002), que definiu a cota fluviométrica de 4,6 m para o início da inundação da planície.

No período posterior à barragem, a análise de regressão dos valores inferiores a 4 metros demonstrou que o controle da área de água na planície passou a ser feito pelo rio Paraná, uma vez que a análise de regressão linear entre os valores de sua cota e a área de água obteve r^2 mais elevado (Figura 16 A), enquanto que a análise com os níveis do rio Ivinheima obteve baixo coeficiente de determinação (0,2215). Por sua vez, a análise de regressão dos valores de nível superiores a 4 m indicaram que o controle da área inundada continua a ser feita pelo rio Paraná (Figura 16 B), embora os resultados obtidos para a soma dos níveis das duas estações também seja consistente (Figura 16 C).

Neste caso, a Figura 16 B não mostra a existência de um intervalo intermediário, como no caso da Figura 15 A, embora existam dois pontos situados no intervalo de cotas entre 4 e 4,5 m. Pode ser que tal resultado indique a existência de alteração na morfologia da planície, de forma que a expansão dos corpos de água teria início em outro nível fluviométrico.

A	B	C
---	---	---

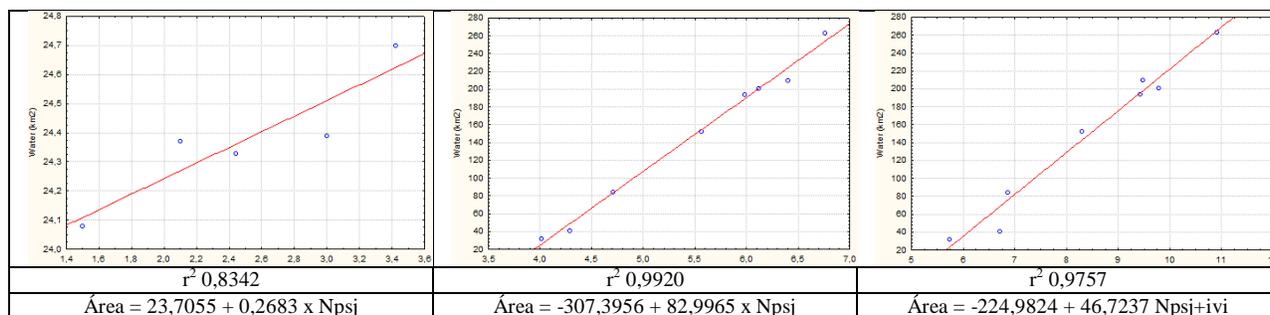


Figura 16: Gráficos resultantes da análise de regressão linear entre os valores de nível e a área de água na planície no período posterior à barragem, valores de r^2 e equações obtidas. Em A, resultado da análise de regressão entre os níveis do rio Paraná inferiores a 4 metros em PSJ; em B, resultado dos níveis do rio Paraná superiores a 4 m; e em C, resultado da soma dos níveis quando o rio Paraná encontrava-se acima de 4 m.

Neste caso, a intersecção das retas das figuras 16 A e 16 B corresponde ao início da inundação, uma vez que os valores da área de água variam da ordem de 24 km² (Figura 16 A) para mais de 32 km², ao nível de 4,01 m (Figura 16 B). Coincidentemente a intersecção ocorre no nível de 4,01 m, mas a área calculada é de 24,8 km². A diferença entre os valores deve-se à margem de erro dos valores estimados pelas duas equações.

A comparação entre a variação da área de água na planície nos dois períodos ser observada na Figura 17. A Figura 17 A mostra que a área de água tornou-se maior do que era até o nível de 3,55 m, tornando a ficar maior a partir do nível de 4,02 m. Antes da barragem a área média de água na planície era de 22,55 km² quando o nível de água era inferior a 3,55 m em PSJ e depois dela a área passou a ser de 24,38 km². Tal resultado reforça a possibilidade de que a morfologia da planície tenha se modificado e provavelmente é a razão dos dados do período posterior à barragem não apresentarem a fase intermediária, em que ocorreria a expansão dos corpos de água.

A diminuição do valor do nível fluviométrico do início da inundação e a alteração do controle da área de água nos níveis mais baixos também são evidências que indicam a existência de mudanças morfológicas. Tais mudanças permitiram o aumento da conexão do rio Paraná com os corpos de água e a diminuição da conexão deles com o rio Ivinheima.

A Figura 17 B demonstra que a partir do nível de 5,55 m, a área de água na planície tornou-se menor depois da barragem. Ou seja, após o fechamento do reservatório de Porto Primavera, a abrangência das cheias diminuiu em descargas mais elevadas. No período anterior a

ela, o nível necessário para cobrir os 397,14 (km²) da área de estudo era de 7,16 m e após sua construção, passou a ser de 8,49 m.

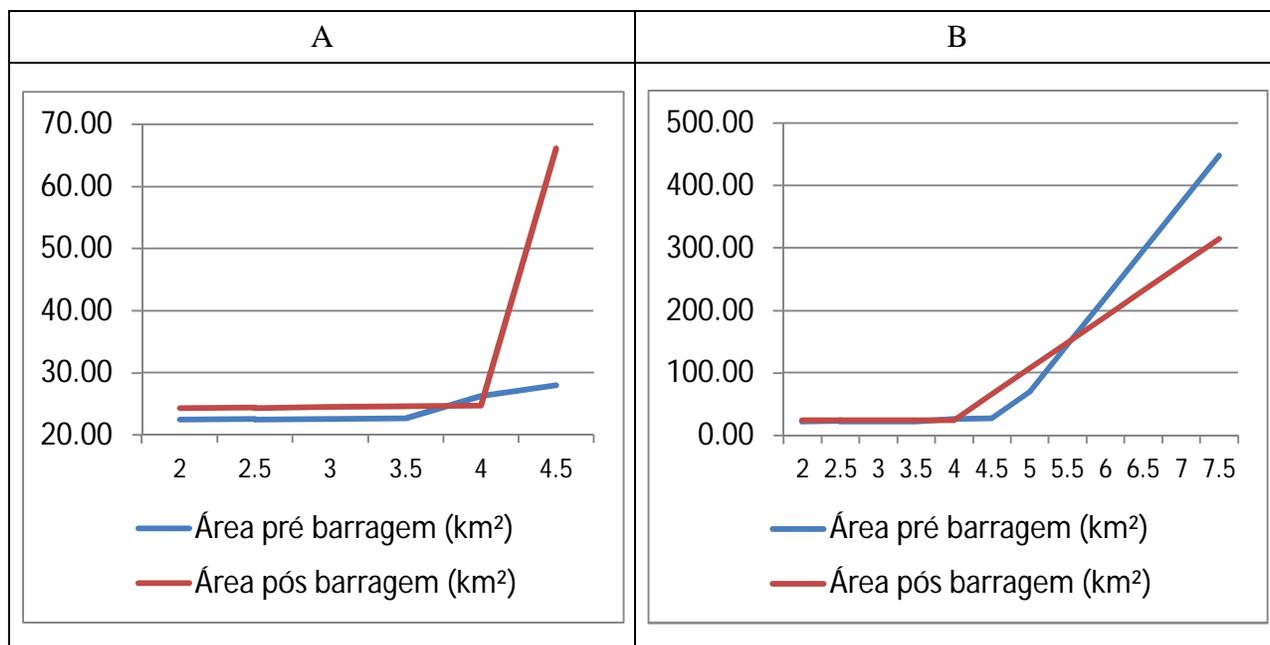


Figura 17: Variação da área de água na planície, de acordo com a variação do nível fluviométrico (m) da estação Porto São José, no período anterior e posterior à barragem de Porto Primavera. Os valores foram calculados a partir das equações obtidas.

Tais dados indicam que após a barragem o rio Paraná passou a controlar a área de água na planície em todos os níveis fluviométricos e a abrangência das cheias passou a ser maior e quase todos os níveis inferiores a 5,55 m, mas tornou-se menor acima deste valor.

7.2 Os mapas de hidroperíodo

Os mapas de hidroperíodo de ambos os intervalos de tempo estudados encontram-se na Figura 18 (1 e 2). As áreas não inundáveis e de baixa frequência de inundação estão localizadas na porção nordeste da planície (próximo à barragem de Porto Primavera) e na parte alta do rio Cururuba (detalhe B das Figuras 18 1 e 2). As áreas com média e alta frequência de inundação ocorrem na área central da área estudada, compreendendo o rio Baía (detalhe C), e na extremidade sudoeste, compreendendo o médio e baixo curso do rio Curutuba e as margens do rio Ivinheima (detalhe A). Elas são mais largas em sua porção sudoeste e estreitam-se no sentido montante, apresentando limite definido com as áreas pouco inundáveis em sua parte jusante e

limite transicional em sua parte montante. As áreas permanentemente alagadas ocorrem em todo o conjunto, embora sejam mais abundantes nas áreas com alta e média frequência de inundação.

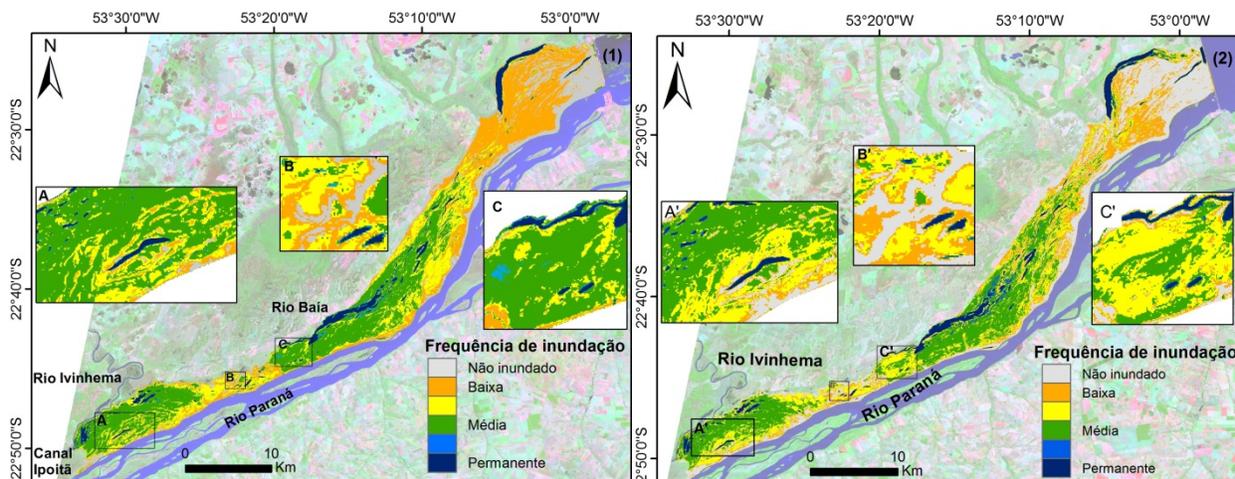


Figura 18: Frequência de inundação da planície fluvial do rio Paraná no período anterior à barragem (1) e no período posterior (2). Em A, detalhe da bacia de inundação, lagoas e diques marginais (atual e antigos); em B, detalhe da parte alta do rio Curutuba, e as formas relacionadas a antigos diques marginais, lagoas e bacias de inundação; em C, detalhe do rio Baía, da bacia de inundação, lagoas, diques marginais e leque de rompimento de dique. Ao fundo, imagem de 22/06/2006, composição colorida R7 G4 B2.

As áreas não inundáveis e com baixa frequência de inundação representam as áreas altas da planície, as áreas com média e alta frequência de inundação representam as partes baixas da planície e as áreas permanentemente alagadas representam o sistema de canais dos rios Baía e Curutuba, além do conjunto de lagoas. A disposição das áreas altas e das áreas baixas evidencia a existência de blocos estruturais, conforme definido por ANDRADE (2008) e por SOUZA FILHO (2011); o limite bem definido da parte jusante das áreas baixas marca a posição de prováveis falhas transversais à planície. A passagem gradativa da parte montante e a posição do conjunto de canais evidenciam a inclinação do bloco estrutural com mergulho para oeste. Por esta razão o sentido de entrada de água na planície é de jusante para montante, a partir dos canais de ligação rio Ivinhema e do rio baía com o rio Paraná.

O micro relevo, definido pelos diques marginais, leques de rompimento de diques e bacias de inundação torna-se mais visível nas áreas baixas (detalhes A e C da Figura 18) do que nas áreas altas (detalhe B) porque nas áreas baixas ele controla a distribuição de água na planície.

A comparação entre os mapas de ambos os períodos demonstra que as áreas de alta, média e baixa frequência de inundação diminuíram no período posterior à barragem. Nos

detalhes A e C, a área de alta frequência de inundação diminuiu 4 e 8 km², respectivamente. Por outro lado, as áreas não inundáveis aumentaram sua expressão superficial após a barragem.

O aumento de áreas permanentemente secas e a maior diminuição das áreas de baixa frequência de inundação (cores laranja e amarelo na Figura 11) pode ser resultado da menor abrangência das cheias em níveis fluviométricos mais elevados. Contudo, a existência de drenos artificiais na planície (Figura 19) também pode ser responsável pelo aumento das áreas secas ou ainda, a baixa frequência de cheias significativas.

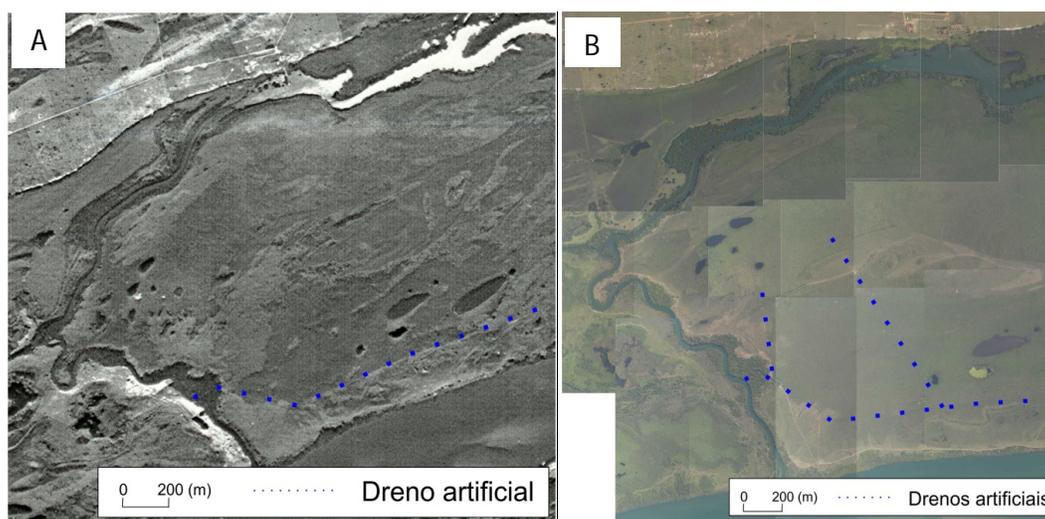


Figura 19: Drenos artificiais próximos ao rio Baía. (A) Fotografia aérea de 1996 (monocromática). (B) Fotografia aérea de 2009 (Composição colorida verdadeira R3, G2, B1).

A menor frequência de cheias pode ser descartada porque a área de água no dia 10/04/1991, com nível fluviométrico de 6,73 m era de 340,24 km² enquanto em 16/03/2011, a 6,76 m ela era de 263 km², o que demonstra a redução da abrangência das cheias após Porto Primavera. Já a influência dos drenos não pode ser descartada porque, infelizmente, os intervalos de nível fluviométrico utilizados para a elaboração dos mapas de frequência não contemplam os níveis de entrada de água na planície, pois os valores utilizados foram os de literatura. Desta forma não há como comparar a frequência nos intervalos de nível definidos anteriormente por este trabalho. Por esta razão, há necessidade de estudos adicionais, ou seja, a elaboração de mapas de frequência utilizando-se os níveis de 2,97 m, 3,55, 4,01, 4,6 m e 5,55 m.

A validação do mapa de hidroperíodo posterior à barragem foi realizada por meio de fotografias aéreas coloridas, cujos recortes encontram-se na Figura 20. Tais recortes demonstram

que há correspondência entre as classes de frequência de inundação e as feições morfológicas na planície.

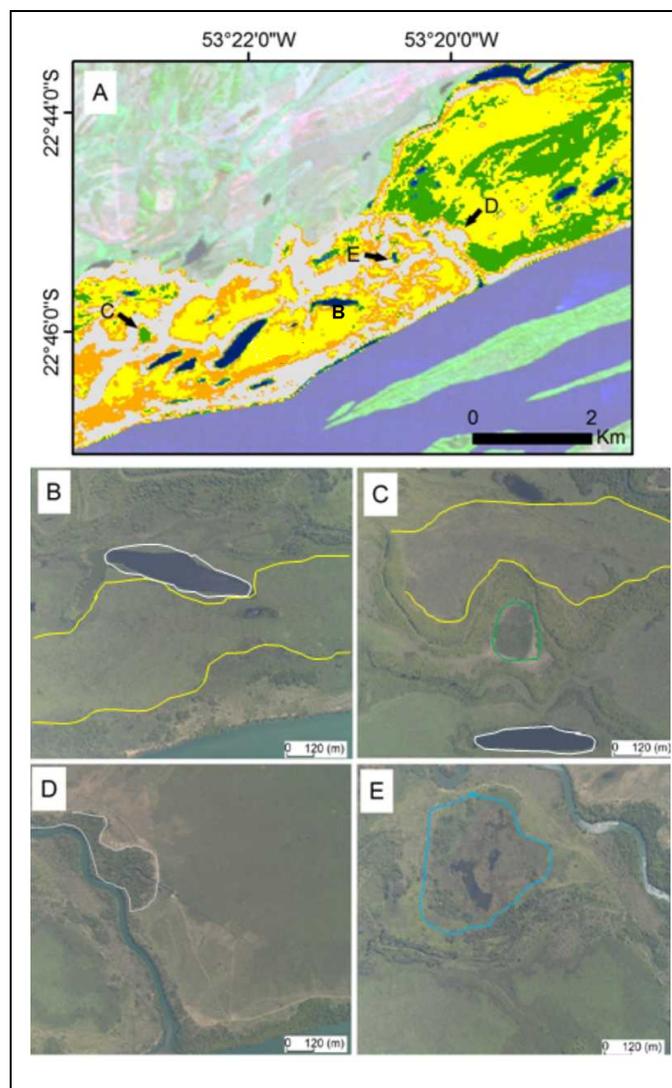


Figura 20: Validação do mapa de hidroperíodo de pós barragem. (A) Localização dos pontos ilustrados pelas fotografias aéreas. (B à E) Áreas alagadas (delimitadas por linha branca), áreas com alta frequência de inundação (delimitada por linha azul clara), com média frequência (delimitada por linha verde) e baixa frequência (delimitada por linha amarela). Recortes de fotografias aéreas coloridas obtidas em junho de 2009.

7.3 Cobertura vegetal

Na determinação da cobertura vegetal na planície fluvial, a AD que proporcionou melhor classificação dos objetos na cena de 22/06/06, distinguiu com poucas folhas as classes definidas anteriormente. Na data de 04/05/1994 a AD foi semelhante à Figura 21.

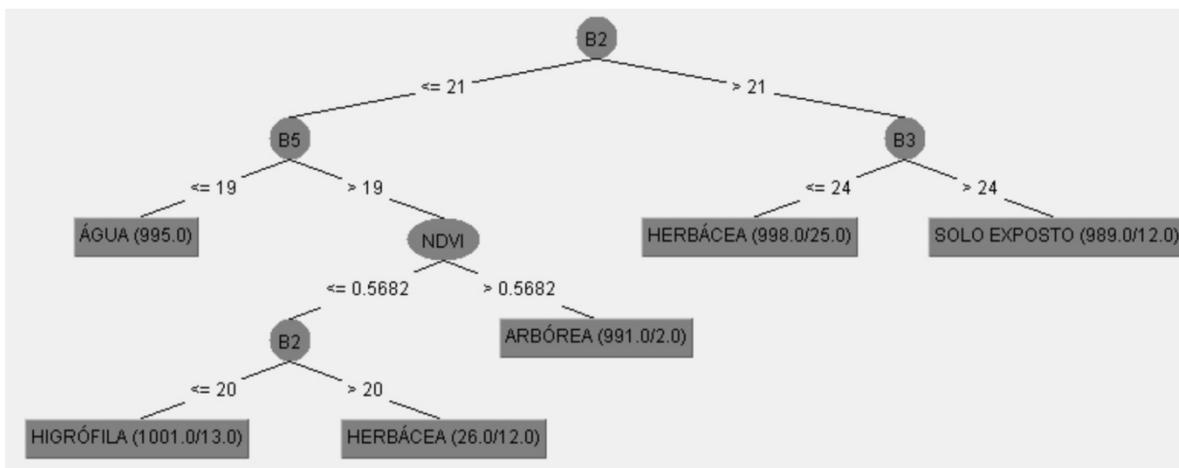


Figura 21: Árvore de decisão utilizada na classificação das imagens.

Foram utilizadas as bandas (B1 a B5 e B7) do satélite Landsat/TM 5, somado a imagem de NDVI e Imagens Fração Vegetação, Solo Exposto e Água. A folha fundamental foi a banda 2 separando a vegetação arbórea e higrófila da vegetação herbácea. A banda 3 fatiou os pixels representantes da classe de vegetação herbácea e solo exposto e a banda 5 os corpos d'água. A folha do NDVI separou a vegetação arbórea e uma nova folha com a banda 2 definiu as classes de vegetação higrófila e herbácea.

A separação das classes de cobertura vegetal e água permitiu corroborar com alguns trabalhos que utilizaram determinadas bandas ou derivados para classificação dos alvos. Com a finalidade de separar área inundável e não inundável autores como CREMON, (2012), FRAGAL et al., (2012), ZANI e ROSSETI, (no prelo), utilizam o fatiamento da banda 5 e obtiveram bons resultados.

A folha do NDVI permitiu separar a vegetação arbórea das outras classes, porque esta classe maior possui maior quantidade de biomassa e/ou Índice de Área Foliar (IAF), com valores acima de 0,5, na escala de -1 a 1. Contudo a classificação da cobertura vegetal executada por FRAGAL e SOUZA FILHO, (2011) utilizando imagens NDVI na região próximo a Porto Rico (PR), os autores não obtiveram bons resultados no fatiamento da imagem, porque a umidade da superfície da planície interfere na resposta espectral da vegetação higrófila, levando-a a ser confundida com a vegetação arbórea. Contudo, em condições de baixa umidade dos sedimentos, a imagem NDVI demonstra ser eficiente para a separação da classe arbórea. Com isso, as

imagens utilizadas nas datas de 04/05/1994 e 22/06/2006, apresentaram menor exposição da umidade presente na vegetação higrófila, permitindo separar a classe arbórea com pouca confusão.

Em abordagens multitemporais é necessário realizar a normalização radiométrica (Fator de Reflectância Aparente) entre as imagens para executar comparações entre as mesmas (PONZONI e SHIMABUKURO, 2007). Contudo, não foi realizada essa transformação, pois foram gerados produtos temáticos separadamente para cada imagem. Se a intenção fosse trabalhar com os valores físicos, as imagens deveriam ser submetidas a correção atmosférica. Esse procedimento minimiza a interferência atmosférica presente na imagem e permite caracterizar espectralmente o alvo pelos valores de Fator de Reflectância de Superfície.

A cobertura vegetal no período anterior e posterior a barragem encontra-se na Figura 22. Observa-se que a vegetação arbórea predomina nas áreas próximas das margens do rio Paraná sobre os diques marginais e paleodiques. A vegetação herbácea e higrófila localizam-se com predominância na porção nordeste e sudoeste dos mapas, respectivamente. Ambos os tipos de vegetação intercalam-se de acordo com o mosaico de formas do relevo da planície fluvial. No período pré e pós barramento a área de vegetação arbórea variou de 30 km² para 28 km², porém com escala de trabalho desse estudo (1:100.000), essa mudança não deve ser inferida diretamente ao desflorestamento, pois essa variação pode estar associada a condição fisiológica do dossel arbóreo, promovendo mistura na classificação nas bordas de transição entre a vegetação arbórea com a vegetação higrófila.

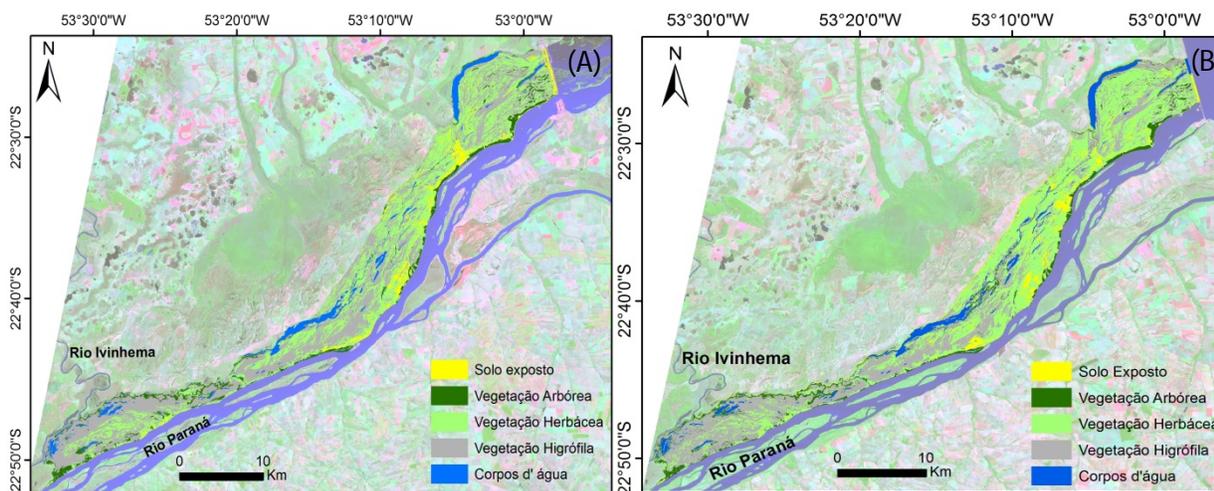


Figura 22: Mapa de cobertura vegetal. (A) Pré barragem, composição colorida R7 G4 B2, imagem de 15/04/1993. (B) Pós barragem, composição colorida R7 G4 B2, imagem de 22/06/2006.

A vegetação herbácea apresentou área de 147,14 km² em 1993 e 182,67 km², em 2006. A área de vegetação higrófila variou de 176,80 km² para 145,30 km² nas duas datas mencionadas. Essa diferença de área indica a diminuição da vegetação higrófila e o aumento da vegetação herbácea, que corrobora a tendência da planície tornar-se mais seca, graças aos efeito da barragem de Porto Primavera.

A área de solo exposto (~ 20 km²) foi maior no período posterior a barragem, mas a dimensão vincula-se diretamente as ações antrópicas, exploradas pelas queimadas para renovação de pastagens, pisoteio do gado e construção de canais de drenagem artificial para a agricultura, ou ainda pode incluir a morte da vegetação herbácea e arbustiva na cheia anterior.

A avaliação estatística dos mapas de cobertura vegetal determinou Exatidão Global de 94,50% e 95,50%, e Índice Kappa de 0,93 e 0,94 no período pré e pós barragem, respectivamente, com valores ($p < 0.05$) considerados estatisticamente significativos. Ou seja, a classificação pode ser considerada como excelente.

As áreas ocupadas por cada classe de vegetação em cada data encontram-se na Tabela 5. Os valores ausentes de informação são oriundos de problemas com as imagens em que a classificação das classes de vegetação não foi adequada, seja por problemas radiométricos, seja por presença de nuvens.

A análise de regressão entre os valores de nível (PSJ, IVI e PSJ+IVI) e o conjunto total das amostras demonstrou que o nível fluviométrico de ambos os rios ou mesmo a soma deles não controla nem influencia as áreas de vegetação arbórea ou de solo exposto, pois os coeficientes de determinação foram inferiores a 0,0440. No caso da vegetação arbórea, a copa das árvores permanece acima da linha de água, mesmo em grandes inundações e no caso do solo exposto, a ação antrópica pode interferir nos resultados. O mesmo pode ser afirmado com relação à área da vegetação higrófila, embora o valor de r^2 tenha sido um pouco maior (0,3303), indicando uma pequena influência da variação dos níveis sobre a variável.

Tabela 5: Valores de área das classes de vegetação, obtidas a partir da classificação das imagens.

Data	Arbórea (km ²)	Herbácea (km ²)	Higrófila (km ²)	Solo Exposto (km ²)
16/10/1996	-	-	-	-
25/07/1989	-	-	-	-
04/05/1994	28,14	147,14	182,67	16,63
14/03/1987	28,56	86,87	180,39	78,52
25/03/1991	-	-	-	-
15/04/1993	27,26	66,36	259,66	16,64
08/03/1985	-	-	-	-
24/03/1985	29,04	38,37	98,33	65,29
20/02/1985	28,46	59,37	93,22	2,00
26/02/1993	27,31	40,54	124,73	7,37
10/07/2001	28,30	119,11	191,01	34,64
22/08/2005	30,74	151,68	169,5	20,88
22/08/2005	29,31	173,10	152,30	18,1
22/06/2006	30,00	176,80	145,30	20,65
11/04/2009	30,96	90,93	182,79	67,76
22/02/2009	30,27	107,23	188,20	39,09
27/02/1999	-	-	-	-
24/04/2008	28,82	32,49	191,85	59,34
11/02/2005	28,63	54,3	141,21	20,9
05/03/2007	30,49	24,63	126,29	22,1
24/01/2010	-	-	-	-
01/02/2007	29,81	25,96	100,39	30,85
16/03/2011	-	-	-	-

Por outro lado, a análise demonstrou que as áreas de vegetação herbácea são influenciadas pelos níveis fluviométricos. A variação de área da vegetação herbácea é inversamente proporcional à elevação dos níveis fluviométricos e a soma dos níveis fluviométricos exerce maior influência, visto que o valor de r^2 foi mais elevado (0,7924), embora a influência do rio Paraná também seja importante (r^2 de 0,7257).

A análise dos dados do período anterior à barragem também demonstram que os níveis não influenciavam as áreas de vegetação arbórea e as áreas de solo exposto, mas mostram que o rio Paraná exercia influência sobre as áreas de vegetação higrófila (r^2 de 0,4707), especialmente em níveis superiores a 4 m (r^2 de 0,6598). Embora o coeficiente de determinação seja baixo, o aumento do nível proporcionava diminuição das áreas, na maior parte dos casos.

No caso da vegetação herbácea, os resultados da análise indicam que a soma dos níveis das estações controlava a área deste tipo de vegetação (Figura 23), contudo, quando considerados apenas os níveis superiores a 4 m, o coeficiente de determinação foi reduzido a 0,6947. A equação da figura 23 pode ser utilizada para a realização de estimativa da área de vegetação herbácea de acordo com a variação da soma dos níveis das duas estações.

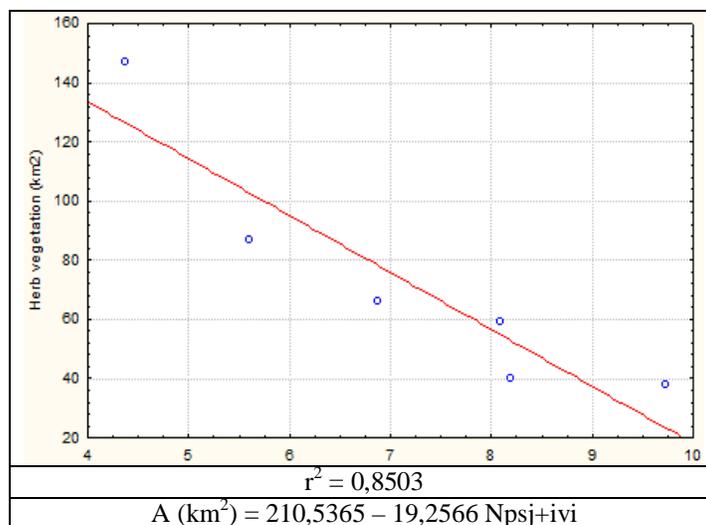


Figura 23: Gráfico resultante da análise de regressão linear entre a soma dos níveis das estações (em x) e a área de vegetação herbácea no período anterior à barragem de Porto Primavera.

As análises para o período posterior à barragem reafirmaram a ausência do controle dos níveis fluviométricos sobre as áreas de vegetação arbórea e de solo exposto e demonstraram que em níveis superiores a 4 m o rio Paraná controla a área de vegetação higrófila (Figura 24), embora tenha pouca influência quando considerados todos os níveis (r^2 de 0,3940). Os níveis do rio Ivinheima e a soma dos níveis das estações não influenciam a variável. A equação da Figura 24 pode ser utilizada para calcular a área de vegetação higrófila em níveis superiores a 4 m na estação de Porto São José.

A análise dos dados de vegetação herbácea demonstrou que esta variável é influenciada principalmente pela soma dos níveis das estações (r^2 de 0,7677), mas que em níveis superiores a 4 metros a sua influência diminui (r^2 de 0,6293).

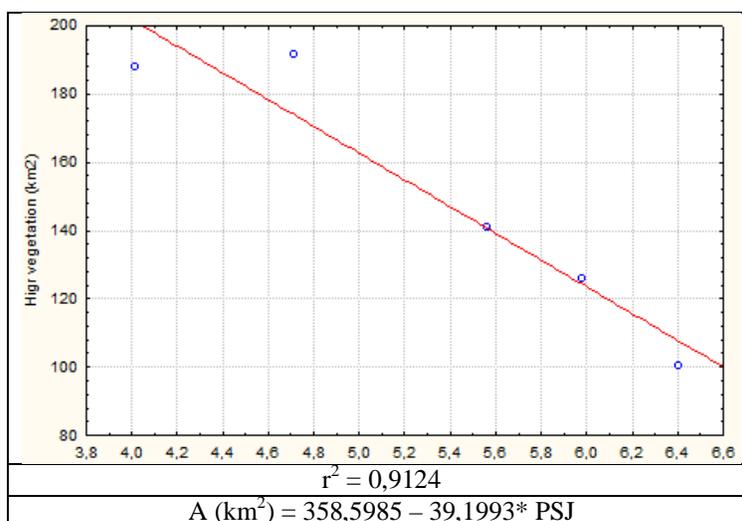


Figura 24: Gráfico resultante da análise de regressão linear entre os níveis do rio Paraná superiores a 4 m e a área de vegetação higrófila no período posterior á barragem de Porto Primavera.

7.4 Relação das áreas inundáveis com a vegetação e formas geomorfológicas

Já foi relatado que as partes altas e baixas da planície exercem controle sobre a área de água e esta exerce controle sobre a vegetação. Além disso, o micro-relevo herdado do antigo sistema anastomosado também exerce controle sobre a distribuição de água, principalmente nas áreas baixas. Para demonstrar tais relações foram escolhidas 4 áreas (Figura 25) para a demonstração de tais relações. As áreas dos recortes EFG e HIJ representam a situação das áreas altas da planície, enquanto os recortes KLM e NOP representam as áreas baixas.

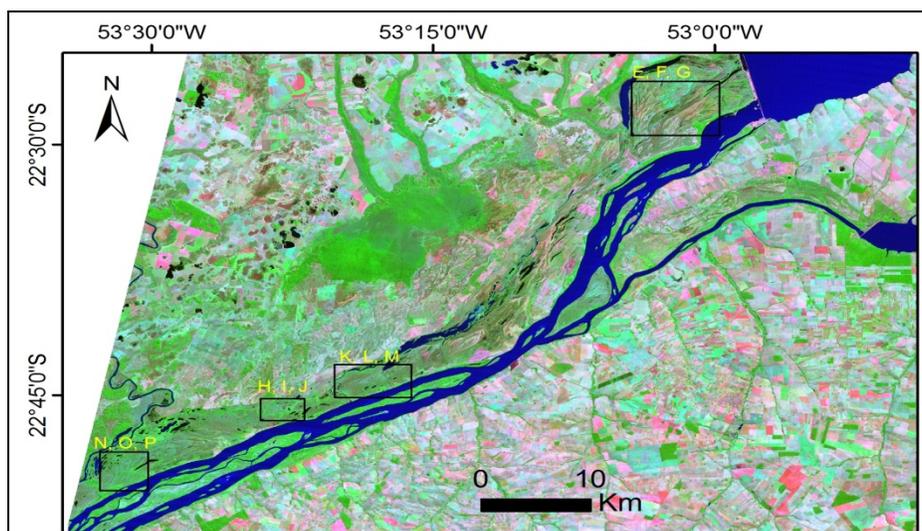


Figura 25: Imagem TM de 22/06/06, com a localização das áreas selecionadas. Composição colorida R3 G2 B1.

A Figura 26, com os recortes EFG e HIJ, mostra que na área mais alta da planície (recorte EFJ) os diques marginais e as áreas de paleobarras praticamente não são inundáveis e nas paleobarras há domínio de vegetação herbácea enquanto no dique marginal há domínio de vegetação arbórea. A frequência de inundação é um pouco maior nos paleocanais, que confinam a vegetação higrófila e apresentam poucos corpos de água. No recorte HIJ, os diques marginais definem claramente as áreas secas, mas mesmo as bacias de inundação são pouco inundáveis.

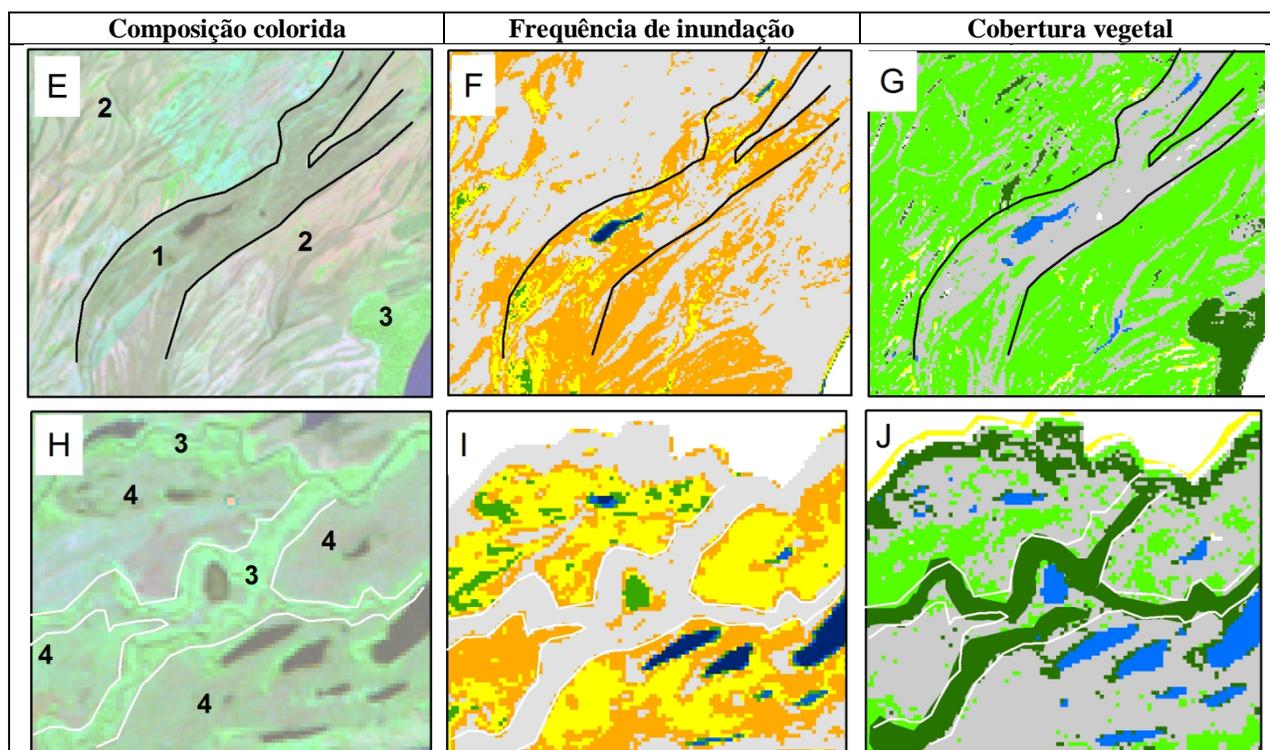


Figura 26: Composição colorida R7/B4/G2 da imagem TM de 22/06/2006, mapa de frequência de inundação e mapa de cobertura vegetal dos recortes EFG e HIJ. Em destaque, a expressão de um paleocanal (1), paleobarras (2), diques marginais (3) e bacia de inundação (4).

A Figura 27, com os recortes KLM e NOP, demonstra que os diques marginais não são inundáveis e são ocupados pela vegetação arbórea, mesmo nos locais em que estão rompidos. As bacias de inundação são mais inundáveis, em especial na parte mais baixa (recorte NOP) e são ocupadas por vegetação herbácea. Os leques de rompimento de dique apresentam áreas com diferentes frequências de inundação e alternância de vegetação herbácea e higrófila. Os corpos de água são mais frequentes que nas áreas mais altas.

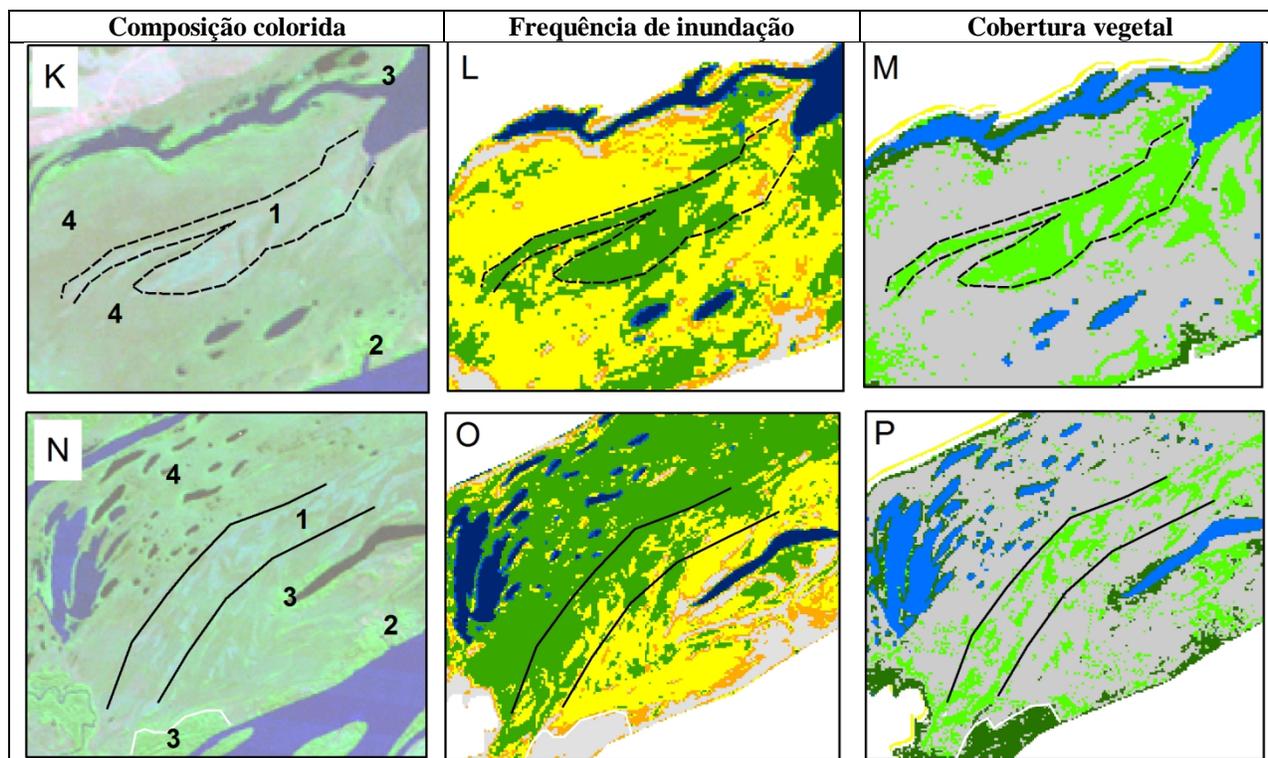


Figura 27: Composição colorida R7/B4/G2 da imagem TM de 22/06/2006, mapa de frequência de inundação e mapa de cobertura vegetal dos recortes KLM e NOP. Em destaque, leque de rompimento de dique marginal (1), local de rompimento de dique (2), diques marginais (3) e bacia de inundação (4).

A distribuição da vegetação é a do dia 22/06/2006 e representa a situação em que o nível do rio Paraná era de 3,00 m e o do rio Ivinheima era de 1,29 m. Em níveis mais altos, a água ocupa progressivamente as áreas mais inundáveis afogando inicialmente a vegetação higrófila e posteriormente a vegetação herbácea. Por esta razão a área destas duas classes diminui conforme o aumento do nível.

8 CONCLUSÃO

A utilização dos produtos de sensoriamento remoto permitiu a realização dos mapas temáticos, tornando-se peça fundamental para a realização das análises sobre a influência da dinâmica de inundação na planície fluvial do Alto rio Paraná.

As informações apresentadas anteriormente subsidiam a afirmação que com a instalação do barramento de Porto Primavera foi modificada as relações entre rio e planície fluvial, permitindo esse trabalho analisar as relações das áreas inundadas com a vegetação e formas geomorfológicas.

Em comparação da área inundada com o nível fluviométrico do rio Paraná das 23 imagens utilizadas deteve um coeficiente de determinação de (r^2) 0,77. Já dividindo os dados em grupos de pré e pós barragem e esses subdivido em cotas inferiores ou superiores que 4 m, determinou controle do rio Ivinhema em níveis menores que 4 m anteriormente a barragem (r^2 de 0,89), e em nível superior à 4 m retorna rio Paraná como principal controlador, em que por meio das interseções das retas da cota inferior e superior a 4 m definiu-se que no nível de 2,97 m o rio Paraná assume o controle da área de água e em 4,73 toma-se como início da inundação na planície.

No período depois da barragem os valores inferiores voltam a ser controlados pelo Rio Paraná r^2 de 0,83 e superiores no controle do início da inundação r^2 de 0,99. A quantidade de área de água na planície aumentou nos níveis inferiores a 4 m, com um agudo aumento da área de água entre as cotas 4 a 5,5 m seguido por rebaixamento em relação ao período anterior a barragem, sendo um forte indicador de mudanças morfológicas na planície.

A frequência de inundação nas épocas de pré e pós barragem foi alterada ao longo da área estudada com diminuição na porção central (~ 8 km²) e extremo sudoeste (~ 4 km²) e aumento na região de montante das áreas não inundadas. A distribuição da cobertura vegetal foi representada na condição de vazante do rio Paraná. Mostrou diminuição da vegetação higrófila em detrimento do aumento da vegetação herbácea, contudo com a escala de trabalho (1:100,000) e a ausência de dados do lençol freático não permitem alegar concretamente a ocorrência da modificação da estrutura florística.

Em relação dos níveis fluviométricos com a vegetação, no período de anterior a barragem foi possível calcular a área de vegetação herbácea pela soma de PSJ e IVI acima da cota 4 m pela equação $[A \text{ (km}^2\text{)} = 210,5365 - 19,2566 N_{psj+ivi}]$ e vegetação higrófila pela $[A \text{ (km}^2\text{)} = 358,5985 - 39,1993 * PSJ]$ posterior a barragem.

A planície fluvial ao longo do seu trecho detém elevada correlação das áreas inundáveis com a formas geomorfológicas e cobertura vegetal, caracterizando que a mudança de uma variável acarretara mudanças nas outras, sendo a ação antrópica um agente que promove aceleração o retardamento desses processos naturais.

Com o exposto cabe-se tecer algumas recomendações de futuros trabalhos sobre a área estudada.

- Utilizar outros produtos de sensoriamento remoto como imagens de radar, para primeiramente introduzir uma nova abordagem metodológica de estudo na área, somado a permitir visualizar aspectos, na qual tanto campanhas de campo como as imagens de satélites ópticas não foi possível visualizar.
- A inserção de piezômetros distribuídos na planície para efetivamente medir o grau de influência do lençol freático nos sedimentos e na cobertura vegetal.
- Executar pesquisas em âmbito ecológico nas áreas evidenciadas com mudança de hidroperíodo, para descrever e medir as mudanças nos atributos dependentes da interação rio-planície.

9 REFERÊNCIAS

ANDRADE, I. R. A.; **O uso de técnicas de sensoriamento remoto na identificação de formas na região de Porto Rico, planície de inundação do Alto rio Paraná MS/PR.** Maringá, 2008. Dissertação (Mestrado em Geografia). Pós-Graduação em Geografia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2008.

ANTUNES, J. F. G.; ESQUERDO, J. C. D. M. **Geração automática de produtos derivados de imagens AVHRR-NOAA para monitoramento de áreas inundáveis do Pantanal.** In: 1º Simpósio de Geotecnologias do Pantanal. Anais do 1º SGP. Campo Grande. v. único, p. 28-37, 2006.

BATES, P. D.; WILSON, M. D.; HORRITT, M. S.; Mason, D. C.; Holden, N.; Currie, A. **Reach scale floodplain inundation dynamics observed using airborne synthetic aperture radar imagery: Data analysis and modeling.** Journal of Hydrology. v. 328, p. 306-318, 2006.

CARDOZO, F. S.; PEREIRA, G.; SILVA, G. B. S.; SILVA, F. B.; SHIMABUKURO, Y. E.; MORAES, E. C. **Discriminação de áreas alagadas no Pantanal sul-matogrossense a partir de imagens orbitais.** 2º Simpósio de Geotecnologias do Pantanal. Anais do 1º SGP. Corumbá. v. único, p. 99-106, 2009.

CLARKE, R. T.; BITTENCOURT, H. R. **Uso de árvores de decisão na classificação de imagens digitais.** In: IN: XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), Anais. Belo Horizonte, 2003 p. 2043-2045.

COMUNELLO, E. **Dinâmica de inundação de áreas sazonalmente alagáveis na planície aluvial do alto rio Paraná.** Maringá, 2001 52 p.. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Ambientes Aquáticos Continentais) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2001.

COMUNELLO, E.; SOUZA FILHO, E. E.; ROCHA, P. C.; NANNI, M. R. **Dinâmica de inundação de áreas sazonalmente alagáveis na planície aluvial do Alto Rio Paraná: estudo**

preliminar. In: XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), Anais. Belo Horizonte, 2003 p 2459-2466.

CONGALTON, R. G. **Al review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data.** Remote Sensing of Environment. v.49 n.12, p.1671- 1678, 1991.

CORRADINI, F. A.; STEVAUX, J. C.; FACHINI, M. P. **Controle geomorfológico da distribuição da vegetação ripária do rio paraná: parte i – unidades geomórficas da planície de inundação– PR/MS.** Revista UnG Geociências, Rio Claro, v. 5, n. 1, p. 13-21, 2006.

COUTO, E.V.; HAYAKAWA, E. H.; SOUZA FILHO, E. E. **Diagnóstico dos efeitos causados pelas cheias excepcionais de 1982/1983 sobre a planície inundacional do Alto rio Paraná (PR-MS).** Revista de Geografia, Meio Ambiente e Ensino GEOMAE, v. 1, p. 83-99, 2010.

CREMON, É. H. **Caracterização morfológica do sistema fluvial do rio Demini (Amazônia setentrional) com base em sensoriamento remoto.** São José dos Campos, 2012. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Divisão de Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2012.

CREMON, É. H.; MONTANHER, O. C.; ARENAS-IBARRA, J. A. **A influência das crevasses na dinâmica de inundação da planície do Alto rio Paraná.** In: VIII Simpósio Nacional de Geomorfologia, 2010, Recife. Anais do VIII Simpósio Nacional de Geomorfologia, 2010.

CRISPIM, J. Q. **Alterações na hidrologia do canal após a construção do reservatório a montante: O caso da Usina Hidrelétrica Engenheiro Sérgio Motta (Represa de Porto Primavera) rio Paraná.** Maringá, 2001. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Ambientes Aquáticos Continentais), Universidade de Maringá, Maringá, 2001.

FERREIRA, M. E. **Análise do Modelo Linear de Mistura Espectral na Discriminação de Fitofisionomias do Parque Nacional de Brasília (Bioma Cerrado).** Brasília, 2003. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2003.

FRAGAL, E. H.; CREMON, É. H. **Catálogo de imagens orbitais a partir da cobertura de nuvem e nível fluviométrico do Alto rio Paraná.** Boletim de Geografia, 2012.

FRAGAL, E. H.; SOUZA FILHO, E. E. **Cartografia da cobertura vegetal da planície do rio Paraná por meio do uso do Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME).** Relatório Final de iniciação científica, Universidade Estadual de Maringá. PIBIC/UEM, 2012.

FRAGAL, E. H.; SOUZA FILHO, E. E. **Verificação da aplicabilidade dos índices de vegetação para o estudo da identificação vegetal na planície fluvial do rio Paraná.** Relatório Final de iniciação científica, Universidade Estadual de Maringá. PIBITI/UEM, 2011.

FRAGAL, E. H.; SOUZA FILHO, E. E.; ALVES, F. C. Submetido para publicação. **A dinâmica da vegetação da planície fluvial do alto rio Paraná no ano de 2007.** Revista Brasileira de Geomorfologia.

FRAZIER, P. S.; PAGE, K. J. **Water body detection and delineation with Landsat TM data.** Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 66, pp. 1461–1467, 2000.

FREITAS, R. M.; NOVO, E. M. L. **Mapeamento de Áreas Alagáveis na Planície do Rio Amazonas a partir de Dados do Sensor MODIS – Região do Lago Curuaí – PA.** In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia Anais do XII SBSR, 2005 p. 533-540.

FRIEDL, M. A.; BRODLEY, C. E. **Decision Tree classification of land cover from remotely sensed data.** Remote Sensing of Environment. v. 61, p. 399-409, 1997.

HALL, M.; FRANK, E.; HOLMES, G.; PFAHRINGER, B.; REUTEMANN, P.; WITTEN, I. H. **The WEKA Data Mining Software: An Update.** In: SIGKDD Explorations, Volume 11, Issue 1, 2009.

HAYAKAWA, E. H. **Análise da variabilidade espacial e temporal dos sedimentos suspensos do Alto rio Paraná via imagens orbitais: região de porto São José.** Maringá, 2007. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2007.

HESS, L. L.; MELACK, J. M.; NOVO, E. M. L. M.; BARBOSA, C. C. F.; GASTIL, M. **Dual-season mapping of wetland inundation and vegetation for the central Amazon basin.** Remote Sensing of Environment. v. 87, p. 404-428, 2003.

IBGE. **Geografia do Brasil: Região Sul.** 2ª edição. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, p.189-216, 1990.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres.** Tradução: Epiphany, José Carlos Neves, Formaggio, Antonio R. Santos, Athos R. Rudorff, Bernardo F. T. Almeida, Cláudia M. Galvão, Lênio S. São José dos Campos: Parêntese, 2009.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. **The measurement of observer agreement focategorical data.** Biometrics, 33, pp.159-174, 1977.

MATGEN, P.; SCHUMANN, G.; HENRY, J. B.; HOFFMANN, L.; PFISTER, L. **Integration of SAR-derived river inundation areas, high-precision topographic data and a river flow model toward near real-time flood management.** International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. v.9, p. 247-263, 2007.

MEDEIROS, I. P.; CASTRO FILHO, C. A. P.; ERTHAL, G. J.; DUTRA, L. V. **Classificação de imagens pelo método de Árvore de Decisão Oblíqua.** In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Curitiba. Anais do XV SBSR, 2011 p. 4255-4262.

MEURER, M. **Regime de Cheias e Cartografia de Áreas Inundáveis no Alto Rio Paraná, na Região De porto Rico – PR.** Maringá, 2004. 59 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2004.

MONTANHER, O. C.; SOUZA FILHO, E. E. Submetido para publicação. **Retrieval of suspended sediment concentration in the Upper Paraná River (Brazil) using Landsat/TM data.** International Journal of Remote Sensing.

NOVO, E. M. L. M.; SHIMABUKURO, Y. E. **Identification and mapping of the Amazon floodplain habitats using a mixing model.** International Journal of Remote Sensing, 18(3), p. 663-670, 1997.

OTUKEI, J. R.; BLASCHKE, T. **Land cover change assessment using decision trees, support vector machines and maximum likelihood classification algorithms.** International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. v. 12, p. 27-31, 2010.

PEIXOTO, J. M. A. **Monitoramento da dinâmica da geomorfologia fluvial da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamiraurá, por meio de técnicas de sensoriamento remoto.** 2007. Dissertação (Mestrado em Ciências em Florestas Tropicais) - INPA (Instituto Nacional de Pesquisa na Amazônia), Universidade Estadual do Amazonas, Manaus, 2007.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação.** São José dos Campos: Ed. A. Silva Vieira. 2007.

RENÓ, V. F.; NOVO, E. M. L. M.; ALMEIDA FILHO, R.; SUEMITSU, C. **Mapeamento da Antiga Cobertura Vegetal de Várzea do Baixo Amazonas a Partir de Imagens Históricas (1975-1981) do Sensor MSS-Landsat.** Acta Amazonica. v.41, p. 47-56, 2011,b.

RENÓ, V. F.; NOVO, E. M. L. M.; SUEMITSU, C.; RENNÓ, C. D.; SILVA, T. S. F. **Assessment of deforestation in the Lower Amazon floodplain using historical Landsat MSS/TM imagery.** Remote Sensing of Environment. v. 115, p. 3446-3456, 2011,a.

ROCHA, J. A. **As características geomorfológicas do canal do rio Paraná no segmento imediatamente a jusante da Usina Hidrelétrica de Porto Primavera.** 2001. Dissertação (Doutorado em Ecologia de Ambientes Aquáticos Continentais) – Núcleo de Pesquisas em Limnologia, Ictiologia e Aquicultura, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2001.

ROCHA, P. C. **Dinâmica dos Canais no Sistema Rio-Planície Fluvial do Alto Rio Paraná, nas proximidades de Porto Rico – PR.** 2002. Tese (Doutorado em Ecologia de Ambientes Aquáticos Continentais) – Núcleo de Pesquisas em Limnologia, Ictiologia e Aquicultura, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2002.

ROCHA, P. C.; SOUZA FILHO, E. E. **Erosão marginal e evolução hidrodinâmica no sistema rio-planície fluvial do Alto Paraná-Centro Sul do Brasil.** In: Nunes, J. O. R. e ROCHA, P. C. Geomorfologia: aplicações e metodologias. Ed, São Paulo: Expressão Popular, 2008, p. 133-154.

ROUSE, J. W; HAAS, R. H; SCHELL, J. A; DEERING, D. W. **Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS.** In: **Earth Resources Technology Satellite – 1 Symposium**, 3, 1973. Proceedings. Washington, v. 1, p. 309 – 317, 1973.

SAMIZAVA, T. M. **SIG e sensoriamento remoto aplicado ao estudo dos processos de inundação e mapeamento da cobertura vegetal na planície fluvial do alto Rio Paraná.** Dissertação (Ciências Cartográficas) - Universidade Estadual Paulista - Presidente Prudente. 2009

SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J. A. **The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data.** IEEE Transaction on Geoscience and remote Sensing, v. 29, p. 16-20, 1991.

SILVA, S.A. **Características do regime hidrológico do alto rio Paraná: modificações e aspectos ambientais.** Maringá, 2007. Tese (Doutorado em Ecologia de Ambientes Aquáticos Continentais) – Núcleo de Pesquisas em Limnologia, Ictiologia e Aquicultura, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2007.

SMITH, L. **Satellite remote sensing of river inundation area, stage, and discharge: a review.** Hydrological Processes, v. 11, p. 1427-1439, 1997.

SOUZA FILHO, E. E. . **As transformações da calha fluvial do Alto rio Paraná induzidas por barragens.** In: Messias Modesto dos Passos. (Org.). **A raia divisória São Paulo - Paraná - Matogrosso do Sul (cenários e cenários).** 1 ed. São Paulo: Expressão Popular, v. 1, p. 167-195. 2011.

SOUZA FILHO, E. E. **Aspectos da geologia e estratigrafia dos depósitos sedimentares do rio Paraná entre Porto Primavera (MS) e Guaíra (PR).** 1993. Tese (Doutorado em Geociência), Instituto de Geociência. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

SOUZA FILHO, E. E. Evaluation of the Upper Paraná River discharge controlled by reservoirs. **Brazilian Journal of Biology**, v. 69, p. 707-716, 2009.

SOUZA FILHO, E. E. **Feições do sistema anastomosado pré atual do rio Paraná.** In: XXXVIII Congresso Brasileiro de Geologia. Camburiú. Anais, v.2 407-409. 1994.

SOUZA FILHO, E. E.; ROCHA, P. C.; COMUNELLO, E.; STEVAUX, J. C. **Effects of the Porto Primavera dam on physical environment of the downstream floodplain.** Edited by THOMAZ, S.M.; AGOSTINHO, A. A.; HAHN, S. S. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands, 2004.

SOUZA FILHO, E. E.; STEVAUX, J. C. **Geologia e geomorfologia do complexo rio Baía, Curutuba, Ivinheima.** In: A Planície de Inundação do Alto Rio Paraná. A. E. A. de M. VAZZOLER, A. A. AGOSTINHO, & N. S. HAHN, (Eds.), EDUEM NUPÉLIA, Maringá, 460 p. 1997.

STEVAUX, J. C. **Produção, armazenamento e transferência de sedimentos por processos naturais e humanamente induzidos na bacia do Paraná: proposição de um modelo de fluxo hidro-geomorfológico em escala continental.** Relatório Final do Projeto CNPq (proc. 305549/2007-3). Disponível em < <http://www.gema.uem.br/> >. Acessado em 23 de julho de 2012.

STEVAUX, J. C. **The Upper Parana River (Brasil): geomorphology, sedimentology, and paleoclimatology.** Quaternary International, v.21, p. 143-161, 1994.

STEVAUX, J. C.; SOUZA, I. A. **Floodplain construction in an anastomosed river.** Quaternary International, v.114, p. 55-66, 2004.

SULSOFT. **ENVI: curso avançado (Manual do Curso de Envi 4.6).** Sulsoft, 2009.

WATANABE, F. Y. S.; IMAI, N. N.; SAMIZAVA, T. M.; ROCHA, P. C. **Classificação da Vegetação de Áreas Úmidas Baseada em Redes Neurais Artificiais: Estudo de Caso da Planície Fluvial do Alto Rio Paraná.** In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Natal. Anais do XIV SBSR. São José dos Campos: INPE, v. único. p. 5515-5522, 2009.

ZANI, H.; ROSSETTI, D. F. **Multitemporal Landsat data applied for deciphering a megafan in northern Amazonia.** International Journal of Remote Sensing, no prelo.