



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

## **MODELAGEM NA ESTIMATIVA DE ÁREA E VOLUME DA PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO DE CURUAI**

**Disciplina:**

Introdução ao Geoprocessamento – SER300

**Aluno:**

Vitor Souza Martins

Junho/2015

## MODELAGEM NA ESTIMATIVA DE ÁREA E VOLUME DA PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO DE CURUAI

---

Vitor Souza Martins, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) - Caixa Postal 515 - 12227-010 – São José dos Campos - SP, Brasil.

---

### RESUMO

A compreensão e quantificação da circulação das águas sobre as planícies de inundação dependem de levantamento batimétrico de alta resolução associado ao comportamento hidrológico da região. As planícies inundáveis da região Amazônica apresentam uma complexa topografia e desafios para aquisição de dados. Com base no trabalho desenvolvido por Barbosa (2005), o objetivo do estudo é analisar a correlação do volume de água e área de inundação da planície do Lago Grande de Curuai para diferentes modelos de dados e cotas d'água, além de avaliar o erro de concordância das áreas inundadas da planície obtidas pelo modelo bruto e corrigido por SRTM. Os erros de classificação (área alagada e terra firme) dos modelos batimétricos foram distribuídos espacialmente para perceber as regiões de agrupamento. O modelo batimétrico corrigido com SRTM apresentou melhor concordância na estimativa de área inundada, no entanto os valores de cotas d'água menores não possuem boa concordância em nenhum dos modelos. Os erros de classificação ocorrem, predominantemente, nas bordas e em lagos marginais a Oeste e Norte da planície. O volume de água é subestimado para as cotas d'água menores, devido o modelo batimétrico subestimar a área alagada, no entanto em cotas maiores apresenta uma melhor estimativa. A aplicação de imagens TM no monitoramento da área alagada requer uma disponibilidade de tempo para seleção e processamento digital das imagens, além de ser necessário associar um estudo hidrológico do regime de cotas d'água. Portanto a utilização de um modelo batimétrico, se disponível, é uma boa alternativa se considerado os intervalos de cota d'água com melhores estimativas.

**Palavras-chave:** modelo batimétrico, área e volume de inundação, dinâmica em planícies amazônicas.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Ecossistema nas planícies de inundação amazônica .....	1
1.2. Sensoriamento remoto e circulação de água nas planícies amazônicas .....	2
2. ÁREA DE ESTUDO .....	3
3. BASE DE DADOS E DESENVOLVIMENTO .....	5
3.1. Caracterização do regime de nível d'água .....	5
3.2. Dados de sensoriamento remoto: Sensor TM/Landsat-5 .....	7
3.3. Modelo batimétrico sem correção .....	8
3.4. Modelo batimétrico corrigido com SRTM.....	9
3.5. Medida de concordância na estimativa de área de inundação e distribuição espacial dos erros da classificação .....	10
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	12
4.1. Área de inundação.....	12
4.2. Volume de água da inundação .....	17
5. CONCLUSÕES.....	18
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	20
7. ANEXOS.....	22

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização do Lago Grande de Curuai.....	4
Figura 2. Regime de cotas d'água e precipitação média mensal. ....	6
Figura 3. Curva de permanência do nível médio diário de água na planície.....	7
Figura 4. Banda 5 do TM classificada para a cota 548 cm.....	8
Figura 5. Modelo batimétrico da planície de inundação de Curuai.....	9
Figura 6. Modelo batimétrico corrigido por SRTM para a planície de inundação de Curuai. ....	10
Figura 7. Distribuição espacial do erro em cotas d'água 425, 661 e 925 cm. ....	12

Figura 8. Distribuição do erro de classificação do modelo batimétrico bruto para cota 425 cm. ....	14
Figura 9. Distribuição do erro de classificação do modelo batimétrico bruto para cota 661 cm. ....	14
Figura 10. Distribuição do erro de classificação do modelo batimétrico bruto para cota 425 cm. ....	15
Figura 11. Volume de água em relação a cota d'água. ....	18
Figura 12. Distribuição do erro da classificação na cota 425 cm. ....	22
Figura 13. Distribuição do erro da classificação na cota 425 cm. ....	22
Figura 14. Distribuição do erro da classificação na cota 925 cm. ....	23
Figura 15. Curvas de regressão da área alagada versus cota d'água. ....	23

#### LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Descrição da estação fluviométrica e pluviométrica. ....	5
Tabela 2. Área inundada de três modelos para diferentes cotas d'água. ....	13
Tabela 3. Índice Kappa para modelo batimétrico (bruto e corrigido). ....	16
Tabela 4. Volume de água para modelo batimétrico (bruto e corrigido) em diferentes cotas d'água. ....	17

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Ecossistema nas planícies de inundação amazônica

As zonas úmidas da região amazônica englobam áreas de planícies susceptíveis a inundação com a cheia dos rios. As várzeas amazônicas são ambientes dependentes da ocorrência do chamado “pulso de inundação” (JUNK et al., 1989), onde a variação dos fluxos de água no período de enchente geram um extravasamento da calha do rio em direção as planícies de inundação, transformando habitats terrestres em aquáticos.

O deslocamento da água e inundação de novas áreas gera uma disponibilidade de nutrientes e baixa pressão de predação, o que torna esse habitat favorável para perpetuação de muitas espécies aquáticas.

O fim do período de cheia altera o sentido do fluxo da água para retornar aos rios, o que reduz a disponibilidade de habitats e alimentos alóctones, e aumenta a competição pelos recursos entre espécies o que proporciona uma segregação de nichos entre espécies (CASTELLO, 2008; CORREA & WINEMILLER, 2014). Assim com o período de baixa, o ambiente favorece a fauna terrestre (JUNK et al., 1989).

O confinamento da água em regiões da planície torna o habitat temporariamente isolado, impondo uma resistência da paisagem à dispersão e ao fluxo gênico destes organismos, constituem-se um importante fator na seleção de habitats e no uso dos recursos (JUNK et al., 1989; AYRES & CLUTTON-BROCK, 1992).

A dinâmica da água tratada, em relação à sua composição e volume, são informações fundamentais para definir a tipologia e funcionamento dos ecossistemas aquáticos. As características físico-químicas das águas na bacia amazônica são responsáveis pelo funcionamento dos ecossistemas alagados, tendo suas características variando em função da origem da água, do tipo de solo e das condições climáticas (BARBOSA, 2003).

## **1.2. Sensoriamento remoto e circulação de água nas planícies amazônicas**

As planícies inundáveis da região Amazônica apresentam uma complexa topografia e desafios para aquisição de dados, como a obstrução por banco de macrófitas, dificuldade de acesso aos limites da planície e uma grande extensão de área.

A dinâmica de cota d'água no período de enchente, cheia, vazante e baixa nas planícies amazônicas é constantemente estudada através de séries históricas de dados fluviométricas, o que permite uma ideia da sazonalidade dos períodos ao longo do ano. Segundo Richey et al. (1989), através dos registros de nível de água ao longo dos rios principais, e considerando que o nível de água ao longo da planície era similar aos dos rios, estimaram que a troca de água entre o rio Amazonas e sua planície inundável era da ordem de 25 % de sua descarga anual no oceano (BARBOSA, 2005). No entanto a possibilidade de uma análise espacial do fluxo das massas de água nas planícies aumentou com os dados de sensoriamento remoto.

A delimitação das áreas alagadas acompanhando um regime de cotas d'água é bastante complexa nos trabalhos de campo devido ao tempo, dificuldade de acesso às áreas de borda e a grande extensão das planícies. A disponibilização de dados orbitais amplia a aplicação do sensoriamento remoto em estudos amazônicos, devido à alta frequência do imageamento e a riqueza de informações capazes de serem extraídas. A habilidade que sensores remotos orbitais apresentam no recobrimento sinóptico da superfície da terra, por sua vez, permite a avaliação de extensas áreas, propiciando novos conhecimentos sobre a dinâmica das paisagens de várzea (HESS et al., 1993).

A série histórica de imagens permite analisar a circulação das massas de água nas áreas de inundação e perceber como o ecossistema é afetado por essa sazonalidade hidrológica na paisagem durante o período de enchente, cheia, vazante e baixa. Nas áreas úmidas, o tempo de inundação é uma das variáveis mais importantes que atua sobre a distribuição das espécies, mas sua caracterização espaço-temporal é de difícil realização em campo, devido à necessidade de monitoramento sistemático e abrangente, em locais de difícil acesso (HESS et al., 1993).

Como os fenômenos de inundação são cíclicos e periódicos, assim os dados orbitais de observação da superfície terrestre, como do programa Landsat, são ideais para essa escala de tempo e área de estudo.

Neste sentido, o objetivo é verificar a correlação do volume de água e área de inundação da planície do Lago Grande de Curuai para diferentes níveis de água através dos modelos batimétricos. Será avaliada a concordância das áreas inundadas obtidas por imagem de satélite e por levantamento batimétrico bruto e corrigido por SRTM.

O estudo busca solucionar essas questões:

- Qual é a concordância na estimativa de área de inundação entre os MDEs e a imagem de satélite?
- A correção do modelo batimétrico por SRTM melhora a concordância da estimativa de área de inundação? E o volume?
- Quais são os erros de classificação das áreas alagadas pelos modelos batimétricos e como estão distribuídos espacialmente?

## **2. ÁREA DE ESTUDO**

O estudo é desenvolvido para a planície do Lago Grande de Curuai – LGC (**Figura 1**) localizada a noroeste da cidade de Santarém no Estado do Pará e a 900 km da foz do rio Amazonas (1°30” S; 55°43” W). A planície possui uma área de aproximadamente 3500 Km<sup>2</sup> e uma flutuação de até 7 metros no nível da água. Essa planície faz limite com três (03) municípios: Óbidos, Juruti e Santarém no Estado do Pará.

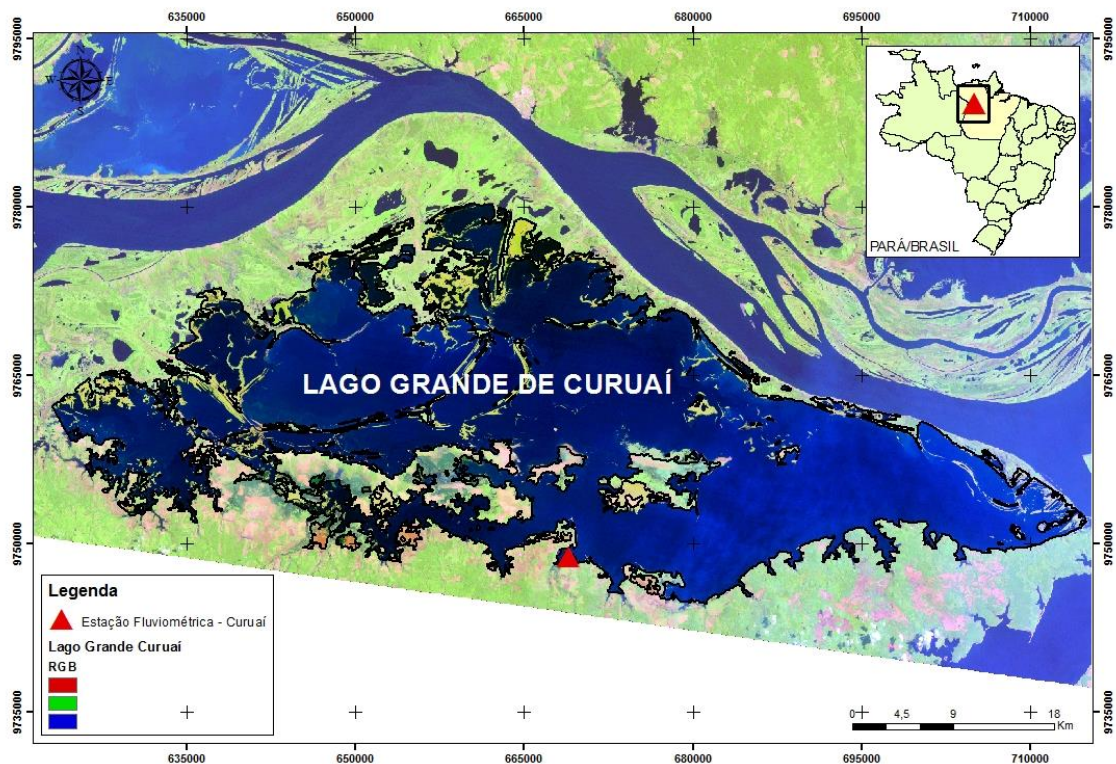


Figura 1. Localização do Lago Grande de Curuai.

A planície é formada por mais de 20 lagos que são interligados por canais de comunicação mantidos no ciclo hidrológico. A planície fluvial inundável é sujeita ao regime natural de águas do rio Amazonas e recebe em diferentes proporções: águas brancas, claras e pretas. As águas pretas originam-se de florestas, as águas claras de pequenos rios da margem sul, e as águas brancas (maior proporção) vem do rio Amazonas (BARBOSA, 2005).

Segundo a Prefeitura Municipal de Santarém, a planície possui uma riqueza em diversidade de espécies de peixes, pássaros e flora, além de regiões de terra firme que constituem campos naturais. O lago Grande do Curuai possui diversas comunidades a margem, e que se dedicam na fabricação de artesanatos em madeira e palha

Devido às dimensões da bacia Amazônica, as águas que circulam pela planície de inundação variam amplamente de composição em função da origem da água, do tipo de solo e das condições climáticas. (BARBOSA, 2005).



### 3. BASE DE DADOS E DESENVOLVIMENTO

#### 3.1. Caracterização do regime de nível d'água

A caracterização do regime de cota d'água na Lagoa Grande de Curuai é obtida por uma série histórica de dados da estação fluviométrica – Curuai (**Tabela 1**), localizada no distrito de Curuai no Estado do Pará. A estação fluviométrica localizada na margem da LGC (faixa central da planície) é monitorada pela CPRM/ANA. A série histórica de cotas d'água da LGC é registrada desde 01 de janeiro de 1983 até 31 de dezembro de 2014, com falhas de dados em 06 e 07/2008, 06/2010, 2011 e 01/2012. Os períodos com falhas de dados não comprometem as análises do regime de cotas, devido à série histórica ter registrado mais de 25 anos de dados brutos e contemplar registros em diferentes períodos do ano.

O comportamento do regime de precipitação influencia nos períodos de cheia e vazante da planície e para caracterizar esse regime obteve-se uma série histórica de dados pluviométricos da estação Parintins (**Tabela 1**). Os dados pluviométricos registram uma série dados desde 01/1970 até 01/2014. Para associar os efeitos do regime de precipitação com as cotas d'água, a estação selecionada está localizada, aproximadamente, a 100 km a montante da LGC no rio Amazonas.

Tabela 1. Descrição da estação fluviométrica e pluviométrica.

Nome	Estação	Código	Coordenadas Geográficas	
			Long (O)	Lat (S)
Curuai	Fluviométrico (CPRM)	17060000	55°28'51''	02°16'21''
Parintins	Pluviométrico (INMET)	256000	56°43'48''	02°37'48''

Com a manipulação dos dados de precipitação calculou-se os valores de precipitação média mensal e será sobreposto com a variação de cota d'água do LGC para compreender a influência do regime de precipitação sobre os estados de enchente, cheia, vazante e baixa.

A hidrógrafa de cota média diária e precipitação média mensal (**Figura 2**) caracteriza o período de enchente, cheia, vazante e baixa no LGC, e assim permitiu seleção das imagens TM/landsat-5 associadas as informações do período e das cotas d'água na planície, sendo esse conjunto de dados importante para compreender a

dinâmica de circulação de água no LGC. O regime de precipitação (média mensal) agrega informação para análise do momento de pulso de inundação, no entanto, devido a grande extensão da área de drenagem da amazônica entre a cabeceira até a planície de Curuai, uma única estação fluviométrica não é capaz de descrever o complexo comportamento hidrológico da região. Existem outras variáveis ambientais, como o relevo predominantemente baixo, o degelo dos Andes, que provocam uma elevação sazonal no nível da água, caracterizado como pulso de inundação, que é responsável pela complexidade dos ecossistemas aquáticos da região (JUNK, et al., 1989).

A sazonalidade de precipitação e cota d'água geram períodos marcantes na dinâmica da água na planície de Curuai. Observa-se o período de enchente iniciando em dezembro até abril, devido aumento da precipitação e em consequência a formação do pulso de inundação das águas do rio Amazonas. Em sequência, o período de cheia da planície com cotas de inundação máximas e relativamente estáveis entre maio e julho, o que transforma a dinâmica do ecossistema de terrestre para aquático. A redução na frequência da precipitação marca o fim do período chuvoso, e assim a redução do fluxo de água entrando na planície entre julho a novembro, o que caracterizará o período de vazante com as menores cotas d'água, principalmente, em outubro e novembro. A estabilidade da planície em níveis mais baixos entre setembro e final de novembro começa a alterar com o início do período chuvoso, sendo o nível d'água na planície aumentar sutilmente e atingindo a máxima no pulso de inundação.

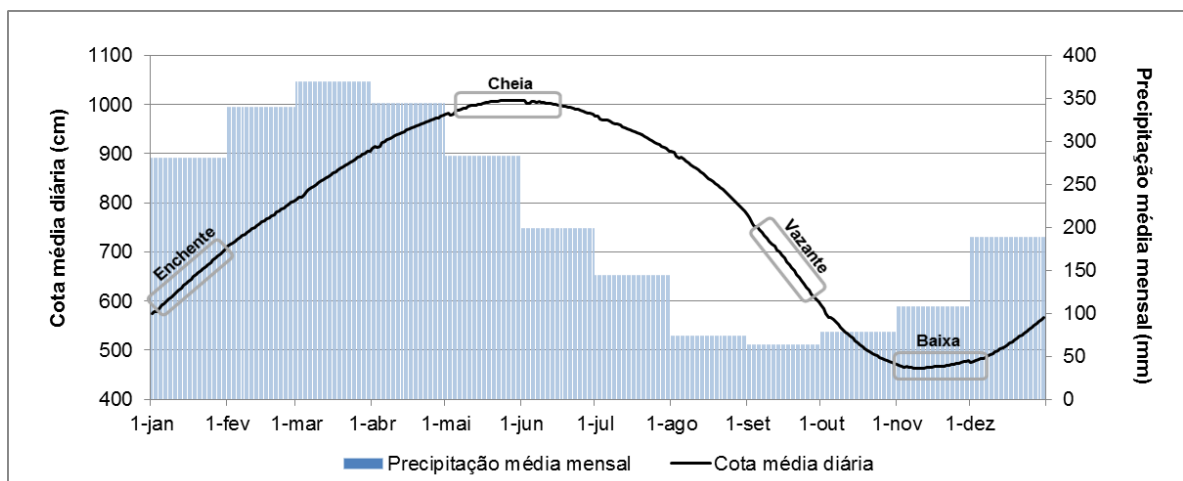


Figura 2. Regime de cotas d'água e precipitação média mensal.

O registro da sazonalidade entre cotas máximas, médias e mínimas diárias e a caracterização dos estados relevantes para o entendimento da dinâmica de água na planície de Curuai, definiu-se 12 cotas distintas que variam entre 415 e 925 cm para selecionar as imagens TM/landsat-5. As cotas d'água selecionadas foram em função da disponibilidade de imagens com baixos níveis de cobertura de nuvem (máxima de 10%) e que permitisse estudar as variações de área e volume.

O intervalo de cota d'água de 415 a 925 cm corresponde a valores com ocorrência em, aproximadamente, 70% do tempo na série histórica na planície (**Figura 3**), ou seja, o estudo da dinâmica de circulação de água na planície através dessas cotas d'água representaram 70% dos casos entre os estados (enchente, cheia, vazante e baixa).

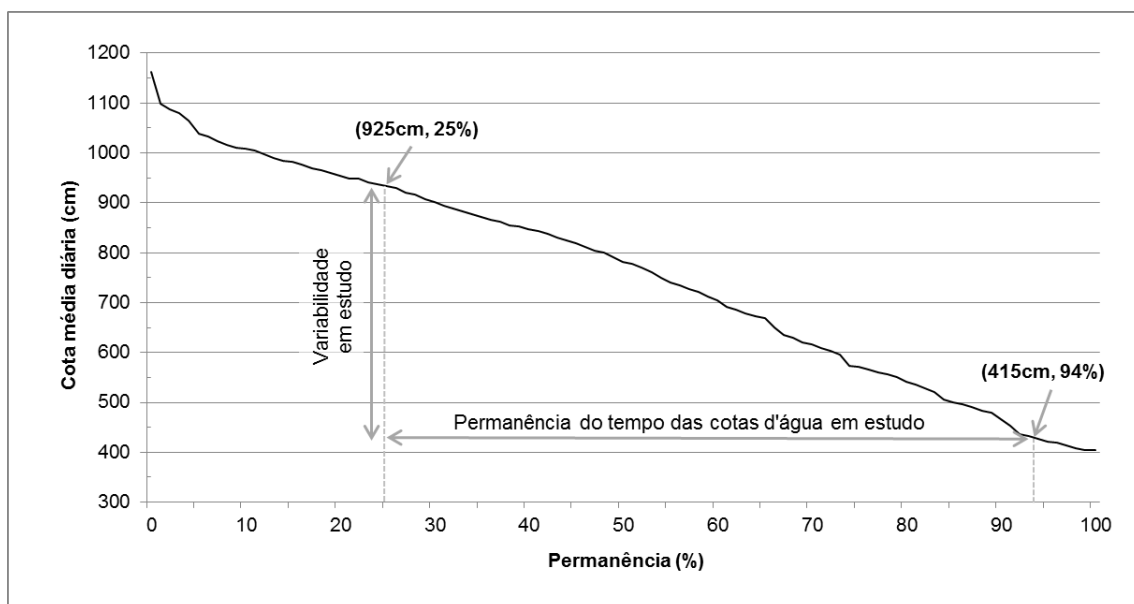


Figura 3. Curva de permanência do nível médio diário de água na planície.

### 3.2. Dados de sensoriamento remoto: Sensor TM/Landsat-5

Os dados de sensoriamento remoto utilizados no estudo foram as imagens do sensor TM/Landsat-5, o qual possui um conjunto de 5 bandas espectrais (B1 – 0,45 a 0,52  $\mu\text{m}$ ; B2 – 0,52 a 0,6  $\mu\text{m}$ ; B3 – 0,63 a 0,69  $\mu\text{m}$ ; B4 – 0,76 a 0,9  $\mu\text{m}$ ; B5 – 1,55 a 1,77  $\mu\text{m}$ ; B6 – 10,4 a 12,5  $\mu\text{m}$ ; B7 – 2,08 a 2,35  $\mu\text{m}$ ) para cada imagem. Devido à disponibilidade de uma série histórica de imagens para diferentes cotas d'água e com baixos percentuais de cobertura por nuvens (10 %), as imagens são bastante úteis na limitação da área inundada em diferentes estados da planície.

A extração da informação de área da planície inundada se baseou na classificação não supervisionada da banda 5 (**Figura 4**) com faixa espectral entre 1,55 a 1,77  $\mu\text{m}$ . Uma característica da interação da água na faixa espectral referente à banda 5 é a alta absorvância desses comprimentos de onda da radiação eletromagnética, o que resulta em baixos níveis de cinza na imagem para a água e provoca bastante contraste entre as regiões alagadas e terra firme. A classificação gerou duas classes: área de terra firme e alagada.

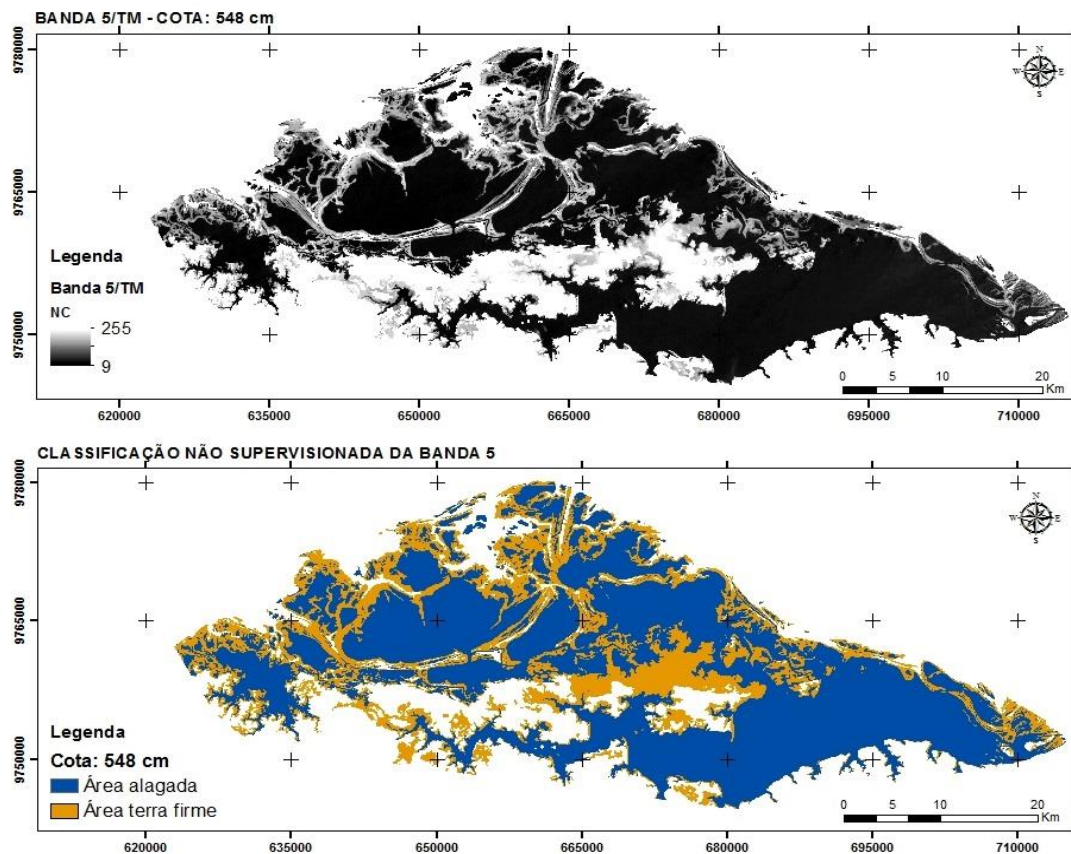


Figura 4. Banda 5 do TM classificada para a cota 548 cm.

### 3.3. Modelo batimétrico sem correção

O modelo batimétrico do LGC obtido por Barbosa (2005) com o ecobatímetro - Lowrance modelo 480M resultou na geração de MDE (**Figura 5**) com resolução horizontal de 15 metros e resolução vertical de um centímetro da planície. A campanha de campo para a aquisição dos dados batimétricos foi realizada entre 31 de maio e 21 de junho de 2004, período de cheia.

Durante o período de coleta a cota variou entre 936 e 918 cm, sendo o registro desta variação no nível d'água foi essencial para a correção posterior dos dados brutos (Barbosa, 2006). Para a correção devida à variação do nível d'água considerou-se a cota máxima (936 cm) como referência para profundidade, ou seja, as medidas foram ajustadas adicionando ao valor de profundidade a diferença entre a cota do dia em que foi realizada a medida e a cota de referência.

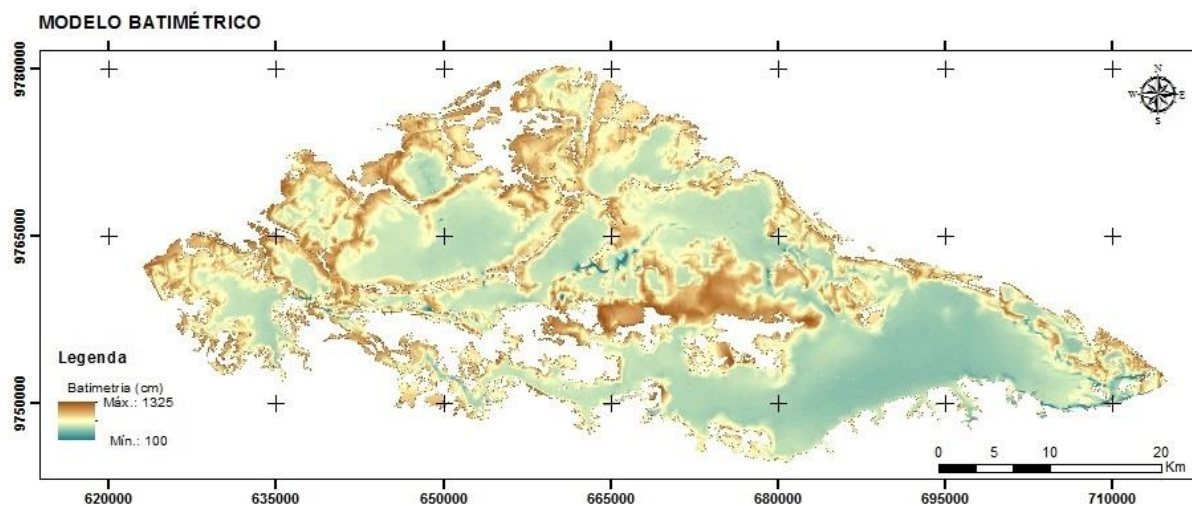


Figura 5. Modelo batimétrico da planície de inundação de Curuai.

### 3.4. Modelo batimétrico corrigido com SRTM

O modelo batimétrico do LGC foi avaliado com intuito de corrigir áreas de inundação as quais não foram obtidas amostras por dificuldade de acesso e áreas encobertas pela presença de banco de macrófitas. O modelo batimétrico foi corrigido pelos dados do SRTM (**Figura 6**) para melhorar as estimativas de área e volume. O modelo corrigido possui uma resolução espacial de 92,5 m e abrange uma área de 8171 km<sup>2</sup>, sendo o desenvolvimento desse tratamento realizado por Conrado (2014).

O modelo corrigido por SRTM será avaliado para verificar o ganho de se estimar área alagada e volume de água em relação ao modelo batimétrico bruto.

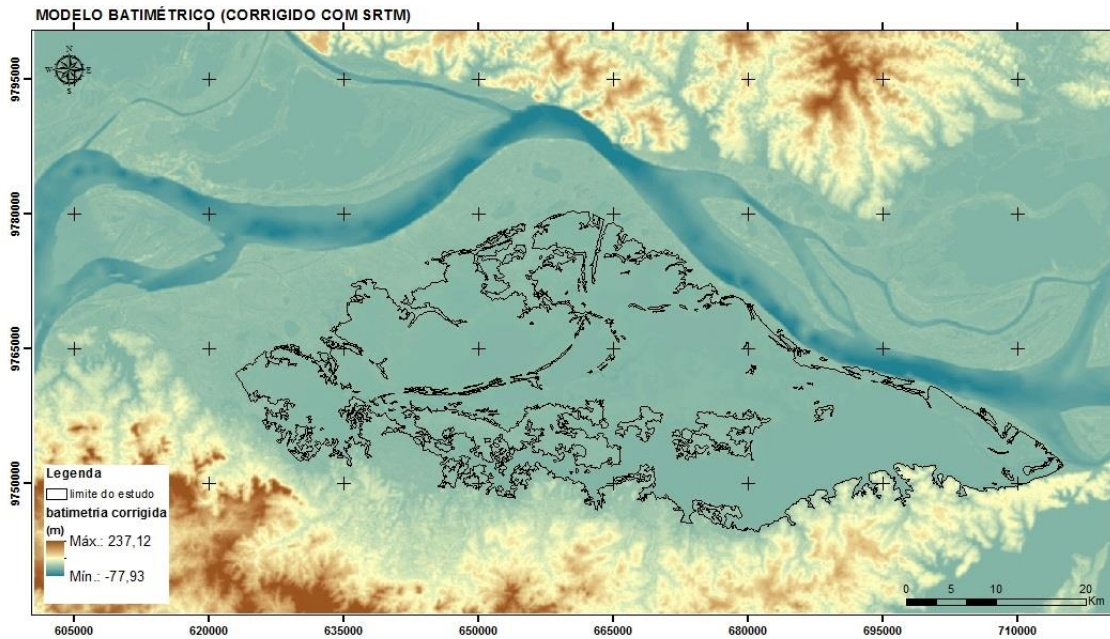


Figura 6. Modelo batimétrico corrigido por SRTM para a planície de inundação de Curuai.

### 3.5. Medida de concordância na estimativa de área de inundação e distribuição espacial dos erros da classificação

A avaliação da concordância entre as classes de área alagada e terra firme obtida para os modelos batimétricos serão comparados com a referência (imagem TM), o que permite estimar o acerto da classificação pelos modelos batimétricos através de índice. A maneira mais comum para expressar a precisão está na declaração da porcentagem da área de mapa que foi corretamente classificada quando comparada com dados de referência, denominada Exatidão Global (STORY & CONGALTON, 1986). Esta declaração normalmente é derivada de uma contraparte da classificação correta gerada por amostragem dos dados classificados, e expressa na forma de matriz de erro, algumas vezes denominada de matriz de confusão. Entretanto, Gong & Howarth (1990) utilizaram o índice Kappa (K) como uma medida de precisão importante a ser associada à matriz de erro, por representá-la inteiramente, isto é, considerando todos os elementos da matriz e não apenas aqueles que se situam na diagonal principal, como acontece com o índice de Exatidão Global.

Assim Rosenfield & Fitzpatrick-Lins (1986) desenvolveram um coeficiente de concordância denominado kappa, definido de acordo com a equação 1.

$$\hat{\kappa} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{1 - \theta_2} \quad \text{Equação 1}$$

em que,  $\hat{\kappa}$  = coeficiente Kappa;  $\theta_1$  = exatidão total da classificação; e  $\theta_2$  = proporção de acerto aleatório.

$$\hat{K} = \frac{n \sum_{i=1}^c x_{ii} - \sum_{i=1}^c x_{i\oplus} x_{\oplus i}}{n^2 - \sum_{i=1}^c x_{i\oplus} x_{\oplus i}} \quad \text{Equação 2}$$

em que,  $x_{ii}$  = valor na linha i e coluna i da matriz de erros;  $x_{i\oplus}$  = total da linha i;  $x_{\oplus i}$  = total da coluna i; n = número total da amostra; e c = número total de classes.

A interpretação do kappa é igual a zero, quando o acerto obtido pelo classificador é igual ao acerto aleatório. Quando o Kappa possui valores positivos é devido o acerto ser maior que o acaso e quando os valores são negativos ocorrem é uma classificação por acaso.

No desenvolvimento do índice foram distribuídos aleatoriamente 1220 pontos sobre a classificação da imagem TM, da batimetria bruta e corrigida e extraída as classes de terra firme ou alagada para cada ponto. A matriz de confusão é construída e assim é calculado o índice Kappa. Ao valor do Kappa é aplicado o teste z com significância de 5% para verificar se o valor do kappa é maior que zero, assim, os valores de kappa demonstram a concordância na estimativa de área inundada entre os MDEs em relação TM imagem.

Além do índice kappa, os pontos amostrados foram utilizados para obter uma distribuição espacial do erro (**Figura 7**). O erro ocorre quando a classe obtida pelos modelos batimétricos é diferente da classe obtida pela imagem TM, assim os pontos amostrados extraem a informação da classe para cada modelo e confronta com a classe da referência. O método algébrico para calcular os pontos com classes erradas é simples, pois se baseia na subtração entre classe do modelo pela classe da referência. Na distribuição espacial do erro foram selecionadas três cotas d'água (425, 661 e 925 cm).

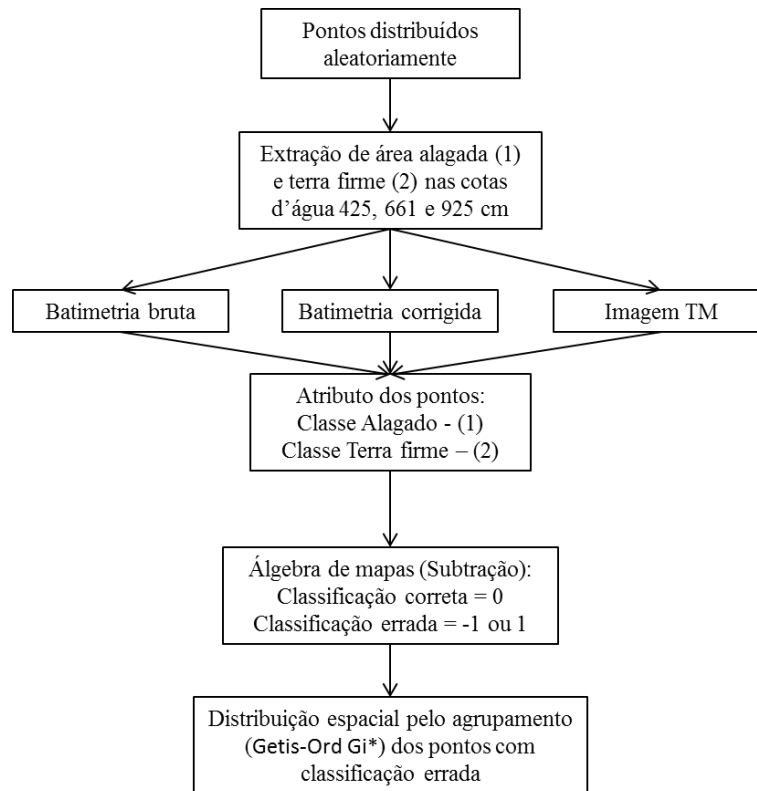


Figura 7. Modelo para obtenção do erro da classificação e agrupamento espacial.

Para analisar a distribuição espacial do erro na classificação de terra firme ou alagada serão agrupados os pontos através da função Getis-Ord  $G_i^*$ , conhecido como localizador de alta incidência. Essa função de agrupamento opera com base na análise de vizinhança para localizar agrupamentos estatisticamente significativos, ou seja, agrupamento de pontos não aleatórios no espaço.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Área de inundação

As áreas alagadas em diferentes cotas d'água da planície (**Tabela 2**) serão analisadas juntamente com a distribuição espacial dos erros de classificação dos modelos batimétricos (**Figura 8**). A diferença entre os valores em relação à imagem TM serão avaliadas pelo índice de concordância para perceber se existe uma melhor estimativa da área alagada pelo modelo batimétrico bruto ou corrigido por SRTM.



A distribuição espacial dos erros da classificação (áreas alagadas e terra firme) dos modelos batimétricos é uma informação importante para compreender as fontes de incertezas na delimitação da área alagada pelos modelos batimétricos. Ambos os modelos apresentam uma distribuição espacial dos erros ligeiramente semelhante, sendo apresentada somente a espacialização obtida pela classificação do modelo batimétrico bruto. Os pontos amostrados ( $n = 1220$ ) para geração da matriz de confusão do índice kappa foram utilizados para a distribuição espacial e agrupamento dos erros em três cotas d'água (425, 661 e 925 cm). Os agrupamentos não significativos ou com acertos foram suprimidos da visualização para facilitar observação das regiões de interesse.

Tabela 2. Área inundada de três modelos para diferentes cotas d'água.

	<b>Imagem TM [1]</b>	<b>Batimetria [2]</b>	<b>Batimetria corrigida [3]</b>	<b>Dif [1] - [2]</b>	<b>Dif [1] - [3]</b>
<b>Cota (cm)</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>		<b>Diferença (km<sup>2</sup>)</b>		
415	671,3	221,1	344,1	450,2	327,2
425	668,3	288,0	375,1	380,3	293,2
497	853,6	688,6	646,3	164,9	207,2
548	947,3	827,8	804,4	119,5	142,9
619	1018,2	1013,4	962,1	4,8	56,1
661	1047,2	1121,2	1049,5	-74,0	-2,3
701	1183,4	1212,7	1119,2	-29,3	64,1
742	1235,9	1292,4	1202,0	-56,5	33,9
804	1195,4	1358,4	1264,7	-163,0	-69,3
857	1207,5	1380,4	1320,6	-172,9	-113,1
897	1277,3	1395,0	1332,8	-117,8	-55,5
925	1274,9	1398,6	1349,8	-123,8	-74,9

As maiores diferenças entre área alagada pelo modelo batimétrico bruto e com correção em relação à imagem TM ocorrem para as cotas 415, 425 e 497 cm (estado de baixa). Essa diferença ocorre pelos lagos marginais terem uma quantidade de água confinada referente ao ciclo de cheia passado e os modelos batimétricos não percebem essas áreas alagadas. O fluxo de água se difunde pela planície gradualmente no modelo batimétrico, preenchendo os canais de interligação e depois conduzindo essa água para preencher os lagos marginais. Dessa forma, o nível de água não é o mesmo em toda planície em cotas menores, sendo dependente da condução da água pelos canais de ligação entre lagos, o que gera um retardo no escoamento dessa água por toda planície.

Os valores de cota d'água entre 619 a 742 cm apresentaram melhor concordância entre os modelos e a imagem TM, e a diferença entre modelos ocorre pela classificação não garantir com precisão os limites de área alagada e terra firme.

A diferença de área alagada inverte em maiores cotas d'água, pois os modelos batimétricos passam a estimar maiores áreas alagadas do que as imagens TM. Essa diferença é um indicio do erro associado à classificação não supervisionada da banda 5 (imagem TM), pois as áreas alagadas cobertas por bancos de macrófitas são classificadas como terra firme, o que gera uma subestimativa das áreas alagadas pela classificação.

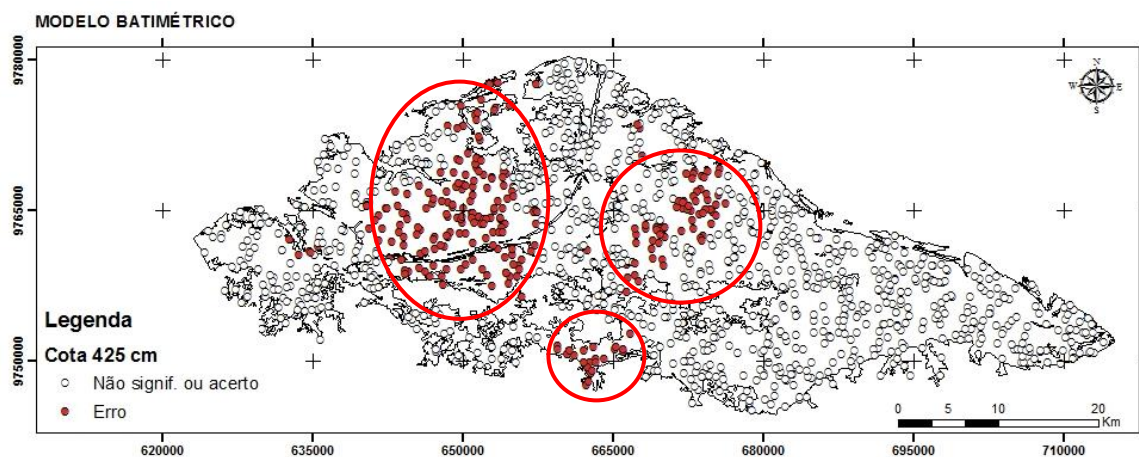


Figura 8. Distribuição do erro de classificação do modelo batimétrico bruto para cota 425 cm.

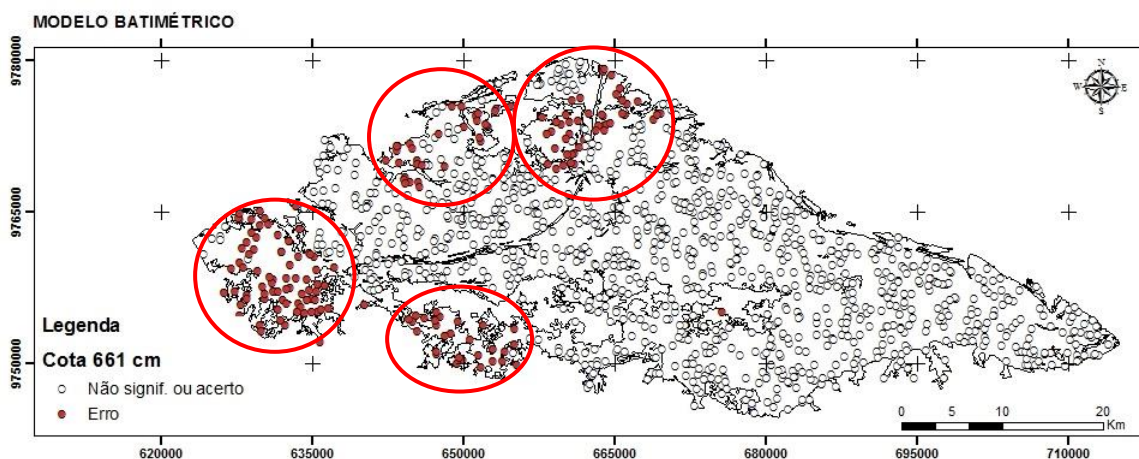


Figura 9. Distribuição do erro de classificação do modelo batimétrico bruto para cota 661 cm.

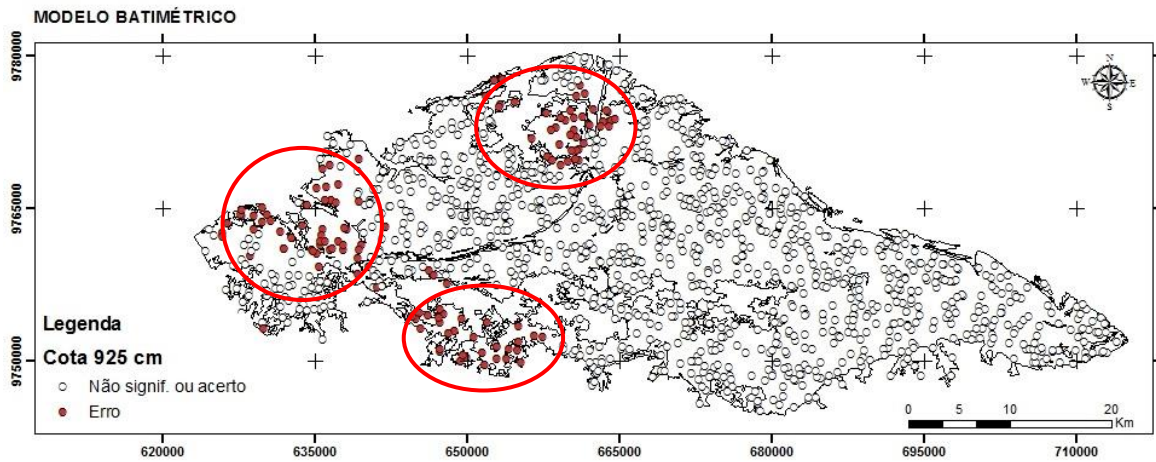


Figura 10. Distribuição do erro de classificação do modelo batimétrico bruto para cota 425 cm.

O índice Kappa é uma informação de concordância das áreas alagadas pelos modelos batimétricos (bruto e corrigido) em relação à imagem TM. Os índices kappa (**Tabela 3**) foram significativamente diferentes de zero para maioria das cotas d'água, exceto para 897 e 925 cm do modelo batimétrico bruto. A concordância entre áreas é menor para os extremos do intervalo de cotas d'água, por razões abordadas anteriormente. Em especial, o índice kappa para as cotas maiores passa não fazer sentido, devido a amostragem de pontos nos modelos batimétricos tenderem a uma predominância da classe de área alagada, assim o valor do índice próximo a zero perde o sentido, o que não significa que as áreas alagadas estimadas pelos modelos são totalmente diferentes das áreas alagadas obtidas pelas imagens TM. O índice kappa foi maior na maioria das cotas para o modelo batimétrico corrigido se comparado com os valores de kappa da batimetria bruta, o que indica uma maior concordância na estimativa das áreas alagadas por esse modelo.

Tabela 3. Índice Kappa para modelo batimétrico (bruto e corrigido).

Cota (cm)	Modelo Batimétrico	
	Bruto	Corrigido
<b>415</b>	0,282*	0,311*
<b>425</b>	0,416*	0,411*
<b>497</b>	0,697*	0,597*
<b>548</b>	0,648*	0,616*
<b>619</b>	0,609*	0,656*
<b>661</b>	0,459*	0,633*
<b>701</b>	0,375*	0,542*
<b>742</b>	0,282*	0,462*
<b>804</b>	0,114*	0,544*
<b>857</b>	0,076*	0,376*
<b>897</b>	0,017 <sup>NS</sup>	0,391*
<b>925</b>	0 <sup>NS</sup>	0,358*

\* - Significativo a 5% de probabilidade

NS - Não significativo a 5% de probabilidade

É importante ressaltar que os dados possuem incertezas inerentes ao processo de modelagem, assim, espera-se uma pequena diferença na estimativa de área de inundação entre eles. O processo de classificação não supervisionada das imagens TM visa distinguir as áreas homogêneas na imagem e assim associar a uma classe, mas a própria delimitação do limite da classe é incerta, além da mistura de alvos dentro de uma mesma classe. A classificação da banda 5 do TM/Landsat 5 é influenciada pela presença de extensos bancos de macrófitas, o que dificulta a distinção de ambiente alagado e de terra firme pela superfície estar encoberta por vegetação.

O modelo batimétrico possui um limite de amostragem influenciada pela a dificuldade de acesso em todos os lagos da planície e nas bordas da planície pela presença de plantas aquáticas. O modelo batimétrico corrigido por SRTM busca aumentar os limites de análise para as áreas não amostradas, no entanto, degrada a resolução espacial de 15 m para 92,5 m.

## 4.2. Volume de água da inundação

As planícies inundáveis da região Amazônica apresentam uma complexa topografia e grande extensão de área, o que justifica os desafios para aquisição desses dados. O modelo batimetria obtido por Barbosa (2005) permite o cálculo do volume de água em diferentes cotas d'água, e o intuito é avaliar a estimativa desse parâmetro para o modelo batimétrico bruto e corrigido. A diferença dos volumes de água (**Tabela 4**) entre os modelos batimétricos é significativa para cotas d'água menores, e com melhor estimativa para o modelo batimétrico bruto pela maior concordância da área de inundação desse modelo com a imagem TM nessas cotas. A partir da cota 619 cm, os valores de concordância do modelo batimétrico corrigido por SRTM são maiores que o modelo batimétrico bruto, o que torna melhor a estimativa do volume de água a partir do modelo corrigido. No entanto, as cotas d'água em que a área alagada é subestimativa pelos modelos batimétricos, permite concluir que o volume de água será subestimado. Existe uma grande diferença do volume de água estimado pelos modelos em cotas maiores, sendo reflexo da suavização das profundidades no modelo corrigido com 92,5 m, além do limite de área alagada entre os modelos ser diferente.

Tabela 4. Volume de água para modelo batimétrico (bruto e corrigido) em diferentes cotas d'água.

	<b>Batimetria bruta [1]</b>	<b>Batimetria corrigido [2]</b>	<b>Dif [2] - [1]</b>
Cota (cm)	Volume (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )		
415	214,77	183,50	-31,28
425	269,50	218,26	-51,24
497	471,00	577,92	106,92
548	855,96	939,71	83,75
619	1504,33	1551,93	47,60
661	1949,61	1962,46	12,85
701	2414,60	2384,53	-30,07
742	2926,73	2846,45	-80,28
804	3750,23	3587,22	-163,00
857	4475,76	4249,96	-225,81
897	5030,46	4758,28	-272,18
925	5422,67	5118,95	-303,72

Avaliando a regressão linear do volume pela cota (**Figura 9**), observa-se a semelhança entre as retas ajustadas em ambos os modelos, no entanto a inclinação da reta é menor para o modelo corrigido, resultado da degradação da resolução espacial de 15 m (bruto) para 92,5m (corrigido) que tende a suavizar a topografia e estima valores de volume menores do que o modelo bruto. Como a topografia das planícies de inundação é complexa, utilizar um modelo batimétrico com uma baixa resolução espacial não é o mais adequado na estimativa de volume de água, mas em contrapartida a maior concordância de área alagada por esse modelo induz a uma maior probabilidade de acertar na estimativa desse parâmetro.

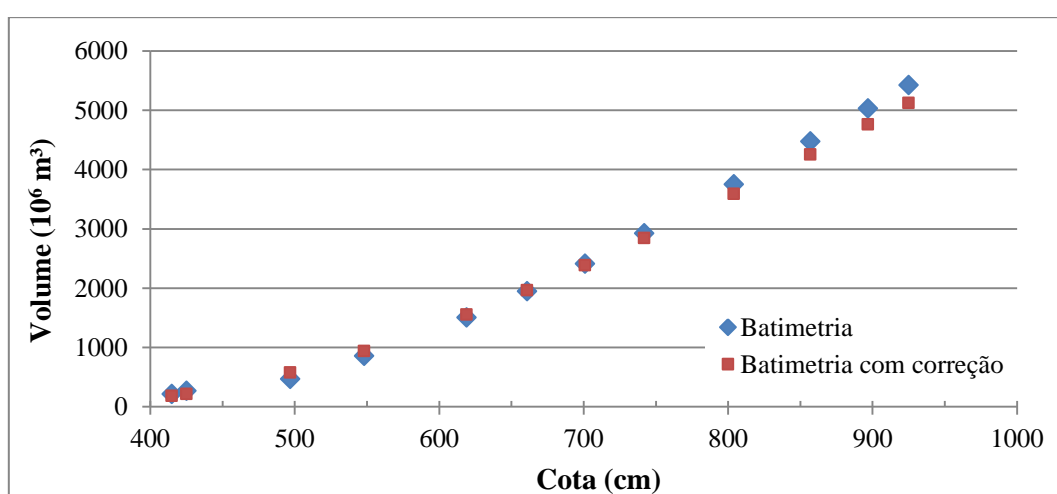


Figura 11. Volume de água em relação a cota d'água.

## 5. CONCLUSÕES

A complexidade da topografia de planícies de inundação faz com que o monitoramento de área alagada e volume de água por modelo batimétrico incidam em erros nas estimativas desses parâmetros.

O modelo batimétrico corrigido com SRTM apresentou melhor concordância na estimativa de área inundada, apesar dos valores em cotas d'água menores não terem boa concordância em ambos os modelos. Os erros de classificação ocorrem, predominantemente, nas bordas e em lagos marginais a oeste e norte da planície.

O volume de água é subestimado para as cotas d'água menores, devido o modelo batimétrico subestimar a área alagada. O modelo batimétrico corrigido possui uma baixa resolução espacial o que influencia na suavização dos valores de profundidade, mas em

contrapartida, melhorou a concordância da área alagada com a imagem TM, sendo uma boa opção dependendo cota d'água.

A aplicação de imagens TM no monitoramento da área alagada requer uma disponibilidade de tempo para seleção e processamento digital das imagens, além da necessidade de associação de um estudo do regime de cotas d'água. Portanto, a utilização de um modelo batimétrico, se disponível, é uma boa alternativa se considerado os intervalos de cota d'água com melhores estimativas.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AYRES, J. M. As Matas de Várzea do Mamirauá: Médio Rio Solimões. Brasília: Sociedade Civil Mamirauá; CNPq., 1995. 124p. (Estudos do Mamirauá, 1)
- BARBOSA, C.C.F. et al. **Caracterização espectral das massas d'água amazônicas**. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, v. 11, p. 1099-1106, 2003.
- BARBOSA, C.C.F.. Sensoriamento remoto da dinâmica de circulação da água do sistema planície de Curai/rio Amazonas. São José dos Campos. 255p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto)-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2005.
- BARBOSA, C.C.F. et al. Metodologia de análise da dinâmica de área e volume inundável: o exemplo da várzea do Lago Grande de Curuaí. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 58, n. 3, 2006.
- CASTELLO, L., 2008. Lateral migration of *Arapaima gigas* in floodplains of the Amazon. *Ecology of Freshwater Fish*, 17(1), pp.38–46.
- CORREA, S.B. & Winemiller, K.O., 2014. Niche partitioning among frugivorous fishes in response to fluctuating resources in the Amazonian floodplain forest. *Ecology*, 95(1), pp.210–24.
- GONG, P.; Howarth, P. J. An assessment of some factors influencing multispectral land-cover classification. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. v. 56, n. 5, p. 597-603, 1990.
- HESS, L.L.; Melack, J.M., Filoso, S., Wang, Y, 1993. Delineation of inundated area and vegetation along the Amazon floodplain with the SIR-C synthetic aperture radar. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 33(4), pp. 896-904
- JUNK, W.J., Bayley, P.B. & Sparks, R.E., 1989. **The flood pulse concept in river floodplain systems**. In C. P. F. A. S. 106 Spec, ed. Proceedings of the International Large River Symposium. pp. 110–127
- RICHEY, J.E.; Mertes, L.A.K.; Dunne, T.; Victoria, R. L.; Forsberg, B.R.; Tancredi, A.C.N.S; Oliveira, E. Sources and routing of the Amazon River flood wave. **Global Biogeochemical Cycles**, v.3, p.191-204, 1989.



- ROSENFELD, G.H.; Fitzpatrick-Lins, K. A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.52 n.2 p.223-227, 1986.
- RUDORFF, C.; M.; Melack, John M.; Bates, Paul D. Flooding dynamics on the lower Amazon floodplain: 1. Hydraulic controls on water elevation, inundation extent, and river-floodplain discharge. **Water Resources Research**, v. 50, n. 1, p. 619-634, 2014.
- SANTARÉM, Prefeitura Municipal. Planície de Curuai. Disponível em: <<http://www.santarem.pa.gov.br/>>. Acesso em: 05 de junho de 2015.
- STORY, M.; Congalton, R. G. Accuracy assessment: a user's perspective. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 52, n. 3, p. 397-399, 1986.

## 7. ANEXOS

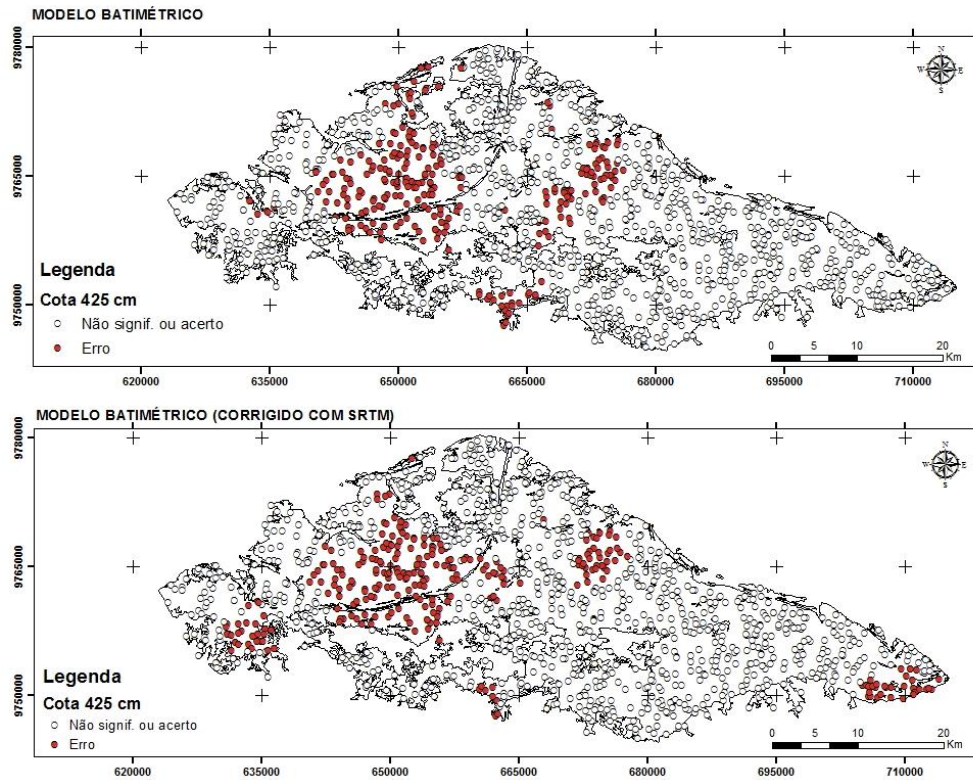


Figura 12. Distribuição do erro da classificação na cota 425 cm.

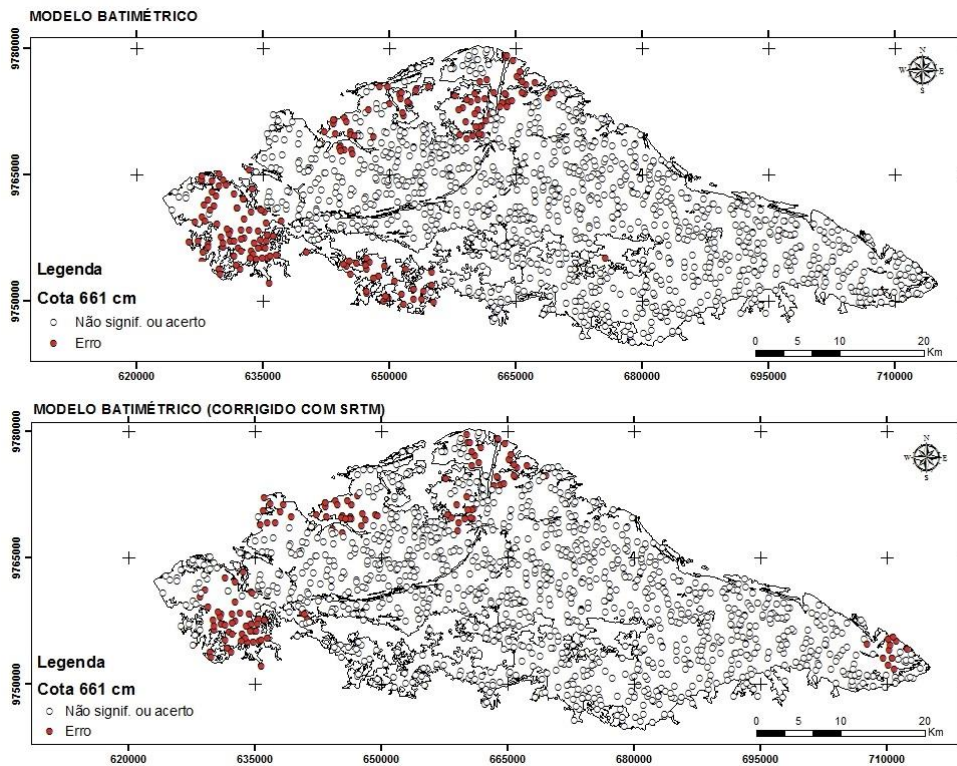


Figura 13. Distribuição do erro da classificação na cota 661 cm.

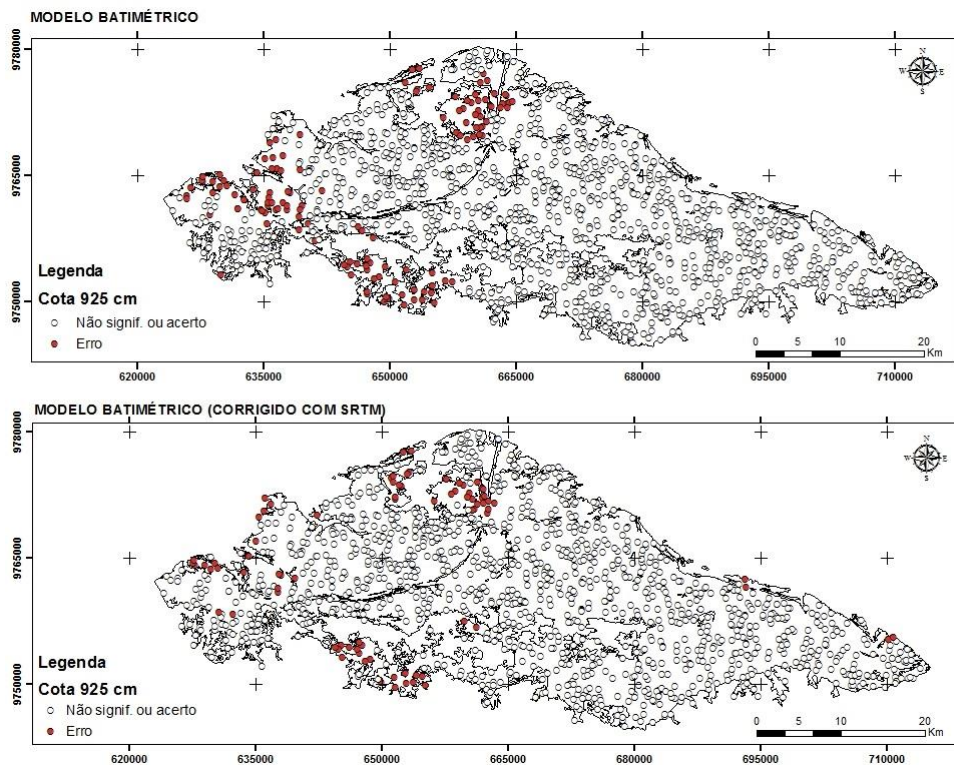


Figura 14. Distribuição do erro da classificação na cota 925 cm.

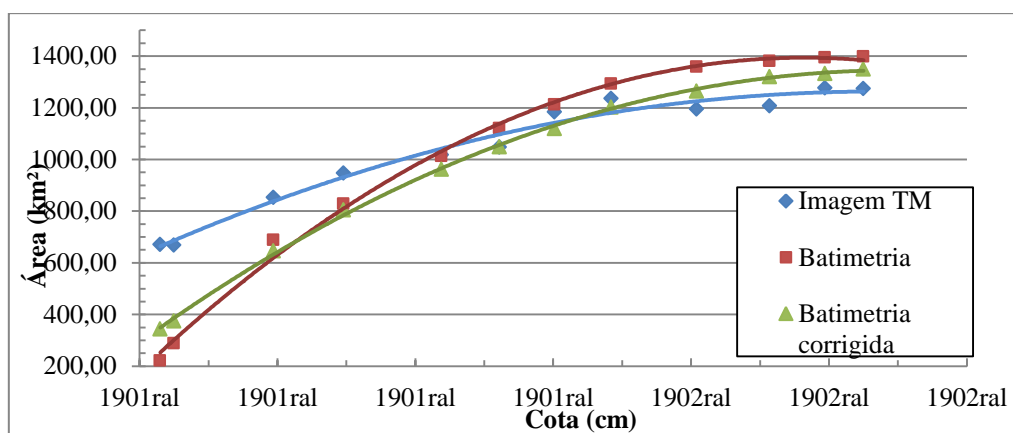


Figura 15. Curvas de regressão de área alagada versus cota d'água.

### Modelo da regressão para área alagada e volume de água

$$\text{Área (imagem TM)} = -0,0022 \times \text{cota}^2 + 4,1526 \times \text{cota} - 676,77 \quad (R^2 = 0,9781)$$

$$\text{Área (batimetria bruta)} = -0,0052 \times \text{cota}^2 + 9,2198 \times \text{cota} - 2672,8 \quad (R^2 = 0,9962)$$

$$\text{Área (batimetria corrigida)} = -0,0035 \times \text{cota}^2 + 6,6531 \times \text{cota} - 1807,4 \quad (R^2 = 0,9992)$$

$$\text{Volume (batimetria bruta)} = 10,416 \times (\text{cota}) - 4582,6 \quad (R^2 = 0,971)$$

$$\text{Volume (batimetria corrigida)} = 9,79 \times (\text{cota}) - 4237,9 \quad (R^2 = 0,981)$$