

## Mapeamento geomorfológico de áreas alagáveis tropicais com imagens ALOS PALSAR

Hiran Zani<sup>1</sup>  
Dilce de Fátima Rossetti<sup>1</sup>  
Édipo Henrique Cremon<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{hzani, rossetti, cremon}@dsr.inpe.br

**Abstract.** The application of optical sensors for geomorphological mapping in tropical areas is limited by the permanent cloud cover and dense vegetation. Synthetic aperture radar (SAR) images have been an alternative data source for this type of approach. In this study, we applied SAR images for mapping landform units of an extensive wetland located in northern Amazonia. Our dataset consisted in three PALSAR images, acquired under contrasting hydrological conditions. A total of six classes were defined as: (1) floodplain; (2) fan-shaped interfluvial; (3) fluvial terraces and bars; (4) wetland; (5) temporary channel; and (6) permanent channel. After preprocessing for radiometric and geometric corrections, a decision tree was applied to extract the landforms. Accuracy assessment was based on an independent dataset and applied to analyze the quality of the resulting map. The results show that the backscatter temporal variations are directly related to the landforms. The classification presented an overall accuracy of 84 % and Kappa index of 0.82 ( $p < 0.001$ ). The geomorphological map indicated morphological classes that are compatible with the existence of a megafan system associated with a wetland between two fluvial valleys.

**Palavras-chave:** geomorphological mapping, synthetic aperture radar (SAR), wetland, Amazonia, mapeamento geomorfológico, radar de abertura sintética, áreas alagáveis, Amazônia.

### 1. Introdução

Produtos de sensoriamento remoto, juntamente com dados coletados em campo, são as principais fontes de dados para a elaboração de mapas geomorfológicos (Verstapen, 2011). Em recente revisão sobre os principais métodos utilizados para este fim, Smith e Pain (2009) destacaram o uso de imagens ópticas e modelos digitais de elevação (MDE). No entanto, a constante cobertura de nuvens e a vegetação densa em regiões tropicais podem dificultar a sua utilização para fins de caracterização morfológica.

Imagens geradas por sensores que operam na faixa espectral das microondas, como radares de abertura sintética (SAR), são pouco influenciadas pelas condições atmosféricas. Além disso, possuem potencial de transpor coberturas vegetais e registrar condições abaixo dos dosséis arbóreos (Hess et al., 1990), característica que pode ser explorada para identificar formas do relevo em áreas alagáveis florestadas. Este estudo tem o objetivo de analisar o potencial de imagens fornecidas pelo sensor PALSAR para o mapeamento geomorfológico de uma área alagável de grande dimensão no norte da Amazônia.

### 2. Área de estudo

A área de estudo está localizada no Parque Nacional do Viruá, margem esquerda do rio Branco, centro sul do Estado de Roraima (Figura 1). Esta região foi identificada por Junk (2011) como uma das áreas alagáveis de maior extensão da Amazônia, caracterizada por fitofisionomias de vegetação aberta natural (campinarana), florestas de terra firme, várzea e igapó (IBGE, 2008). Com o auxílio de dados de sensoriamento remoto, um sistema deposicional de megaleque foi identificado nesta região (Zani e Rossetti, 2012). A ocorrência desta feição está relacionada com climas tropicais do tipo monçônico durante o Quaternário tardio, provavelmente com maior sazonalidade climática do que o atual, em combinação com a subsidência tectônica (Rossetti et al., 2012).

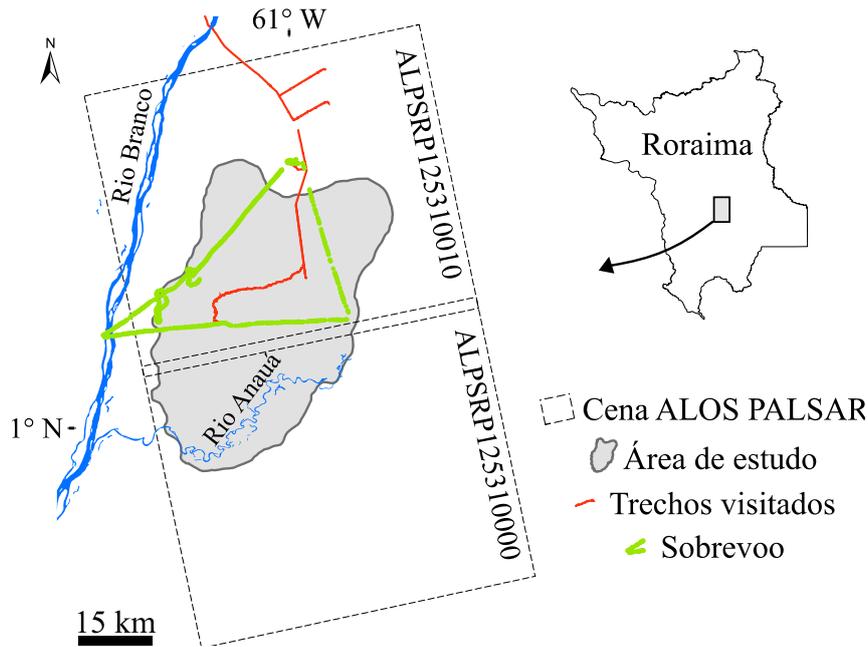


Figura 1. Localização da área de estudo e cobertura dos dados utilizados.

### 3. Material e métodos

#### 3.1 Aquisição e processamento das imagens PALSAR

Foram adquiridas 6 imagens PALSAR, sendo necessárias 2 cenas para a cobertura completa da área de estudo (Tabela 1). Detalhes sobre a missão e informações técnicas sobre este sensor podem ser obtidas em Rosenqvist et al. (2007).

Tabela 1. Características das imagens PALSAR utilizadas.

Data de aquisição	Ângulo de Incidência	Órbita do sensor	Modo/Nível	Banda/Polarização	Pixel (m)	Nº de cenas
01/jun/08	34,3°	Ascendente	FBD/1.5G	L/HH+HV	12,5	2
04/set/09	34,3°	Ascendente	FBD/1.5G	L/HH+HV	12,5	2
20/jan/10	34,3°	Ascendente	FBS/1.5G	L/HH	6,25	2

A série multitemporal abrange o ciclo hidrológico regional, que é caracterizado pelas diferentes posições de cota que o rio Branco alcança ao longo de um ano (Figura 2). Além das imagens PALSAR, foram utilizadas fotografias aéreas obliquas georreferenciadas, mapas de vegetação (IBGE, 2008), e observações de campo. Estes dados auxiliaram na interpretação das formas de relevo e foram utilizados na etapa de validação dos resultados.

As operações de processamento das imagens PALSAR consistiram na aplicação do filtro adaptativo *Enhanced Lee* (Lopes et al., 1990) de janela 7x7 pixels, com a finalidade de atenuar o ruído *Speckle*. Posteriormente, as imagens foram ortorretificadas com base no modelo específico de posicionamento orbital do sensor PALSAR, que resulta em precisão geométrica superior a 1 pixel (Cheng, 2007). Após estas correções, os valores de número digital (ND) foram transformados para valores de retroespalhamento ( $\sigma^0$ ), segundo modelo e coeficientes propostos por Shimada et al. (2009).

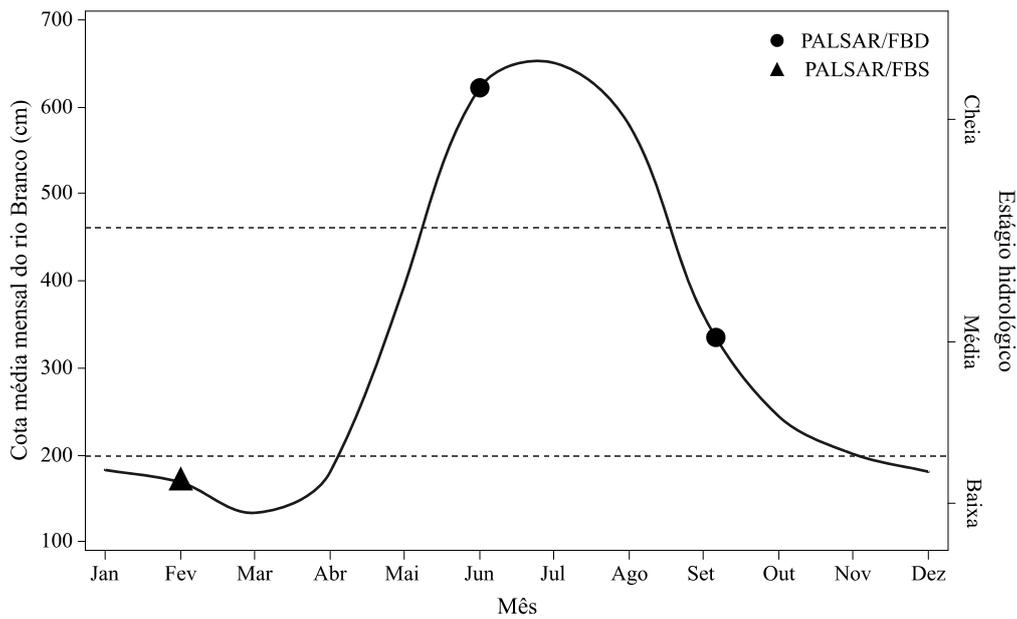


Figura 2. Imagens PALSAR adquiridas e a variação média anual da cota do rio Branco, que representa o ciclo hidrológico da área de estudo.

### 3.2 Modelo de mapeamento geomorfológico

Uma das principais características das imagens SAR é a alta sensibilidade às condições de umidade do terreno (Henderson e Lewis, 1998). Como a área de estudo é caracterizada por topografia extremamente plana (média de  $18 \text{ cm.km}^{-1}$ ), variações hidrológicas associadas com o ciclo anual das cheias (Figura 2) foram utilizadas como indicador das formas de relevo (Figura 3).

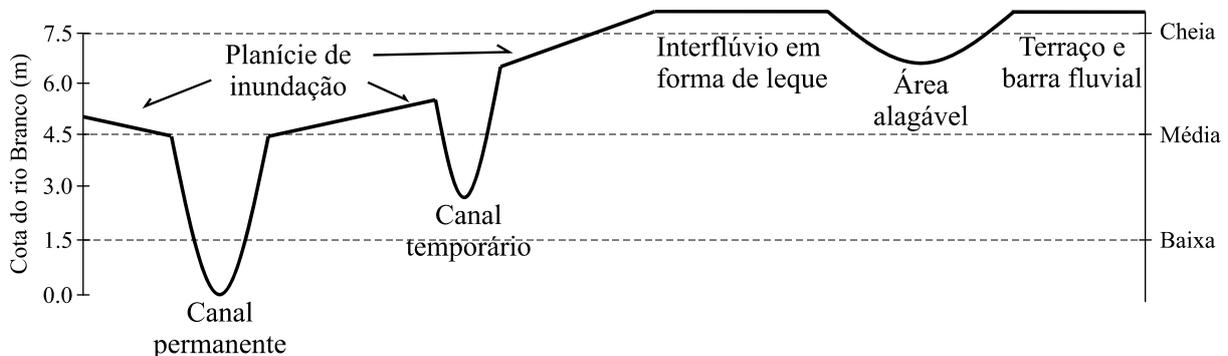


Figura 3. Relação entre formas de relevo com o ciclo hidrológico anual.

Foram definidas 6 classes morfológicas: (1) planície de inundação, que são feições deprimidas e alongadas adjacentes aos canais permanentes e temporários, totalmente cobertas por água durante o estágio hidrológico da cheia; (2) interflúvio em forma de leque, de topografia plana, com cotas altimétricas mais elevadas que o nível médio das cheias; (3) terraço e barra fluvial, que correspondem a depósitos aluviais de posição altimétrica mais elevada que o nível médio das cheias, localizados marginalmente a canais ou entremeados à classe interflúvio em forma de leque; (4) áreas alagáveis, caracterizadas por pequenas depressões acanaladas que são inundadas apenas durante a cheia; (5) canais temporários, com água a partir das cotas médias; e (6) canal permanente, com água durante todo o ano.

A classificação das formas de relevo foi realizada com o uso do algoritmo CART (*Classification and Regression Tree*). Este algoritmo constrói uma árvore de decisão a partir

de parâmetros extraídos das amostras de treinamento. O método é indicado para imagens de radar, pois ao contrário das abordagens tradicionais de classificação (p.e., Máxima Verossimilhança), não assume funções de densidade de probabilidade à priori (Friedl e Brodley, 1997) e sofre pouca influência do ruído *Speckle*.

A etapa final do mapeamento geomorfológico consistiu na análise de exatidão do produto gerado. Com base em até 100 amostras para cada classe, independentes das utilizadas para a elaboração da árvore de decisão, foi gerada uma matriz de confusão e estimada a exatidão global e a estatística Kappa, conforme detalhado em Jensen (2005).

#### 4. Resultados e discussão

Os coeficientes de retroespalhamento ( $\sigma^\circ$ ) apresentaram variabilidade em função das formas de relevo, do estágio hidrológico e da polarização da imagem (Figura 4).

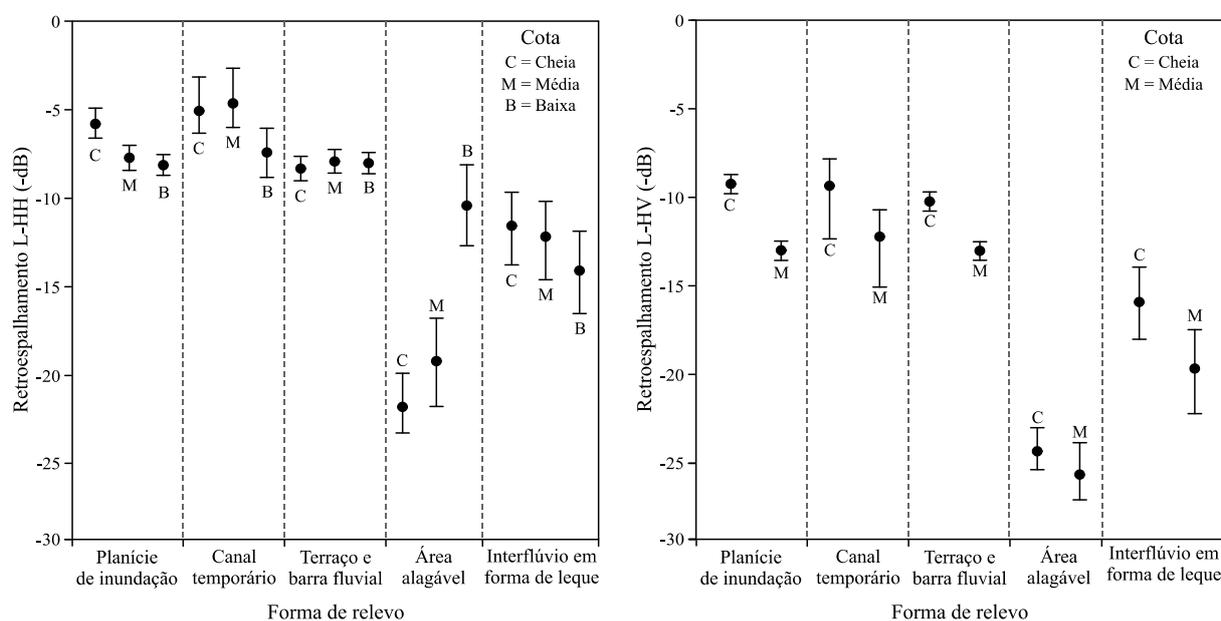


Figura 4. Variações do coeficiente de retroespalhamento ( $\sigma^\circ$ ).

Observa-se que os valores mais altos de  $\sigma^\circ$  estão relacionados com canais temporários, registrados durante períodos de cotas cheia e média (média de -5 dB, polarização L-HH). Já os valores mais baixos foram extraídos das áreas alagáveis nos períodos de cotas cheia e média (média de -27 dB, polarização L-HV). Estas relações foram utilizadas para a construção de uma árvore de decisão (Figura 5), que indica a imagem PALSAR L-HH adquirida no estágio de cheia como o principal dado da série multitemporal para diferenciar as áreas alagáveis e planície de inundação das regiões de terra firme. Esta mesma imagem, mas com polarização L-HV, também permitiu a separação entre as classes de interflúvio em forma de leque e terraços/barras fluviais. Neste caso, o domínio de vegetação aberta nas áreas de interflúvio contrasta com as florestas existentes nos demais compartimentos geomorfológicos. Segundo Hess et al. (1995), imagens SAR adquiridas com polarização cruzada são indicadas para diferenciar estes tipos de fitofisionomias, devido aos diferentes tipos de mecanismos de espalhamento destes alvos.

A imagem PALSAR polarização L-HH adquirida durante a cota média permitiu a distinção entre os canais temporários e a planície de inundação, sendo a última classe inundada somente no período de cheia. A imagem PALSAR polarização L-HH na cota baixa foi utilizada somente no último nó da árvore de decisão, e permitiu a identificação dos corpos de água temporários.

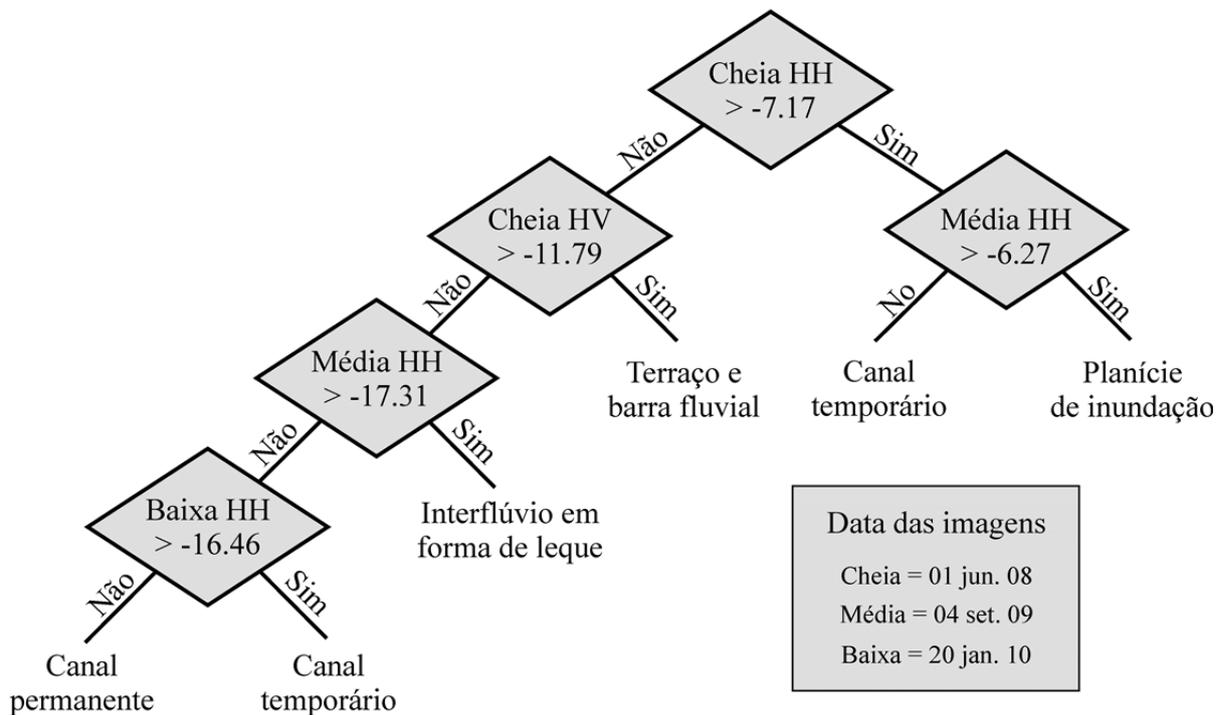


Figura 5. Árvore de decisão com as regras para a classificação das formas de relevo.

O mapa geomorfológico gerado (Figura 6) mostra o predomínio da classe interflúvio em forma de leque, que ocorre em contato com planícies de inundação e terraços fluviais nas porções sul ou e norte da área de estudo, respectivamente. Grande parte da classe interflúvio em forma de leque corresponde a depósito sedimentar previamente identificado como megaleque (Zani e Rossetti, 2012). A parte central do megaleque contém a classe barras fluviais. Observações de campo revelaram que estas barras correspondem a corpos de areia com dimensões máximas de 1.000 m<sup>2</sup>, posicionadas até 1 m mais elevadas que o entorno. Pode-se perceber que muitas dessas barras acham-se alinhadas de acordo com canais distributários abandonados na superfície do megaleque. Estes, previamente identificados com o sensor TM/Landsat (Zani e Rossetti, 2012), não puderam ser extraídos com as imagens PALSAR. Este tipo de omissão pode estar relacionado com o comprimento do sensor, que é pouco sensível aos elementos morfológicos dos paleocanais. Um outro problema associado com o mapa gerado é que relevos residuais correspondentes a rochas do embasamento cristalino pré-cambriano existentes na área de estudo, caracterizados por altitudes de até 230 m, foram incluídos na classe interflúvio em forma de leque e terraço/barra fluvial (Figura 6-a). Outros artefatos existentes, como canais temporários e planícies de inundação em áreas topograficamente mais elevadas, estão associados com distorções inerentes a sistemas de imageamento SAR.

Por outro lado, o mapa geomorfológico eficientemente evidenciou que o limite entre a classe planície de inundação relacionada com o rio Anauá e a porção ocidental da classe interflúvio em forma de leque dá-se por meio de vários segmentos retilíneos ao longo de toda a extensão da área de estudo (ver setas na Figura 6). Outros produtos de sensoriamento remoto analisados anteriormente (p.e., imagens ópticas, modelos digitais de elevação) não indicaram este lineamento. Sua presença pode ser usada como um elemento sugestivo da presença de falha, levando em consideração que estudos anteriores já revelaram influência neotectônica nessa região (i.e., Rossetti et al. 2012).

Com relação à análise de exatidão do produto gerado, verificou-se um acerto global de 84 % e índice Kappa de 0,82 ( $p < 0,001$ ). A matriz de confusão, construída com amostras independentes das utilizadas no processo de classificação, pode ser observada na Tabela 2. O menor acerto de exatidão do produtor está relacionado com as áreas alagáveis que, em alguns casos, foi associada erroneamente com a classe de interflúvio. A classe de canal permanente apresentou a menor exatidão do usuário, em grande parte devido à confusão do classificador com a classe de interflúvio. Todas as demais classes apresentaram exatidão superior a 70 %.

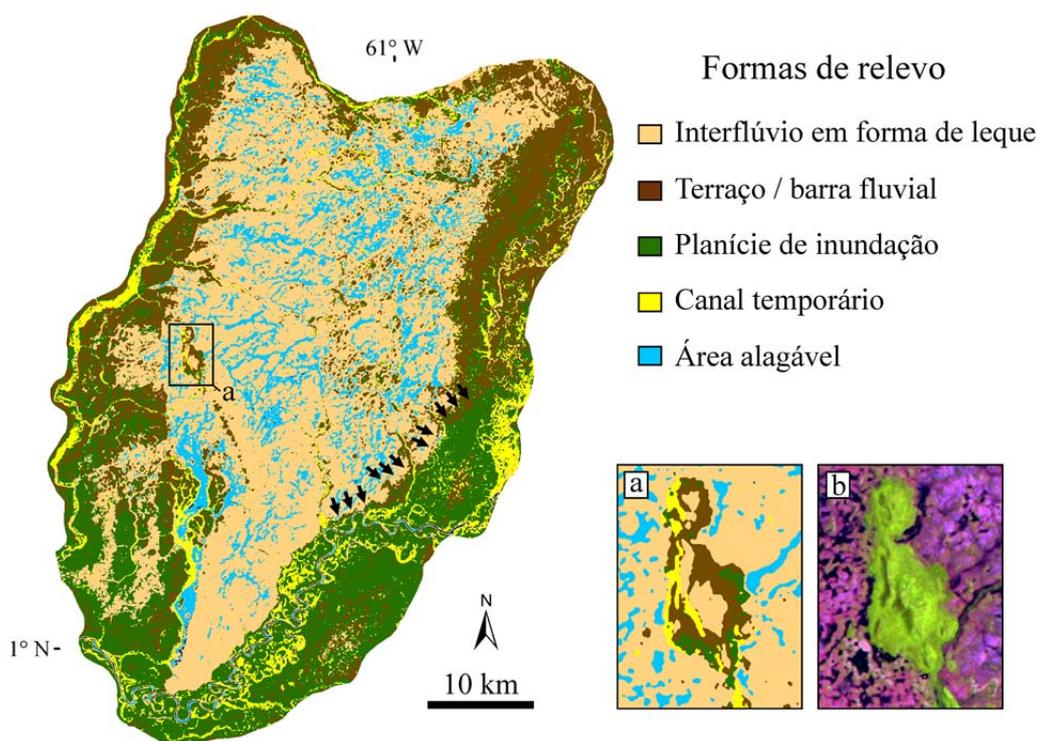


Figura 6. Mapa geomorfológico elaborado para a área de estudo. (a) Detalhe mostra relevo residual erroneamente associado com as classes de interflúvio em forma de leque e canal temporário. (b) O mesmo detalhe de (a) representado por uma imagem TM/Landsat (composição 742). Setas indicam lineamentos morfológicos que foram relevados por este produto.

Tabela 2. Matriz de erro do mapa geomorfológico gerado. As abreviações correspondem a CT. = canal temporário, Plan. = planície de inundação, CP. = canal permanente, Ter. = terraço e barra fluvial, Int. = interflúvio em forma de leque, Ala. = área alagável.

Formas de relevo		Classificação							Exatidão do produtor (%)	Exatidão do usuário (%)
		CT.	Plan.	CP.	Ter.	Int.	Ala.	Total		
Referência	CT.	95	0	0	0	0	0	95	95	100
	Plan.	2	100	0	1	0	0	103	100	97
	CP.	0	0	59	0	7	0	87	98	68
	Ter.	3	0	0	98	1	0	102	98	96
	Int.	0	0	1	1	82	1	109	82	75
	Ala.	0	0	0	0	3	41	45	64	91
	Total	100	100	60	100	100	64	624		

## 5. Conclusões

As imagens PALSAR forneceram informações que viabilizaram a elaboração de um mapa geomorfológico de boa qualidade, principalmente no referente ao delineamento de um extenso depósito sedimentar correspondente a um sistema de megaleque. Este produto possibilitou, ainda, categorizar terraços, canais temporários e planícies de inundação associados a vales fluviais que limitam o megaleque, bem como barras fluviais e áreas alagáveis sobre ele. Além de fornecer dados em locais com cobertura de nuvens constante, as imagens PALSAR revelaram informações que não puderam ser observadas com outros sensores. Entretanto, omissões de morfologias, como o caso de paleocanais, foram percebidas, bem como a não distinção de áreas de embasamento cristalino pré-cambriano da classe terraço/barra fluvial. A correção desses erros requer análise de dados complementares provenientes de sensores ópticos.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP pelo financiamento desta pesquisa (Processo # 2010/09484-2) e concessão de bolsa de doutorado para o primeiro autor (Processo # 2009/00672-3). As fotografias aéreas georreferenciadas foram gentilmente cedidas por Beatriz Lisboa do ICM-Bio.

## Referências bibliográficas

Cheng, P. Automated high-accuracy orthorectification and mosaicking of PALSAR data without ground control. **Geoinformatics**, v. 10, n.6, p. 36-38, 2007.

Friedl, M.; Brodley, C. Decision tree classification of land cover from remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, v. 61, n. 3, p. 399-409, 1997.

Henderson, F.M.; Lewis, A. J. **Principles and applications of imaging radar: manual of remote sensing**. New York: John Wiley & Sons, 1998. 896 p.

Hess, L.L.; Melack, J.M.; Simonett, D.S. Radar detection of flooding beneath the forest canopy: a review. **International Journal of Remote Sensing**, v. 11, p. 1313-1325, 1990.

Hess, L.L.; Melack, J.M.; Filoso, S.; Wang, Y. Delineation of Inundated Area and Vegetation Along the Amazon Floodplain with the SIR-C Synthetic Aperture Radar. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 33, n. 4, p. 896-904, 1995.

IBGE. **Mapas temáticos Amazônia Legal - 1:250.000**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2008.

Jensen, J.R. **Introductory digital image processing: A remote sensing perspective**. New Jersey: Prentice Hall, 2005. 316 p.

Junk, W.J.; Piedade, M.T. F.; Schöngart, J.; et al. A Classification of major naturally-occurring Amazonian lowland wetlands. **Wetlands**, v. 31, n. 4, p. 623-640, 2011.

Lopes, A.; Touzi, R.; Nezry, E. Adaptive speckle filters and scene heterogeneity. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 28, n. 6, p. 992-1000, 1990.

Rosenqvist, A.; Shimada, M.; ITO, N.; Watanabe, M. ALOS PALSAR: A Pathfinder Mission for Global-Scale Monitoring of the Environment. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 45, n. 11, p. 3307-3316, 2007.

Rossetti, D.F.; Zani, H.; Cohen, M.C.L.; Cremon, E.H. A Late Pleistocene-Holocene wetland megafan in the Brazilian Amazonia. **Sedimentary Geology**, 2012, No Prelo. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2012.09.015.

Shimada, M.; Isoguchi, O.; Tadono, T.; Isono, K. PALSAR Radiometric and Geometric Calibration. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 47, n. 12, p. 3915-3932, 2009.

Smith, M. J.; Pain, C. F. Applications of remote sensing in geomorphology. *Progress in Physical Geography*, v. 33, n. 4, p. 568-582, 2009.

Verstappen, H.T. Old and new trends in geomorphological and landform mapping. In: Smith, M.J.; PARON, P.; GRIFFITHS, J.S. (Org.). *Geomorphological Mapping: Methods and Application*. Amsterdam: Elsevier, 2011. p. 13-38.

Zani, H.; Rossetti, D. F. Multitemporal Landsat data applied for deciphering a megafan in northern Amazonia. *International Journal of Remote Sensing*, v. 33, n. 19, p. 6060-6075, 2012.