

Integração de informações de multi-sensores para estimar alterações da rugosidade hidráulica da várzea do Baixo Amazonas em função da remoção da floresta inundável

Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo¹

Vivian Fróes Renó¹

Claudio Clemente Farias Barbosa¹

Conrado de Moraes Rudorff²

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{evlyn, vivianf}@dsr.inpe.br; claudio@dpi.inpe.br

² Bren School of Environmental Science and Management, University of California, Santa Barbara, California, USA
cmr@bren.ucsb.edu

Abstract. This paper describes the integration of floodplain cover types mapped from MSS and TM Landsat images and floodplain topographic data from SRTM to estimate changes in the hydraulic roughness caused by floodplain forest removal in the last forty years. Land cover maps representing each decade (1970 and 2000) were overlaid to a floodplain height map following the concept of high and low *varzea* proposed by Whittmann et al. (2002, 2004). A look up table of hydraulic roughness coefficient based on published data was then used to compute the hydraulic roughness in both decades and assess the percent change and the impact of deforestation on the hydraulic roughness coefficient. Results showed that the integration of theory on vegetation resistance to flow and different types of remote sensing derived data allowed to estimate the spatial distribution of hydraulic roughness in the lower Amazon floodplain and to compute the loss in hydraulic resistance in a reach stretching from Parintins (AM) to Almeirim (PA).

Palavras-chave: multi-sensor data integration, hydraulic roughness, Amazon River floodplain; integração de dados multi-sensores, rugosidade hidráulica, planície do rio Amazonas.

1. Introdução

A rugosidade hidráulica é parâmetro de entrada de modelos hidrológicos de difícil medição, porque resulta de uma combinação de características da superfície sobre a qual se dá o escoamento da água, sendo também influenciado pelas próprias características do fluxo, tais como velocidade e profundidade. A rugosidade hidráulica é uma medida da resistência da superfície ao escoamento da água devido ao atrito ou fricção provocada por ela. Há vários coeficientes utilizados na literatura para expressar a rugosidade hidráulica, também muitas vezes, chamada de fricção, sendo o coeficiente de Manning o mais utilizado (Clack, 2004). As previsões dos modelos de inundação são sensíveis à escolha de tais coeficientes (Wilson e Atkinson, 2007) que com frequência são atribuídos considerados valores espacialmente constantes. Existem vários métodos para se medir ou estimar o coeficiente de rugosidade hidráulica, dentre os quais se destacam as simulações em laboratório, medidas indiretas com instrumentos de campo e modelagem numérica (Sellin et al. 2003). A aplicação efetiva desses coeficientes para o ambiente real da planície da inundação exige informação sobre a estrutura e distribuição da cobertura vegetal e da topografia da área a ser modelada.

Dados de sensoriamento remoto têm sido utilizados tanto para calibrar como para validar modelos de inundação, e para modelar a rugosidade hidráulica de áreas florestadas (Straastma et al., 2008; Straastma e Baptist, 2008). Bates e De Roo (2000) relatam o desempenho de um modelo que usa como entrada um modelo digital de elevação para prever a área inundada. Os resultados do modelo foram avaliados com base nos limites da inundação estabelecidos a partir da análise de fotografias aéreas e imagens SAR obtidas concomitante à inundação, e o desempenho do modelo foi da ordem de 82 %. Os autores reconheceram a necessidade de

aperfeiçoamentos, dentre os quais a inclusão de parâmetros que modulassem o comportamento da onda de inundação ao atingir a planície. Wilson et al. (2007) relatam o uso de uma versão mais recente desse modelo para estimar a inundação sazonal das áreas alagáveis da Amazônia. O modelo caracteriza não apenas o escoamento no canal, mas também o escoamento quando a água é transferida do canal para a planície. Os autores também usaram dados topográficos extraídos do SRTM para caracterizar a topografia das áreas inundadas. Os resultados indicaram um bom desempenho do modelo durante o período de cheia (72 % de ajuste espacial e erro médio quadrático de 0,99 m em relação aos níveis da água). O desempenho do modelo, entretanto, durante os mínimos de inundação foi insatisfatório, tal falta de exatidão foi devido a limitação na representação do modelo digital de elevação e de processos hidrológicos internos à planície de inundação como infiltração conforme apontado pelos autores. No entanto, adicionamos a hipótese de que há também necessidade de se levar em conta as variações espaciais e temporais de rugosidade hidráulica na planície.

Segundo Coe et al. (2002) muitos dos modelos não capturam adequadamente a troca sazonal de água entre o rio principal e a planície de inundação, e esta pode ser uma das causas pelas quais os modelos tendem a subestimar a vazão de rios, nos quais a planície de inundação tem dimensões consideráveis em proporção aos canais. Os resultados do modelo de Coe et al. (2002) indicaram que algumas características hidrológicas básicas, como nível da água e vazão, eram bem simuladas, mas que o algoritmo de previsão da extensão de inundação não produzia resultados satisfatórios. Dentre as alterações feitas por Coe et al. (2008) na nova versão do modelo para melhor prever a dimensão da área inundada está a inclusão do efeito da fricção sobre a velocidade da água, uma melhor caracterização da morfologia da planície e o uso de imagens de satélite para forçar o limite das áreas inundáveis no processo de calibração dos modelos.

A remoção da floresta tende a aumentar a velocidade da água porque diminui a rugosidade hidráulica da superfície. Nas áreas de floresta, devido à elevada rugosidade hidráulica proporcionada pelos troncos, a velocidade de entrada da onda de inundação na planície tende a ser menor, favorecendo a subida mais lenta da água. As alterações de velocidade da água também provocam mudanças na morfologia (forma, conectividade, profundidade, granulometria dos sedimentos de fundo) e na limnologia (tempo de residência, disponibilidade de nutrientes, disponibilidade de luz na coluna de água, biodiversidade) como pode ser constatado nos resultados da literatura sobre o tema (Jarleva, 2002; Järvelä, 2004; Straastma, 2009 Vandijk et al. 2009).

Tendo em vista que a remoção da floresta afeta a rugosidade hidráulica de modo significativo, e que alterações dessa propriedade podem ter conseqüências sobre as propriedades da água dos lagos de várzea, o objetivo desse trabalho é estimar as mudanças no coeficiente de rugosidade hidráulica na planície de inundação do baixo Amazonas a partir da integração de informações derivadas de sensores remotos. Serão integrados mapas de cobertura da terra para representar a década de 1970 e 2000 derivados de imagens MSS e TM do satélite Landsat, dados SRTM para discriminar os níveis topográficos da planície (Whitmann et al. 2002, 2004) e dados publicados sobre coeficiente de rugosidade de diferentes tipos de cobertura (Werner et al. 2005).

2. A área de estudo

A área de estudo selecionada (Figura 1) corresponde à seção do rio Amazonas compreendida entre Parintins (AM) e Almeirim (PA) tendo em vista que estudos recentes de Renó (2010) indicaram que, naquele período, a cobertura florestal da várzea nessa região sofreu uma redução de 56% em decorrência da cultura da juta e do crescimento das atividades pecuárias, como alternativa de renda para a pesca.

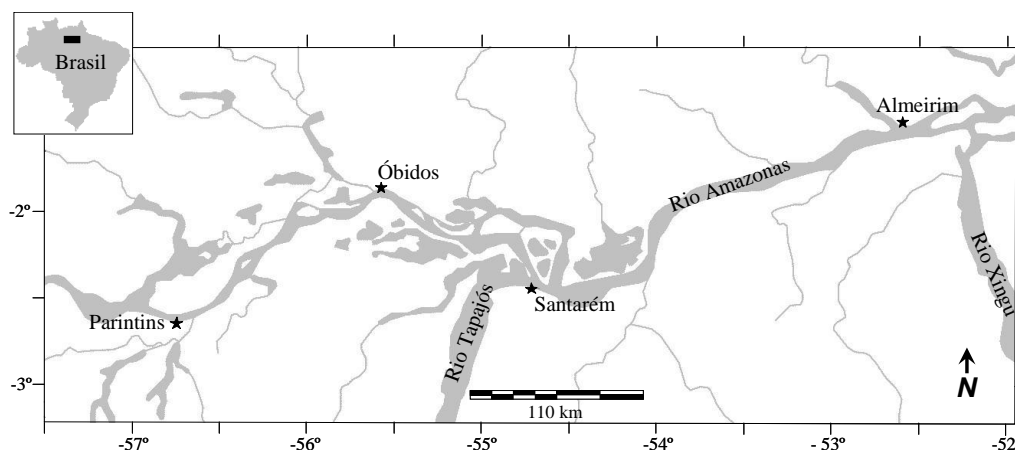


Figura 1 - Localização da região de estudo (Fonte: Renó, 2010)

Esta área foi estudada por Renó (2010) porque resultados de Hess et al. (2003) permitiram constatar que a cobertura dominante na calha do Amazonas/Solimões era de Floresta Inundável (53 %) em 1996, data das imagens SAR do satélite JERS utilizadas para mapear os tipos de cobertura da várzea. O mapa resultante indicava um grande contraste entre a cobertura vegetal à montante de Manaus e à jusante. À montante de Manaus, a cobertura Florestal atinge 100 % em alguns trechos, enquanto que à jusante dominam coberturas herbáceas e arbustivas. Em contraste com a região à montante de Manaus, que possui lagos em forma de canais e cobertura vegetal de várzea dominada por florestas inundáveis, a região entre Parintins e Almeirim se caracteriza pela presença de lagos de formatos arredondados e apenas 10 % da cobertura vegetal de várzea é constituída por florestas. Trata-se, portanto, de uma área em que a remoção da floresta de inundação no período de estudo está bem documentada localmente pelos trabalhos de vários autores (Bunker, 1982; Smith, 1999; Roosevelt, 2000; WinklerPrins, 2006; McGrath et al., 2006) e especialmente por Renó (2010).

3. Materiais e Métodos

A Figura 2 resume as principais etapas do processamento das informações para gerar a distribuição espacial de rugosidade hidráulica na várzea. Foram utilizados dados SRTM para classificar a várzea em alta e baixa conforme proposto por Wittmann et al. (2002). Tal discriminação da várzea em alta, inundável até 3m de profundidade, e baixa, inundável acima 3m de profundidade, levou em conta que a estrutura e a composição florística das florestas inundáveis refletem estágios sucessionais associados à duração e nível de inundação. A cota altimétrica de 11m foi verificada como sendo a cota altimétrica de máxima inundação para o trecho estudado, assim, a elevação de 8m foi usada como cota discriminante entre várzea alta e baixa. Como tanto o nível de inundação quanto a estrutura da floresta afetam o coeficiente de rugosidade hidráulica, essa diferenciação topográfica permite, teoricamente, uma melhor modelagem da resistência hidráulica à onda de inundação. Essa diferenciação altimétrica também atende à sugestão de Anderson et al. (2006), que propôs uma função que associa o coeficiente de rugosidade de Manning (n) ao nível de inundação e a altura das árvores. Segundo essa função, a rugosidade hidráulica varia com o nível de inundação sofrido pelas árvores, sendo máximo quando o nível atinge a base da floresta e mínimo quando a inundação ultrapassa o dossel. Para definir os níveis de inundação relativos à data das imagens utilizadas para o mapeamento da cobertura vegetal, foram utilizados dados de cota fornecidos pela agência nacional das águas (ANA, 2010). Foram também utilizados mapas de cobertura vegetal obtidos por Renó (2010) a partir do uso de imagens MSS e TM Landsat referentes aos anos de 1975/1981 e 2008 para representar a cobertura vegetal nas décadas de 1970 e 2000,

respectivamente. Esses mapas foram validados em campo e resultaram em um índice Kappa de 0,75 e 0,77 respectivamente.

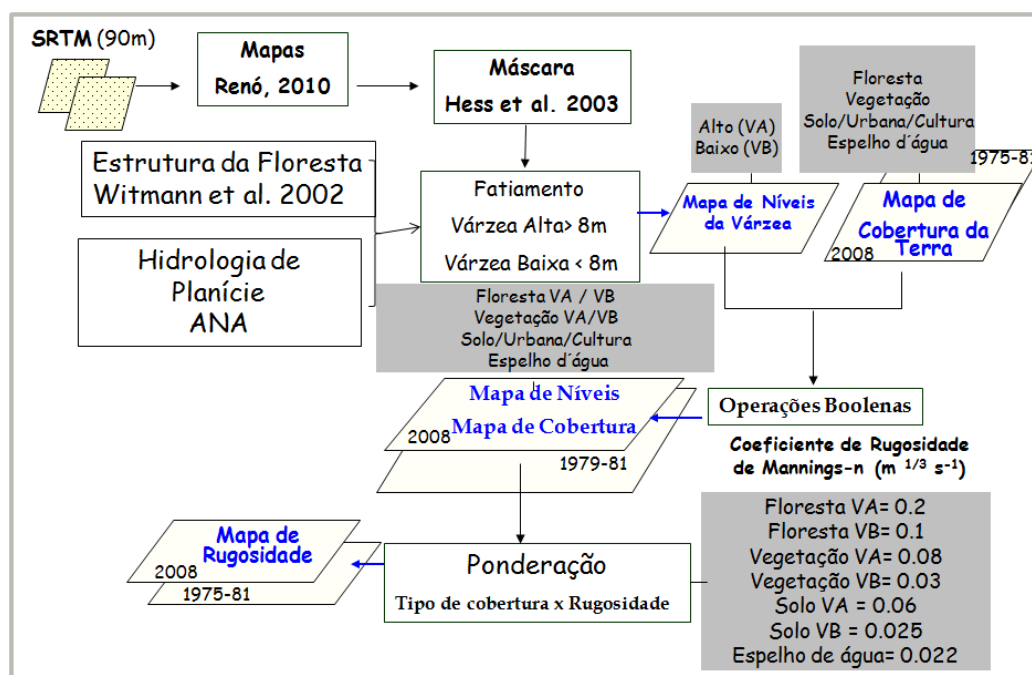


Figura 2 – Fluxograma das etapas de geração do mapa de rugosidade hidráulica

Para delimitar a região referente à área alagada foi utilizada a máscara de área alagada cujo método de elaboração encontra-se descrito em Hess et al. (2003). Finalmente, a atribuição de valores de rugosidade de cada classe de cobertura e tipo de várzea baseou-se em dados da literatura, segundo Werner et al. (2006) que atribui o coeficiente n de Maning a diferentes tipos de cobertura, gerando uma “look up table” que permite associar o uso da terra em cada pixel a um valor de rugosidade. A aplicação de operações booleanas permitiu combinar a informação altimétrica da várzea com a de cobertura, dando origem a seis classes distintas no tocante à exposição à inundação e ao potencial de fricção sobre o escoamento da água. Uma sétima classe foi criada (espelho de água) para representar os canais fluviais e os lagos. Para se avaliar a modificação do coeficiente de rugosidade hidráulica em função do desflorestamento da várzea ao longo dos últimos 30 anos, subtraiu-se pixel a pixel o coeficiente de rugosidade de 2008 daquele computado para 1975/1981, gerando-se um mapa de Perda de Rugosidade Hidráulica. O mapa foi então analisado e comparado com informações hidrológicas e dados de campo.

4. Resultados e Discussão

A Figura 3 mostra o resultado da classificação da área de várzea em **várzea baixa** e **várzea alta**. Embora os corpos d'água tenham sido diferenciados no tocante a sua posição topográfica na várzea alta e baixa, essa informação não foi utilizada para o cálculo da rugosidade hidráulica.

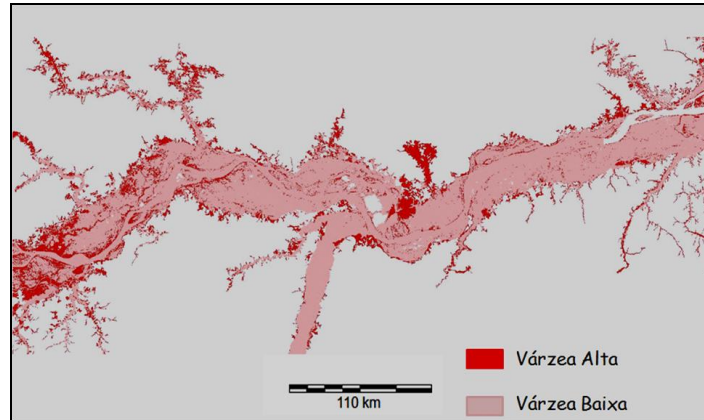


Figura 3 – Classificação da planície de inundação segundo o nível topográfico a partir de fatiamento de imagem SRTM.

A Figura 4 mostra o resultado do cruzamento entre as classes de uso e cobertura da várzea e as classes topográficas (várzea alta e várzea baixa). Esse mapa foi gerado para as duas décadas (1975/1981 e 2000).

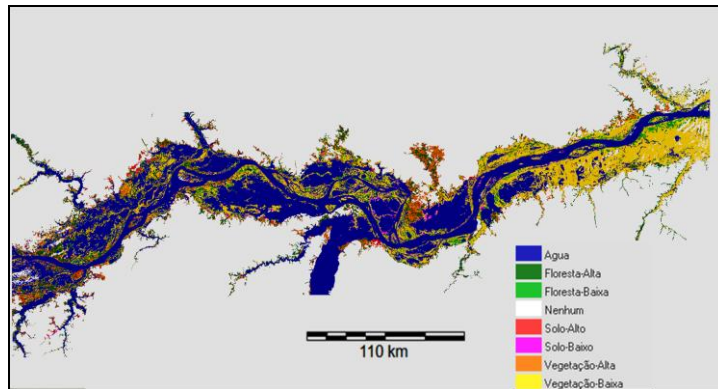


Figura 4 – Classificação da planície de inundação segundo os tipos de uso e cobertura derivados de Renó (2010) e as classes topográficas geradas a partir de dados SRTM.

A Figura 5 ilustra o processo de conversão das classes de uso, cobertura e altitude em distribuição de rugosidade a partir de dados tabelados obtidos na literatura por meio da ponderação de cada classe pelo respectivo coeficiente. Ao término desse processo foram obtidos dois mapas com a distribuição da rugosidade hidráulica em toda a área de estudo. A subtração dos mapas de rugosidade resultou no mapa de perda de rugosidade hidráulica conforme pode ser observado na Figura 6.

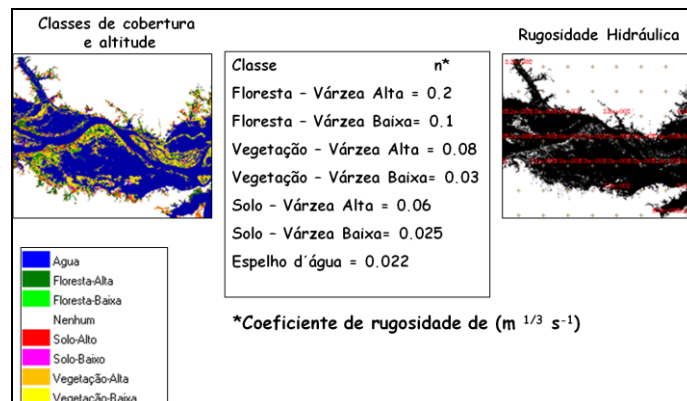


Figura 5 – Processo de ponderação das classes de cobertura e altitude pelo coeficiente de rugosidade de modo a gerar a distribuição espacial da rugosidade hidráulica da planície do baixo Amazonas.

A Figura 6 mostra o mapa de mudança de rugosidade hidráulica na várzea do baixo Amazonas entre as décadas de 1970 e 2000. De modo geral, houve perda de rugosidade hidráulica nessa região, associada à remoção da floresta inundável. A Tabela 1 permite quantificar as mudanças sofridas no período em termos da área ocupada pelas classes. Em termos relativos, a classe de maior representatividade espacial é a de áreas que não sofreram modificação no coeficiente de rugosidade. Isso se deve à adoção de um único índice de rugosidade para a classe **espelho de água** que se manteve relativamente constante nos dois mapas de cobertura vegetal de Renó (2010). Removendo-se do cômputo geral as áreas de rugosidade constante, verifica-se que 80 % da área de estudo sofreram redução da rugosidade hidráulica entre 1970 e 2000, pela conversão da floresta inundável em vegetação não-arbórea e pela conversão de vegetação não-arbórea em solo, área cultivada e área urbanizada

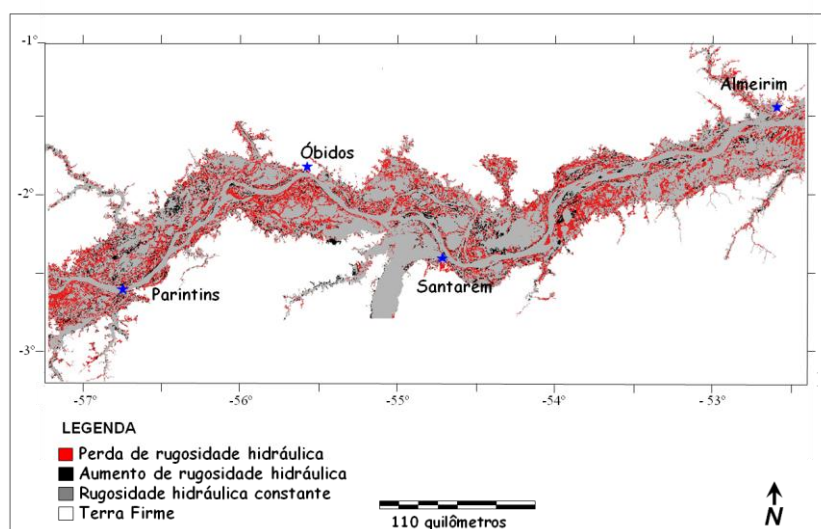


Figura 6 – Distribuição espacial das mudanças de rugosidade hidráulica no baixo Amazonas entre a década de 1970 e 2000.

Tabela 1 – Classes de rugosidade hidráulica e área ocupada por elas.

Classes	Área (km ²)
Perda de rugosidade hidráulica	7789
Aumento de rugosidade hidráulica	2041
Rugosidade hidráulica constante	20827
Total	30657

Apesar dos resultados parecerem coerentes não há como validá-los, pois não existem dados disponíveis. De modo a avaliar a influência da redução de rugosidade hidráulica sobre a hidrologia da várzea, realizou-se uma análise preliminar da variação na amplitude média mensal dos níveis de água na estação de Óbidos ao longo de três décadas. As amplitudes foram separadas em três classes (< 1 m; 1-1,9 m; > 2,9m), e calculou-se a frequência de ocorrência de cada intervalo de classe para a década de 1980, 1990 e 2000. A Figura 7 mostra o resultado dessa análise que evidencia uma redução sistemática da frequência de amplitudes médias mensais inferiores a 1m. A frequência na década de 1980 era de 80 % e caiu para 65 % na década de 2000. Por outro lado, a frequência de amplitudes médias mensais superiores a 2,9 m sofreu um aumento gradativo entre a década de 1980 e 2000, praticamente triplicando. O que isso significa? Significa que o sistema rio-planície está aumentando a variabilidade média mensal, ou seja, que o sistema responde mais rapidamente a entrada de água seja por

contribuição difusa ou concentrada. Com a diminuição da rugosidade hidráulica, a água passa a entrar e sair mais rapidamente no sistema, aumentando sua variabilidade, o que explica o aumento da frequência das amplitudes mais elevadas.

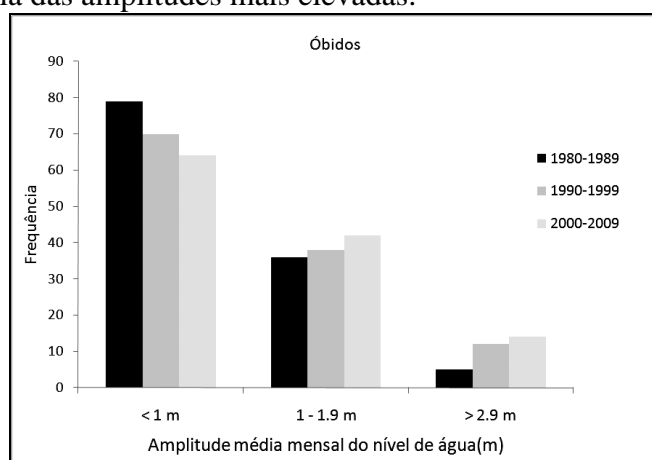


Figura 7 – Variação decadal da amplitude média mensal do nível da água na estação fluviométrica de Óbidos.

5. Conclusões

A análise dos resultados demonstra ser possível estimar as mudanças de rugosidade hidráulica na planície de inundação do baixo Amazonas a partir da integração de dados de várias fontes. Embora os resultados não sejam passíveis de validação pela falta de dados empíricos, a análise da variação da amplitude média mensal do nível da água na estação fluviométrica de Óbidos sugere que essa redução tem afetado o comportamento hidrológico da planície nas três últimas décadas. O desenvolvimento de modelos de inundação em escala adequada à várzea Amazônica, conforme demonstrado por Wilson et al. (2007), trás o potencial de uso da rugosidade hidráulica aqui caracterizada para aprofundar a análise das mudanças hidráulicas que a planície de inundação tem sofrido.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP (Processo 08/07537-1). Vivian Renó agradece ao CNPq pela Bolsa PCI (Processo 382071/2010-7), Conrado Rudorff agradece à CAPES (Processo 1705/07-5), e Evelyn Novo agradece ao CNPq (Processo 304929/2007-7 e Processo 550373/2010-1)

Referências Bibliográficas

- Agência Nacional da Água (ANA) – Dados hidrológicos <<http://hidroweb.ana.gov.br/>> acesso em maio junho de 2010.
- Anderson, B.G.; Rutherford, I.D.; Western A.W. An analysis of the influence of riparian vegetation on the propagation of flood waves. *Environmental Modelling & Software* 21:1290-1296, 2006.
- Bates; P.D. ; De Roo, A.P.J. simple raster-based model for flood inundation simulation *Journal of Hydrology* 236 :54–77, 2000.
- Bunker, S.G. 1982. Os programas de crédito e a desintegração não-intencional a das economias extrativas de exportação no Médio Amazonas do Pará. *Pesq. Plan. Econ.*, v. 12, n. 1, p. 231-60.
- Clack, V. The Use of the LISFLOOD-FP Flood Inundation Model to Assess Potential Future Flood Risk Scenarios at Varying Scales for a 10 Kilometre Reach of the River Avon, Hampshire. PhD Thesis, Kingston, University, 2004.
- Coe, M. T.; Costa, M.H.; Botta, A. ; Birkett, C. Long-term simulations of discharge and floods in the Amazon Basin. *Journal of Geophysical Research* ,v.107, D20, 2002

- Coe, M. T.; Costa, M.H.; Howard, E. A. Simulating the surface waters of the Amazon River basin: impacts of new river geomorphic and flow parameterizations. *Hydrol. Process.* 22, 2542–2553, 2008.
- Hess, L. L.; Melack, J. M.; Novo, E. M. L. M.; Barbosa, C. C.; Gastil, M. Dual-season mapping of wetland inundation and vegetation. *Remote Sensing of Environment*, v. 87, p. 404–428, 2003.
- Vandijk, A. I. J. M.; Noordwijk, M. V.; Calder, I. R.; Buijzeel, S. L. A.; Schellenkens, J.; Chappell, N. A. Forest–flood relation still tenuous – comment on ‘Global evidence that deforestation amplifies flood risk and severity in the developing world’ by C. J. A. Bradshaw, N. S. Sodi, K. S.-H. Peh and B. W. Brook. *Global Change Biology*, 15, 110–115, 2009.
- Järvelä, J. Flow resistance of flexible and stiff vegetation: a flume study with natural plants. *Journal of Hydrology* 269: 44–54, 2002
- Järvelä, J. Flow resistance in environmental channels: focus on vegetation. Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology. Department of Civil and Environmental Engineering. Helsinki University of Technology (Espoo, Finland), 2004.
- McGrath, D.G.; Almeida, O.T.; Merry, F.D. 2006. The Influence of Community Management Agreements on Household Economic Strategies: Cattle Grazing and Fishing Agreements on the Lower Amazon Floodplain. XI Biennial Global Conference of The International Association for the Study of Common Property (IASCP), June 19 – June 23, 2006, Bali, Indonesia.
- Renó, V.F. 2010. Avaliação do desflorestamento da várzea do baixo Amazonas com imagens Landsat obtidas em 1975/1981 e 2008. 123 p. (INPE-16728-TDI/1666). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2010.
- Sellin, R. H. J.; Bryant, T. B.; Loveless, J. H. An improved method for roughening floodplains on physical river models *Journal of Hydraulic Research* 41(1), 2003.
- Straatsma, M. 3D float tracking: in situ floodplain roughness estimation *Hydrol. Process.* 23: 201–212, 2009.
- Straatsma, M. W.; Warmink, J. J.; Middelkoopt, H. Two novel methods for field measurements of hydrodynamic density of floodplain vegetation using terrestrial laser scanning and digital parallel photography, *International Journal of Remote Sensing*, 29(5): 1595–1617, 2008.
- Straatsma, M. W.; Baptist, M.J. Floodplain roughness parameterization using airborne laser scanning and spectral remote sensing, *Remote Sensing of Environment* 112: 1062–1080, 2008.
- Werner, M.G.F.; Hunter, N.M.; Bates, P.D. Identifiability of distributed floodplain roughness values in flood extent estimation. *Journal of Hydrology* 314, 139–157, 2005.
- Wilson, M. D.; Atkinson, P. M. The use of remotely sensed land cover to derive floodplain friction coefficients for flood inundation modeling. *Hydrol. Process.* 21, 3576–3586, 2007.
- Wilson, M.; Bates, P.; Alsdorf, D.; Forsberg, B.; Horrit, M.; Melack, J.; Frappart, F.; Famiglietti, J. Modeling large-scale inundation of Amazonian seasonally flooded wetlands *Geophysical Research Letters*, Vol. 34, L15404, 6 PP., 2007.
- Winklerprins, A.M.G.A. 2006. Jute cultivation in the lower Amazon, 1940–1990: an ethnographic account from Santarém, Pará, Brazil. *Journal of Historical Geography*, v. 32, n. 4, p. 818–88.
- Wittmann, F.; Anhufo, D.; Junk, W.J. Tree species distribution and community structure of central Amazonian várzea forests by remote sensing techniques. *Journal of Tropical Ecology*. 18, 805–820, 2002.
- Wittmann, F.; Junk, W. J.; Piedade, M. T.F. The várzea forests in Amazonia: flooding and the highly dynamic geomorphology interact with natural forest succession. *Forest Ecology and Management* 196: 199–212, 2004.