

Revista Brasileira de Cartografia (2010) N° 63/4, p. 555-565
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

GERAÇÃO DE BASE DE DADOS ESPACIAIS PARA ESTUDOS DE DRENAGEM URBANA NA REGIÃO METROPOLITANA DE RECIFE, PERNAMBUCO

Generation of Spatial Data Base for Urban Drainage Studies in Metropolitan Region of Recife, PE

Valéria Camboim Góes¹ & José Almir Cirilo²

**¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB
Campus Cabedelo**

Rua Pastor José Alves de Oliveira, s/n, Centro, 58.310-000. Cabedelo, PB - Brasil
valgoes@ibest.com.br

²Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Centro de Tecnologia e Geociências - Departamento de Engenharia Civil - Laboratório de Hidráulica

Rua Acadêmico Hélio Ramos, s/n, Cidade Universitária, 50.740-530. Recife, PE - Brasil
almir.cirilo@gmail.com

*Recebido em 11 de Março de 2011/ Aceito em 22 de Abril de 2011
Received on March 11, 2011/ Accepted on April 22, 2011*

RESUMO

Os estudos de drenagem urbana devem considerar as constantes modificações no meio urbano. As informações obtidas a partir de imagens de satélite de alta resolução, modelos numéricos do terreno e mapas de uso e ocupação do solo podem ser integradas e manipuladas por meio de ferramentas de geoprocessamento para facilitar o planejamento e auxiliar na resolução de problemas do espaço urbano. Para a Região Metropolitana do Recife – RMR, que representa um complexo sistema de drenagem urbano, essas informações foram incorporadas ao modelo hidrológico-hidrodinâmico MIKE SHE/MIKE 11, com o objetivo de melhor representar a dinâmica de bacias urbanas a partir de informações mais refinadas.

Palavras chaves: Geoprocessamento, Planejamento, Drenagem Urbana.

ABSTRACT

Studies of urban drainage should consider the continuous changes in the urban environment. The information obtained from satellite images of high resolution, numerical models and maps of the land use can be integrated and manipulated via GIS tools to facilitate planning and help in solving problems of urban space. For the Metropolitan Region of Recife - RMR, which represents a complex urban drainage system, this information was incorporated into the hydrological-hydrodynamic model, MIKE SHE/MIKE 11, with the aim to better represent the dynamics of urban basins from more refined information.

Keywords: Geoprocessing, Planning, Urban Drainage.

1. INTRODUÇÃO

A integração entre o geoprocessamento e os modelos hidrológicos pode auxiliar no gerenciamento de vários problemas de drenagem urbana, seja na previsão e no controle das inundações, seja na definição das intervenções a serem implementadas para reduzir os impactos e de forma mais ampla para orientar o planejamento urbano, no que tange à ocupação do solo urbano de forma mais racional. O suporte do geoprocessamento é essencial para a quantificação de muitas variáveis e parâmetros necessários à aplicação dos modelos de simulação: delineamento de bacias hidrográficas e correspondentes redes de drenagem, áreas de seções de escoamento no leito maior dos rios, traçado, comprimento e perfis dos canais, fator de forma, tipologia e quantificação dos diferentes tipos de solo e do parcelamento do seu uso e ocupação, apenas para citar algumas aplicações possíveis.

Os modelos de simulação hidrológica e hidrodinâmica são ferramentas importantes na área de recursos hídricos, tanto para auxiliar o planejamento (por exemplo, como suporte para definir retenção do escoamento: construção de barragens, piscinões, ampliação da calha fluvial, relocação de edificações) como no apoio a ações emergenciais de defesa civil, modelando as áreas que podem ser alagadas em eventos de precipitações intensas.

Os modelos hidrológicos, quanto ao uso de informações espaciais, podem ser concentrados ou distribuídos. Os modelos concentrados usam parâmetros médios para representar as características espaciais, ao passo que os modelos do tipo distribuído detalham por meio de células uma melhor representação física da bacia hidrográfica. Consequentemente, a gama de informações espaciais requerida é muito mais ampla.

Com o objetivo de verificar o ganho de qualidade nos resultados obtidos por modelos hidrológicos utilizados para áreas urbanas, testou-se neste trabalho a aplicabilidade do modelo hidrológico-hidrodinâmico determinístico de base física distribuído MIKE SHE/MIKE 11 (DHI, 2011), aqui alimentado por informações cartográficas, informações extraídas de imagens de satélite e informações hidrológicas. A parte hidrológica desse modelo é baseada no SHE –

Systeme Hydrologique European (ABBOTT *et al.*, 1986). A formulação do modelo consiste principalmente em equações diferenciais que representam matematicamente os processos do ciclo hidrológico, tendo como resultado a avaliação do escoamento superficial e subterrâneo na bacia hidrográfica. O escoamento na calha fluvial, componente hidrodinâmico do sistema, é modelado por meio das equações de Saint-Venant, que representam matematicamente os processos de conservação da massa e da quantidade de movimento no rio ou canal (BAPTISTA *et al.*, 2003).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os produtos resultantes do processamento de imagens digitais permitem monitorar a evolução de mudanças ambientais e o impacto das atividades humanas sobre o meio ambiente. Especificamente, as imagens de satélite de alta resolução são amplamente utilizadas nos projetos que exigem um mapeamento mais detalhado da cobertura vegetal e uso da terra, ou seja, mapeamentos urbanos e rurais que exijam mais precisão dos dados e informações coletados.

Em áreas urbanas, é vasta a aplicação das imagens de satélite de alta resolução. Diversos tipos de degradação ambiental podem ser monitorados com o uso dessas ferramentas, como processos de erosão, desmatamentos, aterramento de várzeas e comprometimento de encostas, decorrentes da falta de controle do uso e ocupação do solo.

Centeno *et al.* (2003) apresentaram e discutiram uma metodologia para estimativa da porcentagem de áreas impermeabilizadas em bacias urbanas. A abordagem se baseou no uso de imagens de alta resolução (IKONOS), fotografias aéreas e a análise orientada a regiões como alternativa para a identificação de diferentes tipos de objetos numa cena urbana. A projeção horizontal dos objetos, como telhados, ruas, pátios e calçadas, foi estimada usando técnicas de segmentação de imagens e classificação fuzzy. Os resultados obtidos foram comparados com o mapeamento obtido por restituição fotogramétrica, mostrando que a segmentação orientada a objeto e a classificação fuzzy em imagens de alta resolução viabilizaram uma estimativa confiável do percentual de áreas permeáveis e impermeáveis na região coberta pela imagem.

Furtini *et al.* (2009) quantificaram as superfícies permeáveis e a sua correlação com a declividade do terreno, além da interferência desta interação na formação da malha urbana na sub-bacia hidrográfica do Córrego Centenário, na cidade de Lavras-MG. O resultado da classificação da permeabilidade superficial na imagem de alta resolução (ortofotografias digitais, com resolução espacial de 10 cm, bandas 1, 2 e 3) mostrou que 61% do uso do solo na sub-bacia encontrava-se em áreas impermeabilizadas (telhados, asfalto, áreas cimentadas, áreas edificadas, etc), comprometendo a drenagem da água pluvial nos corpos receptores.

Ribeiro (2009) criou um modelo de conhecimento no software InterIMAGE utilizando regras de decisão, para separar áreas permeáveis e impermeáveis no município de São José dos Campos, São Paulo, Brasil. Foram utilizadas imagens do sensor QuickBird-II de 0,60 metros de resolução espacial. Os resultados foram bons e demonstraram que a estratégia de análise do InterIMAGE é elegível para classificar a cobertura do solo em áreas urbanas.

Oliveira *et al.* (2004) utilizaram uma imagem de satélite de alta resolução para atualizar informações e caracterizar dados espaciais visando o planejamento e a gestão do ordenamento e da ocupação do território urbano. As informações obtidas por meio da interpretação da imagem possibilitaram a quantificação dos impactos causados pelo homem no meio físico em regiões propícias a inundações e deslizamentos. A região de estudo compreendeu a bacia hidrográfica do rio Itacorubi, em Florianópolis – SC, que possui área aproximada de 23 km². Utilizando uma imagem do satélite QuickBird e por meio de técnicas de interpretação e processamento de produtos digitais foi possível obter mapas temáticos de interesse ao planejamento urbano e definir um prognóstico da ocupação espacial com vista à gestão ambiental, permitindo avaliações especializadas das zonas eventualmente inundáveis compreendidas na bacia hidrográfica do rio Itacorubi.

Em Moraes *et al.* (2007), foi utilizada uma imagem do satélite QuickBird para auxiliar na estimativa do coeficiente de escoamento superficial, ou coeficiente de “runoff” – C, em uma área de intensa urbanização pertencente à bacia do córrego Botafogo, na cidade de Goiânia, em Goiás. Procurou-se o desenvolvimento de uma metodologia

para a obtenção de valores de coeficientes de deflúvio “C” mais precisos e que refletissem melhor o estado de antropização da bacia estudada. Com auxílio de ferramentas de geoprocessamento foi realizada a delimitação automática da microbacia urbana na cidade de Goiânia-GO, com cerca de 2 km² e, em seguida, procedeu-se à classificação da imagem, identificando-se classes de interesse com diferentes influências no escoamento superficial das águas precipitadas. Os resultados apresentaram valores do coeficiente “C” com acréscimo de cerca de 30% em relação aos valores utilizados pela Prefeitura Municipal de Goiânia, para o dimensionamento de galerias de águas pluviais, que se encontravam, em sua maioria, subdimensionadas, mostrando a eficiência da metodologia, mesmo em se tratando de bacia urbana de pequeno porte e fortemente ocupada.

Yuhara *et al.* (2007) utilizaram a imagem do satélite de alta resolução espacial IKONOS II para identificar as áreas que necessitavam de maiores intervenções na infra-estrutura e no saneamento na bacia hidrográfica do ribeirão Cocaia, situada na área de proteção aos mananciais do reservatório Billings, ao sul do município de São Paulo. A bacia possui uma área de aproximadamente 19,29 km². As informações obtidas por meio da interpretação da imagem associadas às informações socioeconômicas da população subsidiaram políticas socioambientais na área.

Assim, a utilização das imagens multiespectrais de alta resolução auxilia na identificação e monitoramento de impactos ambientais e no planejamento de ações em áreas urbanas e permite aliar três aspectos fundamentais: informação detalhada, rapidez na aquisição das informações e custo cada vez mais baixo para obtenção das imagens.

No tocante às experiências de utilização do modelo hidrológico-hidrodinâmico MIKE SHE/MIKE 11, destacam-se tanto a modelagem contínua quanto a modelagem de eventos, sendo essa última de extrema importância em áreas urbanas que sofrem com os problemas das enchentes.

Butts *et al.* (2005) aplicaram o MIKE SHE à bacia hidrográfica do rio Odra na Polônia, uma das bacias contempladas no projeto FLOODRELIEF, que envolve vários países da Europa. Esse projeto desenvolveu novas metodologias para previsão de inundações,

priorizando a capacidade e a exatidão dos modelos e permitiu que os resultados dos estudos fossem acessíveis aos gestores públicos tomadores de decisão e pessoas que vivem em áreas de risco. O rio Odra sofre frequentemente com inundações, sendo citadas com destaque no trabalho as ocorridas em 1997 e 2001. O modelo foi calibrado com sucesso, incluindo as inundações.

Nielsen (2006) mostra uma aplicação do MIKE SHE em uma área urbana da região sudeste da Ásia. O modelo foi capaz de simular a inundação devido aos efeitos combinados de chuva e maré. Foi simulado todo o sistema de drenagem, considerando diferentes taxas de infiltração e as áreas pavimentadas.

Diversos trabalhos têm utilizado a tecnologia LIDAR- “LIght Detection And Ranging”, para obtenção de modelos numéricos de elevação do terreno em trechos de rios e de cidades inundáveis (MARKS & BATES, 2000; COBBY *et al.*, 2003; HAILE & RIENTJES, 2005; GIBSON *et al.*, 2010). Pesquisas em andamento no Departamento de Engenharia Civil da UFPE utilizam resultados de levantamento em área de 1100km² ao longo de rios no território pernambucano, realizados com a tecnologia LIDAR, na geração de cenários de inundação destinados às ações de defesa civil no estado.

Os resultados apresentados neste artigo são parte da Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco (GÓES, 2009).

3. ÁREA DE ESTUDO

A RMR possui uma área de 2.785 km², correspondente a 2,83% da área total do Estado de Pernambuco, onde residiam em 2000, segundo o IBGE, 3.339.616 habitantes, representando 42,12% da população estadual e uma densidade demográfica de 1.199,14 hab/km².

A RMR é cortada por vasta rede de rios e canais, com destaque para as bacias dos rios Beberibe, Capibaribe e Tejipiú, nos trechos de maior urbanização e inseridos na região de planície do Recife. Desde o início da colonização, a ocupação territorial do Recife foi marcada predominantemente pela conquista de espaços ocupados pela águas, por meio da prática de aterros. O sistema de drenagem da região é composto, além dos cursos dos três rios

citados, de uma série de cursos d'água secundários ou canais, afluentes ou interligados à drenagem principal. O baixo gradiente hidráulico, característico de toda a planície, impõe a mais séria restrição na busca de soluções para o sistema de drenagem.

Alcoforado & Cirilo (2001) apresentaram modelagem do processo de propagação de cheias e inundação na bacia do rio Capibaribe, utilizando modelos hidrológicos concentrados e espalhamento da inundação na cidade de Recife sobre bases de dados espaciais geradas com o suporte de MNT montado pelos autores a partir de digitalização de curvas de nível decorrentes de levantamentos de 1974 e imagens dos satélites LANDSAT e SPOT.

No presente trabalho a modelagem hidrológica distribuída foi aplicada aos principais rios e canais da bacia hidrográfica do Rio Beberibe, que é uma bacia com uma área de pequena expressão (81 km², porém densamente ocupada, com cerca de 550.000 habitantes, o que representa uma alta densidade demográfica de 6.781 hab/km². Nessa bacia, encontra-se a maior concentração de áreas de baixa renda da RMR, requerendo projetos e intervenções nas áreas de saneamento, urbanismo e redução de risco de enchentes (CIDADES/PE, 2008)

Apesar de este estudo estar focado na bacia hidrográfica do Rio Beberibe, a geração de informações para uma área mais abrangente baseou-se na necessidade de montagem de um banco de dados mais completo e que pudesse ser utilizado em outros estudos nesta região, pela recorrência das inundações. A Figura 1 apresenta as bacias hidrográficas estudadas.

O procedimento de delimitação dos contornos das bacias hidrográficas e a geração do mapa a partir da classificação multiespectral da imagem de satélite serão descritos a seguir e apresentam-se como os primeiros resultados deste trabalho.

4. METODOLOGIA

Os dados cartográficos disponíveis para a RMR foram agregados e manipulados em ambiente SIG e compreendem as seguintes informações:

Altimetria (Fonte: FIDEM – Ano do Vôo: 1974, edição 1975, Escala: 1:2.000, com curvas de nível de 2 em 2 metros);

Hidrografia (Fonte: FIDEM – 2003, Escala: 1:1.000);

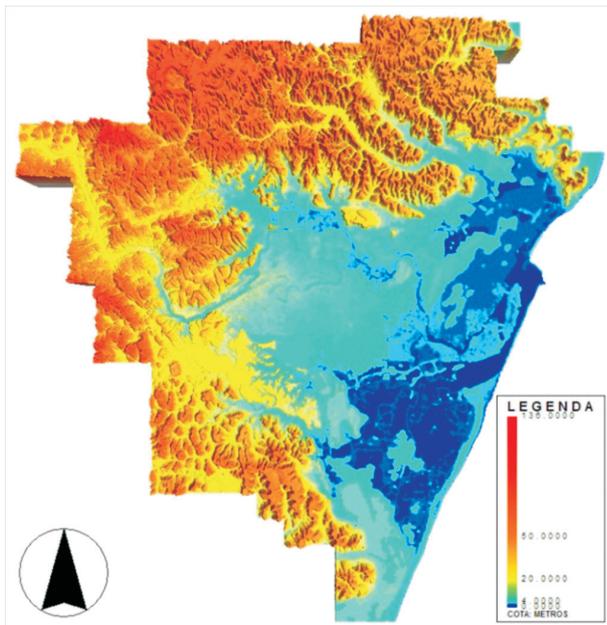


Fig. 2 - Modelo Numérico de Terreno (MNT) do terreno da região de estudo.

que gerou o MNT, então é necessário que essa depressão seja preenchida de modo a permitir a continuidade do fluxo para jusante. Esse processo automatizado consiste em soerguer a depressão até o menor valor que permita a continuação do fluxo a jusante.

Essa delimitação automática das bacias hidrográficas foi efetuada pelo programa CRWR-Prepro (AHRENS *et al.*, 1998) desenvolvido pelo Centro para Pesquisa em Recursos Hídricos da Universidade do Texas em Austin e outras organizações. A Figura 1 representa as bacias hidrográficas geradas automaticamente.

A classificação multiespectral de imagens de satélite é o processo de extração de informação em imagens para reconhecer padrões e objetos homogêneos com o objetivo de mapear as áreas da superfície terrestre. A saída de um processo de classificação é um mapa temático; onde um grande número de níveis de cinza nas diversas bandas espectrais é transformado em um pequeno número de classes em uma única imagem. De forma geral, as técnicas de classificação de imagens atuam sobre uma determinada cena considerando suas várias bandas espectrais ou utilizam imagens resultantes de processamentos (por ex. razão de banda, modelo de mistura, etc.).

Os níveis de cinza para cada pixel nas bandas selecionadas são “comparados” e os pixels com níveis de cinza mais similares, segundo uma regra de decisão, tendem a ser classificados em uma mesma categoria.

Neste trabalho, na classificação da imagem QuickBird (Figura 3) foi utilizado o software ENVI, no qual procedeu-se a classificação supervisionada da imagem utilizando o classificador por pixel supervisionado Maxver (Máxima Verossimilhança). Ele pressupõe que os níveis de cinza de cada classe seguem uma distribuição normal multivariada. Esse classificador avalia as probabilidades que um determinado pixel tem de pertencer às classes identificadas e o designa àquela cuja probabilidade é maior. O critério de decisão incorpora o conceito de limiar de decisão.

Apesar de existirem novas técnicas para classificação de imagens de alta resolução, como a classificação orientada a objeto, que utiliza vários parâmetros para realizar a classificação, a escolha da classificação supervisionada baseou-se no bom conhecimento da área de estudo e na possibilidade de interação do analista no processo.

Para a classificação da imagem foram realizadas as seguintes etapas:

1 - Seleção das classes a serem identificadas na imagem (água, vegetação, solo exposto, área impermeável e nuvem);

2 - Escolha do conjunto de amostras (conjunto de pixels) representativo de cada uma das classes. Essas amostras formam um conjunto de amostras de treinamento e foram definidas usando dados de campo, fotos aéreas ou ainda a interpretação visual da imagem a ser classificada;

3 - Utilização do conjunto de treinamento para estimar os parâmetros usados pelo algoritmo de classificação Maxver, etapa essa conhecida como treinamento;

4 - geração do mapa temático com as classes de interesse (Figura 4), definidas anteriormente.

O banco de dados contendo os contornos das bacias hidrográficas obtidos de forma automática, o modelo numérico de elevação do terreno e o mapa gerado a partir da classificação multiespectral da imagem de satélite foram incorporados como dados de entrada ao modelo hidrológico-hidrodinâmico MIKE SHE/MIKE 11, que foi aplicado para previsão de vazão nas principais bacias hidrográficas da RMR.

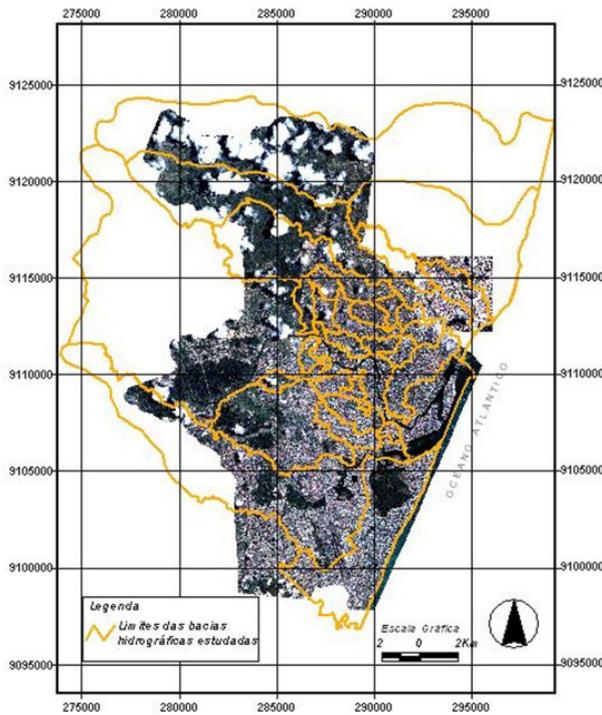


Fig. 3 - Imagem do Satélite QuickBird com os limites das bacias hidrográficas da área de estudo.

A geração do modelo numérico de elevação do terreno a partir de cartas altimétricas na escala 1:2.000 foi o primeiro passo para construção da base de dados, tendo o MNT permitido o traçado automático das bacias hidrográficas e sendo incorporado espacialmente ao modelo para o cálculo das direções de fluxo. Como limitação, registra-se o fato de que a altimetria foi gerada a partir de curvas de nível produzidas há mais de 30 anos, por não haver nenhum levantamento mais recente que cubra a região estudada (a base de dados do SRTM90, da NASA, não tem resolução suficiente na escala de estudo). Apesar de a ocupação urbana ter modificado de forma sensível partes da área, acredita-se que os padrões de escoamento em escala macro foram mantidos. Essa limitação, porém, configura-se em uma fonte de incerteza para o modelo hidrológico.

Mesmo com essa limitação, somente a partir das informações do MNT, da hidrografia e da imagem de satélite de alta resolução foi possível dirimir algumas dúvidas durante o processo de atualização da hidrografia e traçado das bacias hidrográficas, principalmente, quanto ao caminamento do fluxo e os divisores topográficos em vários pontos da bacia hidrográfica do rio Beberibe, caracterizada pela alta densidade de rios e canais.

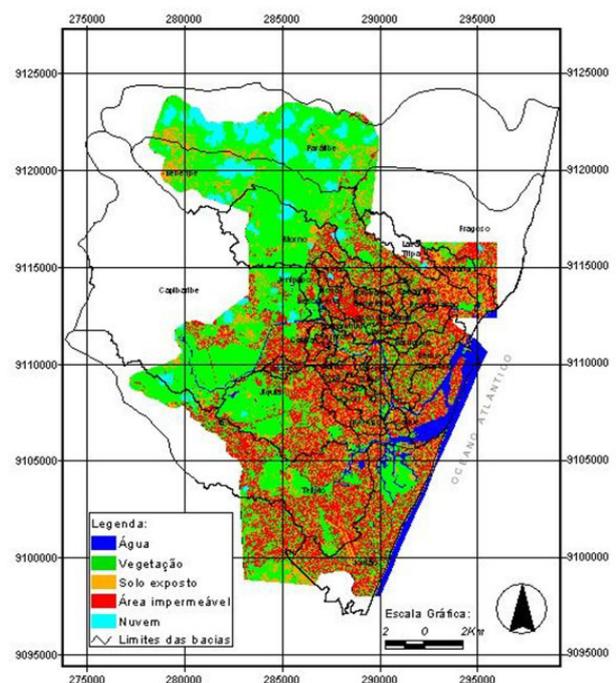


Fig. 4 - Mapa resultante da classificação da imagem de satélite com os limites das bacias hidrográficas estudadas.

A classificação da imagem de satélite permitiu além da geração do mapa temático (Figura 4), a extração das áreas de cada classe (água, vegetação, solo exposto, área impermeável e nuvem) por bacia hidrográfica (Tabela 1).

O resultado da classificação da imagem mostrou que na maioria das 23 bacias hidrográficas que foram cobertas pela imagem de satélite a percentagem de áreas impermeáveis com relação à área da bacia ficou em torno de 50%, sendo que a bacia hidrográfica menos urbanizada é a bacia do rio Morno (H^o 16%) e a que possui a maior percentagem de áreas impermeáveis é a bacia do canal Nova Descoberta (H^o 63%).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O mapa de áreas permeáveis e impermeáveis, obtido da classificação da imagem de satélite, foi incorporado ao modelo hidrológico com um grid de 10m x 10m que representa uma discretização bastante detalhada e, também, permitiu compatibilizar as informações sem gerar entraves computacionais para rodar o modelo hidrológico-hidrodinâmico MIKE SHE/MIKE 11.

Com a incorporação desses dados de impermeabilização por bacia hidrográfica na modelagem hidrológica, pretendeu-se melhor

Tabela 1 – Área de cada classe temática por bacia hidrográfica.

Bacia Hidrográfica	Área Total (km ²)	Área coberta pela imagem (km ²)	Água (km ²)	Vegetação (km ²)	Solo exposto (km ²)	Nuvem (km ²)	Área impermeável (km ²)	Área impermeável (%)
Areia	1,8140	1,8140	0,0250	0,4679	0,2746	0,0476	0,9988	55,0627
Barriguda	1,5566	1,5566	0,0810	0,482	0,234	0,0000	0,759	48,7880
**Beberibe	40,3897	32,8004	0,2161	19,0218	5,9775	2,5062	5,0789	15,4841
Bomba do Hemetério	1,8635	1,8635	0,0360	0,5234	0,2728	0,0000	1,0312	55,3389
Caiara	1,2658	1,2658	0,1563	0,2680	0,2058	0,0000	0,6356	50,2166
*Capibaribe	110,3240	49,8703	5,6721	24,7962	5,7621	1,3312	12,3087	24,6814
Cavouco	2,1576	2,1576	0,0750	0,5949	0,2323	0,0482	1,2071	55,9478
Coque	0,8127	0,8127	0,0316	0,1587	0,2349	0,0000	0,3875	47,6762
Derby-Tacaruna	6,8034	6,8034	0,7802	1,3014	1,1349	0,0000	3,5869	52,7222
*Fragoso	32,7020	6,0801	0,0155	2,3771	1,6119	0,1166	1,9590	32,2204
IPA-ABC	3,2157	3,2157	0,1595	0,6247	0,5640	0,0000	1,8676	58,0768
Jacaré	1,3914	1,3914	0,0720	0,5397	0,1444	0,0000	0,6353	45,6580
Jenipapo	2,1994	2,1994	0,0818	1,4236	0,2101	0,0000	0,4839	22,0017
Jiquiá	20,7719	20,7719	0,2227	10,8373	2,7807	0,0665	6,8647	33,0478
*Jordão	25,9571	22,7710	1,2078	8,0043	4,0008	0,0000	9,5581	41,9748
*Lava Tripa	4,8197	1,9522	0,0043	0,4527	0,4989	0,1274	0,8689	44,5104
*Malária	5,1729	5,1684	0,0740	1,1311	1,9354	0,0000	2,0279	39,2359
*Morno	19,9325	17,2766	0,1211	11,6712	1,6507	1,0343	2,7993	16,2030
Nova Descoberta	1,8644	1,8644	0,1233	0,3494	0,1715	0,0385	1,1816	63,3788
*Paratibe	83,0134	31,0471	0,0000	19,4317	2,8888	8,2826	0,4440	1,4300
Parnamirim-Serpro	1,6657	1,6657	0,0801	0,5816	0,2137	0,0106	0,7798	46,8143
Prado-Sport	3,4156	3,4156	0,1471	0,9293	0,6654	0,0000	1,6738	49,0055
Regeneração	1,3746	1,3746	0,0420	0,3251	0,3006	0,0000	0,7069	51,4239
Santa Rosa	1,7232	1,7232	0,0581	0,3475	0,2660	0,0000	1,0515	61,0210
São Sebastião	1,3082	1,3082	0,0500	0,4749	0,1938	0,0000	0,6395	48,8844
*Teipiú	51,9020	34,9159	1,1400	14,1212	4,9508	0,4251	14,2787	40,8946
Valença-Zumbi	1,2662	1,2662	0,0403	0,3040	0,2072	0,0000	0,7148	56,4520
Vasco da Gama	5,3665	5,3665	0,2277	1,4217	0,7244	0,0000	2,9928	55,7674
Total	436,0497	263,7184	10,9406	122,9624	38,308	14,0348	77,5218	29,3956

Obs: * Essas bacias não foram totalmente cobertas pela imagem
 ** O valor da área da bacia do rio Beberibe está subtraído do valor da área das bacias dos afluentes.

representar o uso do solo nas bacias e diminuir as incertezas nos resultados das simulações.

Foram realizadas as simulações de três eventos representativos de chuva compreendendo o período de maio a agosto de 2007. O maior pico de chuva, da ordem de 30 mm, foi registrado no 1º evento de 2007. Os outros eventos apresentaram valores de pico inferiores, da ordem de 15 mm para o 2º evento e 20 mm para o 3º evento. Comparando-se os eventos ocorridos em 2007, verifica-se que este é um ano representativo, tendo como base três eventos históricos que ocorreram na região: a enchente de 1975 e as tormentas de 2000 e 2006 (ALCOFORADO, 2006).

Nos gráficos das Figuras 5, 6, e 7 são apresentados os resultados da simulação do 1º evento para as seções do Riacho Lava Tripa, Canal Vasco da Gama e Rio Morno, que são importantes

afluentes do Rio Beberibe e sofrem constantemente com o problema das enchentes.

Nesses gráficos a precipitação está representada no eixo auxiliar superior. A linha com quadrados representa os valores de vazão obtidos pela curva-chave e a linha com círculos representa os valores simulados pelo MIKE SHE/MIKE 11.

A curva-chave é uma equação ajustada aos dados de medição de vazão. Para gerar uma curva-chave representativa é necessário medir a vazão do rio em situações de vazões baixas, médias e altas. Foram realizadas 10 campanhas de medição de velocidade, calculadas as vazões e obtidas as curvas-chave. Esses valores obtidos pela curva-chave serviram como base de comparação para os resultados da simulação no modelo MIKE SHE/MIKE 11.

Verifica-se pelos resultados da simulação que houve um bom ajuste com relação à forma dos

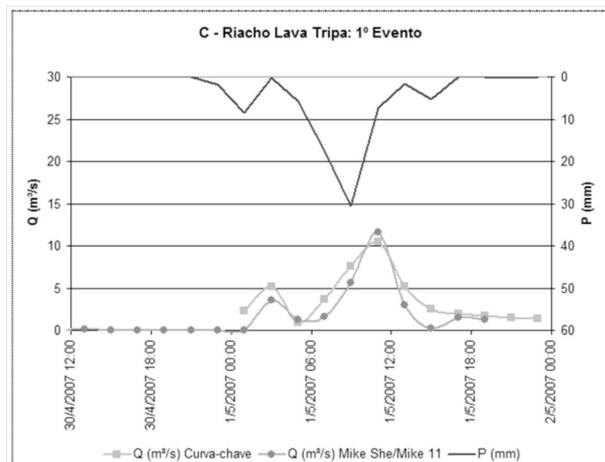


Fig. 5 – Vazão simulada e vazão medida no 1º evento na seção do Riacho Lava Tripa.

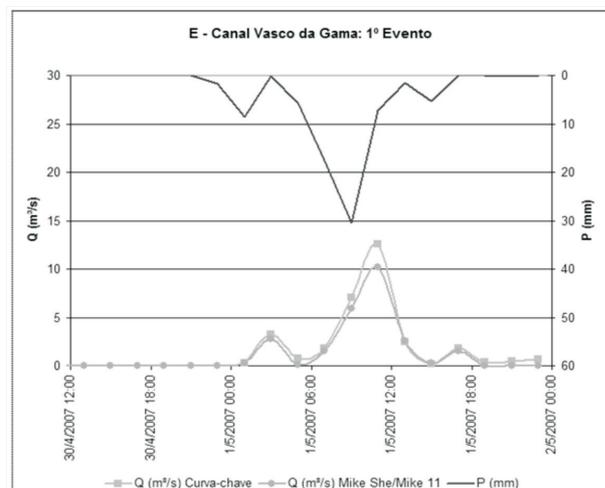


Fig. 6 - Vazão simulada e vazão medida no 1º evento na seção do Canal Vasco da Gama.

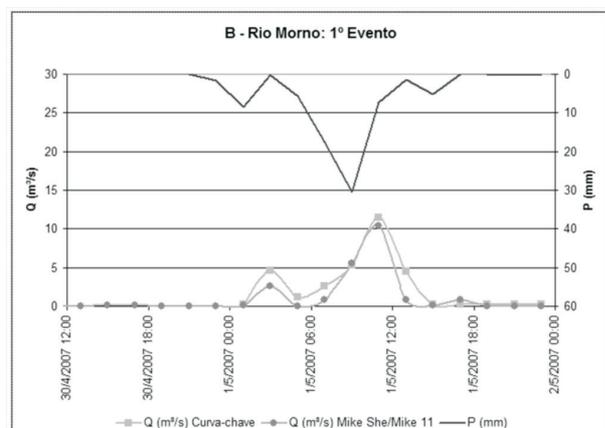


Fig. 7 - Vazão simulada e vazão medida no 1º evento na seção do Rio Morno.

hidrogramas e aos valores de pico. As áreas contribuintes para as seções do Riacho Lava-Tripa (4,03 km²) e do Canal Vasco da Gama (2,78 km²), apesar de serem bem menores do que a área contribuinte para a seção do Rio Morno (21,17 km²), aproximadamente sete vezes menor, geraram valores bem próximos da vazão de pico, em torno de 10 m³/s (Figuras 5, 6 e 7), o que pode ser explicado pela alta taxa de impermeabilização das duas primeiras bacias.

Os resultados satisfatórios obtidos requerem, contudo, a continuação do processo de avaliação dos modelos utilizados ao longo de novos períodos de monitoramento dos rios e canais que foram objeto desse estudo durante outros eventos de chuva intensa. A segurança no uso de um modelo de simulação decorre acima de tudo da sua validação durante diversos eventos.

6. CONCLUSÕES

Os resultados da simulação da vazão para os eventos de chuva mostraram que os modelos utilizados são capazes de representar adequadamente as vazões nos canais estudados. A utilização de modelos de simulação distribuídos como o aqui apresentado permite a avaliação dos processos de inundação em cada corpo d'água que compõe a rede de rios e canais, diferente do uso de modelos concentrados, para os quais a sub-bacia é tão somente elemento de contribuição do rio principal. O ganho esperado na melhor representação dos processos físicos requer, porém, maior esforço na agregação de dados e informações espaciais, como discutido neste artigo.

Os modelos utilizados, pela integração com as ferramentas de GIS, possibilitam ao usuário flexibilidade para simular os impactos decorrentes de cenários na mudança do uso e ocupação do solo, seja para análise de tendência de degradação do ambiente urbano estabelecido, seja para planificar as mudanças necessárias para a sua recuperação. As áreas aqui estudadas estão em processo de implantação de medidas para a revitalização da bacia hidrográfica, tanto no que diz respeito à capacidade de escoamento da calha fluvial quanto nos aspectos sanitários (coleta e tratamento dos esgotos), além de medidas para desocupação das margens do rio Beberibe e afluentes. Uma próxima etapa de continuação dos estudos aqui apresentados será a avaliação dos cenários de mudança,

agregando porém bases de dados espaciais mais aprimoradas, provavelmente a serem geradas com o suporte da tecnologia LIDAR.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Prefeitura da Cidade de Recife e à FIDEM – Fundação de Desenvolvimento da Região Metropolitana do Recife, pela cessão de imagens e mapas. Agradecem à Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos de Pernambuco pelo suporte às ações de monitoramento de rios e canais, bem como aos jovens das comunidades envolvidas, que participaram do projeto registrando o nível d'água em campanhas durante os eventos observados. Agradecem igualmente ao CNPq e à CAPES, pelo suporte à pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBOTT, M.B.; BATHURST, J.C.; CUNGE, J.A.; P.E. O'CONNELL; RASMUSSEN J. An Introduction to the European Hydrological System-Systeme Hydrologique European 'SHE' 2: Structure of a Physically-Based, Distributed Modeling System. ASCE **Journal of Hydrologic Engineer**, 87: p.61-77. 1986.
- AHRENS, S.; OLIVERA, F.; MAIDMENT, D.R. Exercise 2: Digital Watershed Delineation and CRWR-PrePro. CE394K.3 GIS in **Water Resources class at University of Texas**. 1998. Disponível em <<http://www.cwrw.utexas.edu/gis/gishyd98/class/prepro/webfiles/prepro.htm>>. Acesso em 01 jul. 2009, 10:00.
- ALCOFORADO, R.G.; CIRILO, J. A. Sistema de Suporte à Decisão para Análise, Previsão e Controle de Inundações. RBRH - **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Volume 6 n.4 Out/Dez 2001, 133-153, 2001.
- ALCOFORADO, R.G. **Simulação Hidráulico-Hidrológica do Escoamento em Redes Complexas de Rios Urbanos: Suporte de Informações Espaciais de Alta Resolução**. 150p. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Centro de Tecnologia e Geociências. Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 2006.
- BAPTISTA, M. B.; COELHO, M. M. L. P.; CIRILO, J. A. (orgs.). **Hidráulica Aplicada**. Porto Alegre: Ed. ABRH. 619p. 2001.
- BUTTS, M.B.; OVERGAARD, J.; VIAENE, P.; DUBICKI, A.; STROŃSKA, K.; SZALINSKA, W.; LEWANDOWSKI, A.; OLSZEWSKI, T.; KOLERSKI, T. Flexible Process-Based Hydrological Modelling Framework for Flood Forecasting – MIKE SHE. Proc. International Conference “Innovation, advances and implementation of flood forecasting technology”, Tromsø, Norway. **Anais**. 10p. 2005.
- CENTENO, J.A.S.; ANTUNES, A.F.B.; TREVIZAN, S.; CORREA, F. Mapeamento de áreas permeáveis usando uma metodologia orientada a regiões e imagens de alta resolução. **Revista Brasileira de Cartografia**, Curitiba, v. 55, n. 1, p. 48-56. 2003.
- COBBY, D. M., MASON, D. C., MATTHEW S. HORRITT, M. S., BATES, P.D.; Two-dimensional hydraulic flood modelling using a finite-element mesh decomposed according to vegetation and topographic features derived from airborne scanning laser altimetry. **Hydrological Process**. 17, 1979–2000. 2003.
- COSTA, W.D.; SANTOS, A.C.; COSTA FILHO, W.D. O Controle Estrutural na Formação dos Aquíferos na Planície do Recife. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 8. **Anais**. Recife: ABAS. 543p. il. p.38 – 43. 1994.
- Graham, D; Jacobsen, T. MIKE SHE Code Verification and Validation Manual. DHI – **Danish Hydraulic Institute**. Denmark. 125p. 2001.
- FURTINI, M.B.; FERREIRA, E.; SAMPAIO, F.M.T. Evolução urbana na caracterização das superfícies impermeáveis. **Anais do XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, Natal - RN. INPE, p. 691-698. 2009.
- GIBSON, S., NYGAARD, C., SCLAFANI, P; Assessing Flooding Risk and Impact due to System Sediment. 2nd Joint Federal Interagency Conference. **Anais**. Las Vegas, NV, June 27 - July 1, 9p. 2010
- GÓES, V.C. **Simulação hidrológico-hidrodinâmica integrada ao geoprocessamento para avaliação da macrodrenagem em centros urbanos**. 152p. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Centro de Tecnologia e Geociências. Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 2009.

- HAILE, A. T., RIENTJES, T.H.M.; Effects of Lidar Dem Resolution in Flood Modelling: a Model Sensitive Study for the City of Tegucigalpa, Honduras.
- Proceedings of the ISPRS Workshop “**Laser scanning 2005**” September 12-14. Enschede, the Netherlands. p.168 – 173. 2005.
- MARKS K, BATES P.D. 2000. Integration of high-resolution topographic data with floodplain flow models. **Hydrological Processes** 14: 2109–2122, 2000.
- MATHER, P.M. **Computer processing of remotely-sensed images: an introduction**. Chichester: John Wiley & Sons, 1999. 292p. 1999.
- MORAES, G.A.; MENEZES FILHO, F.C.M.; ARAÚJO, J.V.G.; COSTA, A.R. Estimativa do Coeficiente de Escoamento Superficial “C” utilizando Sensoriamento Remoto em Imagem de Alta Resolução. **Anais** do 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Belo Horizonte – MG, Brasil. 2007.
- NIELSEN, C. The Application of Mike She to Floodplain Inundation and Urban Drainage Assessment in South East Asia. 4th Asia-Pacific DHI Software Conference. **Anais**. Shanghai. 4p. 2006.
- OLIVEIRA, F.H.; PINTO, J.F.; WOSNY, G.C.; DAL SANTO, M.A. Utilização de Geotecnologias para Avaliação do Risco Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Itacorubi – Florianópolis/SC. **Anais** do Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais, 1. **Anais**. Florianópolis: GEDN/UFSC, 2004. p. 212-223. (CD-ROM). 2004.
- PCR – PREFEITURA DA CIDADE DO RECIFE. **Cadastro de Canais da Cidade do Recife**. Recife - PE, 168p. 2000.
- RIBEIRO, B.M.G. Extração de superfícies impermeáveis a partir de imagens QuickBird aplicando classificação orientada a objeto. **Anais** do 2º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Corumbá, p.259-269, 2009.
- SECTMA/PE. - Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente do Estado de Pernambuco. **Plano Estadual de Recursos Hídricos – PERH/PE**. Recife-PE. 1998.
- U.S.ARMY CORPS OF ENGINEERS. **HEC-RAS River Analysis System – Hydraulic Reference Manual** – Version 3.0. Davis. 2001. Disponível em <<http://www.hec.usace.army.mil/>>. Acesso em 01 jul. 2009, 10:00.
- YUHARA, C.H.; LUCHIARI, A.; SILVA, D.A. Identificação das Unidades Residenciais Intra-Urbanas da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Cocaia - Área de Proteção aos Mananciais da Represa Billings, SP – utilizando Dados Orbitais de Alta Resolução Espacial. **Anais** do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Florianópolis – SC, Brasil. INPE, p. 695-702. 2007.