

# INTEGRAÇÃO DO SIG, HEC/HMS E HEC/RAS NO MAPEAMENTO DE ÁREA DE INUNDAÇÃO URBANA: APLICAÇÃO À BACIA DO RIO GRANJEIRO-CE

Samuellson Lopes CABRAL<sup>1</sup>, José Nilson B. CAMPOS<sup>2</sup>, Cleiton da Silva SILVEIRA<sup>3</sup>,  
Francisco Alberto de Assis TEIXEIRA<sup>2</sup>

- (1) Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. Estrada Doutor Altino Bondesan, 500. CEP 12247-016. São José dos Campos, SP. Endereço eletrônico: samuellson.cabral@cemaden.gov.br.
- (2) Universidade Federal do Ceará. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Campus do Pici, S/N. CEP 60451-970. Fortaleza, CE. Endereço eletrônico: jnbcampos@gmail.com.
- (3) Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira. Campus de Redenção. Av. da Abolição, Centro, CEP 62790-000. Redenção, CE. Endereço eletrônico: cleiton.silveira@unilab.edu.br

- Introdução
- Revisão de Literatura
- Materiais e Métodos
  - Área de estudo
  - Dados das chuvas diárias
  - Estimativa da chuva de período de retorno de 100 anos
  - Modelagem hidrológica com o HMS
  - Modelagem hidráulica e SIG
- Resultados e Discussões
  - A chuva de frequência centenária
  - As áreas de inundação
- Considerações finais
  - Referências bibliográficas

**RESUMO** - O artigo apresenta uma aplicação integrada de modelos hidrológico, hidráulico e Sistemas de Informações Geográficas (SIG) para delimitar áreas inundadas por uma chuva centenária no município do Crato, no Estado do Ceará. Os programas computacionais empregados foram: o Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) para a modelagem hidrológica; o Hydrologic Engineering Center-River Analysis System (HEC-RAS) para a modelagem hidráulica da superfície de inundação; e o HEC-GeoRAS para elaborar o mapeamento. Os resultados mostraram que parte substancial da população urbana da cidade do Crato é afetada por inundações ocasionadas por uma chuva de frequência centenária de 194 mm, com sete horas de duração que resulta em um pico de cheias de  $336 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , afetando aproximadamente 19% da área urbana do município do Crato, ocasionada pela cheia do Rio Granjeiro.

**Palavras chave:** enchente urbana, zona de inundação, SIG

**ABSTRACT** - The paper presents a case study integrating hydrological and hydraulic models with geographic information systems (GIS) to delimit flooded area caused by a rain of 100 years return period in the city of Crato, in the State of Ceará. The computational tools employed were the Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) for hydrological modeling; the Hydrologic Engineering Center-River Analysis System (HEC-RAS) for hydraulic modeling and the HEC-GeoRAS for the geographic information System (GIS). The results showed that 19% of the urban area affected by flood of the river Granjeiro, occasioned by a precipitation of 194 mm in 7:0 and with peak flow equal to  $336 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

**Keywords:** urban flooding, mapping flood, GIS

## INTRODUÇÃO

A frequência de inundações tem crescido em diversas partes do Brasil e do mundo, como consequência de impactos antrópicos ou de mudanças climáticas, afetando diretamente a intensidade das chuvas e seus escoamentos gerados (Mendes & Mediondo, 2007; Lambert et al., 2008; Grimm, 2011; Min et al., 2011). Muitos autores têm contribuído na formação de conhecimentos das precipitações intensas, utilizando modernas técnicas estatísticas (Ben-

Zvi, 2009; Damé et al., 2010; Santos et al., 2010; Aragão et al., 2013).

A busca de soluções para os problemas de enchentes urbanas, que afetam a qualidade de vida das populações, não pode prescindir de conhecimentos técnicos e científicos que combinem a hidrologia urbana e a hidráulica, associadas ao geoprocessamento. As inundações são problemas recorrentes em várias cidades brasileiras, as quais, em áreas

densamente ocupadas, provocam prejuízos consideráveis e, em muitos casos, resultam em perdas de vidas humanas (Suleiman & Barbassa, 2005).

O risco de inundação é uma função da lâmina média da lâmina de água escoada em uma certa área e da quantidade de pessoas vulneráveis às enchentes. Quanto maiores a lâmina de água escoada e o número de pessoas atingidas, maior o risco (Webster et al., 2004; USGS, 2007; Webster, 2010;).

Segundo Oliveira et al., (2010), o mapeamento das áreas suscetíveis às inundações é um recurso muito importante para a leitura e compreensão das enchentes, o qual, se bem empregado, pode minimizar os impactos decorrentes. Outra ferramenta importante são os sistemas de alerta de cheias, que associam modelos meteorológicos, hidrológicos e hidráulicos para antecipar o conhecimento sobre as ondas de cheias e reduzir os impactos desses eventos. Por isso, considera-se de grande importância para o

planejamento urbano, a modelagem e a simulação desses eventos, que ocorrem em canais de drenagem naturais ou artificiais, assim como a análise das interações com as planícies adjacentes (Ribeiro & Lima, 2011).

Vários autores, Oliveira et al., (2010); Ribeiro e Lima, (2011); Oliveira e Guasselli, (2011);, Gichamo et al., (2012); Martin et al., (2012); Haghizadeh et al., (2012); Abushandi & Merkel; (2013); utilizaram modelos hidrológicos, hidráulicos e Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para a determinação de manchas de inundação em rios e canais urbanos, para propiciar ações dos órgãos responsáveis em reduzir os prejuízos das populações ribeirinhas.

Esse artigo apresenta um estudo de caso de aplicação integrada dos programas HEC-HMS, HEC-RAS e Geo-RAS na determinação das áreas inundadas da bacia do Rio Granjeiro no município do Crato no Ceará, para uma cheia ocasionada pela chuva centenária na cidade do Crato.

## REVISÃO DE LITERATURA

Sistemas de Informações Geográficas (SIG) têm sido utilizados com sucesso em mapeamentos de áreas vulneráveis a inundações e enchentes avaliando seus impactos (Dawod et al., 2014; Youssef et al., 2010; Fernández & Lutz, 2010).

A integração entre modelos hidrológicos e/ou hidráulicos a Sistema de Informação Geográfica vem crescendo significativamente nos últimos anos, principalmente em mapeamentos de áreas de inundação, seja ela em áreas urbanas ou rurais, em virtude principalmente do potencial que essa ferramenta apresenta na integração de dados de tipos e formatos diferentes.

Vários estudos acerca da integração dessas ferramentas vêm sendo publicado por autores no Brasil e no mundo. Kneb et al., (2005), utilizaram modelo hidrológico (HEC-HMS) e hidráulico (HEC-RAS) integrado a SIG na bacia hidrológica do rio San Antônio, na região central do Texas-EUA, para um evento hidrológico.

Cabral et al., (2014), utilizaram informações de modelos hidrológicos, hidráulicos e SIG, no mapeamento de áreas inundáveis na parte

média da bacia hidrográfica do rio Acaraú, no Estado do Ceará, evidenciando áreas susceptíveis e um mapeamento satisfatório, quando comparado com as marcas de cheias de inundação dos municípios.

Oliveira et al., (2010), utilizaram dados de sensoriamento remoto aninhado a técnicas de SIG, na espacialização das áreas de inundação da bacia hidrográfica do rio Caí no Rio Grande do Sul, mostrando um potencial da metodologia na região do estudo. Já Robaina et al.,(2013) em seu trabalho utilizando dados oriundos de sensoriamento remoto e SIGs, evidenciaram regiões propícias a inundações na área urbana de Alegrete-RS, influenciada pelo rio Ibirapuitã, onde os autores identificaram áreas susceptíveis a inundações e alagamentos em vários bairros do município.

Siddayao et al., (2015), aplicaram um modelo hidráulico aninhado e SIG na cidade de Tuguegarao nas Filipinas, e concluíram que as ferramentas utilizadas tem potencial na identificação de áreas propícias a inundações, e que essa integração pode gerar mapas que poderão ser usados por órgãos de planejamento e partes interessadas a fim de mitigar possíveis

efeitos das inundações assim como ordenar os tipos de usos do solo na região.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Apresenta-se nessa seção uma breve descrição da área de estudo e dos dados utilizados na pesquisa. Discorre-se também sobre os métodos aplicados para o mapeamento das áreas de inundação decorrentes da máxima chuva com TR = 100 anos.

### Área de estudo

A bacia hidrográfica do Rio Granjeiro, afluente do Rio Salgado, no município do Crato, situado na Região Metropolitana do Cariri (Figura 1), localiza-se no extremo sul do Estado do Ceará, a aproximadamente 550 km de Fortaleza. A bacia tem 18 km<sup>2</sup> de área com altitude entre 400 m e 950 m. O Rio Granjeiro tem 7 km de extensão, com declividade de 0,0141 m/m. O Granjeiro atravessa a cidade do Crato e provoca frequentes inundações na área urbana.

Segundo a FUNCEME (2014), na região, as chuvas são distribuídas, principalmente, entre a pré-estação e a estação chuvosa. As chuvas que

ocorrem em dezembro e janeiro são em geral chamadas de chuvas de pré-estação. Essas chuvas são causadas, basicamente, por frentes frias que vêm do Sul e Sudeste do Brasil, que afetam as condições atmosféricas do Nordeste, com eventuais formações de vórtices ciclônicos. Por sua vez, a denominada estação chuvosa, que ocorre de fevereiro a maio, é decorrente do posicionamento mais ao sul da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). A pluviosidade média na região é de 1000 mm, dos quais 23% ocorrem na pré-estação e 62% na estação chuvosa.

### Dados de chuvas diárias

Os dados pluviométricos da estação de Crato II, utilizados nesse estudo, foram obtidos do banco de dados da FUNCEME, disponível em <http://www.funceme.br>. A Tabela 1 apresenta as informações da referida estação pluviométrica.

**Tabela 1.** Característica do posto pluviométrico de Crato II

Código	Início	Fim	Posto	Município	Latitude	Longitude
739006	1912	2012	Crato II	Crato	-7°13'59	-39°24'00

A Tabela 2 apresenta estatística descritiva das precipitações diárias, com valores de precipitações máximos e mínimos, média, desvio padrão, assimetria e coeficiente de

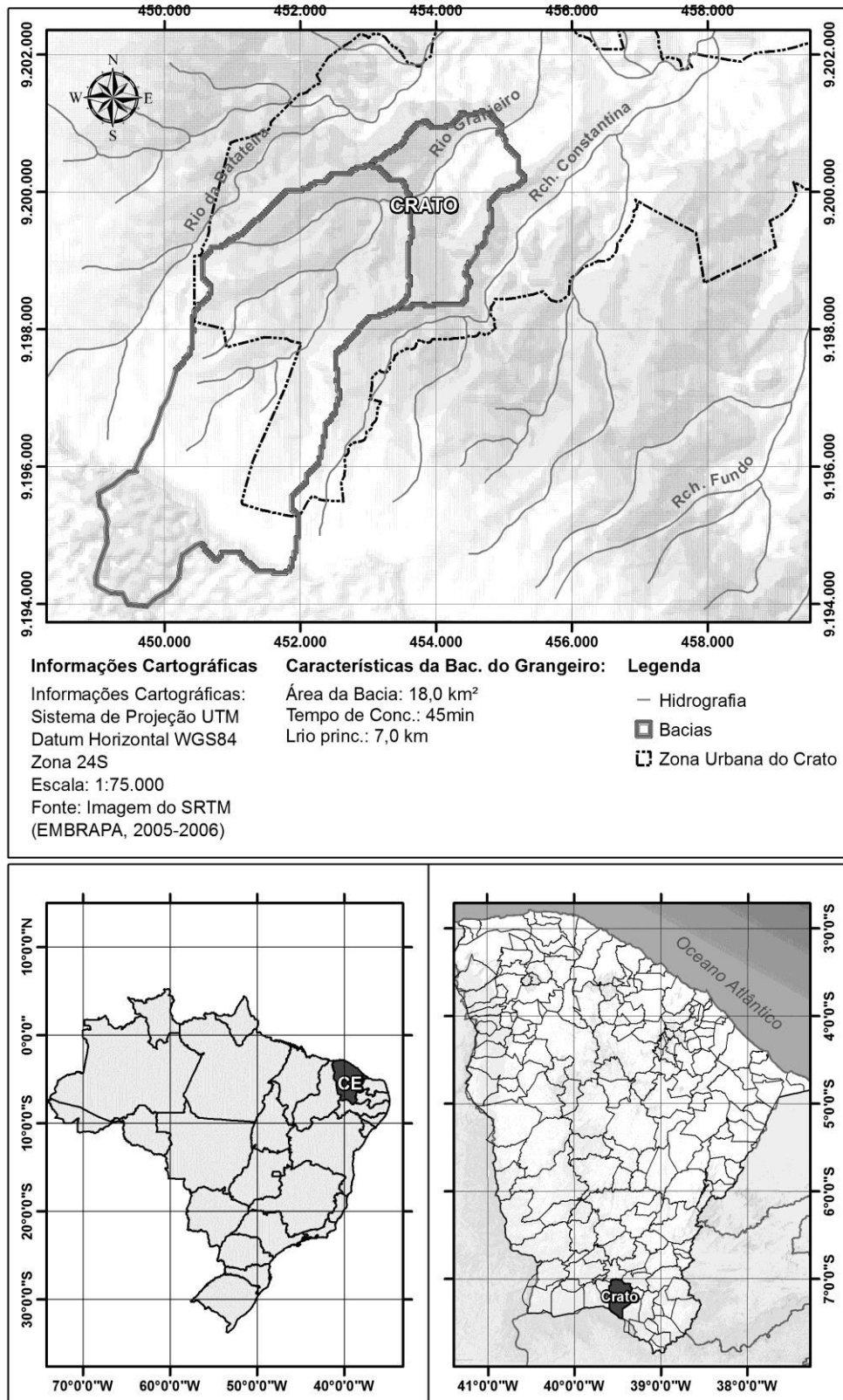
variação. A Figura 2 mostra as precipitações máximas diárias anuais no período de 1912 a 2012.

**Tabela 2.** Estatística do posto pluviométrico utilizado no estudo

Amostra (anos)	Máximo (mm)	Mínimo (mm)	Média (mm)	Desvio Padrão	Assimetria	CV
100	162	4	89,2	27,4	0,29	0,31

Observe-se que não se dispõe de registros de chuvas intensas de distribuição infradiária. Assim, optou-se por distribuir as chuvas pelo método sintético dos blocos alternados, conforme descrito por Campos (2009). Esse

método admite que a maior quantidade de precipitação no incremento de tempo considerado,  $\Delta t$ , ocorre sensivelmente a meio da duração do acontecimento pluviométrico.



**Figura 1.** Localização da área de estudo.

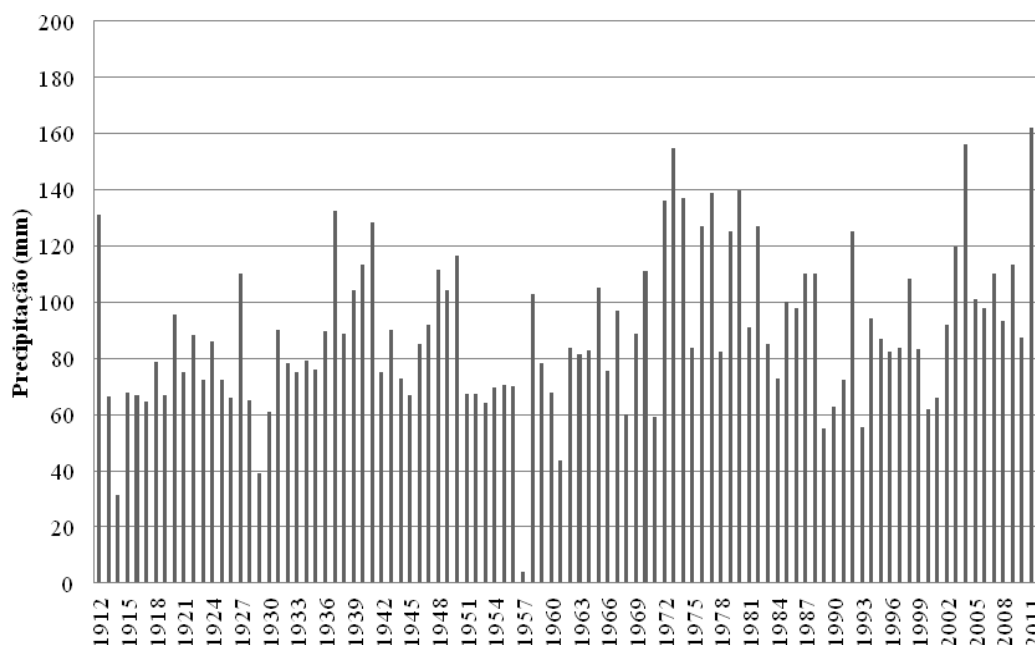


Figura 2. Precipitações diárias máximas anuais em Crato

### Estimativa da chuva de período de retorno de 100 anos

Foi testada a aderência da série observada de precipitações máximas para a bacia do Rio Granjeiro, utilizando as funções de distribuição Normal, Log-Normal, Gumbel, Exponencial, Pearson III e Log-Pearson III.

Notou-se que todas as funções passaram no teste do qui-quadrado, com exceção da distribuição Log-Normal. Em virtude dessa

análise usou-se neste trabalho a função de distribuição de Gumbel, por esta ter apresentado o melhor ajuste entre as funções de distribuição.

Na distribuição de Gumbel, a função de probabilidade acumulada ( $F$ ) é a mais utilizada em razão de sua simplicidade. A função é dada pela Eq.1:

$$F(y) = 1 - e^{-e^y} \Rightarrow y = \ln(-\ln(1 - F(y))) \quad (1)$$

sendo:

$y$  : variável reduzida de Gumbel.

O valor de  $y$  é calculado pela Eq.2:

$$y_i = \alpha(x_i - \beta) \quad (2)$$

sendo:

$\alpha$ : parâmetro de concentração,

$\beta$ : parâmetro da distribuição da Gumbel.

Os valores de  $\alpha$  e  $\beta$  são estimados pelo método dos momentos pelas Eqs. 3 e 4.

$$\alpha = \frac{1,285}{\sigma} \quad (3)$$

$$\beta = \mu - 0,450\sigma \quad (4)$$

sendo:

$\mu$ : precipitação média (mm),

$\sigma$ : desvio padrão.

### Modelagem hidrológica com o HMS

Para estimar as vazões geradas pela chuva centenária, utilizou-se o programa HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System). Trata-se de um programa internacionalmente reconhecido por suas capacidades computacionais em Engenharia Hidrológica.

As áreas de contribuição foram calculadas utilizando-se a base cartográfica da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos (COGERH) do Ceará e dados do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Para o hietograma, utilizou-se o método dos blocos alternados. Na determinação da precipitação efetiva, aplicou-se o método da *Curve Number* (CN), desenvolvido pelo Natural Resources Conservation Service (NRCS).

O valor de CN responde pela maior parte das características das bacias hidrográficas produtoras de escoamento, tais como tipo de solo, uso da terra, condição hidrológica e condição antecedente de umidade. (MISHRA & SINGH, 2004).

Para estimar a precipitação efetiva, aplicou-se a Eq.5:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \text{ para } P > I_a \text{ e } 0 \text{ nos demais casos}$$

(5)

sendo:

$P_e$ : chuva efetiva (mm)

P: precipitação total (mm)

$I_a$ : abstração inicial (mm)

S: máximo potencial de retenção do solo (mm)

Para  $I_a$  adotou-se o valor de 0,2S, conforme recomendado pelo NRCS. Assim, a equação 5 pode ser reescrita na forma da Eq.6:

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}$$

(6)

Sendo:

S obtido pela Eq.7:

$$S=25400/CN-254 \quad (7)$$

O parâmetro CN está relacionado ao tipo de solo, ao tipo de cobertura vegetal e às condições de umidade antecedentes. Nesse estudo utilizou-se condição antecedente de umidade média para um solo tipo B com cobertura vegetal tipo: urbano, área vegetada e mata ciliar. Na estimativa do CN, foram utilizadas imagens aéreas do município, combinadas com imagens do Google Earth. Destaca-se, que o valor do número CN foi estimado a partir dos valores da tabela determinada pelo NRCS, conforme o tipo de solo da área de estudo.

Para obter o hidrograma da cheia a partir do hietograma da chuva, aplicou-se o método do Hidrograma Unitário Adimensional do NRCS, seguindo a proposta de Ebrahimian et al., 2012. O método tem como parâmetro o tempo de retardo ( $T_{lag}$ ). O valor de  $T_{lag}$  é obtido pela Eq.8:

$$T_{lag} = 0.6T_c \quad (8)$$

sendo:

$T_c$ : tempo de concentração (min)

Para cálculo, o  $T_c$  é estimado pela Equação de Kirpich, Eq.9:

$$T_c = 0.0078x \left( \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \right) \quad (9)$$

sendo:

L: comprimento do rio (km)

S: declividade do rio em %.

A Tabela 3 apresenta alguns parâmetros físicos e hidráulicos da bacia estudada, tal como: área, valor do CN, comprimento do talvegue, tempo de retardo (*lag time*), tempo de concentração e declividade média do rio.

**Tabela 3.** Informações físicas e hidráulicas da bacia do Rio Granjeiro

Bacia	Área (km <sup>2</sup> )	CN	L (Km)	Lag Tim (h)	Tc (h)	S (m/m)
Granjeiro	18,0	77,0	7,0	0,45	0,79	0,033

### Modelagem hidráulica e SIG

Para a simulação da inundação na área de estudo, foi utilizado o programa *Hydrologic*

*Engineering Center - River Analysis System* (HEC-RAS), desenvolvido pelo Corpo de Engenharia do Exército dos EUA.

As vazões máximas obtidas na modelagem hidrológica para uma precipitação com TR = 100 anos, assim como os elementos hidráulicos (rede de drenagem, seções transversais e limites da calha) foram inseridas como dados de entrada no modelo HEC-RAS. Diante da limitação de dados na escala horária, adotou-se o regime de escoamento permanente. Assim, o valor obtido refere-se à área inundada na cheia máxima provocada pelo evento de chuva simulado no estudo.

O valor do coeficiente de rugosidade de Manning (n) foi selecionado por meio de imagens do Google Earth<sup>®</sup>, georreferenciada e datadas de 25 de janeiro de 2009. Para o escoamento na calha do rio, adotou-se  $n = 0,40$  como valor inicial e, para escoamento na planície de inundação, em ambas as margens, tomou-se  $n = 0,35$ .

As seções transversais ao longo do rio foram espaçadas de um quilômetro nos trechos fora da zona urbana e de 500 metros ao longo da área urbana. Esse espaçamento mais detalhado na zona urbana foi escolhido visando um melhor detalhamento das possíveis áreas inundáveis, ao contrário dos trechos fora da zona urbana.

O software HEC-GeoRAS também desenvolvido pelo *US Army Corps of Engineers* consiste numa extensão para o SIG ArcGIS, e foi desenvolvido para criar e processar informações geo-espaciais para utilização conjunta com o software HEC-RAS, possibilitando gerar os dados requeridos para a modelagem hidráulica em canais de drenagem.

Nesta etapa foi utilizado o software HEC-GeoRAS, instalado no SIG ArcGIS, o qual possibilitou elaborar o conjunto de dados requeridos para a simulação hidráulica.

Inicialmente foram gerados arquivos digitais (*shapefile*), através da ferramenta de criação de *Layers* disponível no HEC-GeoRAS. Estes arquivos foram delimitados utilizando uma base de dados digitais disponibilizados pela COGERH. Em seguida foram obtidas outras informações exigidas pelo modelo, referentes a topologia dos arquivos e a extensão total de cada curso d'água, sendo todas as informações armazenadas na forma tabular no SIG ArcGIS. A delimitação da calha principal foi realizada para distinguir o canal principal das planícies de inundação, definindo, dessa forma, o leito menor de cada curso d'água. Foi utilizado como guia para a delimitação deste elemento o modelo sombreado do terreno obtido a partir do MDE. Desse modo foi possível identificar visualmente os detalhes topográficos das calhas fluviais de interesse. Foram delimitadas as Linhas de Fluxo de cada curso d'água considerando o fluxo no talvegue do canal e o fluxo sobre o leito maior ao longo das margens, e consistiram em linhas indicando a direção do escoamento nestes locais. As seções transversais consistiram nos principais elementos para a simulação hidráulica, pois a partir delas foram extraídas as cotas de elevação provenientes do MDE para a geração dos perfis em cada seção do canal, e também para computar as informações hidrológicas de entrada para a posterior simulação no software HEC-RAS.

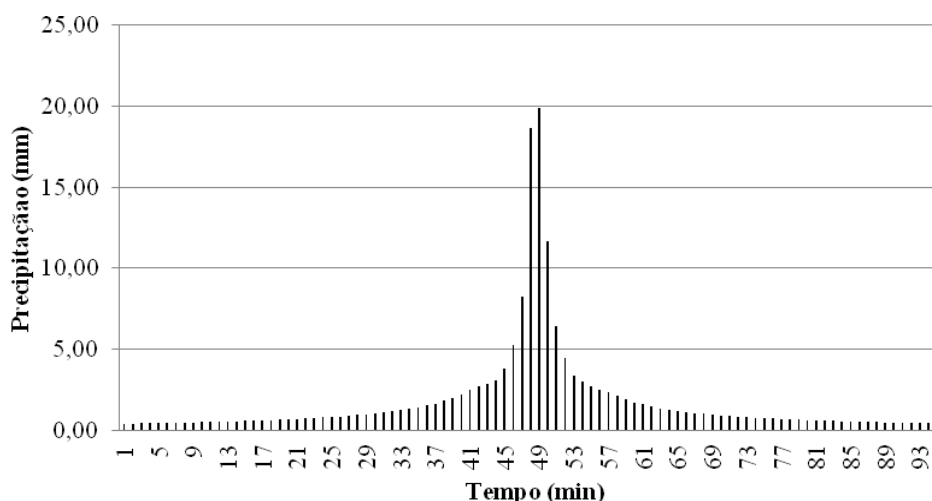
Após o cálculo dos perfis da superfície da água, os resultados foram exportados para o formato *shapefile*. Os níveis da água em cada seção foram sobrepostos ao *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) para estimar a altura das cheias e as áreas de inundação.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### A chuva de frequência centenária

Feita a análise estatística do posto pluviométrico inserido na bacia do Rio Granjeiro, testadas as funções de distribuição de probabilidade e realizados testes de aderência, verificou-se que a precipitação máxima foi de 194 mm, com tempo de retorno

de 100 anos e duração de aproximadamente 7 horas. A Figura 3 mostra o hietograma de projeto. A chuva de projeto estimada pelo HEC-HMS mostrou-se concentrada nos primeiros 85 minutos, apresentando precipitação intensa na bacia do rio Granjeiro.



**Figura 3.** Hietograma de projeto da área de estudo

A Tabela 4 mostra a estimativa do pico da vazão no rio Granjeiro, mostrando que o pico do evento teve vazão da ordem de  $335 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . A

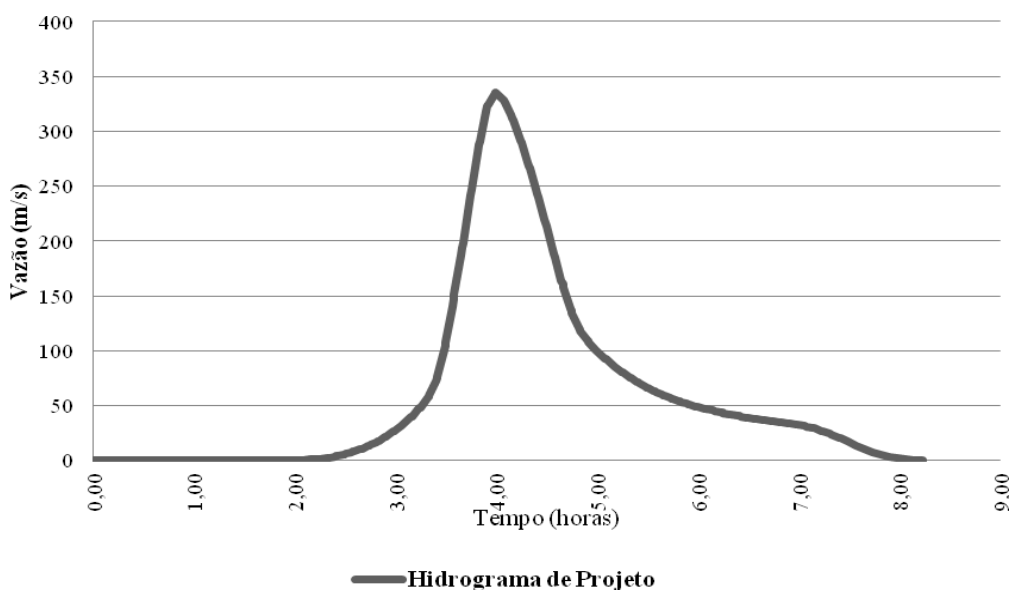
Figura 4 mostra o hietograma resultante dos picos da vazão gerados pela chuva centenária na bacia estudada.

**Tabela 4.** Vazão para chuva com tempo de retorno de 100 anos

Bacia	$Q_{(\text{pico})} (\text{m}^3 \text{ s}^{-1})$
Granjeiro	335,6

Resultados desta natureza permitem verificar que o hidrograma de projeto depende, concomitantemente, de diversas variáveis, como a precipitação; uso, tipo e capacidade de infiltração do solo; tempo de resposta da bacia hidrográfica para uma mesma entrada de chuva; dentre outras. Como a metodologia empregada na estimativa da chuva de projeto é apenas uma

das variáveis envolvidas e vem coberta de questionamentos, ponderando sobre o uso das relações IDF obtidas a partir de registros pluviográficos, que representam a média de chuva de determinada duração, e não a história real do evento, alteram-se os resultados e avaliações dessas relações.



**Figura 4.** Vazão de projeto da área de estudo.



## As áreas de inundação

A Tabela 5 apresenta a relação entre a área do município do Crato (área total e urbana) e a

percentagem de área urbana afetada pelas inundações causadas pelas chuvas centenárias na bacia do rio Granjeiro no Estado do Ceará.

**Tabela 5.** Relação entre a área urbana e a percentagem de áreas urbanas inundadas

Município	Área Total (Km <sup>2</sup> )	Área Urbana (Km <sup>2</sup> )	Área Inundada (Km <sup>2</sup> )	Área Urbana Inundada (%)
Crato	1158	100	6,8	18,9

Para esse evento hidrológico, cerca de 18% da área urbana foi atingida pela inundação do rio Granjeiro, sendo a área urbana atingida igual a 6,8 km<sup>2</sup>, afetando vários bairros do município do Crato no Ceará.

A Figura 5 apresenta a distribuição espacial dos bairros mais afetados pela cheia centenária, no município do Crato. A Figura 6 mostra a distribuição espacial da inundação com TR = 100 anos no município do Crato, com grande parte da área urbana atingida pela inundação, chegando à cota de 43,5m.

Percebe-se que predomina o uso desordenado por desmatamentos, queimadas, ocupações ilegais nas margens e leito fluvial, poluição hídrica, retirada da mata ciliar, ocorrência de processos erosivos, assoreamentos, enchentes, inundações, canalização artificial do rio, deposição inadequada de lixo, entre outras em toda área ribeirinha, ficando essas áreas mais vulneráveis às inundações.

Alguns fatores como a impermeabilização nos interflúvios devido à urbanização crescente, fator que reduz a infiltração e aumenta o escoamento superficial, assim com a impermeabilização do rio Granjeiro na zona urbana, podem maximizar os efeitos das inundações. Outros fatores como lançamento de esgotos e a disposição inadequada de resíduos sólidos dentro do canal, causando poluição das águas e poluição visual, podem influenciar nas recorrentes inundações. Esses fatores somados podem causar ocorrência de vazões de pico extraordinárias, acima do valor máximo considerado para a capacidade das obras de drenagem.

As áreas urbanas foram relativamente mais atingidas pelas manchas de inundação simuladas na área de estudo. Estas são as mais

vulneráveis devido aos aspectos sociais e econômicos envolvidos. Dessa forma alguns locais foram considerados críticos em ocorrência de inundações em razão da presença de residências e estruturas urbanas.

Outro fator agravante é a falta de áreas vegetadas ao longo do rio Granjeiro, aumentando a vazão de pico, devido à ausência da mata ciliar em quase toda a bacia; além da impermeabilização do solo, devida à urbanização desordenada do município.

Observa-se na Figura 5 que as áreas inundáveis apresentadas revelam um desvio quanto à localização do leito do rio em vários trechos. Isto ocorre devido à ausência de ajustes computacionais da geometria do rio no modelo hidráulico, já que o processo das simulações hidráulicas pode ser realizado automaticamente sem os ajustes dos dados. Além disto, a qualidade dos dados de entrada (MDE e imagens de satélite) influencia diretamente o resultado final, pois esses dados são utilizados em todas as etapas de modelagem. Ainda é possível identificar que há uma lacuna e um grande desvio das áreas inundáveis mostradas em relação ao leito do rio no trecho de canal artificial. Como a modelagem utiliza as curvas de nível, que representam o terreno sem as modificações provenientes da construção do canal artificial, a diferença neste trecho é destacada, já que o canal não foi construído no curso natural do rio Granjeiro.

De um modo geral, a integração entre os modelos hidrológico e hidráulico ao SIG, mostrou ser uma potencial ferramenta de auxílio dos órgãos federal e/ou estadual no monitoramento de desastres naturais de fator hidrológico, podendo auxiliar esses órgãos na mitigação dos efeitos desses eventos críticos.

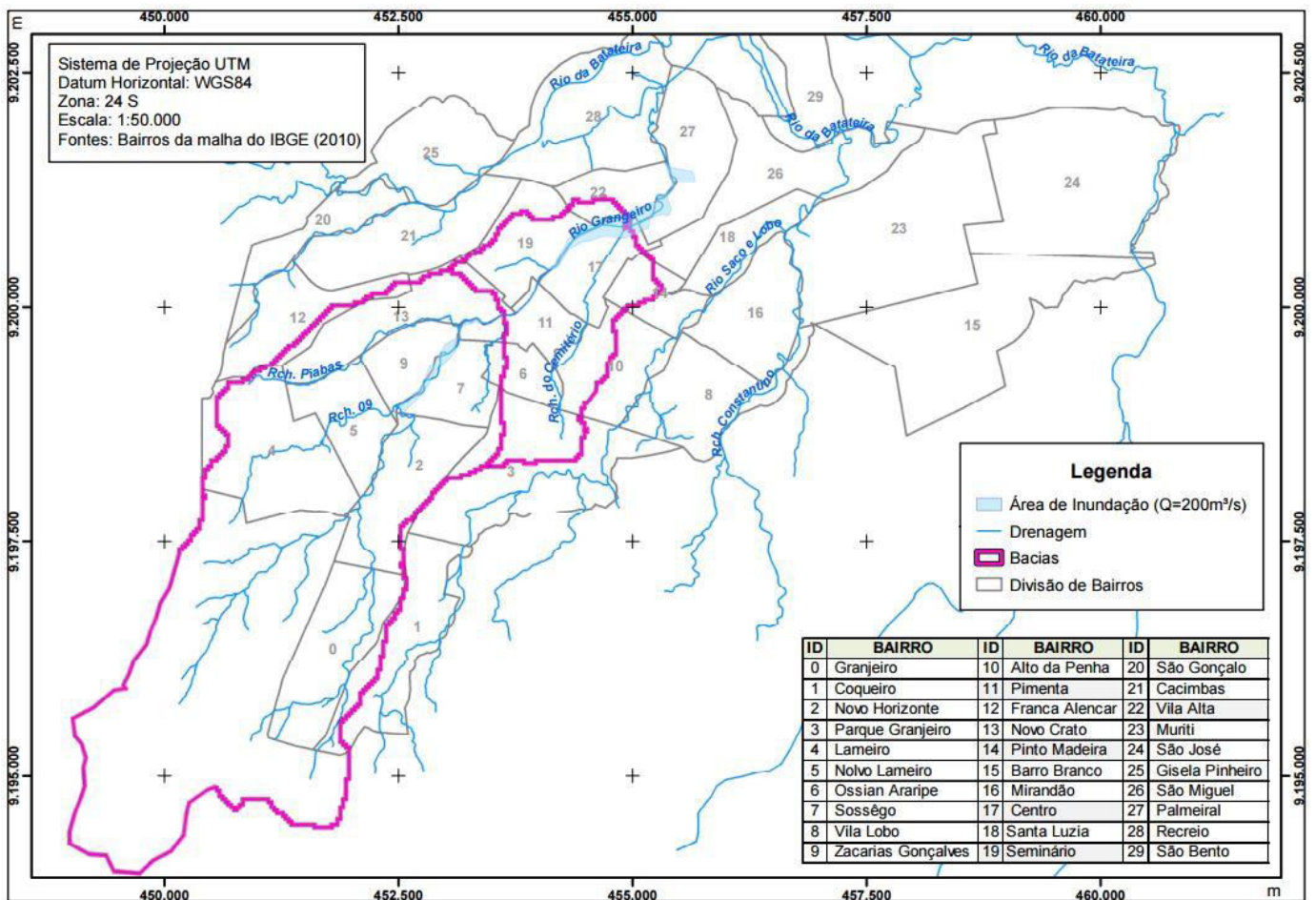


Figura 5. Distribuição dos bairros do município do Crato.

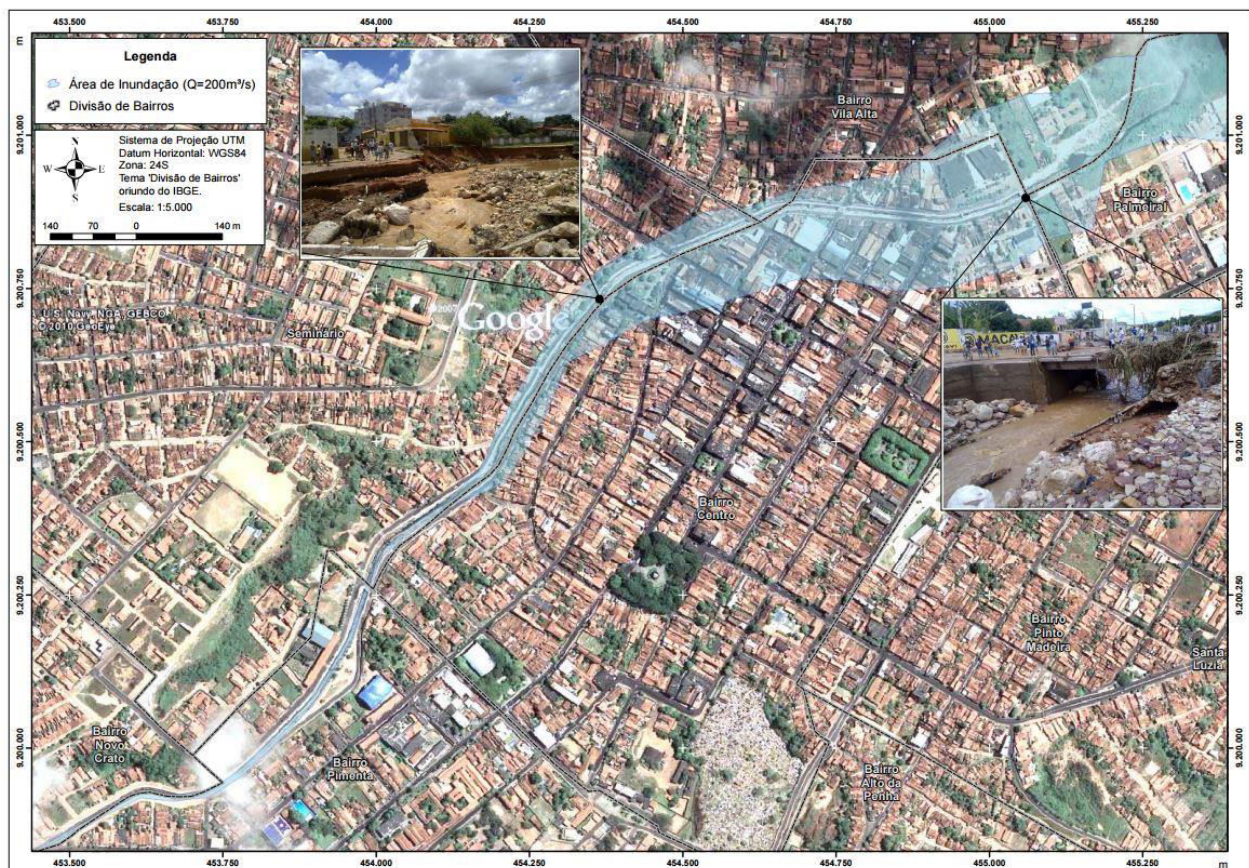


Figura 6. Espacialização da área inundável do município do Crato.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

1. A integração entre a modelagem hidrológica, hidráulica e o SIG mostrou que é possível desenvolver uma metodologia confiável nas bacias urbanas, com base em dados digitais, imagens de satélites e uma boa rede de observações de campo.

2. O modelo hidráulico representou de forma satisfatória a mancha de inundação com a chuva centenária no município do Crato, indicando ser uma ferramenta promissora para subsidiar o planejamento urbano e para alertar e prevenir a cidade contra cheias.

3. A calibração da modelagem hidráulica foi bem sucedida, quando se relaciona o coeficiente de Manning e as marcas de cheias nos centros urbanos, sendo uma forma confiável de verificação de outros eventos de cheias.

4. As informações obtidas revelam as áreas mais propícias à ocorrência de inundações no município do Crato-CE, especialmente em áreas densamente urbanizadas, o que representa um sério risco à segurança da população e das construções nestes locais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abushandi, E. & Merkel, B. Modelling Rainfall Runoff Relations Using HEC-HMS and IHACRES for a Single Rain Event in an Arid Region of Jordan. **Water Resources Management**, v.27, p.2391-2409, 2013.
2. Aragão, R.; Santana, R.G.; Costa, E.F.F.C.; Cruz, A.S.M.; Figueredo, E. E.; Srinivasan, S. V. Chuvas intensas para o Estado de Sergipe com base em dados desagregados de chuva diária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, p.243-252, 2013.
3. Ben-Zvi, A. Rainfall intensity–duration–frequency relationships derived from large partial duration series. **Journal of Hydrology**, v.367, p.104-114, 2009.
4. Cabral, S.L.; Campos, J.N.B.; Teixeira, A.F.; Silveira, S.C. Hydrologic and hydraulic modelling integrated with GIS: a study of the Acaraú river basin – CE. **Journal of Urban and Environmental Engineering**, v.8, p.167-174, 2014.
5. Campos, J.B. **Lições em modelos e simulação hidrológica**. Fortaleza: ASTEF/Expressão Gráfica, v.1, 166 p., 2009.
6. Damé, R.C.F.; Teixeira, C.F.A.; Terra, V.S.S.; Rosskoff, J.L.C. Hidrograma de projeto em função da metodologia utilizada na obtenção da precipitação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, p.46-54, 2010.
7. Dawod, G.M.; Mirza, M.N.; Al-Ghamdi, K.A.; Elzahrany, R.A. Projected impacts of land use and road network changes on increasing flood hazards using a 4D GIS: A case study in Makkah metropolitan area, Saudi Arabia. **Arab J Geoscience**, v.7, p.1139–1156, 2014.
8. Ebrahimian, M.; Nuruddin, A.A.; Soom, M.A.B.M.; Sood, A.M. Application of NRCS-curve number method for runoff estimation in a mountainous watershed. **Journal of Environmental Sciences**, v.10, p. 103-114, 2012.
9. Fernandez, D.S. & Lutz, M.A. Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. **Engineering Geology**, v.111, p. 90–98, 2010.
10. Funceme. **Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos do Ceará**. Disponível em: <http://www.funceme.br>. Acessado em 10nov2014.
11. Gichamo, Z.G.; Popescu, I.; Jonoski, A.; Solomatine, D.P. River Cross Section Extraction from ASTER Global DEM for Flood Modeling, Environ. **Modell. Softw**, v.31, p.37–46, 2012.
12. Grimm, A.M. Interannual climate variability in South America: Impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change. **Stoch Environ Res Risk Assess**, v.25, p.537–554, 2011.
13. Knebl, M.R.; Yang, Z.L.; Hutchison, K.; Maidment, D.R. Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. **Journal of Environmental Management**, v.75, p.325–336, 2005.
14. Haghizadeh, A.; Shui, L.T.; Mirzaei, M.; Memarian, H. Incorporation of GIS Based Program into Hydraulic Model for Water Level Modeling on River Basin. **Journal of Water Resource and Protection**, v.4, p.25-31, 2012.
15. Lambert, F.H.; Stine, A.R.; Krakauer, N.Y.; Chiang, J.C.H. How much will precipitation increase with global warming? **EOS, Transactions American Geophysical Union**, v.89, p.193-200, 2008.
16. Martin, O.; Rugumayo, A.; Ovcharovichova, J. Application of HEC HMS/RAS and GIS tools in flood modeling: A case study for river Sironko – Uganda. **Journal of Engineering, Design and Technology**, v.1(2), p. 19-31, 2012.
17. Mendes, H.C. & Mendiando, E.M. Histórico da expansão urbana e incidência de inundações: O Caso da Bacia do Gregório, São Carlos – SP. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.12, p.17-27, 2007.
18. Min, S.; Zhang, X.; Zwiers, F.W.; Heger, G.C. Human contribution to more-intense precipitation extremes. **Nature Letter**, v. 470, p. 378, 2011.
19. Oliveira, G.G.; Saldanha, D.L.; Guasselli, L. A. Espacialização e análise das inundações na bacia hidrográfica do rio Caí/RS. **Geociências**, v.29, p.413-427, 2010.
20. Oliveira, G.G. & Guasselli, L.A. Relação entre a suscetibilidade a inundações e a falta de capacidade nos condutos da Sub-bacia do Arroio da Areia, em Porto Alegre/RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.16, p.5-15, 2011.
21. Ribeiro, C.B.M. & Lima, R.N.S. Simulação de inundações urbanas a partir da integração de técnicas de geoprocessamento à modelagem hidráulica e hidrológica. **Revista Geografia**, v. 2, n. 1, p. 1-9, 2011.
22. Robaina, L.E.S.; Kormann, T.C.; Schirmer, G.J. Zoneamento das inundações na área urbana de Alegrete-Rio Grande do Sul-Brasil. **Geociências**, v. 32, n.2, p. 346-355, 2013.
23. Santos, G.S.; Nori, P.G.; Oliveira, L.F.C. Chuvas intensas relacionadas à erosão hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, p.115-123, 2010.

24. Siddayao, G.P.; Valdez, S.E.; Fernandez, L.P. Modeling Flood Risk for an Urban CBD Using AHP and GIS. **International Journal of Information and Education Technology**, v.5, p.748-753, 2015.
25. Suleiman, H.C.E. & Barbassa, A.P. Mapeamento preliminar de áreas urbanas de inundação. **Ciência & Engenharia**, v.15, p.51-58, 2005.
26. Webster, T.L.; Forbes, D.L.; Dickie, S.; Shreenan, R. Using topographic LiDAR to map flood risk from storm-surge events for Charlottetown, Prince Edward Island, Canada. **Remote Sensing**, v. 30, p. 64-76. 2004.
27. Webster, T.L. Flood risk mapping using LiDAR for Annapolis Royal, Nova Scotia. **Remote Sensing**, v.2. p.2060-2082, 2010.
28. Youssef, A.M.; Biswajeet, P.; Abdallah, M.H.; Flash flood risk estimation along the St. Katherine road, southern Sinai, Egypt using GIS based morphometry and satellite imagery. **Environmental Earth Sciences**, v.62, p.611-623, 2011.

*Manuscrito recebido em: 01 de Maio de 2015*  
*Revisado e Aceito em: 25 de Setembro de 2015*