

# **AValiação de Modelos Digitais de Terreno para Estimativa de Índices de Enchentes em Bacias Hidrográficas.**

**Marcos Cesar Ferreira\***

## **INTRODUÇÃO**

A crescente demanda por água para fins industriais, residenciais e agrícolas, observada na segunda metade deste século, coloca os estudos hidrológicos como de destacada importância para o planejamento do uso das reservas hídricas de superfície e sub-superfície. A água de superfície, cuja estabilidade está controlada principalmente pela relação precipitação-vazão, para muitas cidades do Estado de São Paulo ainda é a única reserva para o consumo urbano e rural. É neste contexto que também se inserem as pesquisas sobre hidrologia de bacias hidrográficas, buscando entender as relações entre a estrutura da superfície das bacias e parâmetros que descrevem o comportamento das vazões fluviais a jusante das mesmas.

É reconhecida na vasta bibliografia sobre hidrologia geral, a importância da ação conjunta dos elementos da superfície das bacias e da precipitação na intensidade do escoamento fluvial anual. Dentre estes elementos citam-se o uso do solo, a morfometria do relevo da bacia, a distribuição espacial dos solos, a densidade de rios e a existência de lagos, entre outros. Embora seja consenso que a ação integrada destes fatores condicione a dinâmica dos rios, deve-se entretanto avaliar isoladamente cada um deles em relação a vazão fluvial, e desta maneira melhor precisar o alcance de cada elemento da superfície como indicador hidrológico.

Neste trabalho elegeu-se o modelo digital do terreno (DTM), construído a partir de matrizes digitais de altitudes, como o elemento da superfície das bacias mais adequado para se estimar parâmetros de vazão fluvial através de sistemas de informação geográfica. Buscamos através deste ponto de vista metodológico, estabelecer em uma primeira aproximação, a correlação existente entre 5 parâmetros extraídos de DTMs e um parâmetro hidrológico indicador de cheias, utilizando como teste bacias hidrográficas amostrais situadas no Estado de São Paulo.

O objetivo desta pesquisa foi a avaliação uso dos modelos digitais de terreno gerados em sistemas de informação geográfica, para a estimativa de parâmetros hidrológicos de bacias hidrográficas sem dados regulares disponíveis. Pretendeu-se inclusive analisar os principais parâmetros estatísticos que descrevem a distribuição dos valores de altitude dentro dos DTMs das bacias, avaliando-os individualmente como possíveis indicadores de cheia através de análise de regressão com a vazão média anual específica de bacias hidrográficas.

## **2 - REVISÃO DA LITERATURA**

O uso de modelos digitais de terreno e sistemas de informação geográfica em hidrologia de bacias tem se intensificado a partir dos anos 80. Algumas aplicações tem sido desenvolvidas e adaptadas a modelos hidrológicos e utilizadas para estimativa de vazão fluvial. Os resultados tem sido favoráveis ao desenvolvimento novas pesquisas nesta área.

---

\* Professor Assistente-Doutor

Departamento de Cartografia e Análise da Informação Geográfica  
UNESP, Caixa Postal 178, Rio Claro - SP - Brasil

Jensen & Domingue (1988) apresentaram um método para o levantamento de atributos topográficos de uso hidrológico a partir de modelos digitais de elevação. O método foi aplicado para delimitação de bacias e sub-bacias hidrográficas, conexão entre bacias, mapeamento automático da rede de drenagem e do caminho do escoamento superficial. O programa foi testado em vários estudos hidrológicos, com DTMs construídos a partir de cartas nas escalas 1:250.000 e 1:24.000 e concluiu-se que o procedimento desenvolvido apresentou até 97 % de confiabilidade se comparado aos métodos convencionais de análise topográfica para hidrologia

Band (1989) desenvolveu um sistema de informação de bacias hidrográficas organizado a partir de dados digitais de elevação do terreno. A partir de DTMs o autor conseguiu extrair a rede de drenagem, as sub-bacias e dividir as vertentes que drenam para o canal principal da bacia e mapear o caminho do escoamento através da conexão entre bacias. Para atingir estes objetivos o autor construiu DTMs com 30 metros de resolução no terreno para bacias-teste nos EUA e os testou em interface com modelos de escoamento fluvial. Os resultados mostraram a possibilidade de se gerar curvas hidrógrafas unitárias a partir de DTMs.

Howard (1990) estudou com detalhe o papel da hipsometria na resposta hidrológica de bacias hidrográficas, analisando os efeitos da morfometria no valor máximo de cheia e no tempo necessário para se atingi-lo. Entre as inúmeras conclusões a que chegou o autor, destaca-se o fato de que o perfil longitudinal das bacias de drenagem desempenham um importante papel no controle das cheias. A este parâmetro estão relacionados a declividade, a amplitude do relevo e a concavidade da bacia. Romanowicz, Beven & Moore (1993) afirmam que alguns modelos de resposta hidrológica de bacias, como o Topmodel (Beven & Wood, 1983), utilizam dados topográficos derivados de DTMs para a estimativa de vazão fluvial.

Hoog et al. (1993) utilizaram DTMs para estudar a distribuição espacial do gradiente da superfície de bacias e desenvolver um método para o mapeamento digital de sub-bacias hidrográficas e da rede de drenagem, para posterior modelagem hidrológica dos processos de superfície em escalas espaço-temporais. Aplicando o procedimento a DTMs de 50 metros de resolução, os autores obtiveram através de análise digital, importantes fatores hidrológicos, como: densidade e gradiente de rios, declividade da superfície, frequência de canais de drenagem e hierarquia fluvial. Os autores concluíram que a análise de DTMs apresenta um amplo leque de possibilidades de uso em hidrologia, facilitando também a associação com dados espaciais disponíveis em sistemas de informação geográfica.

Estudos têm demonstrado que um grande número de variáveis ambientais interferem no comportamento temporal e espacial das vazões fluviais ao nível de bacias hidrográficas.. A preocupação em se conhecer o grau de dependência entre as vazões fluviais e as características físico-geográficas das respectivas bacias não é recente. Morisawa (1962) E Patton & Baker (1976) já estudaram detalhadamente o papel da morfometria intensidade das cheias.

Com o objetivo de minimizar a heterogeneidade das regiões e os erros na estimativa de parâmetros de cheia, Mosley (1981) propôs um método para a identificação de regiões homogêneas utilizando análise de agrupamentos de bacias similares com base nos parâmetros *vazão média anual específica*  $Q_{med}/A(l/s/km^2)$  e o seu *coeficiente de variação* (CV). A vazão média anual específica descreve a intensidade espacial da vazão de cheia, enquanto o CV caracteriza a sua variabilidade interanual. As bacias cujos postos situam-se próximos entre si, podem ser combinadas

para formar grupos com o objetivo de se analisar frequências de cheias. O processo de agrupamento pode ser efetuado utilizando-se a distância euclidiana ou outro critério de proximidade.

### 3 - METODOLOGIA E MATERIAL

O desenvolvimento deste trabalho baseou-se em três etapas: a *análise hidrológica* das bacias hidrográficas, onde foram estudados parâmetros de vazão fluvial e definidas as regiões de bacias similares para posterior seleção de amostras; e a *análise dos parâmetros de modelos digitais de terreno*, momento em que foram obtidos valores estatísticos sobre a distribuição espacial das altitudes dentro das bacias amostrais e finalmente, a *análise de regressão* entre os parâmetros hidrológicos e os parâmetros dos DTMs.

A análise e o mapeamento das regiões hidrológicas foi realizado com base em dados fluviométricos provenientes de uma amostra de 66 bacias hidrográficas do Estado de São Paulo, distribuídas da maneira mais regular possível todo o território estudado. Os dados fluviométricos, organizados segundo os parâmetros *vazão máxima anual* ( $Q_{max}$ ) e *vazão média anual* ( $Q_{med}$ ), foram obtidos nos boletins hidrológicos do DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo). Para o levantamento de dados de vazão média específica das bacias, consideramos apenas os postos com séries de vazões fluviais médias e máximas superiores a 10 anos, escolhidos através de amostragem aleatória não estratificada.

A análise dos dados hidrológicos das bacias foi realizado tomando-se como base duas variáveis vazão máxima anual específica ( $Q_{max}/A$ ), vazão média anual específica ( $Q_{med}/A$ ). As vazões específicas são definidas como a razão entre as vazões observadas em um dado intervalo de tempo e a sua respectiva área de drenagem, apresentando como unidade de medida  $l/s/km^2$ . A formação dos grupos de bacias hidrográficas similares foi obtida através da análise da distância euclidiana entre os valores de  $Q_{max}/A$  e  $Q_{med}/A$  e o seu coeficiente de variação ( $CV$ ). Através do algoritmo da *média K*, foram definidos os grupos de bacias cuja distância ao valor médio do grupo fosse o mínimo possível.

Após a identificação das regiões hidrológicas, sorteou-se de 3 a 4 bacias por região, totalizando-se 17 amostras. Os valores de vazão média específica destas bacias foram posteriormente utilizados para a análise de regressão com os parâmetros dos respectivos modelos digitais do terreno. As 17 bacias amostrais selecionadas foram digitalizadas a partir do Mapa Hipsométrico do Estado de São Paulo (São Paulo, 1982) e em seguida convertidos para o formato de arquivo raster do SIG IDRISI (Eastman, 1995). Como resultado obtivemos um arquivo imagem no formato de polígonos correspondentes aos divisores das respectivas bacias hidrográficas.

Para a construção dos modelos digitais de altitude das bacias selecionadas, primeiramente procedeu-se à digitalização das curvas de nível utilizando-se como base também aquele mapa hipsométrico, que foram convertidas em arquivos raster no formato de linhas do SIG IDRISI. A partir desta etapa, já no ambiente SIG, foi gerada a superfície altimétrica interpolada para toda a área de estudo, através do módulo *Context/Distance Operators*, utilizando-se o comando *Surface*. Em seguida, aplicou-se o comando *Filter* para se eliminar eventuais valores extremos, tanto os picos exagerados como depressões profundas resultantes do processo de interpolação.

A análise dos parâmetros estatísticos dos modelos digitais foi realizada individualmente para cada bacia, através da geração de mapas binários, isolando-se cada bacia a ser estudada. Utilizando-se os mapas binários como janelas para coleta e tratamento estatístico das altitudes, foi realizada uma amostragem dos valores dos pixels inseridos nos limites de cada bacia.

Para esta ação de pesquisa foi empregada a função *Query*, associada a função *Histo* que produziram um sumário estatístico da distribuição dos valores altimétricos daqueles pixels. Foram coletados valores da *altitude máxima* ( $H_{max}$ ), *altitude média* ( $H_{med}$ ), *altitude mínima* ( $H_{min}$ ), *desvio padrão* ( $Dp_h$ ), *coeficiente de variação* ( $CV_h$ ), *amplitude altimétrica* ( $\Delta H$ ) e *coeficiente de dissecação* ( $CD$ ). Os parâmetros acima calculados para as 17 bacias amostrais, foram utilizados na análise de regressão com os respectivos valores de  $R^2$  e  $R$ . Esta análise foi desenvolvida em ambiente IDRISI através da função *Regress*, sendo obtidos a reta, a equação de regressão e os valores de  $R^2$  e  $R$ .

#### 4 - RESULTADOS

A Figura 1 apresenta o mapa da distribuição espacial das bacias hidrográficas utilizadas como unidades de coleta de dados de vazão fluvial para o Estado de São Paulo. Os resultados mostraram a possibilidade de se agrupar as 66 bacias hidrográficas em 5 grupos homogêneos, cujo sumário estatístico é apresentado na Tabela 1. Tomando-se como base as regiões definidas anteriormente, foram selecionadas 17 bacias hidrográficas amostrais para a análise dos parâmetros do DTM, sendo elas: rios Moinho, Batalha (*região I*); Preto, Turvo, Peixe e Aguapeí (*região II*); Corumbataí, Itapetininga e Jacaré-Pepira (*região III*); Jacui, Paraibuna, Batatais e Taquari (*região IV*); Buquira, Guarau, Piracuama e Bocaina (*região V*).

Figura 1 - Distribuição espacial dos postos fluviométricos utilizados na pesquisa

Região	$Q_{med}/A$				CV			
	mínimo	média	máximo	desv.padrão	mínimo	média	máximo	desv.padrão
I	4.5	5.8	7.3	0.10	0.15	0.28	0.40	0.09
II	7.9	10.0	11.5	0.11	0.08	0.28	0.45	0.08
III	12.2	13.4	15.0	0.08	0.11	0.26	0.40	0.09
IV	16.1	18.3	20.3	0.11	0.21	0.30	0.55	0.09
V	29.8	31.5	39.9	0.17	0.18	0.22	0.26	0.03

Tabela 1- Sumário estatístico das regiões hidrológicas.

O resultado da coleta dos valores dos parâmetros do DTM e para as bacias amostrais está disponível na Tabela 2. Devemos ressaltar nesta tabela a significância dos valores de  $DP$ , cuja variabilidade é notável, uma vez que apresentam valores mínimos para as bacias situadas nas regiões I e II (5.47 e 9.27, respectivamente para as bacias dos rios Moinho e Preto) e valores máximos para aquelas situadas na região V (238.97 e 260.18), respectivamente para as bacias dos rios Buquira e Bocaina).

Analisando-se os valores do coeficiente de variação para os parâmetros quantificados, verificamos que destacam-se  $DP_h$  com  $cv = 0.89$  e  $CV_h$  com  $cv = 1.10$ . Estes valores nos fazem supor que o desvio padrão e o coeficiente de variação das altitudes dos DTMs foram os parâmetros que melhor discriminaram as bacias amostrais

e, por outro lado, a altitude média ( $H_{med}$ ) apresentou menor variabilidade entre as bacias, com  $cv = 0.43$ .

BACIAS	Hmed (m)	DPh	CVh(%)	Dh (m)	CD	Q <sub>med</sub> /A (l/s/km <sup>2</sup> )
<i>Moinho</i>	397.92	5.47	1.37	189	1.55	5.7
<i>Batalha</i>	513.89	29.22	5.68	180	0.63	7.3
<i>Preto</i>	483.33	9.27	1.91	118	0.12	7.9
<i>Turvo</i>	554.40	29.72	5.36	199	0.77	10.8
<i>Aguapei</i>	487.49	36.79	7.54	156	0.53	10.4
<i>Corumbatai</i>	704.01	58.29	8.27	415	0.49	13.2
<i>Itapetininga</i>	688.08	78.43	11.39	352	0.06	12.8
<i>Jacaré Pepira</i>	728.16	87.39	11.72	264	0.35	12.6
<i>Jacui</i>	1175.60	108.49	9.22	540	0.67	18.2
<i>Paraibuna</i>	1118.32	161.59	14.44	400	0.55	20.0
<i>Batatais</i>	783.05	33.06	4.22	193	0.45	18.3
<i>Buquira</i>	1109.00	238.97	21.54	692	0.74	24.4
<i>Guarau</i>	138.05	82.70	59.92	935	0.05	30.4
<i>Peixe</i>	534.79	55.16	10.31	220	0.61	7.9
<i>Taquari</i>	773.72	33.43	4.31	327	0.28	19.5
<i>Piracuama</i>	1314.62	152.35	11.58	820	0.83	23.0
<i>Bocaina</i>	735.52	260.18	35.37	656	0.19	
<b>DP</b>	309.87	76.20	14.53	250.72	0.36	
<b>MÉDIA</b>	719.99	85.91	13.19	391.53	0.52	
<b>CV(%)</b>	0.43	0.89	1.10	0.64	0.70	

Tabela 2 - Valores dos parâmetros dos DTMs e de das bacias amostrais.

Os resultados da análise de regressão entre os parâmetros dos DTMs e a vazão média anual específica das bacias amostrais são apresentados nas Figuras 2a, 2b, 2c e 2d e na Tabela 3. Devemos destacar que os parâmetros  $\Delta H$  e  $DP_h$  apresentaram maiores valores do índice de correlação com a vazão média anual específica das bacias, respectivamente  $r = 0.8220$  e  $r = 0.8212$ . Associados a estes valores, encontramos coeficientes de determinação respectivamente de  $r^2 = 67.56\%$  e  $r^2 = 67.44\%$ . O mesmo desempenho na análise de regressão com a vazão média específica anual, não foi verificado com o parâmetro  $H_{med}$ , que apresentou  $r = 0.1888$ ; e CD, para o qual constatamos  $r = -0.2014$ .

Parâmetro Do Dtm	R	R <sup>2</sup>	T	Equação De Regressão
$\Delta H$	0.8220	67.56	5.5898	$Q_{med}/A = 0.444237 + 0.002998 \Delta H$
$CV_h$	0.7848	61.59	4.9048	$Q_{med}/A = 0.966890 + 0.049395 CV_h$
$DP_h$	0.8212	67.44	5.5733	$Q_{med}/A = 0.772586 + 0.009857 DP_h$
$H_{med}$	0.1888	3.56	0.7445	$Q_{med}/A = 1.265996 + 0.000533 H_{med}$
CD	-0.2014	4.06	-0.7964	$Q_{med}/A = 1.959369 - 0.738103 CD$

Tabela 3 - Sumário estatístico da análise de regressão entre os parâmetros dos modelos digitais de terreno e a vazão média anual específica das respectivas bacias hidrográficas.

## 5 - CONCLUSÕES

Os resultados a que atingimos nesta pesquisa, referem-se a um universo de análise composto de 17 bacias hidrográficas escolhidas por amostragem aleatória estratificada, de uma população de 66 bacias situadas no Estado de São Paulo. Devemos ressaltar que a regionalização proposta para o estado tem caráter preliminar, cujos limites são transitórios e traçados apenas com o intuito de delimitar espaços hidrológicos homogêneos para seleção de bacias amostrais.

Cabe também destacar que o número de amostras faz parte de uma primeira etapa de investigação das relações entre os DTMs e os parâmetros hidrológicos, onde se pretende averiguar se existem tendências que justifique uma maior amostragem. Pelas conclusões a que chegamos, constatamos que este estudo deve prosseguir em uma segunda fase, quando ampliaremos o número de bacias amostrais e realizaremos testes para se conhecer a margem de erro da estimativa de parâmetros hidrológicos a partir de DTMs.

Ao contrário do que se tem argumentado ao nível teórico, o coeficiente de dissecação se mostrou impróprio para se estudar as cheias, uma vez que apresentou baixo valor de  $R$  e  $R^2$  em relação à vazão média específica. Acreditamos que o CD é mais adequado a estudos geomorfológicos sobre a evolução do relevo ao nível de bacias de drenagem. A média das altitudes dos DTMs apresentou também pouca significância na estimativa de parâmetros de cheia. Já os demais parâmetros que descrevem a topografia das bacias apresentaram valores positivos mais elevados de  $R$  e  $R^2$ , devendo-se destacar a *amplitude altimétrica* e o *desvio padrão das altitudes*.

Estes dois parâmetros serão avaliados futuramente em um universo amostral ampliado a fim de se estabelecer os limites de sua utilização em bacias sem dados hidrométricos regulares. Também pretende-se avaliar em um projeto de pesquisa a ser iniciado brevemente, as relações entre a dimensão fractal da superfície das bacias, os parâmetros  $\Delta H$  e  $DP_h$ , e a frequência de cheias em bacias hidrográficas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Band, L.E - A Terrain-Based Watershed Information System. *Hydrological Processes*, 3:151-162, 1989.
- Beven, K & Wood, E.F - Catchment Geomorphology And Dynamics Of Runoff Contributing Areas. *Journal Of Hydrology* (65):139-158, 1983.
- Eastman, J.R - *Idrisi For Windows, Version 1.1*. Clark University, Worcester, 1995
- Hoog, J; McCormack, J.E; Roberts, S.A e Hoyle, B.S - *Automated Derivation Of Stream-Channel Networks And Selected Catchment Characteristics From Digital Elevation Models*. In: *Geographical Information Handling-Research Applications*. Ed. By P.M. Mather, Pp. 206-235, John Wiley & Sons Ltd, 1993.
- Howard, A.D - Role Of Hypsometry And Planform In Basin Hydrologic Response. *Hydrological Processes*, 4:373-385, 1990.
- Jensen, S.K. & Domingue, J.O. - Extracting Topographic Structure From Digital Elevation Data For Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering And Remote Sensing*, 54(11):1593-1600, 1988
- Morisawa, M - Quantitative Geomorphology Of Some Watersheds In The Appalachian Plateau. *Geolog. Soc. Of Am. Bull.* 73(9):1025-1043, 1962.

Mosley, M.P. - Delimitation Of New Zealand Hydrological Regions. *Journal Of Hydrology*, 49:173-192, 1981.

Patton, P.C & Baker, V.R - Morphometry And Floods In Small Drainage Basins Subject To Diverse Hydrogeomorphic Conrols. *Water Resources Research*, 12(5):941-952, 1976.

Riggs, H. - Frequency Curves. *Techniques Of Water Resources Investigations*. United States Geological Survey. A2, Book 4, 1968, 15p.

Romanowicz, R.; Beven, K & Moore, R. - *GIS And Distributed Hydrological Models.*: In: Geographical Information Handling-Reseach Applications. Ed. By P.M. Mather, Pp. 206-235, John Wiley & Sons Ltd, 1993.

São Paulo. Secretaria De Estado Dos Negócios Do Interior. IGC. - *Hipsometria Do Estado De São Paulo*, Esc.: 1:1.000.000. São Paulo, IGC,

