

APRESENTAÇÃO DE UM MODELO DISTRIBUÍDO DE PRECIPITAÇÃO/ESCOAMENTO SUPERFICIAL

Rui Miguel Madeira Lança

Eng. Civil, Assistente na Universidade do Algarve,
rlanca@ualg.pt

António Carmona Rodrigues

Professor Doutor António Carmona Rodrigues, Universidade Nova de Lisboa
acr@mail.fct.unl.pt

RESUMO

O estudo e compreensão dos fenómenos que provocam uma cheia é fundamental para a segurança das populações e dos bens que se encontram em zonas ciclicamente inundáveis. Estes locais são preferenciais para a fixação de população, tanto pela via de comunicação fluvial, como pela fertilidade dos solos aluvionares.

O aspecto mais relevante desta comunicação consiste em apresentar um modelo de precipitação/escoamento superficial que toma em consideração o fenómeno distribuído em toda a área da bacia, sendo a metodologia válida para todos os pontos da bacia, encosta ou linha de água, por forma a conseguir prever quais as modificações induzidas na relação precipitação/escoamento superficial devido a modificações antrópicas ou não na bacia. Possibilitando uma abordagem de controlo de cheias, não pela intervenção no leito como é usual, mas pelo reordenamento da bacia, práticas de conservação do solo e alteração do seu uso.

O modelo baseia-se em equações físicas para modelar os fenómenos da infiltração e do escoamento superficial.

Para modelar o escoamento superficial o modelo desenvolvido emprega a equação da onda cinemática. Esta equação é resolvida por dois métodos numéricos distintos, por forma a detectar acumulação de erros e problemas de convergência.

A rede hidrográfica é alimentada por caudais de percurso que são determinados pelo excesso de precipitação, numa visão do escoamento superficial descrita por Horton, 1933. O excesso de precipitação é função da intensidade de precipitação e das propriedades hidrológicas do solo. A modelação da infiltração é efectuada por dois métodos distintos, a equação de Green-Ampt e o método da Curva Número do Soil Conservation Service, por forma a que os resultados possam ser controlados e aferidos mais facilmente.

O modelo desenvolvido é aplicado à bacia hidrográfica da Ribeira de Alportel, exemplo que serve para aferir os dados por retro-análise, comparando os resultados obtidos pela simulação com os valores de campo observados na estação hidrométrica de Bodega. Deste modo, é possível prever para possíveis cenários de alteração das condições da bacia hidrográfica qual a futura resposta da bacia hidrográfica a eventos pluviométricos.

PALAVRAS CHAVE: cheias; gestão de bacias hidrográficas; modelo distribuído de precipitação/escoamento superficial; onda cinemática; infiltração.

1. INTRODUÇÃO

As cheias ocorrem como consequência da precipitação, fenómeno com forte componente aleatória e sobre o qual o homem não tem controlo. No entanto o uso e ocupação da bacia hidrográfica pelo Homem é um factor que influencia imenso as consequências desses eventos.

As actividades de gestão de uma bacia hidrográfica enquadram-se em três grupos:

- conservação e recuperação das linhas de água e dos recursos naturais que influenciam a relação precipitação/escoamento superficial, tais como: solo; flora; fauna;
- aproveitamento dos recursos hídricos;
- aumento da qualidade dos recursos hídricos e do bem estar dos seus usuários.

Tradicionalmente o controlo de cheias é efectuado por soluções estruturais como reservatórios de inundação que retardam a cheia, barragens cujas albufeiras retêm ou atenuam a cheia e também têm funções de aproveitamento dos recursos hídricos, diques que protegem as margens de inundação, aumento das dimensões do leito ou diminuição da sua rugosidade.

Actualmente existe uma forte tendência para o controlo de cheias se efectuar por soluções não estruturais a funcionarem em articulação com soluções estruturais, tais como sistemas de previsão e aviso de cheias, planos de evacuação, diminuição dos caudais de ponta por uma gestão integrada da bacia hidrográfica.

O âmbito desta comunicação centra-se nesta ultima solução não estrutural em que se apresenta um modelo distribuído do escoamento superficial que permite simular a influência dos usos do solo e do ordenamento da bacia hidrográfica na relação precipitação/escoamento superficial e consequentemente nos hidrogramas de cheia que se verificam em qualquer secção da rede hidrográfica.

Para além da exposição teórica do modelo também é apresentado um caso de aplicação, no qual se aplica o modelo desenvolvido à bacia hidrográfica da Ribeira de Alportel.

2. ESTRUTURA DO MODELO

O modelo de simulação do escoamento superficial proposto assenta sobre um modelo digital do terreno constituído por uma malha regular de células. Este género de modelos digitais do terreno embora mais rudimentares do que outros, como uma malha de triângulos irregulares adjacentes, mais conhecidos por TIN, do inglês "*triangular irregular network*", apresenta inúmeras vantagens, devido à sua simplicidade e principalmente quando se pretende utilizar imagens de satélite para a caracterização do relevo, solos e usos do solo da bacia hidrográfica em estudo.

O movimento do escoamento superficial, gerado pelo excesso de precipitação (parte da precipitação que não se infiltra nem fica retida nas plantas ou em pequenas irregularidades do solo e que escoam superficialmente pelas linhas de água) pela rede hidrográfica é calculado pelo modelo de onda cinemática. A rede hidrográfica é gerada com base no modelo digital do relevo e o excesso de precipitação pode ser calculado pelo método da curva número do Soil Conservation Service ou pela equação de Green-Ampt, consoante a informação sobre as propriedades hidrológicas dos solos que estejam disponíveis.

2.1. Caudais de percurso

O cálculo dos caudais de percurso é determinado com base no excesso de precipitação, numa visão do escoamento superficial, como a descrita por Horton, 1933. Assim para cada célula e para cada instante é determinada a precipitação total e a parcela desta que contribui para o escoamento superficial, denominada precipitação efectiva. Para o cálculo desta parcela podem ser empregues dois métodos distintos: a equação de Green-Ampt e o método da Curva Número do Soil Conservation Service.

2.1.1. Equação de Green-Ampt

A infiltração é o processo pelo qual a água passa da superfície do solo para o interior deste. A velocidade de infiltração é influenciada por muitos factores, a vegetação a porosidade, condutividade hidráulica e teor de humidade do solo.

Em 1911, Green-Ampt propôs a seguinte expressão para a modelação da infiltração:

$$F(t) = K \cdot t + y \cdot \Delta q \cdot \ln \left(1 + \frac{F(t)}{y \cdot \Delta q} \right) \quad (01)$$

em que as variáveis assumem os seguintes significados:

$F(t)$ infiltração acumulada;

K condutividade hidráulica na frente de humedecimento;

t tempo;

y altura de sucção na frente de humedecimento;

Δq variação do teor de humidade no solo na passagem da frente de humedecimento.

A aplicação deste equação é difícil, pois não contempla o efeito do coberto vegetal, e as variáveis necessárias à sua aplicação apresentam grande variabilidade espacial.

2.1.2. Método da Curva Número do Soil Conservation Service

O método da Curva Número, foi apresentado em 1972 pelo Soil Conservation Service e apesar da sua simplicidade continua a ser bastante válido. A expressão proposta para o cálculo da precipitação efectiva é a seguinte:

$$P_e = \frac{\left(P - \frac{5080}{CN} + 50.8 \right)^2}{P + \frac{20320}{CN} - 203.2} \quad (02)$$

sendo:

P_e precipitação efectiva;

P precipitação total;

CN curva número.

O parâmetro CN é empírico, varia entre 0 e 100 e é função do tipo de solo, da ocupação do solo e do teor de humidade do solo anterior à chuva em questão. Existem tabelas para determinação do CN, ver Lencastre, 1992. Neste método o solo é classificado segundo o seu grupo hidrológico. Segundo experiências levadas a cabo por Raws et Al, 1982, essa classificação pode ser efectuada por um ábaco triangular de classificação textural, no qual são identificados os quatro grupos hidrológicos.

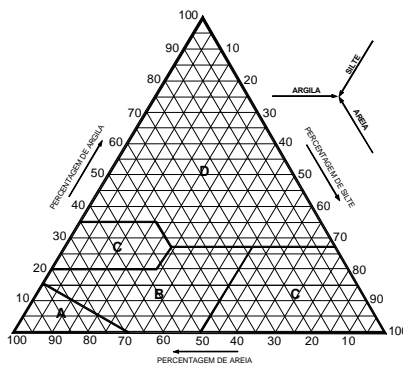


Figura 1 - Ábaco triangular para a classificação do grupo hidrológico de solo¹

¹ Elaborado com base em Raws et al, 1982 em Thomas N. Debo, 1995

2.2. Modelo de onda cinemática

O modelo de onda cinemática deriva de uma simplificação das equações gerais do escoamento em superfície livre, geralmente conhecidas por equações de Saint-Venant:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (03)$$

$$\frac{1}{A} \cdot \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \cdot \frac{\partial y}{\partial x} - g \cdot (S_0 - S_f) = 0 \quad (04)$$

em que as variáveis assumem os seguintes significados:

- Q caudal;
- A área da secção transversal do escoamento;
- x distância medida segundo a direcção do escoamento;
- t tempo;
- g aceleração da gravidade;
- y profundidade do escoamento;
- S₀ declive do perfil longitudinal da linha de água;
- S_f declive da linha de energia.

Estas equações diferenciais às derivadas parciais são respectivamente as equações de conservação da massa, Eq 03 e de conservação da quantidade de movimento, Eq 04.

Considerando nulos os termos da aceleração local $\frac{1}{A} \cdot \frac{\partial Q}{\partial t}$, da aceleração convectiva

$\frac{1}{A} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right)$ e da diferença de pressões entre as duas secções transversais extremas do

volume de controlo considerado $g \cdot \frac{\partial y}{\partial x}$, na equação da conservação da quantidade de movimento, resulta o modelo de onda cinemática. Este modelo aproxima-se da realidade quando a lâmina de água tem espessura reduzida, não se verificam variações muito bruscas do caudal as forças mais importantes aplicadas ao fluido são a gravidade e o atrito e a velocidade do escoamento não varia consideravelmente, sendo a aceleração reduzida.

O modelo de onda cinemática traduz-se pela seguinte equação:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} \cdot Q^{b-1} \cdot \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right) = q \quad (05)$$

sendo:

- Q caudal;
- x distância medida segundo a direcção do escoamento;
- q caudal de percurso;
- t tempo;
- a, b** parâmetros da equação da onda cinemática.

Em que **a** é dado por:

$$\mathbf{a} = \left(\frac{P^{2/3}}{K_s \cdot S_0^{1/2}} \right) \quad (06)$$

sendo:

- K_s coeficiente de rugosidade de Manning-Strickler;
- S₀ declive do perfil longitudinal da linha de água;
- P perímetro molhado da secção transversal.

e:

$$b = \frac{3}{5}$$

Este modelo apresenta grandes vantagens do ponto de vista de resolução numérica, os métodos utilizados para a sua resolução são consideravelmente mais simples e apresentam menos problemas de convergência do que os empregues para a resolução das equações de Saint-Venant.

A sua resolução pode ser efectuada recorrendo a um esquema de diferenças finitas em que o contínuo espaço tempo é discretizado numa grelha numérica, na qual actua um operador numérico explícito.

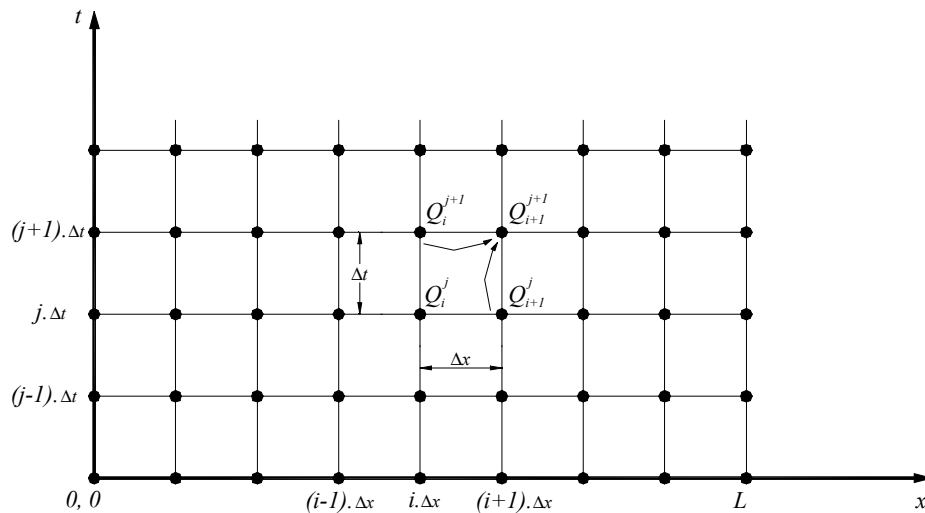


Figura 2 - Grelha numérica discretizando o plano espaço-tempo

2.3. Modelo 'Quasi 2D'

As equações apresentadas em 2.2 são válidas para o escoamento unidireccional. Numa bacia hidrográfica a água superficial escoa em cada ponto segundo a direcção do maior declive descendente. Num modelo digital do terreno de malha regular, a direcção do escoamento será das oito possíveis direcções, aquela que apresenta maior declive. Desta forma é possível definir com base na topografia da bacia hidrográfica a rede hidrográfica.

Neste caso a grelha numérica apresentada na figura 2 é transformada num conjunto de grelhas numéricas com tantos elementos quanto o numero de troços em que a rede hidrográfica é discretizada, como se pode observar na figura 3:

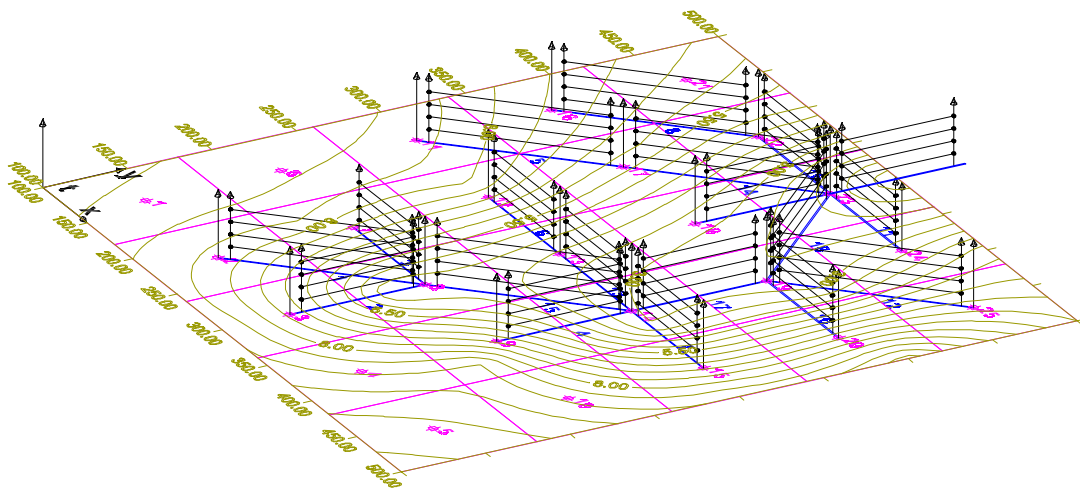


Figura 3 - Representação esquemática da discretização do contínuo espaço-tempo

Neste conjunto de grelhas numéricas que discretizam o contínuo espaço tempo actuam dois operadores numéricos explícitos. O primeiro designado por operador linear é de fácil implementação, mas os resultados obtidos variam com a relação $\frac{\Delta t}{\Delta x}$.

$$(Q_2^{j+1})_{ic} = \frac{\frac{(q_{No(1)}^{j+1})_{ic} + (q_{No(1)}^j)_{ic}}{2} \cdot \Delta t + \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} \cdot \left[\frac{(Q_1^{j+1})_{ic} + (Q_2^j)_{ic}}{2} \right] \cdot (Q_2^j)_{ic} + (Q_1^{j+1})_{ic} + (Q_1^{j+1})_{ic} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x}}{\frac{\Delta t}{\Delta x} + \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} \cdot \left[\frac{(Q_1^{j+1})_{ic} + (Q_2^j)_{ic}}{2} \right]^{b-1}} \quad (07)$$

Os resultados obtidos através deste operador linear são considerados uma estimativa inicial para o operador não linear.

O operador não linear para a resolução da equação da onda cinemática é traduzido pelas seguintes expressões:

$$C = \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot (Q_1^{j+1})_{ic} + \mathbf{a} \cdot ((Q_2^j)_{ic})^b + \Delta t \cdot \left(\frac{(q_{No(1)}^{j+1})_{ic} + (q_{No(1)}^j)_{ic}}{2} \right) \quad (08)$$

e:

$$f((Q_2^{j+1})_{ic}) = \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot (Q_2^{j+1})_{ic} + \mathbf{a} \cdot ((Q_2^{j+1})_{ic})^b - C \quad (09)$$

O valor do caudal na secção dois no troço ic $(Q_2^{j+1})_{ic}$ será o zero da função $f((Q_2^{j+1})_{ic})$. Como a função é não linear, emprega-se um método de resolução numérica de equações como o método de *Newton - Raphson*.

Nos dois operadores numéricos acima referidos as variáveis assumem o seguinte significado:

a e b	têm o mesmo significado que no ponto 2.2;
Dt	intervalo de tempo;
Dx	comprimento do troço;
ic	número do troço;
j	nível de tempo;
$(Q_1)_{ic}$	caudal a montante do troço ic ;
$(Q_2)_{ic}$	caudal a jusante do troço ic ;
$q_{No(1)}^j$	caudal de percurso calculado com base no excesso de precipitação gerado na célula a montante do respectivo troço.

3 - Caso de estudo - Bacia hidrográfica da Ribeira de Alportel

A Ribeira de Alportel situa-se no Sotavento Algarvio, 10 km a Noroeste de Tavira. O modelo digital do relevo desta bacia é o apresentado na figura 4:



Figura 4 - Modelo digital do relevo da bacia hidrográfica da Ribeira de Alportel

A rede hidrográfica digitalizada sobre a carta militar à escala 1:25000 é a apresentada na figura 5.

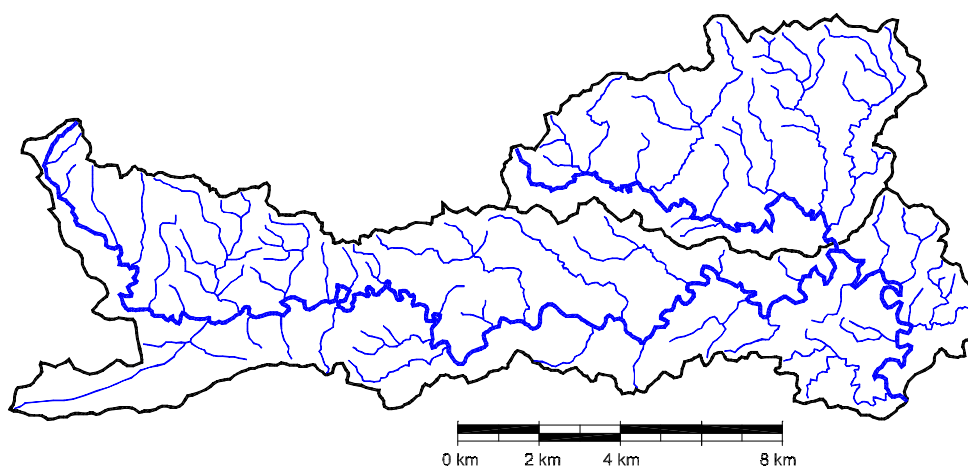


Figura 5 - Rede hidrográfica da bacia hidrográfica da Ribeira de Alportel

Parâmetro	valor	unidade
Área	132	km ²
Perímetro	86.2	km
Comprimento máximo da bacia	22.5	km
Coefficiente de compacidade	2.11	adim.
Factor de forma	5.88	adim.
Rectângulo equivalente		
L	40	km
l	3.3	km
Densidade de drenagem	4.86	km/km ²
Inclinação média das vertentes	18.3	%
Altitude máxima	520	m
Altitude mínima	13	m
Altitude média	245.4	m
Índice de pendente	0.0228	m/m

Quadro 1 - Parâmetros descritivos da geomorfologia da bacia hidrográfica da Ribeira de Alportel

Representando a topografia da bacia hidrográfica num o modelo digital do relevo de células adjacentes regulares com dimensão de 200x200 m e gerando a rede hidrográfica pelo critério de o escoamento se dar segundo o maior declive, obtém-se a seguinte rede hidrográfica:

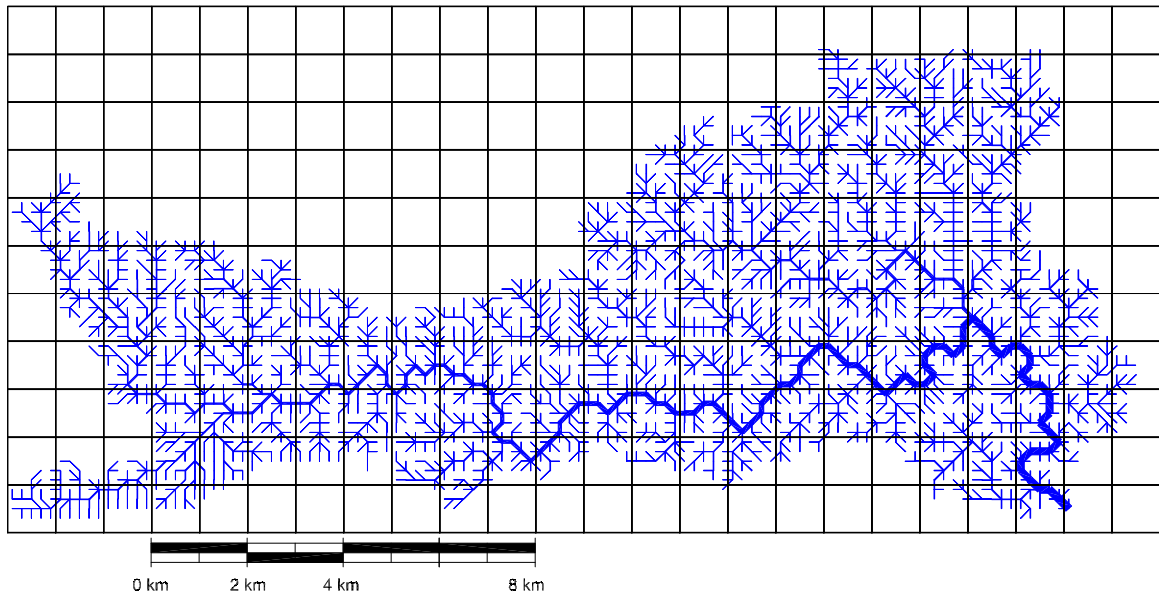


Figura 6 - Discretização da rede hidrográfica da Ribeira de Alportel

A secção transversal de cada troço de rede hidrográfica é trapezoidal assimétrica em que a dimensão da base é directamente proporcional à ordem do respectivo troço assim como o coeficiente de rugosidade de Manning-Strickler. A ordem do troço é definida como o máximo número de troços a montante mais um. A inclinação das margens é definida pela diferença de cotas entre o fundo do canal e a cota da célula mais próxima numa direcção perpendicular à direcção da linha de água.

Após a discretização da rede hidrográfica, verifica-se que o comprimento das linhas de água na rede hidrográfica discretizada é sensivelmente inferior à mesma grandeza medida na cartografia. Isto deve-se ao suprimimento de algumas curvas com pequeno raio. Esta diferença aumenta com a dimensão das células. Para atender a esta diferença introduz-se um factor de sinuosidade adicional definido pela relação entre o comprimento da linha de água principal medida sobre a cartografia base e o mesmo comprimento medido na rede hidrográfica discretizada.

A calibração dos coeficientes de rugosidade de Manning-Strickler é efectuada com base no tempo de concentração. Por definição o tempo de concentração é o tempo necessário para que toda a área da bacia hidrográfica esteja a contribuir para o escoamento na secção de controlo, isto pode ser feito para toda a bacia hidrográfica ou para qualquer uma das suas sub-bacias hidrográficas. No caso de estudo, através de fórmulas empíricas, chegou-se à conclusão que o tempo de concentração da bacia hidrográfica é de 7 horas e que os coeficientes de rugosidade de Manning-Strickler são de $4 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ para os troços de ordem 1 (cabeceiras) e de $25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ para o troço de ordem máxima (secção de controlo). Para uma chuva efectiva de 10 mm/hora, as áreas de contribuição após 1, 2, ..., 6, 7 horas são as seguintes.

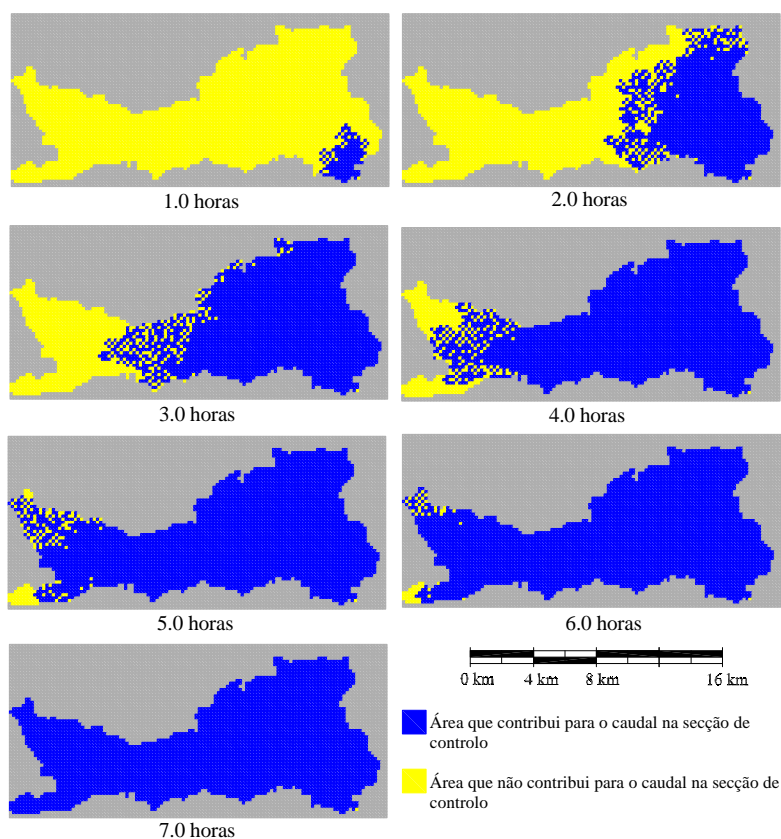


Figura 7 - Áreas de contribuição

No caso de um evento meteorológico real, conhecidos os udogramas de precipitação horária registados nas estações udográficas de Faro, São Brás de Alportel e Vila Real de Santo António e o hidrograma registado na estação meteorológica de Bodega, foi possível calibrar as propriedades hidrológicas dos solos nos dois métodos referidos para o cálculo da infiltração. A precipitação horária é calculada para todas as células (distribuída espacialmente) pelo método do inverso das distâncias, em que num determinado ponto a precipitação é calculada como uma média ponderada pelo inverso das distâncias entre esse ponto e as respectivas estações udométricas consideradas.

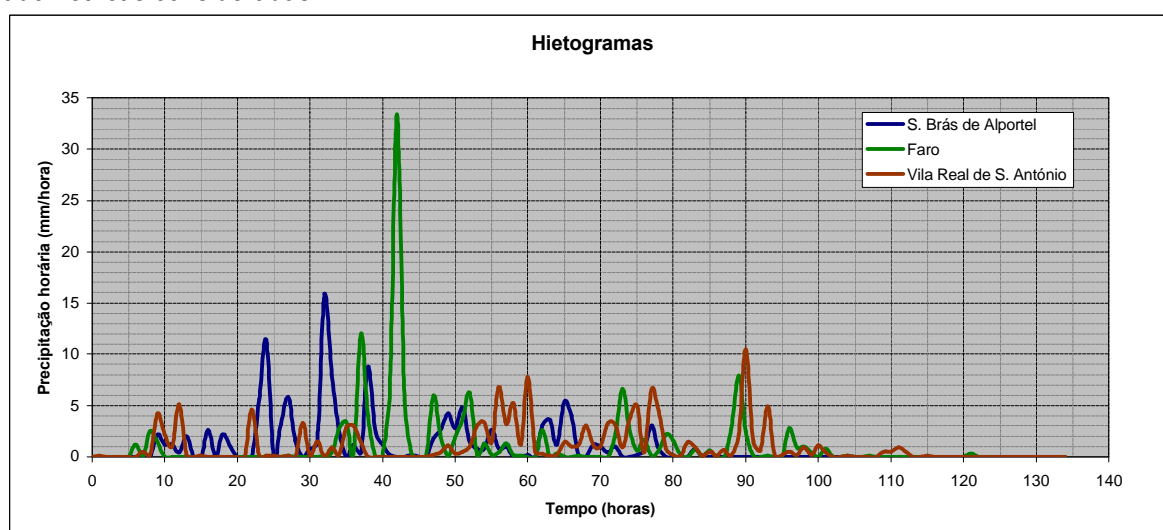


Figura 8 - Precipitação horária observada nas estações udográficas²

² Precipitação com início às 10:00 do dia 09/12/95

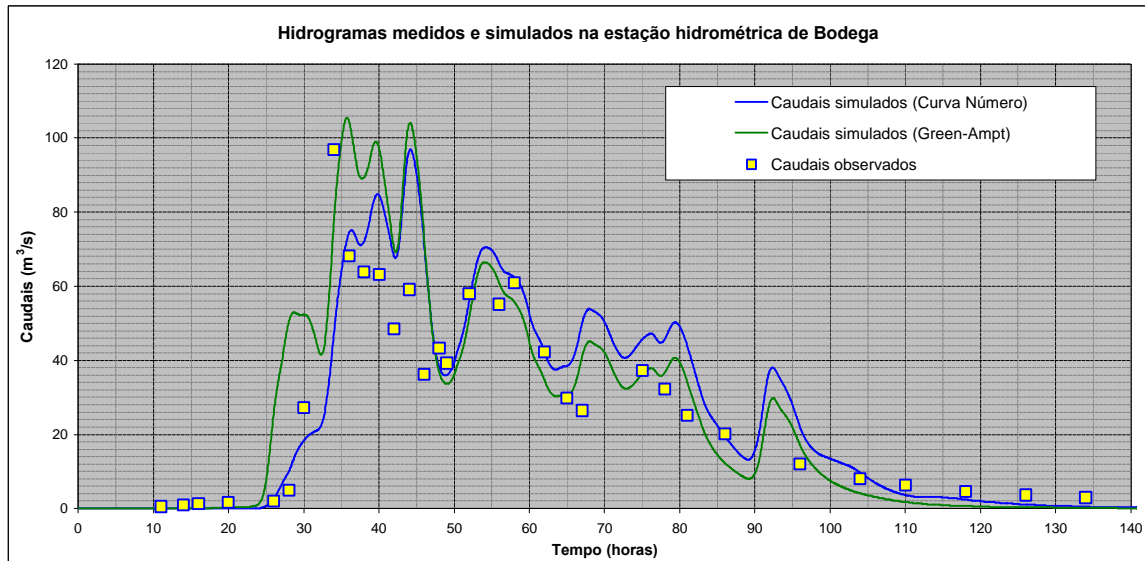


Figura 8 - Hidrogramas calculados e observados na estação hidrométrica de Bodega³

A diferença que se verifica entre os caudais observados e os caudais simulados é essencialmente devida às estações udométricas de Faro e Vila Real de Santo António estarem demasiado afastadas da bacia hidrográfica. Como é sabido, precipitações mais intensas são de curta duração e são espacialmente mal distribuídas. Dai se deve a diferença entre os caudais observados e simulados.

De qualquer modo, e principalmente no segundo e terceiro dia, em que as chuvas são menos intensas, os caudais simulados e calculados praticamente coincidem. Para melhor aferir o modelo seria necessário que existisse pelo menos uma estação udométrica situada dentro da bacia hidrográfica, preferencialmente o mais próximo possível do seu centro de gravidade.

4. CONCLUSÃO

Nesta comunicação, apresenta-se um modelo distribuído determinístico do escoamento superficial numa bacia hidrográfica. O modelo do escoamento de superfície baseia-se no seguinte:

- a topografia da região em estudo, bem como as propriedades dos solos e respectivos usos são dados na forma de um modelo digital do terreno de quadrícula, em que a superfície do terreno é discretizada em células quadradas regulares. Assume-se que as propriedades do terreno são homogêneas no interior de cada célula, podendo no entanto variar de célula para célula. Verifica-se que tal restrição não constitui problema, pois para o comportamento global da resposta da bacia a um evento pluviométrico, a variabilidade espacial das propriedades do terreno é correctamente representada de acordo com a informação de base disponível;

- a descrição da geomorfologia de uma bacia hidrográfica com base num modelo digital do terreno de quadrícula regular exige considerável quantidade de informação, geralmente esta informação tem o papel como suporte físico, o que torna difícil e demorada a sua conversão para suporte digital e é certamente motivo de dissuasão para a utilização de modelos deste género. Contudo com o desenvolvimento e generalização dos sistemas de informação geográfica, SIG, existe cada vez mais informação disponível em suporte digital em que a sua conversão para o formato requerido para o modelo pode ser automatizada, o que torna atractiva a utilização generalizada deste género de modelos a médio prazo;

- uma área de investigação paralela ao tema de estudo e que tem tido um desenvolvimento surpreendente nos últimos tempos é a detecção remota (Singh, 1996), possibilitando a aquisição

³ Hidrograma com início às 10:00 do dia 09/12/95

de informação via satélite. O formato em que esta informação adquirida via satélite se disponibiliza, após ser tratada, são imagens, mapas de pontos que facilmente são convertidas nas matrizes de dados necessárias ao modelo. Por isso é de esperar que a médio prazo seja prático modelar bacias hidrográficas utilizando modelos distribuídos;

- com base no modelo digital do relevo, é discretizada a rede hidrográfica. A geração da rede baseia-se no facto de a direcção do escoamento ser a do maior declive. O principal problema que ocorre com o modelo digital do relevo em quadrícula é que se as cotas de cada célula corresponderem exactamente ao ponto que representa o centro de gravidade da bacia a rede gerada tem poços, ou seja células que não têm saída por representarem erroneamente uma depressão no relevo. Para evitar tal situação a cota de cada célula deverá ser a cota da linha de água mais próxima do centro de gravidade da respectiva célula;

- outro problema que se verificou foi a definição das secções transversais das linhas de água, uma vez que a informação contida no modelo digital do relevo não é suficiente para a sua definição. Por observação da morfologia da região chegou-se à conclusão que a melhor forma de descrever as secções transversais das linhas de água é considerar uma geometria trapezoidal assimétrica. Em que a largura da base é função da ordem do respectivo troço e a inclinação das margens é função das cotas das células vizinhas. Tal consideração poder ter algumas discrepâncias localizadas com a morfologia "*in-situ*", mas considerando a globalidade da bacia e a influência na relação precipitação/escoamento superficial, tal consideração relevou-se ser bastante coerente, uma vez que os valores das rugosidades considerados são coerentes com a bibliografia, Chow 1959, Silva 1996;

- para definir os coeficientes de rugosidade de Manning-Strickler a atribuir aos troços da rede hidrográfica considerou-se, por observação das linhas de água "*in-situ*" uma variação destes coeficientes de montante para jusante proporcional à ordem do respectivo troço. Tal consideração apesar de poder ter algumas discrepâncias com os valores reais, em alguns pontos localizados da bacia hidrográfica, revelou-se acertada, uma vez que os coeficientes de rugosidade atribuídos aos troços de cabeceira, portanto de ordem um e ao troço que representa a secção de controlo são coerentes com a bibliografia, Chow 1959, Silva 1996, assim como o tempo de concentração;

- um dos principais defeitos apontados aos modelos digitais de quadrícula é que os resultados obtidos são influenciados pela dimensão das células. Tal facto realmente ocorre, mas pode ser minimizado pelas considerações feitas no ponto anterior e pela inclusão de um factor de sinuosidade adicional;

- a aplicação da equação da onda cinemática para a modelação do escoamento superficial em regime variável revelou-se adequada, sendo apenas de referir algumas diferenças verificadas entre as curvas de esvaziamento dos hidrogramas calculado e observado, uma vez que para valores de caudais muito baixos, as celeridades diminuem consideravelmente, o que faz com que o tempo de esvaziamento da rede hidrográfica seja alto. Tal constatação também é registada por Silva, 1996;

- a principal falha na instrumentação é não existir uma estação udométrica próxima do centro de gravidade da bacia. As estações udométricas, à excepção da estação de São Brás de Alportel estão mais afastadas do centro de gravidade da bacia hidrográfica do que seria desejável. Isto provoca alguma diferença entre a precipitação espacialmente distribuída calculada e a real, o que evidentemente se reflecte nos hidrogramas calculados;

- a aplicação da equação de Green-Ampt para a modelação matemática da infiltração revela alguns problemas quando a aplicação se faz a esta escala. Não obstante do bom comportamento da equação, esta necessita de parâmetros do solo que não são fáceis de obter e que apresentam grande variabilidade espacial, mesmo dentro das mesmas classes taxonómicas. Outro problema da aplicação desta equação é que não existe forma explícita de considerar o efeito do uso do solo.

Tal consideração terá que ser introduzida nos parâmetros intrínsecos do solo mediante aferição destes;

- a aplicação do método da curva número do Soil Conservation Service para o cálculo da precipitação efectiva revela-se prático. Nos cálculos efectuados observou-se uma excelente aproximação no cálculo do volume de precipitação efectiva, utilizando os valores de *CN* indicados na bibliografia. Contudo a equação de Green-Ampt revelou-se mais eficiente quando se compara a distribuição da precipitação efectiva ao longo do tempo de cálculo.

SIMBOLOGIA

<i>A</i>	área da secção transversal do escoamento;
<i>a e b</i>	parâmetros da onda cinemática;
<i>CN</i>	curva número;
<i>Dt</i>	intervalo de tempo;
<i>Dx</i>	comprimento do troço;
<i>g</i>	aceleração da gravidade;
<i>ic</i>	número do troço;
<i>j</i>	nível de tempo;
<i>K_s</i>	coeficiente de rugosidade de Manning-Strickler;
<i>P</i>	perímetro molhado da secção transversal;
<i>P</i>	precipitação total;
<i>P_e</i>	precipitação efectiva;
<i>Q</i>	caudal;
<i>(Q₁)_{ic}</i>	caudal a montante do troço <i>ic</i> ;
<i>(Q₂)_{ic}</i>	caudal a jusante do troço <i>ic</i> ;
<i>q_{No(1)}^j</i>	caudal de percurso calculado com base no excesso de precipitação gerado na célula a montante do respectivo troço;
<i>S_o</i>	declive do perfil longitudinal da linha de água;
<i>S_f</i>	declive da linha de energia;
<i>S₀</i>	declive do perfil longitudinal da linha de água;
<i>t</i>	tempo;
<i>y</i>	profundidade do escoamento;
<i>x</i>	distância medida segundo a direcção do escoamento;

AGRADECIMENTOS

O autor deseja apresentar os seus agradecimentos a todas as pessoas e entidades/instituições que, de algum modo contribuíram para a elaboração deste trabalho.

Em particular gostaria de agradecer:

- Ao Professor Doutor António Carmona Rodrigues pela sua disponibilidade e prontidão na orientação e cooperação neste trabalho;

- Ao Eng. José Luís Teixeira da Costa, da Universidade do Algarve, Escola Superior de Tecnologia pelos seus conselhos práticos e apoio dado durante a realização deste trabalho;

- Ao Instituto da Água (INAG), em especial à Eng^a Cláudia Brandão, pela disponibilização dos dados de campo, necessários à aferição deste trabalho;

- À Direcção Regional do Ambiente do Algarve (DRAA), em especial ao Sr. Cláudio pela sua prontidão em disponibilizar os dados da estação meteorológica de São Brás de Alportel;

BIBLIOGRAFIA

- [1] - **Abbott**, M. B. (1992). "Computational Hydraulics". International Institute for Hydraulic and Environmental Engineering, Delft. Danish Hydraulic Institute, Horsholm.
- [2] - **Agassi**, M. (1996). "Soil Erosion, Conservation and Rehabilitation". Marcel Dekker, Inc.
- [3] - **Brandão**, C.; **Rodrigues**, R. (1998) "Precipitações Intensas em Portugal Continental para Períodos de Retorno até 1000 anos". Direcção dos Serviços de Recursos Hídricos, Instituto da Água. Lisboa, 1998.
- [4] - **Bras**, Rafael L. (1990). "Hydrology, an introduction to hydrologic science". Addison-Wesley Series in Civil Engineering.
- [5] - **Brown**, A. G.; **Quine**, T. A. "Fluvial Processes and Environmental Change". Wiley, 1999.
- [6] - **Cárdenas**, Julio Francisco Oliveira (1996) "Spatially Distributed Modeling of Storm Runoff and non-Point Source Pollution Using Geographic Information Systems". Dissertação apresentada à Universidade do Texas em Austin.
- [7] - **Cardoso**, António Heleno. "Hidráulica Fluvial". Fundação Calouste Gulbenkian, 1998.
- [8] - **Cardoso**, José V. J. de Carvalho (1965). "Os solos de Portugal, sua classificação, caracterização e génese". Direcção Geral dos Serviços Agrícolas, Lisboa 1965.
- [9] - **Connolly**, D. R.; **Ciesiolka**, C. A. A.; **Silburn** D. M.; **Carrol** C. (1997). "Distributed parameter model applied to a range of catchment scales using rainfall simulator data". Journal of Hydrology, 201 (1997) pag. 311-328.
- [10] - **Cornelis** B.; **Vreugdenhil** (1989). "Computational Hydraulics". Springer - Verlag.
- [11] - **Cunge**, J. A.; **Holly**, F. M.; **Verwey** A. (1980). "Practical Aspects of Computational River Hydraulics". Pitman Advanced Publishing Program.
- [12] - **Debo**, Thomas N.; **Reese**, Andrew J. "Municipal Storm Water Management". Lewis Publisher, 1995.
- [13] - **Flanagan**, D. C.; **Nearing**, N. A. (1995). "USDA - Water Erosion Prediction Project. Hillslope Profile and watershed model documentation". USDA-ARS, National Soil Erosion Research Laboratory, 1995.
- [14] - **Fletcher**, C. A. (1991). "Computational Techniques for Fluid Dynamics". Springer - Verlag
- [15] - **Franz**, D.; **Melching**, C. (1997). "Full Equations model for the Solution of the Full, Dynamic Equations of Motion for One-Dimensional Unsteady Flow in Open Channels and through Control Structures". U. S. Geological Survey. Water-Resources investigations Report 96-4240.
- [16] - **Fread**, D. L.; **Lewis**, J. M. (1998). "NWS FLDWAV MODEL". Hydrologic Research Laboratory, Office of hydrology. National Weather Service.
- [17] - **Graf**, Walter H.; **Altinakar**, M. S. (1998). "Fluvial Hydraulics". Wiley.
- [18] - **Hornberg**, G. M.; **Raffensperger**, J. P.; **Wilberg**, P. L. (1998). "Elements of Physical Hydrology". The Johns Hopkins University Press.
- [19] - **Kopp**, Erwin; **Sobral**, Manuel; **Soares**, Teresa; **Woerner**, Martin. "Os solos do Algarve e as suas características". Min. da Agricultura, Pescas e Alimentação - DGHEA. Direcção Regional de Agricultura do Algarve, DRAA. Sociedade Alemã de Cooperação Técnica. Faro 1989.
- [20] - **Kothyari**, U. C.; **Tiwari** A. K.; **Singh** R. (1997). "Estimation of temporal variation of sediment yield from small catchments through the kinematic method". Journal of Hydrology, 203 (1997) pag. 39-57.
- [21] - **Kutilek**, Miroslav; **Nielsen**, Donald R. "Soil Hydrology" (1994). Catena Verlag.
- [22] - **Lança**, R. (2000). "Contribuição Para o Estudo de Cheias Recorrendo a um Modelo Distribuído". Universidade de Évora.
- [23] - **Lencastre**, A.; **Franco**, F. M. (1992). "Lições de Hidrologia". Universidade Nova de Lisboa. Faculdade de Ciências e Tecnologia.

- [24] - **Loureiro**, João Mimoso (1983). "*Monografia hidrológica do Algarve*". Universidade do Algarve. Direcção Geral dos Recursos e Aproveitamentos Hidráulicos
- [25] - **Miyazaki**, T. (1993). "*Water Flow in Soils*". Marcel Dekker, Inc.
- [26] - **Moussa**, R.; **Bocquillon**, C. (1996). "*Criteria for the choice of flood-routing methods in natural channels*". Journal of Hydrology, 186 (1996) pag. 1-30.
- [27] - **Novotny**, Vladimir (1995). "*Nonpoint Pollution and urban stormwater management*". Water Quality Management Library - Volume 9. Technomic Publishing Company, Inc., 1995.
- [28] - **Parr**, A.; **Zou**, S.; **McEnroe**, B. (Setembro 1998). "*Effects of Infiltration on Agricultural Runoff Contamination*". Journal of Environmental Engineering.
- [29] - **Raudkivi**, Arved J. "*Loose Boundary Hydraulics*". A. A. Balkema, 1998.
- [30] - **Santos**, Francisco Lúcio (1997). "*Transferencia de água e de solutos no solo*". Publicações Universidade de Évora
- [31] - **Silva**, Maria Manuela Portela Correia dos Santos Ramos da (1996). "*Modelo Distribuído de Simulação do Escoamento Superficial*". Dissertação submetida para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Técnica de Lisboa.
- [32] - **Singh**, Vijav P; **Fiorentino**, M. (1996). "*Geographical Information Systems in Hydrology*". Kluwer Academic Publishers
- [33] - **Smith**, Keith; **Ward**, Roy. "*Floods, Physical Processes and Human Impacts*". Wiley, 1998.
- [34] - **Ven-te-Chow** (1964). "*Handbook of Applied Hydrology*", McGraw-Hill.
- [35] - **Ven-te-Chow** (1959). "*Open Channel Hydraulics*". McGraw-Hill.
- [36] - **Ven-te-Chow**; **Mays**, Larry; **Maidment**, David (1988). "*Applied Hydrology*". McGraw-Hill.
- [37] - **Wigmosta**, Mark S.; **Burges**, Stephen J. (1997). "*An adaptive modeling and monitoring approach to describe the hydrologic behavior of small catchments*". Journal of Hydrology, 202(1997) pag. 48-77.
- [38] - **Yates**, David N. (1997). "*Approaches to Continental Scale Runoff for Integrated Assessment Models*". Journal of Hydrology, 201 (1997) pag. 289-310.