# UTILIZAÇÃO DE REDES TIN EM MODELOS DISTRIBUÍDOS DE PRECIPITAÇÃO/ESCOAMENTO SUPERFICIAL.

LANÇA, Rui M.

*Eq. Professor Adjunto, Universidade do Algarve (EST), Investigador na MARETEC (IMAR, IST)* rlanca@ualg.pt, w3.ualg.pt/~rlanca

**RESUMO**

A comunicação apresenta as directivas de desenvolvimento de um modelo distribuído e a sua aplicação à Ribeira da Pradiela (distrito de Évora, afluente do Dejebe).

A utilização de modelos distribuídos de precipitação/escoamento superficial para modelação integrada dos fenómenos hidrodinâmicos, transporte de sedimentos e qualidade da água à escala da bacia hidrográfica, é fundamental para uma correcta percepção dos binómios causas/efeitos e consequente gestão optimizada dos recursos hídricos.

Os modelos distribuídos existentes assentam em malhas estruturadas de células regulares adjacentes (*DEM*) ou em malhas de triângulos irregulares adjacentes (*TIN*). Os primeiros têm um processamento relativamente simples e são compatíveis com a estrutura matricial de uma imagem *raster*, contudo obrigam a uma densidade de informação uniforme sobre a área em estudo, apresentam problemas de escala na representação das linhas de água e das variáveis distribuídas como a altitude, classes de solo, classes de uso do solo, dotações de rega, fertilizantes e pesticidas. As redes TIN são mais versáteis e no caso particular de os pontos levantados sobre o terreno formarem uma métrica regular, a rede TIN representa uma malha estruturada.

Os modelos existentes que utilizam uma malha TIN definem a rede hidrográfica pelas arestas comuns dos triângulos que formam um ângulo côncavo entre si. Esta implementação pode forçar a existência de linhas de água onde não existem traços morfológicos da sua existência. A metodologia proposta para gerar as linhas de água passa por definir uma área de influência associada a cada nó (polígono de Voronoi) que drena por uma linha de água definida entre o próprio nó e o nó vizinho com o qual forma o maior declive. Esta metodologia é relativamente simples, não cria ambiguidades e permite criar uma rede hidrográfica cuja estrutura é perfeitamente compatível com a implementação de um algoritmo de diferenças finitas. As secções transversais das linhas de água são definidas como função da área a montante da respectiva secção.

A precipitação efectiva é calculada à escala da bacia pelo método da curva número (CN) do *Soil Conservation Service* (SCS) e à escala de uma parcela pela equação de Richardson. O escoamento é resolvido pela equação da onda cinemática nas linhas de água de ordem superior, pela equação de conservação da massa nas depressões e pelas equações de Saint-Venant na linha de água principal. É considerado o destacamento nas encostas e o destacamento/ transporte/ deposição nas linhas de água. Também é considerado o transporte de poluentes adsorvidos aos sedimentos, bem como fenómenos de *wash-off* .

**Palavras-chave:** Bacia hidrográfica, TIN, escoamento superficial, sedimentos, poluentes

## 1.INTRODUÇÃO

A água é um bem de importância vital para a qualidade de toda a vida, por isso o conhecimento de todo o ciclo hidrológico à escala da bacia hidrográfica é essencial para a correcta gestão dos recursos hídricos.

A disponibilidade hídrica pode ser restringida pela quantidade ou pela qualidade. A gestão da bacia hidrográfica deve reflectir o conhecimento de todas as consequências das actividades existentes na bacia. Para as fontes pontuais de poluição é necessário conhecer a capacidade de assimilação do meio receptor e considerar de forma integrada os efeitos cumulativos das diferentes fontes existentes na bacia hidrográfica. Do ponto de vista técnico esta situação é de fácil resolução pois passa por incrementar os níveis de tratamento dos efluentes, embora isto possa ter consequências financeiras difíceis de comportar.

A poluição difusa é mais difícil de determinar e carece de programas de monitorização mais extensos como:

- Medir os níveis de poluição atmosférica;
- Determinar as dotações de fertilizantes aplicadas;
- Determinar as dotações de pesticidas e herbicidas aplicados;
- Conhecer as práticas agrícolas e as quantidades de resíduos orgânicos deixados no solo após a colheita;
- Conhecer a composição das fontes de poluição pontuais.

O seu controle obriga a medidas mais estruturantes como:

- Reordenamento das parcelas agrícolas;
- Incrementar a área de bosque;
- Controlo preciso das dotações de fertilizantes, pesticidas e herbicidas aplicadas;
- Implementação de medidas para o controlo da erosão como: culturas segundo as curvas de nível ou terraços;
- Controlo do número e níveis de tratamento das fontes de poluição pontuais.

Gerir todos estes dados e determinar quais as actividades, qual a sua distribuição geográfica, qual o nível de exploração dos recursos naturais, qual o nível de tratamento dos efluentes das fontes de poluição pontuais, quais as práticas agrícolas a adoptar e estabelecer níveis admissíveis para a poluição atmosféricas são os objectivos de um programa de controlo da poluição difusa.

## 2.CONSTITUIÇÃO DO MODELO/ORGANIZAÇÃO DA INFORMAÇÃO

A informação para um modelo distribuído é geograficamente dispersa, logo é compatível com a utilização de um sistema de informação geográfica (SIG). No modelo desenvolvido apenas se utiliza um software SIG comercial para a visualização de resultados.

Os dados necessários para correr um modelo com estas características são:

- Rede de pontos cotados da superfície do terreno;
- Carta de solos;
- Carta de usos do solo;
- Localização das fontes de poluição pontuais e suas propriedades;
- Dados climatéricos (precipitação, vento, temperatura);
- Práticas agrícolas;
- Dotações de rega;
- Dotações de fertilizantes;
- Dotações de pesticidas e herbicidas;

## 3.MALHAS ESTRUTURADAS *VERSUS* MALHAS NÃO ESTRUTURADAS

O primeiro passo para criar o modelo de bacia hidrográfica é gerar o modelo digital do terreno. No estado da arte, existem duas fortes tendências, as malhas estruturadas de células regulares adjacentes (*DEM*) e as malhas não estruturadas de triângulos irregulares adjacentes (*TIN*):

Nas malhas estruturadas os espaçamentos são regulares e a organização da informação é análoga à de uma imagem *raster*.

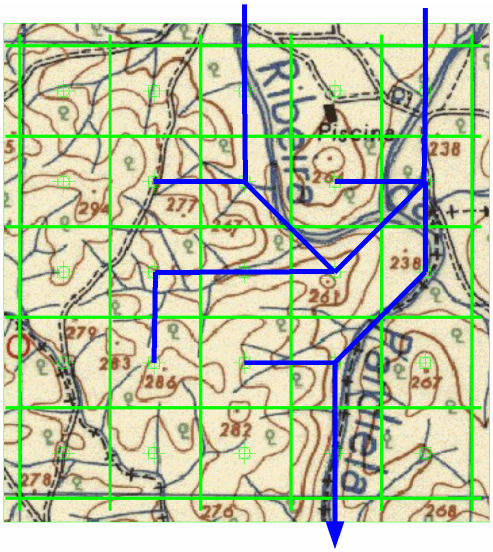


**Figura 1 – Malha estruturada**

A segunda forma de organização consiste numa malha não estruturada, o que permite seleccionar criteriosamente a localização dos pontos de forma a descrever correctamente as singularidades do terreno.

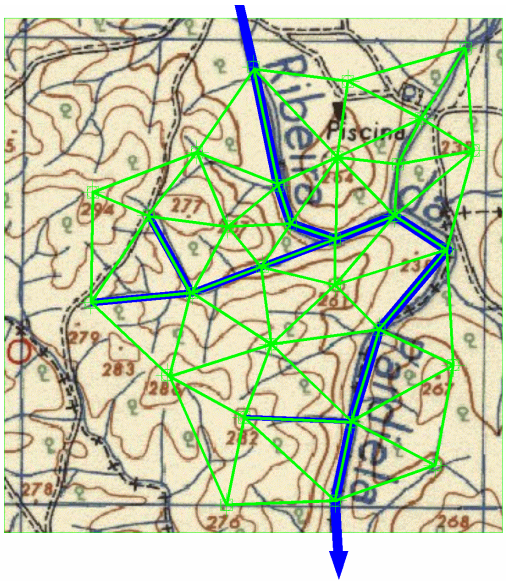


**Figura 2 – Malha não estruturada TIN**

A utilização de malhas estruturadas tem como principais vantagens:

- Simplicidade da estrutura;
- Não existem ambiguidades ao gerar a estrutura;

- Compatibilidade entre a estrutura do modelo digital do terreno e o formato de uma imagem *raster*.

Os principais inconvenientes deste método são:

- Obriga a uma resolução constante sobre toda a área em estudo;
- Para aplicar este método é necessário provocar a translação do ponto com a cota do talvegue para o centro geométrico da célula. Caso isto não seja feito é impossível gerar as linhas de água;
- A existência de oito possíveis direcções para o escoamento em conjunto com a translação dos pontos faz com que exista deformação e excessiva regularização da rede hidrográfica de cálculo.

A utilização de malhas não estruturadas TIN tem como vantagens:

- Quando aplicada a bacias hidrográficas com distribuição não uniforme da variação de uma variável espacialmente distribuída não obriga a discretizar excessivamente as zonas onde os valores da variável são mais próximos;
- Pode ser aplicada quando existem pontos próximos com grande diferença de valores, isto causa problemas, especialmente nos métodos de interpolação polinomial;
- Não surgem problemas quando os pontos levantados se concentram sobre as curvas de nível. Esta situação ocorre frequentemente, quando a informação provém de cartas com curvas de nível;
- Exige pouco processamento numérico. Quando os métodos de levantamento são automáticos, é comum ter valores da ordem das centenas de milhar de pontos;
- Permite adicionar novos pontos à superfície sem recalcular toda a superfície do início;

O conjunto de factores apresentado faz com que a utilização de malhas não estruturadas seja atractivo quando se pretende descrever com rigor a morfologia da bacia hidrográfica.

## 4. TRIANGULAÇÃO DE DELAUNEI

O método proposto para gerar a malha não estruturada TIN designa-se triangulação de Delaunei.

A triangulação de Delaunei está directamente relacionada com os polígonos de Voronoi. Estes polígonos dividem o domínio em polígonos irregulares. Cada um destes polígonos contém no seu interior um dos pontos levantados no terreno, pertencente ao conjunto de dados inicial. Os vértices do polígono são os circuncentros dos triângulos que partilham um vértice comum.

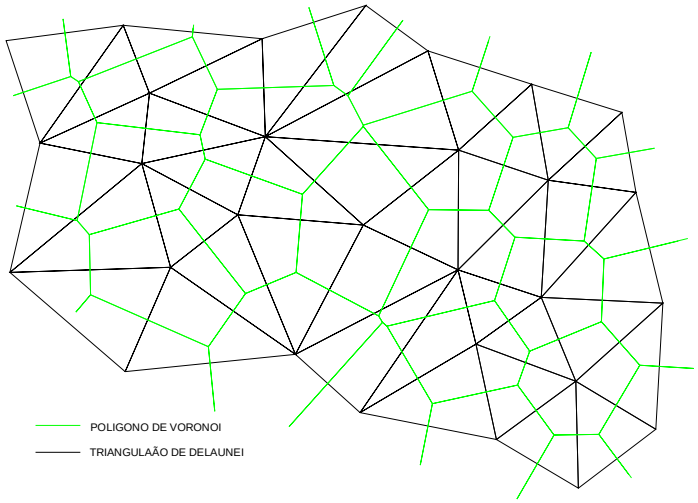


**FIGURA 3 – Triangulação de Delaunei e polígonos de Voronoi**

A triangulação feita por este método tem a vantagem de gerar triângulos o mais equiláteros possível e a malha obtida é única e independente da ordem pela qual os triângulos são gerados. Podem surgir alguns casos que criam problemas ao gerar a malha: quatro pontos a formarem um rectângulo; dois pontos com as mesmas coordenadas. Em dados reais estas situações são pouco frequentes e podem ser eliminadas criando uma pequena perturbação num dos pontos. As descontinuidades são tratadas de uma forma natural, contudo não podem existir dois pontos com as mesmas coordenadas.

Os polígonos de Voronoi são utilizados para discretizar a superfície da bacia hidrográfica. As propriedades do solo, uso do solo, cargas de nutrientes e de poluentes são consideradas uniformes em cada um destes polígonos.

## 5. REDE HIDROGRÁFICA

Os algoritmos para gerar a rede hidrográfica num modelo de células regulares adjacentes já se baseiam numa prática bem estabelecida, contudo as redes de triângulos irregulares adjacentes oferecem alguns desafios adicionais. Tipicamente o escoamento ocorre sobre a superfície dos triângulos. Estes algoritmos podem determinar a geometria das linhas de água com base no maior declive e não limitam a direcção do escoamento em ângulos de 45º.

A maior desvantagem destes modelos é a necessidade de considerar o escoamento sobre e entre os triângulos em separado.

O método mais comum para determinar a rede hidrográfica em modelos TIN consiste em determinar os locais onde o declive de dois triângulos converge para uma aresta comum. Este critério tende a ser algo arbitrário porque não tem em consideração os mecanismos físicos ou marcas morfológicas do início de uma linha de água e é sensível a imprecisões dos dados ou da interpolação linear. Mesmo uma ligeira convexidade entre triângulos adjacentes é considerado como uma linha de água, enquanto que um triângulo quase plano é sempre considerado uma encosta.

A metodologia utilizada para gerar a rede hidrográfica no modelo desenvolvido baseia-se nos polígonos de Voronoi. O escoamento originado em qualquer nó segue na direcção do nó adjacente com maior declive. Segundo este método, a área de contribuição de um nó é igual à soma das áreas dos polígonos de Voronoi dos nós que convergem para esse ponto, incluindo a do próprio nó. Isto tem vantagem quando se pretende resolver o problema por diferenças finitas porque cada nó tem uma zona de influência (polígono de Voronoi) e uma direcção de escoamento associadas. As principais desvantagens deste método são:

- A fronteira da bacia hidrográfica é definida por polígonos de Voronoi, o que obriga a um contorno irregular;
- As linhas de água são forçadas a seguir as arestas dos triângulos.

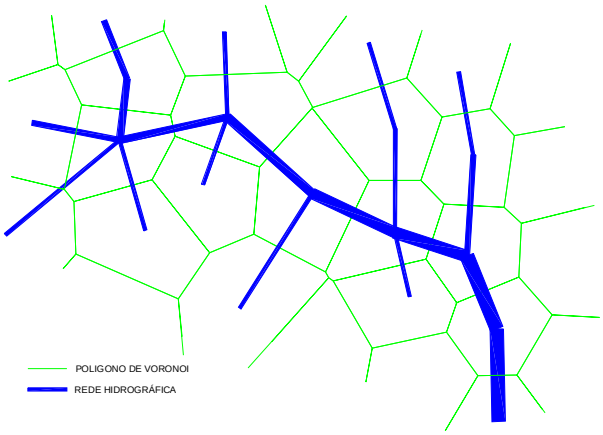


**Figura 4 – Rede hidrográfica**

### 5.1. Depressões naturais do terreno

Os modelos digitais do terreno frequentemente têm depressões, ou seja, pontos com cota inferior à de todos os seus vizinhos. As depressões dividem-se em dois grupos: pequenas depressões que surgem devido a erros de geração do próprio modelo digital do terreno e grupos de pontos que drenam para um ponto sem drenagem, os quais representam a batimetria de um pego, lago ou albufeira. As primeiras surgem como um único ponto sem drenagem e são simplesmente removidas, as segundas têm um processo de identificação um pouco mais complexo, o qual assenta nas seguintes etapas:

1) Encontrar um ponto com cota inferior a todos os seus vizinhos que consequentemente drenam para o mesmo (depressão).
2) Para todos os pontos que drenam para a depressão, identifica caso exista, o vizinho com menor cota que não drena para a depressão.
3) A saída da depressão, será o ponto com menor cota que drena para a depressão e que tem um vizinho que não drena para a depressão. A cota de saída será a maior entre o ponto escolhido e o respectivo vizinho.
4) Todos os pontos que drenam para a depressão com cota inferior à do ponto de saída são marcados como inundados.
5) Após todas as depressões terem sido identificadas, o número de ordem do troço de saída da depressão é alterado para o máximo número de ordem que drena para a depressão mais um e todos os troços a jusante deste são actualizados. A função que faz a transferência do caudal entre o nó mais baixo do lago ou albufeira e o nó de saída considera o nível da superfície livre horizontal e tem em consideração a curva cota/volume da depressão. Para a generalidade dos casos, esta curva será dada como um dado exterior ao modelo digital do terreno.

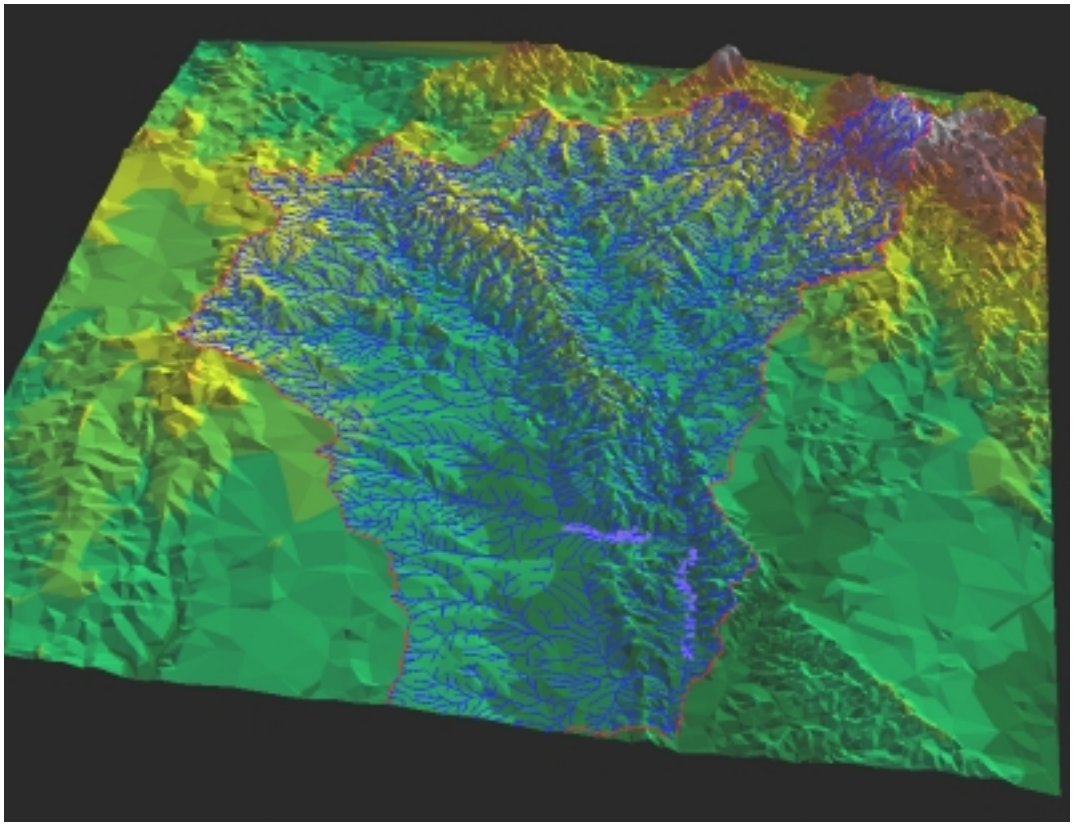

**Figura 5 – Vista 3D da bacia hidrográfica, rede hidrográfica e depressões do terreno**

## 6. MODELO HIDROLÓGICO - DADOS DE ENTRADA

### 6.1.Precipitação

As simulações efectuadas referem-se a um determinado período de tempo do qual se dispõe: da precipitação horária medida em udógrafos colocados na vizinhança da bacia hidrográfica; do limnigrama e respectiva curva de vazão de uma ou mais secções de controlo. A conjugação dos dados de precipitação e do escoamento para uma chuva permite calibrar o modelo.

A precipitação em cada célula é calculada a partir dos udogramas obtidos nas estações meteorológicas. O valor da precipitação numa célula é calculado como a média ponderada pelo inverso das distâncias às respectivas estações meteorológicas. Este método foi proposto por Wei e McGuiness, 1973 e vem referido em Chow, 1988.

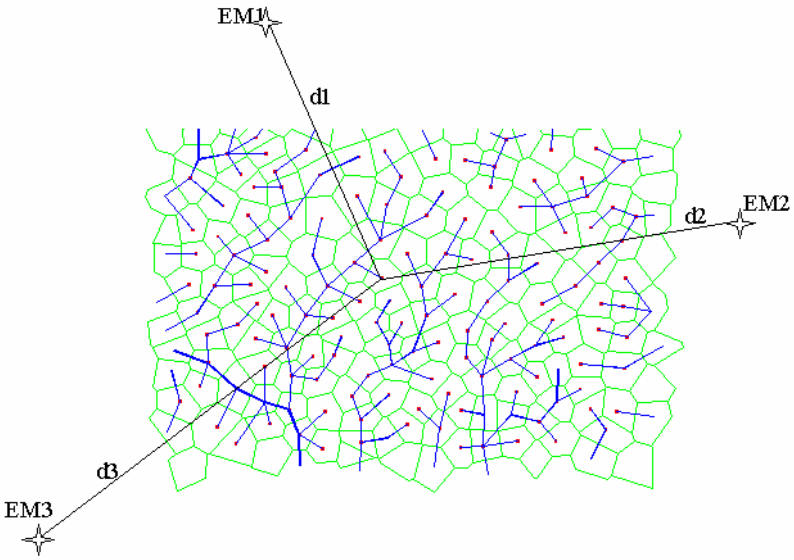


**Figura 6 – Posicionamento das estações meteorológicas**

### 6.2. Classe hidrológica do solo

A cada polígono de Voronoi é atribuído uma classe de solo e uma classe de ocupação do solo. A classe de solo é dada de acordo com a classificação do SROA ou da FAO e classe de ocupação do solo é atribuída pela carta de Ocupação do solo - Cos 90'. A cada classe estão associadas as propriedade inerentes à referida classificação: número de horizontes, textura para cada horizonte, espessura de cada horizonte, curva número e rugosidade da superfície.

Para cada conbinação de classes de solo com uso do solo, resulta uma classe hidrológica, na qual estão atribuídas as variáveis necessárias para o cálculo da infiltração e evapotranspiração. Estas variáveis consideram-se uniformes sobre a área de um polígono.

## 7.PRECIPITAÇÃO/ESCOAMENTO SUPERFICIAL

A modelação do ciclo hidrológico na superfície da bacia hidrográfica faz-se em duas fases distintas, a fase escoamento de superfície e escoamento canalizado. Na primeira fase, a modelação faz-se ao nível do polígono de Voronoi, no qual ocorre precipitação, intercepção, infiltração, escoamento superficial e evapotranspiração. O escoamento superficial forma uma lâmina de água sobre o solo que flui até à linha de água, logo, existe tempo de retenção no polígono e capacidade de transporte, o que origina erosão e *wash-off* de nutrientes e poluentes.

### 7.1.Excesso de precipitação

Por excesso de precipitação entende-se a parcela da precipitação (*P*) que não fica retida na vegetação nem nas pequenas depressões da superfície do solo e que fica disponível para escoar superficialmente.

O método utilizado para determinar o excesso de precipitação ($P_e$) é a curva número (CN) do *Soil Conservation Service* (*SCS*) referido em SWAT, 2000. Este método foi apresentado na década de 50 e é o produto de mais de 20 anos de investigação na relação entre a precipitação e o escoamento superficial gerado em pequenas bacias rurais nos Estados Unidos. Quando se trabalha à escala da bacia é preferível utilizar um modelo conceptual mais simples de calibrar do que um modelo físico como Green-Ampt ou Richardson para os quais não se possuí dados suficientes.

### 7.2. Escoamento superficial não canalizado – *run-off*

O cálculo do escoamento não canalizado é feito ao nível do polígono de Voronoi. Consideram-se todas as propriedades uniformes no interior da célula. A velocidade média e tempo de concentração são estimados com base na equação de Manning e o balanço de massas entre os caudais de entrada, saída e variação do volume armazenado na superfície é feito com base no método de Muskingum.

### 7.3. Escoamento superficial canalizado

O cálculo do escoamento superficial no canal é executado segundo o modelo de onda cinemática. Este deriva de uma simplificação das equações gerais do escoamento em superfície livre, conhecidas por equações de Saint-Venant:

$$\frac{\partial Q}{\partial x}+\frac{\partial A}{\partial t}=q \qquad (1)$$

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

em que as variáveis assumem os seguintes significados:

| | |
|---|---|
| $Q$ | caudal ($m^3/s$); |
| $A$ | área da secção transversal do escoamento ($m^2$); |
| $x$ | distância medida segundo a direcção do escoamento (m); |
| $t$ | tempo (s); |
| $g$ | aceleração da gravidade ($m^2/s$); |
| $y$ | profundidade do escoamento (m); |
| $S_0$ | declive do perfil longitudinal da linha de água (m/m); |
| $S_f$ | declive da linha de energia (m/m). |

Estas equações diferenciais às derivadas parciais são respectivamente as equações de conservação do volume (1) e de conservação da quantidade de movimento (2).

Se desprezar os termos da aceleração local, aceleração convectiva e diferença de pressões entre as duas secções transversais extremas do volume de controlo, 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. Nestas condições a aceleração a que a massa de água contida no volume de controlo (troço de linha de água) está sujeita é reduzida.

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

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \alpha \cdot \beta \cdot Q^{\beta-1} \cdot \left( \frac{\partial Q}{\partial t} \right) = q \qquad (3)$$

em que as variáveis assumem o seguinte significado:

| | |
|---|---|
| $Q$ | caudal ($m^3/s$); |
| $x$ | distância medida segundo a direcção do escoamento (m); |
| $q$ | caudal de percurso ($m^3/s/m$); |
| $t$ | tempo (s); |
| $\alpha, \beta$ | parâmetros da equação da onda cinemática. |

Em que $\alpha$ é dado por:

$$\alpha = \left( \frac{P^{2/3}}{K_s \cdot S_0^{1/2}} \right) \qquad (xx)$$

sendo:

| | |
|---|---|
| $K_S$ | coeficiente de rugosidade de Manning-Strickler ($m^{1/3}/s$); |
| $S_0$ | declive do perfil longitudinal da linha de água (m/m); |
| $P$ | perímetro molhado da secção transversal (m); |
| $\beta$ | constante igual a 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 utilizados para a resolução das equações de Saint-Venant.

### 7.4. Depressões naturais do terreno ( Pegos )

As depressões do terreno são preenchidas por água e formam pegos que recebem caudal de um ou mais troços e descarregam num único troço. Como o caudal de saída é função da altura da superfície livre no pego, o caudal é calculado pela variação do volume armazenado (equação 4) e equação de descarga (equação 5).

$$\frac{dV}{dt} = Q_I - Q_O - A_p \cdot f \qquad (4)$$

$$Q_O = C_1 \cdot (h_r - h_z)^{C_2} \qquad (5)$$

sendo:

| | |
|---|---|
| $V$ | volume armazenado ($m^3$); |
| $h_r$ | elevação da superfície da água (m); |
| $h_z$ | cota do fundo do canal na saida (m); |
| $Q_I$ | caudal de entrada ($m^3/s$); |
| $Q_o$ | caudal de saída ($m^3/s$); |
| $A_p$ | área do pego medida em planta ($m^2$); |
| $f$ | taxa de infiltração no pego (m/s); |

### 7.5. Modelo 'Quasi 2D'

A equação de onda cinemática apresentada em 7.3 é válida para o escoamento unidireccional. Numa bacia hidrográfica a água superficial escoa sobre a superfície do terreno e em cada ponto toma a direcção do maior declive descendente. Este critério foi utilizado para gerar a rede hidrográfica, pelo

que o sentido do escoamento está previamente definido. A equação de onda cinemática é resolvida por diferenças finitas e as grelhas espaço tempo são organizadas como representado na figura 7.

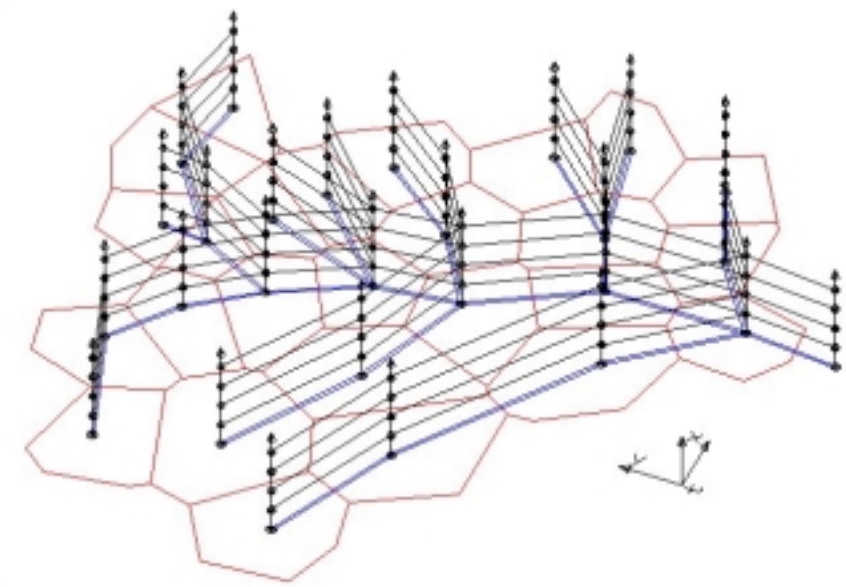

**Figura 7 - Representação esquemática da discretização do continuo espaço - tempo**

Neste conjunto de grelhas numéricas que discretizam o contínuo espaço-tempo actuam dois operadores numéricos que resolvem por diferenças finitas a equação de onda cinemática. O primeiro designado por operador linear é de fácil implementação mas os resultados obtidos variam com a relação Δt/Δx.

$$\left(Q_2^{j+1}\right)_{ic} = \frac{\frac{\left(q_{No(1)}^{j+1}\right)_{ic} + \left(q_{No(1)}^{j}\right)_{ic}}{2} \cdot \Delta t + \alpha \cdot \beta \cdot \left[\frac{\left(Q_1^{j+1}\right)_{ic} + \left(Q_2^{j}\right)_{ic}}{2}\right] \cdot \left(Q_2^{j}\right)_{ic} + \left(Q_1^{j+1}\right)_{ic} + \left(Q_1^{j+1}\right)_{ic} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x}}{\frac{\Delta t}{\Delta x} + \alpha \cdot \beta \cdot \left[\frac{\left(Q_1^{j+1}\right)_{ic} + \left(Q_2^{j}\right)_{ic}}{2}\right]^{\beta-1}} \tag{6}$$

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:

$$C = \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot \left(Q_1^{j+1}\right)_{ic} + \alpha \cdot \left(\left(Q_2^{j}\right)_{ic}\right)^{\beta} + \Delta t \cdot \left(\frac{\left(q_{No(1)}^{j+1}\right)_{ic} + \left(q_{No(1)}^{j}\right)_{ic}}{2}\right) \tag{7}$$

e:

$$f\left(\left(Q_2^{j+1}\right)_{ic}\right) = \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot \left(Q_2^{j+1}\right)_{ic} + \alpha \cdot \left(\left(Q_2^{j+1}\right)_{ic}\right)^{\beta} - C \tag{8}$$

O valor do caudal na secção dois no troço *ic* $\left(Q_2^{j+1}\right)_{ic}$ será o zero da função $f\left(\left(Q_2^{j+1}\right)_{ic}\right)$. 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:

| | |
|---|---|
| $\alpha$ e $\beta$ | parâmetros da onda cinemática; |
| $\Delta t$ | intervalo de tempo (s); |
| $\Delta x$ | comprimento do troço (m); |
| $ic$ | número do troço de rede hidrográfica; |
| $j$ | nível de tempo; |
| $(Q_1)_{ic}$ | caudal a montante do troço ic ($m^3/s$); |
| $(Q_2)_{ic}$ | caudal a jusante do troço ic ($m^3/s$); |
| $q$ | caudal de percurso calculado com base no excesso de precipitação gerado na célula a montante do respectivo troço ($m^3/s/m$). |

Ambos os operadores são explícitos porque a equação de onda cinemática não considera o efeito das condições do escoamento a jusante, logo, mesmo no método não linear o valor $Q_{i+1}^{j+1}$ é função de $Q_i^{j+1}$, $Q_i^j$ e $Q_{i+1}^j$.

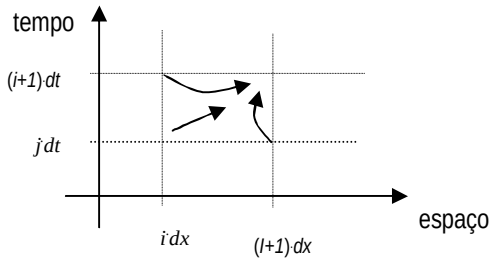


**Figura 8 – Discretização do contínuo espaço tempo**

### 7.6. Transporte de sedimentos

Para o cálculo do transporte de sedimentos utiliza-se um método físico em que a erosão causada pela energia das gotas de chuva e do escoamento superficial são contabilizadas em separado.

A equação utilizada para o cálculo do transporte de sedimentos é uma equação de balanço de massas:

$$\frac{\partial(A \cdot C_S)}{\partial t} + \frac{\partial(Q \cdot C_S)}{\partial x} - e = q_s \qquad (9)$$

sendo:

| | |
|---|---|
| $C_S$ | concentração de sedimentos ($m^3/m^3$); |
| $Q$ | caudal ($m^3/s$); |
| $A$ | área da secção transversal do escoamento ($m^2$); |
| $e$ | taxa de erosão (m2/s); |
| $q_s$ | entrada de sedimentos por unidade de comprimento ($m^3/s/m$). |

Ao nível do polígono de Voronoi a taxa de erosão é composta pela erosão do impacto das gotas de chuva e erosão ou deposição devido ao escoamento superficial.

$$e = e_S + e_h \qquad (10)$$

sendo:

| | |
|---|---|
| $e_S$ | erosão das gotas de chuva ($m^2/s$); |
| $e_h$ | erosão provocada pelo escoamento superficial ($m^2/s$); |

A erosão provocada pelo impacto das gotas de chuva pode ser aproximada por uma relação quadrática da intensidade de precipitação:

$$e_S = c_f \cdot k \cdot r^2 \qquad \text{para } q > 0 \qquad (11)$$

$$e_S = 0 \qquad \text{para } q = 0 \qquad (12)$$

sendo:

- $c_f$ constante relacionada com o solo e propriedades da superfície;
- $k$ factor de redução devida ao efeito atenuador de uma lamina de água sobre a superfície. $k(h) = \exp(-c_h \cdot h)$;
- $c_h$ amortecimento da superfície da água;

A erosão provocada pelo escoamento superficial representa a taxa de permuta de sedimentos entre o solo e o escoamento sobre este.

Para um determinado escoamento é atingido um ponto de equilíbrio, função da velocidade, profundidade e declive. A taxa de erosão num local e num instante é função da diferença entre a concentração de sedimentos no equilíbrio e a concentração de sedimentos nesse instante.

$$e_h = c_g \cdot (C_m - C_S) \cdot A \qquad (13)$$

sendo:

- $C_m$ concentração de sedimentos quando o equilíbrio é atingido ($m^3/m^3$);
- $C_S$ concentração de sedimentos no local e instante em que se calcula a taxa de erosão ($m^3/m^3$);
- $c_g$ taxa de transferência entre sedimentos e escoamento ($s^{-1}$);

A capacidade de transporte é dada pela seguinte expressão, proposta por Engelund e Hansen (1967), referido em *KINEROS REFERENCE MANUAL*.

$$C_m = \frac{0.5 \cdot u \cdot u_*^3}{g \cdot d \cdot h \cdot (\gamma_S - 1)^2} \qquad (14)$$

sendo:

- $u$ velocidade do escoamento (m/s);
- $u_*$ velocidade de atrito junto ao fundo (m/s);
- $g$ aceleração da gravidade ($m/s^2$);
- $d$ diâmetro das partículas (m);
- $\gamma$ peso volúmico do sedimento ($N/m^3$);
- h altura do escoamento (m).

A resolução por diferenças finitas da equação 9 é feita pela aplicação do operador numérico apresentado na equação 15.

$$Q_{s\,i+1}^{\,j+1} = \frac{(q_s + e) \cdot \Delta t \cdot \Delta x + Q_{s\,i}^{\,j+1} \cdot \Delta t - C_s \cdot \alpha \cdot \beta \cdot Q^{\beta-1} \cdot \Delta x \cdot \left(Q_{i+1}^{j+1} - Q_{i+1}^{j}\right) + \alpha \cdot Q^{\beta} \cdot \Delta x \cdot \dfrac{Q_{s\,i+1}^{\,j}}{Q_{i+1}^{j}}}{\Delta t + \dfrac{\alpha \cdot Q^{\beta}}{Q_{i+1}^{j+1}} \cdot \Delta x} \qquad (15)$$

O operador numérico para a resolução do transporte do caudal sólido é explícito e todos os termos do lado direito da equação são conhecidos se o algoritmo para determinar o caudal líquido correr previamente.

## 8. CONCLUSÃO

O modelo está em fase de desenvolvimento, como tal a implementação dos algoritmos em FORTRAN 95 ainda não está concluída. Espera-se que num prazo relativamente curto se possam apresentar análises comparativas entre os resultados deste modelo e do SWAT. O caso de estudo será a Ribeira da Pradiela, situada a sul de Evoramonte e afluente do Dejebe.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho está a ser desenvolvido no âmbito do projecto tempQsim (EVALUATION AND IMPROVEMENT OF WATER QUALITY MODELS FOR APPLICATION TO TEMPORARY WATERS IN SOUTHERN EUROPEAN CATCHMENTS).

O autor agradece ao Professor Ramiro Neves (IST) e a toda a equipa da MARTEC por toda a informação e apoio disponibilizado para a realização deste estudo.

## BIBLIOGRAFIA

CHOW, V.; et al - *APPLIED HYDROLOGY*. EUA. McGraw-Hill, 1988.

IDRHa – CARTA DE SOLOS (1/25 000). PORTUGAL. Instituto de Desenvolvimento Rural e Hidráulica, Ministério da Agricultura.

IGEO – CARTA DE OCUPAÇÃO DO SOLO – COS' 90 (1/25 000). PORTUGAL. Instituto Geográfico Português.

*JETTEN, V. - LISEM TEORETICAL DOCUMENTATION*. Holland, Faculty of Geographical Sciences, Utrecht University, 2003.

LANÇA, R. – *CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO DE CHEIAS RECORRENDO A UM MODELO DISTRIBUÍDO*. Dissertação de Mestrado apresentada na Universidade de Évora – Dep. Eng. Rural, 2000.

MAIDMENT, D. – *HANDBOOK OF HYDROLOG,* EUA, McGraw Hill, 1993.

NEITSCH, S.L.; et al – *SOIL AND WATER ASSESSEMENT TOOL THEORETICAL DOCUMENTATION VERSION 2000*. EUA. GrassLand, Soil and Water Research Laboratory – Agricultural Research Service. BlackLand Research Center – Texas Agricultural Experiment Station, 2002.

SANTOS, D. – *MODELAÇÃO DA POLUIÇÃO DIFUSA EM ÁGUAS SUPERFICIAIS.* Tese de Dissertação de Mestrado apresentada na Universidade Nova de Lisboa – Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente, 2000.

*Woolhiser, D. A.;* et al – *KINEROS, A KINEMATIC RUNOFF AND EROSION MODEL: DOCUMENTATION AND USER MANUAL*. EUA, USDA - Agricultural Research Service, 1990.