

2:1.3 ÍNDICE MÁXIMO DE ESCOAMENTO

O índice máximo de escoamento é o fluxo máximo de escoamento que ocorre com um determinado evento pluvial. O índice máximo de escoamento é um indicador da potência erosiva de uma tempestade, e é usado para prever perda de sedimentos. O modelo SWAT calcula o índice máximo de escoamento com um método racional modificado.

- * O método racional é amplamente utilizado na concepção de valetas, canais e sistemas de controle de águas pluviais. O método racional baseia-se na suposição de que se uma precipitação de intensidade i começa no instante $t = 0$ e continua indefinidamente, a taxa de escoamento aumentará até o tempo da concentração, $t = t_{conc}$, quando a área¹ inteira da sub-bacia está contribuindo para o fluxo na saída. A fórmula racional é:

$$q_{peak} = \frac{C \cdot i \cdot Area}{3.6} \quad 2:1.3.1$$

em que q_{peak} é o índice máximo de escoamento ($m^3 s^{-1}$), C é o coeficiente de escoamento, i é a intensidade da chuva (mm/h), $Area$ é a área da sub-bacia (km^2) e 3,6 é um fator de conversão de unidade.

2:1.3.1 TEMPO DE CONCENTRAÇÃO

O tempo de concentração é a quantidade de tempo a partir do início de uma chuva (evento pluviométrico) até que a área inteira da sub-bacia esteja contribuindo para o fluxo na saída. Em outras palavras, o tempo de concentração é o tempo para uma gota de água fluir desde o ponto mais remoto na sub-bacia até a saída da sub-bacia. O tempo de concentração é calculado somando o tempo de escoamento superficial (o tempo que leva para o fluxo a partir do ponto mais remoto na sub-bacia chegar ao canal) e o tempo de escoamento de canal (o tempo que leva para o fluxo nos canais a montante alcançar a saída):

$$t_{conc} = t_{sv} + t_{ch} \quad 2:1.3.2$$

¹ As equações na seção 2:1.3 utilizam a área da sub-bacia, em vez da área do HRU. Ao contrário de HRUs, as sub-bacias são áreas geograficamente contíguas. Utilizar a área da sub-bacia faz as equações para o tempo de concentração e o índice máximo de escoamento mais fácil de conceitualizar. No modelo, estes cálculos são realizados no nível HRU. Duas modificações são feitas para adequar as equações para HRUs. Em primeiro lugar, a área da sub-bacia é substituída pela área da HRU. Em segundo lugar, o termo comprimento do canal, L , utilizado no cálculo de tempo de concentração de escoamento do canal é multiplicado pela fração da área da sub-bacia com a HRU de interesse.

em que t_{conc} é o tempo de concentração para uma sub-bacia (h), t_{ov} é o tempo de concentração para o escoamento superficial (h) e t_{ch} é o tempo de concentração para o escoamento de canal (h).

2:1.3.1.1 TEMPO DE CONCENTRAÇÃO DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL

O tempo de concentração de escoamento superficial, t_{ov} , pode ser calculado usando a equação

$$t_{ov} = \frac{L_{slp}}{3600 \cdot v_{ov}} \quad 2:1.3.3$$

em que L_{slp} é o comprimento da inclinação da sub-bacia (m), v_{ov} é a velocidade do escoamento superficial ($m \cdot s^{-1}$) e 3600 é um fator de conversão de unidade.

A velocidade de escoamento superficial pode ser calculada a partir da equação de Manning, considerando uma faixa de 1 metro de largura abaixo da superfície inclinada:

$$v_{ov} = \frac{q_{ov}^{0.4} \cdot slp^{0.3}}{n^{0.6}} \quad 2:1.3.4$$

em que q_{ov} é a taxa de escoamento superficial média ($m^3 \cdot s^{-1}$), slp é o declive médio da sub-bacia ($m \cdot m^{-1}$), e n é o coeficiente de rugosidade de Manning para a sub-bacia. Assumindo uma vazão média de 6,35 mm/h e unidades de conversão

$$v_{ov} = \frac{0.005 \cdot L_{slp}^{0.4} \cdot slp^{0.3}}{n^{0.6}} \quad 2:1.3.5$$

Substituindo a equação 2:1.3.5 na equação 2:1.3.3 temos

$$t_{ov} = \frac{L_{slp}^{0.6} \cdot n^{0.6}}{18 \cdot slp^{0.3}} \quad 2.1.3.6$$

Table 6-3: Values of Manning's roughness coefficient, n , for overland flow (Engman, 1983).

Characteristics of Land Surface	Median	Range
Fallow, no residue	0.010	0.008-0.012
Conventional tillage, no residue	0.090	0.060-0.120
Conventional tillage, residue	0.190	0.160-0.220
Chisel plow, no residue	0.090	0.060-0.120
Chisel plow, residue	0.130	0.100-0.160
Fall disking, residue	0.400	0.300-0.500
No till, no residue	0.070	0.040-0.100
No till, 0.5-1 t/ha residue	0.120	0.070-0.170
No till, 2-9 t/ha residue	0.300	0.170-0.470
Rangeland, 20% cover	0.600	
Short grass prairie	0.150	0.100-0.200
Dense grass	0.240	0.170-0.300
Bermudagrass	0.410	0.300-0.480

2:1.3.1.2 TEMPO DE CONCENTRAÇÃO DO FLUXO DE CANAL

O tempo de concentração de fluxo do canal t_{ch} pode ser calculado usando a equação:

$$t_{ch} = \frac{L_c}{3.6 \cdot v_c} \quad 2:1.3.7$$

em que L_c é o comprimento médio do canal de escoamento da sub-bacia (km), v_c é a velocidade média do canal ($m s^{-1}$), e 3,6 é um fator de conversão de unidade.

A duração média de fluxo do canal pode ser calculada utilizando a seguinte equação:

$$L_c = \sqrt{L \cdot L_{cen}} \quad 2:1.3.8$$

em que L é o comprimento do canal a partir do ponto mais distante da saída da sub-bacia (km) e L_{cen} é a distância ao longo do canal para o centroide da sub-bacia (km). Assumindo que $L_{cen} = 0,5 L$, o comprimento médio do fluxo do canal é

$$L_c = 0.71 \cdot L \quad 2:1.3.9$$

A velocidade média pode ser calculada a partir da equação de Manning assumindo um canal trapezoidal com inclinações laterais 2:1 e um fundo de largura-profundidade 10:1.

$$v_c = \frac{0.489 \cdot q_{ch}^{0.25} \cdot slp_{ch}^{0.375}}{n^{0.75}} \quad 2:1.3.10$$

em que v_c é a velocidade média do canal ($m s^{-1}$), q_{ch} é a taxa de escoamento média do canal ($m^3 s^{-1}$), slp_{ch} é a inclinação do canal ($m m^{-1}$), e n é o coeficiente de rugosidade de Manning para o canal. Para expressar a vazão média do canal em unidades de mm/h, a seguinte expressão é usada:

$$q_{ch} = \frac{q_{ch}^* \cdot Area}{3.6} \quad 2:1.3.11$$

em que q_{ch}^* é a vazão média do canal (mm h^{-1}), $Area$ é a área da sub-bacia (km^2), e 3,6 é um fator de conversão de unidade. A vazão média do canal está relacionada com a vazão da área da unidade de origem (área de origem unidade = 1 ha)

$$q_{ch}^* = q_0^* \cdot (100 \cdot Area)^{-0.5} \quad 2:1.3.12$$

em que q_0^* é a taxa de fluxo da área de origem da unidade (mm h^{-1}), $Area$ é a área da sub-bacia (km^2), e 100 é um fator de conversão de unidade. Supondo que a vazão da área de origem da unidade é 6.35 mm/h e substituindo as equações 2:1.3.11 e 2:1.3.12 em 2:1.3.10 temos

$$v_c = \frac{0.317 \cdot Area^{0.125} \cdot slp_{ch}^{0.375}}{n^{0.75}} \quad 2:1.3.13$$

substituindo as equações 2:1.3.9 e 2:1.3.13 em 2:1.3.7 temos

$$t_{ch} = \frac{0.62 \cdot L \cdot n^{0.75}}{Area^{0.125} \cdot slp_{ch}^{0.375}} \quad 2:1.3.14$$

em que t_{ch} é o tempo de concentração para o fluxo de canal (h), L é o comprimento do canal a partir do ponto mais distante da saída sub-bacia (km), n é o coeficiente de rugosidade de Manning para o canal, $Area$ é a área da sub-bacia (km^2), e slp_{ch} é a inclinação do canal (m m^{-1}).

Tabela 2.1-4: Valores do coeficiente de rugosidade de Manning, n , para o fluxo de canal (Chow, 1959).¹

Characteristics of Channel	Median	Range
Excavated or dredged		
Earth, straight and uniform	0.025	0.016-0.033
Earth, winding and sluggish	0.035	0.023-0.050
Not maintained, weeds and brush	0.075	0.040-0.140
Natural streams		
Few trees, stones or brush	0.050	0.025-0.065
Heavy timber and brush	0.100	0.050-0.150

¹ Chow (1959) has a very extensive list of Manning's roughness coefficients. These values represent only a small portion of those he lists in his book.

Embora algumas das premissas utilizadas no desenvolvimento das equações 2:1.3.6 e 2:1.3.14 pareçam liberal, o tempo dos valores de concentração obtidos geralmente dão resultados satisfatórios para as sub-bacias homogêneas. Uma vez que as equações 2:1.3.6 e 2:1.3.14 e são baseadas em considerações hidráulicas, elas são mais confiáveis do que as equações puramente empíricas.

2:1.3.2 COEFICIENTE DE ESCOAMENTO

O coeficiente de escoamento é a proporção entre a velocidade de entrada, $i \cdot Area$, para a taxa de descarga de pico, Q_{peak} . O coeficiente varia dependendo da tempestade e é calculado com a equação:

$$C = \frac{Q_{surf}}{R_{day}} \quad 2:1.3.15$$

em que Q_{surf} é o escoamento superficial (mm H₂O) e R_{day} é a precipitação para o dia (mm H₂O).

2:1.3.3 INTENSIDADE DE CHUVAS

A intensidade de chuvas é a taxa média de chuvas durante o tempo de concentração. Com base nessa definição, ela pode ser calculada com a equação:

$$i = \frac{R_c}{t_{conc}} \quad 2.1.3.16$$

em que i é a intensidade de chuvas (mm / h), o R_c é a quantidade de chuva que cai durante o tempo de concentração (mm H₂O), e t_{conc} é o tempo de concentração para a sub-bacia (h).

Uma análise dos dados de chuvas coletados por Hershfield (1961) para diferentes durações e frequências mostrou que a quantidade de chuva que cai durante o tempo de concentração foi proporcional à quantidade de chuva que cai durante o período de 24 horas.

$$R_{tc} = \alpha_{tc} \cdot R_{day} \quad 2:1.3.17$$

em que R_{tc} é a quantidade de chuva que cai durante o tempo de concentração (mm H₂O), α_{tc} é a fração de precipitação diária que ocorre durante o tempo de concentração e R_{day} é a quantidade de chuva que cai durante o dia (mm H₂O).

Para as tempestades de curta duração, a totalidade ou a maior parte da chuva cairá durante o tempo de concentração, fazendo com que α_{tc} se aproxime do seu limite superior de 1,0. O valor mínimo de α_{tc} seria visto em tempestades de intensidade uniforme ($i_{24} = i$). Esse valor mínimo pode ser definido através da substituição dos produtos de tempo e intensidade de chuva na equação 2:1.3.17

$$\alpha_{tc, \min} = \frac{R_{tc}}{R_{day}} = \frac{i \cdot t_{conc}}{i_{24} \cdot 24} = \frac{t_{conc}}{24} \quad 2:1.3.18$$

Assim, α_{tc} cai no intervalo $t_{conc}/24 \leq \alpha_{tc} \leq 1.0$.

O modelo SWAT estima a fração de chuva que cai no tempo de concentração em função da fração de chuva diária que cai na meia-hora de maior intensidade de precipitação.

$$\alpha_{tc} = 1 - \exp [2 \cdot t_{conc} \cdot \ln(1 - \alpha_{0.5})] \quad 2:1.3.19$$

em que $\alpha_{0.5}$ é a fração de chuva diária caindo na meia-hora de maior intensidade de precipitação, e t_{conc} é o tempo de concentração para a sub-bacia (h). A determinação de um valor para $\alpha_{0.5}$ é discutido nos capítulos 1:2 e 1:3.

2:1.3.5 FÓRMULA RACIONAL MODIFICADA

A fórmula racional modificada utilizada para estimar a vazão de pico é obtida através da substituição das equações 2:1.3.15, 2:1.3.16 e 2:1.3.17 na equação 2:1.3.1

$$q_{peak} = \frac{\alpha_{tc} \cdot Q_{surf} \cdot Area}{3.6 \cdot t_{conc}} \quad 2:1.3.20$$

em que q_{peak} é o índice máximo de escoamento (m³ s⁻¹), α_{tc} é a fração da precipitação diária que ocorre durante o tempo de concentração, Q_{surf} é o escoamento superficial (mm H₂O),

$Area$ é a área da sub-bacia (km^2), t_{conc} é o momento da concentração para a sub-bacia (h) e 3,6 é um fator de conversão de unidade.

Table 2:1-5: SWAT input variables that pertain to peak rate calculations.

Variable Name	Definition	Input File
SUB_KM	Area of the subbasin (km^2)	.sub
HRU_FR	Fraction of subbasin area contained in HRU	.hru
SLSUBBSN	L_{slp} : Average slope length (m)	.hru
HRU_SLP	slp : Average slope steepness (m/m)	.hru
OV_N	n : Manning's "n" value for overland flow	.hru
CH_L(1)	L : Longest tributary channel length in subbasin (km)	.sub
CH_S(1)	slp_{ch} : Average slope of tributary channels (m/m)	.sub
CH_N(1)	n : Manning's "n" value for tributary channels	.sub

2:1.4 ATRASO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL

Em grandes sub-bacias com um tempo de concentração superior a um dia, apenas uma porção do escoamento superficial irá atingir o canal principal no dia na qual é gerado. O modelo SWAT incorpora um recurso de armazenamento de escoamento superficial para retardar a liberação de uma parte do escoamento superficial para o canal principal.

Uma vez que o escoamento superficial é calculado com o número de curva ou o método de *Green & Ampt*, a quantidade de escoamento superficial liberada para o canal principal é calculada:

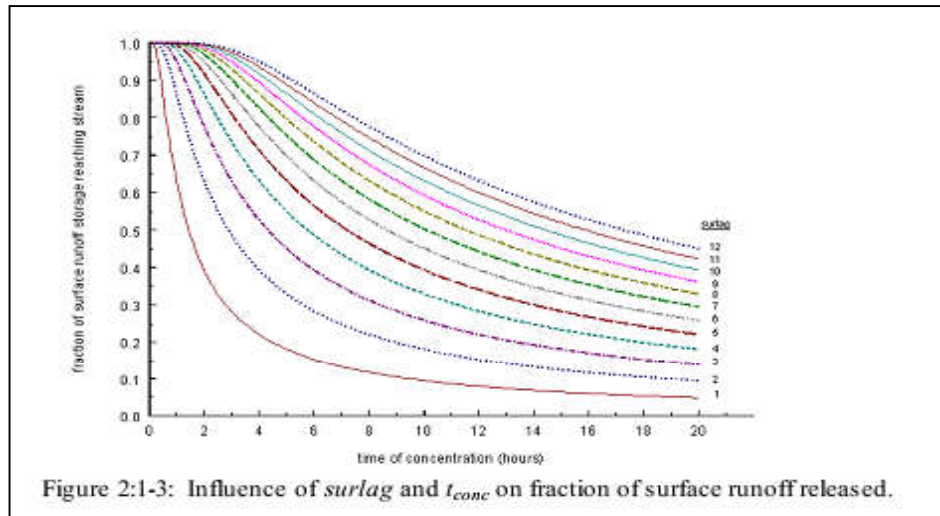
$$Q_{surf} = (Q'_{surf} + Q_{stor,i-1}) \cdot \left(1 - \exp \left[\frac{-surlag}{t_{conc}} \right] \right) \quad 2:1.4.1$$

Em que Q_{surf} é a quantidade de escoamento superficial descarregado no canal principal em um determinado dia (mm H₂O), Q'_{surf} é a quantidade de escoamento superficial gerado na sub-bacia em um determinado dia (mm H₂O), $Q_{stor, i-1}$ é o escoamento superficial armazenado ou atrasado a partir do dia anterior (mm H₂O), $surlag$ é o coeficiente de atraso do escoamento superficial, e t_{conc} é o tempo de concentração para a sub-bacia (h).

A expressão abaixo

$$\left(1 - \exp \left[\frac{-surlag}{t_{conc}} \right] \right)$$

na equação 2:1.4.1 representa a fração do total de água disponível que será admitida entrar no trecho de qualquer dia. Figura 2:1-3 traça valores para esta expressão em valores diferentes para *surlag* e *t_{conc}*.



Observe que por um determinado tempo de concentração, à medida que o *surlag* diminui em valor mais água é mantida em armazenamento. O atraso na liberação de escoamento superficial irá suavizar o hidrograma de vazões simuladas na extensão.

Table 2:1-6: SWAT input variables that pertain to surface runoff lag calculations.

Variable Name	Definition	Input File
SURLAG	<i>surlag</i> : surface runoff lag coefficient	.bsn