

DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ESCOAMENTO DE ENCHENTE (C) EM DUAS BACIAS HIDROGRÁFICAS EXPERIMENTAIS LOCALIZADAS EM UBERLÂNDIA-MG

Natália Gonçalves Mendes (*), Lorraine Campos Martins, Lorraine Campos Martins, Lisiane da Silva Mendes, Darione Alves Leal, Hudson de Paula Carvalho

*Eng.Ambiental Mestranda em Qualidade Ambiental, Universidade Federal de Uberlândia-UFU ee-mail natalia.g.mendes7@gmail.com

RESUMO

O coeficiente de escoamento de enchente ou coeficiente C é a relação da precipitação que contribui para o escoamento. Este termo é utilizado em estudos relacionados à determinação da vazão de enchente ocorrida por uma precipitação intensa. O objetivo do presente trabalho foi estimar o coeficiente de escoamento de enchente C de duas bacias hidrográficas experimentais localizadas em Minas Gerais. O coeficiente de escoamento de enchente C foi estimado por meio da razão entre o escoamento superficial direto e a chuva que originou o hidrograma. Os valores do coeficiente de escoamento de enchente C, na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha variaram de 0,00 a 0,89, com média de 0,15. Já o coeficiente C para a Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória variou de 0,00 a 0,07, com média de 0,01. Para a Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha foi possível ajustar um modelo matemático capaz de estimar o coeficiente C a partir dos dados de intensidade da chuva e da chuva acumulada dos últimos cinco dias.

PALAVRAS-CHAVE: recursos hídricos, hidrograma, escoamento superficial

INTRODUÇÃO

Bacia Hidrográfica é definida como uma área delimitada por divisores de água e drenada pelo curso d'água principal e seus afluentes, em que toda água escoada é convergida para um único ponto de saída conhecido como exutório (MELLO; SILVA, 2013).

Assim, o estudo do ciclo hidrológico é de fundamental importância para compreender a dinâmica de uma bacia hidrográfica. O escoamento superficial é um processo do ciclo hidrológico que corresponde ao fluxo de água ocasionada por uma chuva que se desloca pela superfície do solo da bacia até o curso d'água principal. O escoamento superficial é influenciado pelos fatores de intensidade e duração da chuva, pois quando a intensidade da chuva for constante terá maior escoamento quanto maior a duração. Em relação à intensidade o comportamento é semelhante, pois quanto mais intensa a chuva irá interceptar mais rápida no solo consequentemente atingindo a capacidade de infiltração e o seu excesso gerando o escoamento. Outro fator que pode influenciar são as barragens construídas em bacias, uma vez que as barragens acumulam água em um reservatório retardam o processo de escoamento.

O coeficiente de escoamento de enchente ou coeficiente C é a relação da precipitação que contribui para o escoamento. Este termo é utilizado em estudos relacionados à determinação da vazão de enchente ocorrida por uma precipitação intensa. O coeficiente C varia entre 0 e 1, quanto mais próximo de 1 maior será o escoamento superficial, ou seja, a água infiltra menos e a superfície é impermeável. Valores do coeficiente mais próximo de 0 infere que grande parte da água é infiltrada no solo, retida na vegetação e uma pequena parte é escoada (MELLO & SILVA, 2013).

Tucci (2000) afirma que o coeficiente de escoamento de uma bacia representa a quantidade de água de escoamento gerada pela bacia em eventos chuvosos. Geralmente, este coeficiente é estimado com base em tabelas de manuais.

OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho foi estimar o coeficiente de escoamento de enchente (C) de duas bacias hidrográficas experimentais localizadas em Minas Gerais.

METODOLOGIA

Área de Estudo

Este trabalho foi conduzido nas Bacias Hidrográficas Experimentais do Córrego Glória e do Córrego Água Vermelha, ambas sub-bacias da Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba e localizadas em Minas Gerais. A Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória (BHEGL) possui área total de 8,27 km². O seu exutório está localizado geograficamente a 18° 58' 17"S e 48° 12' 36' W. O solo predominante nesta bacia é o Latossolo Vermelho Distrófico, textura média a argilosa, com relevo suave a plano. A Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego da Água Vermelha (BHEAV) possui área total de 16,35 km² e seu exutório está localizado na latitude 19°05'50'' S e longitude 48°21'21'' W. O solo predominante nesta bacia é o Latossolo Vermelho Distrófico, textura arenosa a média, e também com relevo suave a plano. Em ambos os exutórios, foi instalada uma estação hidrométrica, composta por sensor ultrassônico para o monitoramento do nível de água do córrego e um pluviômetro de báscula para a obtenção dos dados de chuva. A frequência de obtenção dos dados de nível de água dos córregos e de chuva foi de cinco minutos.

Determinações do Escoamento Superficial Direto e do Coeficiente de Escoamento de Enchente

Para a determinação do escoamento superficial direto (ESD), adotou-se a metodologia descrita em Mello e Silva (2013), com algumas modificações. Inicialmente, procedeu-se à separação do escoamento subterrâneo do escoamento superficial, através da determinação dos pontos A (ascensão) e C (declínio) que é o fim da contribuição do escoamento direto (Figura 1). O ponto A é simples de ser determinado por tratar-se de uma mudança brusca na inclinação da curva de escoamento, quando os valores de vazão começam a se elevar. Neste trabalho, o ponto C foi obtido na planilha de dados de vazão, pela divisão da vazão atual pela vazão anterior com o propósito de ter em um resultado uniforme desta divisão. Quando esse valor era encontrado, adotava-se a vazão e o tempo imediatamente anterior como sendo o ponto C.

Neste trabalho, o escoamento superficial direto foi estimado por meio da regra dos trapézios, a partir de diversos hidrogramas obtidos em cada bacia hidrográfica experimental. Esta metodologia consiste em multiplicar a vazão em cada instante pelo intervalo de tempo entre as medições (neste trabalho, o intervalo foi de 5 minutos). A área do hidrograma foi dividida em retângulos, nesse caso específico retângulos de altura igual à vazão e largura igual ao intervalo de tempo entre as medições (Figura 1).

Para a separação do escoamento superficial direto e subterrâneo foi realizada uma aproximação linear entre os pontos A e C, dada pela reta AC, representada na Figura 1. Após isso, foi calculada a inclinação da reta AC por meio da Equação 1.

$$m = \text{tg}(\beta) = \frac{(QC-QA)}{(TC-TA)} \quad \text{equação (1)}$$

Em que :

m = inclinação da reta AC, em L s⁻²; QC = vazão no ponto C, em L s⁻¹; QA = vazão no ponto A, em L s⁻¹; TC = tempo no ponto C, em segundos; TA = tempo no ponto A, em segundos.

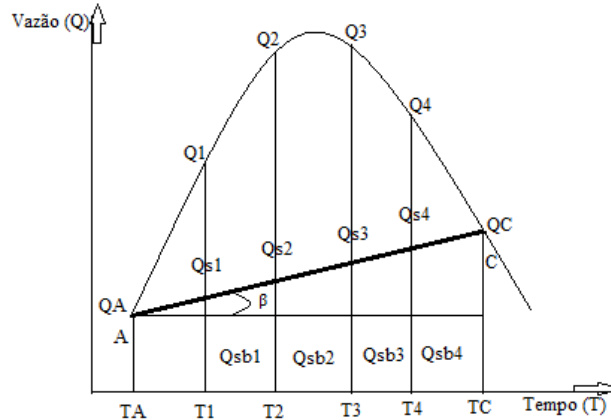
Após isso, foi calculado o valor a ser adicionado como incremento da vazão em cada intervalo de tempo das vazões (neste trabalho foi considerado 5 min. = 300 segundos), conforme explicitado na Equação 2.

$$J = m \cdot \Delta T \quad \text{equação (2)}$$

Em que:

J = valor a ser adicionado às vazões do escoamento base a partir de QA , em L s⁻¹; ΔT = intervalo de tempo entre as vazões coletadas, 300 segundos.

FIGURA 1: Procedimento linear para separação do escoamento superficial direto a partir de um hidrograma (MELLO e SILVA, 2013)



O valor de J foi acrescentado ao escoamento de base a partir de QA. As vazões subterrâneas foram calculadas a partir de J conforme detalhado na Equação 3.

$$Q_{SB1} = QA + J; Q_{SB2} = Q_{SB1} + J; Q_{SB3} = Q_{SB2} + J \dots \quad \text{equação (3)}$$

Em que: $Q_{SB1,2,\dots}$ = vazão subterrânea nos tempos 1, 2 e sucessivamente, $L s^{-1}$.

As vazões equivalentes ao escoamento superficial direto foram calculadas pela diferença entre a vazão total e a respectiva vazão subterrânea, restando, desta forma, apenas o escoamento superficial. Este processo é explicitado na Equação 4.

$$Q_{S1} = Q1 - Q_{SB1}; Q_{S2} = Q2 - Q_{SB2}; Q_{S3} = Q3 - Q_{SB3} \dots \quad \text{equação (4)}$$

Em que: $Q_{S1,2,\dots}$ = vazão superficial direta nos tempos 1, 2 e sucessivamente, em $L s^{-1}$; $Q_{1,2,\dots}$ = vazão medida pelo linígrafo nos tempos 1, 2 e sucessivamente, em $L s^{-1}$.

Somando-se as vazões superficiais e multiplicando-se pelo intervalo de tempo, foi possível obter o volume de escoamento superficial direto, conforme explicitado na Equação 5.

$$ESD = \sum_{i=1}^N (Q_{S1} \cdot \Delta T) \quad \text{equação (5)}$$

Em que: ESD = volume do escoamento superficial direto, em litros; N = número de vazões que compõe o escoamento superficial direto; Q_{si} = vazões provenientes da contribuição do escoamento superficial direto, em $L s^{-1}$; ΔT = intervalo de tempo entre as vazões coletadas, em segundos.

Por fim, o cálculo do coeficiente de escoamento de enchente (C) foi realizado por meio da Equação 6. Neste trabalho, este coeficiente foi estimado por meio da razão entre o escoamento superficial direto (ESD) e a chuva que originou o hidrograma. Os valores obtidos neste coeficiente variam entre 0 e 1, onde valores próximos de 1 representam maior escoamento e valores mais próximos de 0, menor escoamento.

$$C = \frac{ESD}{P} \quad \text{equação (6)}$$

Em que: ESD = escoamento superficial direto (mm) e P = precipitação de chuva (mm).

Os resultados do coeficiente C de cada bacia hidrográfica foram correlacionados por meio do teste de correlação de Pearson, em cada hidrograma, com as variáveis total de chuva, intensidade da chuva e total de chuva dos últimos cinco dias antes do hidrograma. Não obstante, caso as correlações fossem satisfatórias, buscar-se-ia gerar um modelo matemático capaz de estimar o coeficiente C, para cada bacia hidrográfica, a partir dessas variáveis.

RESULTADOS

Neste trabalho foram selecionados 27 e 17 hidrogramas nas Bacias Hidrográficas Experimentais dos Córregos Água Vermelha e Glória, respectivamente. A partir destes, foram calculados os coeficientes de escoamento de enchente (C_{obs}) para cada bacia. Na Tabela 1 estão compilados os resultados obtidos na BHEAV. Analisando-a, verifica-se que os valores do coeficiente de escoamento de enchente observados (C_{obs}) variaram de 0,00 a 0,89, com média de 0,15. O valor 0,00 não significa que não houve escoamento, mas sim que este valor é muito baixo, apresentando valor diferente de zero somente a partir da terceira casa decimal. Quando comparado com valor médio do coeficiente de escoamento de enchente ($C = 0,38$) calculado a partir das tabelas apresentadas em Genovez (2001) *apud* Melo & Silva (2013), verifica-se uma diferença importante. O valor médio obtido na BHEAV representa 40% daquele citado em Genovez (2001) *apud* Melo & Silva (2013).

Dhakal et al. (2012), avaliando o coeficiente de escoamento de enchente em 1.600 hidrogramas oriundos de 83 bacias hidrográficas do estado do Texas nos EUA, também encontrou valores variando de 0,00 a 0,99, com média de 0,33. Esse resultado médio se aproxima daquele citado em Genovez (2001) *apud* Melo & Silva (2013). Isso aconteceu porque esse autor buscou adaptar, para as condições brasileiras, os valores dos coeficientes estimados em bacias hidrográficas americanas. É importante ressaltar que a simples comparação dos valores obtidos no Texas com os da BHEAV deve ser feita com cautela, pois diversas variáveis como tipo de solo, regime hidrológico entre outras, podem interferir nos valores desse coeficiente.

Analisando a Tabela 1, nota-se também, boa correlação entre o coeficiente C observado na bacia hidrográfica (C_{obs}) e a chuva total durante os últimos 5 dias antes da data do hidrograma (P_{5dias}), seguido pela chuva total que originou o hidrograma (Chuva). Em relação à intensidade da chuva (I), não se observou boa correlação, apesar da expectativa inicial de que uma alta intensidade poderia gerar um maior volume de escoamento, visto que a capacidade de infiltração do solo poderia ser vencida, gerando maiores volumes para o escoamento.

A partir dos valores do coeficiente de escoamento de enchente observados (C_{obs}) e das variáveis intensidade (I) e chuva total durante os últimos 5 dias antes da data do hidrograma (P_{5dias}), foi gerada a Equação 7. Apesar da baixa correlação, a variável intensidade, quando transformada (em LN), melhorou consideravelmente os resultados estatísticos da Equação 7, razão pela qual ela foi utilizada na mesma.

Analisando a Equação 7, por meio dos resultados estatísticos, nota-se que foi obtido um bom ajuste estatístico, apesar da amplitude dos valores do coeficiente C observados na BHEAV. Contudo, o número de hidrogramas, e consequentemente de coeficiente C , obtidos nesta bacia experimental ainda é pequeno (27 apenas), o que recomenda cautela na utilização desta equação, bem como no uso do coeficiente C médio explicitado neste trabalho (0,15).

$$C_{est} = 0,136 - 0,113 * LN(I) + 0,00622 * P_{5dias} \quad \text{equação (7)}$$

Resultados estatísticos da Equação 7:

$R^2 = 0,56$; $EPE = 0,17 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; p-valor regressão $< 0,001$; p-valor da variável $LN(I) = 0,007$; p-valor da variável $P_{5dias} < 0,001$; $R = 0,75$.

Em que: C_{est} = coeficiente de escoamento de enchente estimado, adimensional; I = intensidade da chuva, em mm/h; P_{5dias} = chuva acumulada durante os últimos 5 dias, mm; LN = símbolo matemático do logaritmo neperiano; R^2 = coeficiente de determinação, adimensional; EPE = erro padrão de estimativa, adimensional; p-valor regressão = resultado do teste F da equação de regressão; p-valor da variável = resultado do teste t das constantes relacionadas às variáveis da equação; R = resultado do teste de correlação de Pearson, entre os dados dos coeficientes de escoamento de enchente estimados pela equação (C_{est}) e aqueles observados (C_{obs}).

Na Tabela 2 estão compilados os resultados obtidos na BHEGL. Analisando-a, verifica-se que os valores do coeficiente de escoamento de enchente observados (C_{obs}) variaram de 0,00 a 0,07, com média de 0,01. Quando comparado com valor médio do coeficiente de escoamento de enchente ($C = 0,44$) calculado para a BHEGL, a partir das tabelas apresentadas em Genovez (2001) *apud* Melo & Silva (2013), verifica-se uma diferença muito grande. O valor médio obtido na BHEGL representa somente 16% daquele citado em Genovez (2001) *apud* Melo & Silva (2013).

Em relação às variáveis estudadas neste trabalho (Chuva, I e P_{5dias}), nota-se, por meio do coeficiente de correlação de Pearson explicitado na Tabela 1, que estas variáveis apresentaram baixa correlação com os valores de C_{obs} da BHEGL.

Esse resultado pode ser explicado pelo fato de existir um barramento do trecho superior do córrego do Glória, o que pode funcionar como um amortecedor do fluxo de água para jusante, afetando os resultados. Além disso, esta bacia é cortada ao meio no sentido longitudinal e paralelo ao Córrego do Glória, por uma rodovia federal, a BR 050, a qual, por meio do seu talude, poderia afetar o fluxo superficial de água em direção ao exutório. Em função da baixa correlação, não foi possível conseguir um bom ajuste matemático quando da geração do modelo matemático.

Tabela 1. Resultados do coeficiente de escoamento de enchente, da precipitação de chuva total, da intensidade de chuva e da chuva acumulada nos últimos 5 dias, obtidos em 27 hidrogramas da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha, em Uberlândia-MG.

| Data do hidrograma | Chuva ^a (mm) | I ^b (mm/h) | P _{5dias} ^c (mm) | C _{obs} ^d (adimensional) |
|--|----------------------------|--------------------------|--------------------------------------|---|
| 07/01/2017 | 26,00 | 22,29 | 26,00 | 0,00 |
| 09/01/2017 | 9,00 | 3,86 | 35,00 | 0,12 |
| 10/01/2017 | 18,25 | 21,90 | 53,25 | 0,00 |
| 11/01/2017 | 14,00 | 42,00 | 67,25 | 0,00 |
| 12/01/2017 | 3,75 | 2,37 | 71,00 | 0,83 |
| 15/01/2017 | 14,00 | 4,20 | 50,00 | 0,17 |
| 22/01/2017 | 5,25 | 1,97 | 5,25 | 0,18 |
| 23/01/2017 | 10,50 | 3,94 | 15,75 | 0,02 |
| 26/01/2017 | 12,75 | 5,28 | 28,50 | 0,02 |
| 31/01/2017 | 20,25 | 30,38 | 33,00 | 0,16 |
| 02/02/2017 | 30,25 | 13,96 | 50,50 | 0,15 |
| 02/02/2017 | 24,00 | 26,18 | 74,50 | 0,06 |
| 03/02/2017 | 23,75 | 71,25 | 103,00 | 0,12 |
| 04/02/2017 | 50,25 | 14,71 | 153,00 | 0,89 |
| 17/02/2017 | 5,00 | 5,45 | 5,00 | 0,01 |
| 22/02/2017 | 21,50 | 23,45 | 26,50 | 0,02 |
| 27/02/2017 | 24,50 | 13,36 | 46,00 | 0,00 |
| 01/03/2017 | 10,75 | 5,38 | 35,25 | 0,02 |
| 02/03/2017 | 19,25 | 28,88 | 54,50 | 0,00 |
| 05/03/2017 | 40,00 | 12,63 | 70,00 | 0,13 |
| 08/03/2017 | 14,00 | 8,84 | 54,25 | 0,00 |
| 09/03/2017 | 23,25 | 34,88 | 77,50 | 0,62 |
| 06/04/2017 | 21,25 | 11,09 | 21,25 | 0,13 |
| 08/04/2017 | 39,75 | 29,81 | 61,00 | 0,33 |
| 13/04/2017 | 15,25 | 15,25 | 55,00 | 0,09 |
| 22/04/2017 | 12,00 | 7,20 | 12,00 | 0,00 |
| 26/04/2017 | 14,50 | 34,80 | 26,50 | 0,00 |
| Valores médios | 19,37 | 18,34 | 48,55 | 0,15 |
| Coef. de correlação de Pearson em relação à C _{obs} | 0,33 | -0,04 | 0,63 | --- |

^a representa os valores da chuva que originaram o hidrograma; ^b representa a intensidade da chuva que originou o hidrograma; ^c representa a chuva total durante os últimos 5 dias antes da data do hidrograma; ^d representa o coeficiente de escoamento de enchente observado, oriundo do hidrograma, e calculado por meio da Equação 6; a simbologia “---” indica que o dado numérico não foi calculado.

Tabela 2. Resultados do coeficiente de escoamento de enchente, da precipitação de chuva total, da intensidade de chuva e da chuva acumulada nos últimos 5 dias, obtidos em 17 hidrogramas da Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, em Uberlândia-MG.

| Data do hidrograma | Chuva ^a (mm) | I ^b (mm/h) | P _{5dias} ^c (mm) | C _{obs} ^d (adimensional) |
|--|----------------------------|--------------------------|--------------------------------------|---|
| 31/10/2015 | 12,40 | 37,20 | 32,20 | 0,00 |
| 03/11/2015 | 17,00 | 7,85 | 87,00 | 0,01 |
| 07/11/2015 | 5,60 | 33,60 | 26,40 | 0,01 |
| 29/11/2015 | 33,80 | 13,08 | 38,20 | 0,02 |
| 06/12/2015 | 17,40 | 4,86 | 67,80 | 0,01 |
| 18/12/2015 | 4,20 | 6,30 | 4,20 | 0,04 |
| 20/12/2015 | 29,80 | 11,54 | 59,80 | 0,02 |
| 26/12/2015 | 13,60 | 8,16 | 15,80 | 0,00 |
| 28/12/2015 | 15,40 | 23,10 | 33,80 | 0,01 |
| 04/01/2016 | 19,60 | 11,20 | 31,80 | 0,01 |
| 19/01/2016 | 20,00 | 6,15 | 149,40 | 0,02 |
| 04/02/2016 | 6,20 | 37,20 | 6,20 | 0,07 |
| 09/02/2016 | 15,20 | 22,80 | 47,60 | 0,00 |
| 16/02/2016 | 3,60 | 6,17 | 36,80 | 0,01 |
| 29/02/2016 | 15,60 | 10,40 | 52,40 | 0,01 |
| 10/03/2016 | 16,80 | 11,86 | 26,80 | 0,00 |
| 14/03/2016 | 10,00 | 15,00 | 56,00 | 0,00 |
| Valores médios | 15,07 | 15,67 | 45,42 | 0,01 |
| Coef. de correlação de Pearson em relação à C _{obs} | -0,21 | 0,15 | -0,24 | --- |

^a representa os valores da chuva que originaram o hidrograma; ^b representa a intensidade da chuva que originou o hidrograma; ^c representa a chuva total durante os últimos 5 dias antes da data do hidrograma; ^d representa o coeficiente de escoamento de enchente observado, oriundo do hidrograma, e calculado por meio da Equação 6; a simbologia “---” indica que o dado numérico não foi calculado.

CONCLUSÃO

Os valores do coeficiente de escoamento de enchente (C), na Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Água Vermelha variaram de 0,00 a 0,89, com média de 0,15. Foi possível ajustar um modelo matemático capaz de estimar o coeficiente C para essa bacia, a partir dos dados de intensidade da chuva e da chuva acumulada dos últimos cinco dias.

Para a Bacia Hidrográfica Experimental do Córrego Glória, o coeficiente C obtido variou de 0,00 a 0,07, com média de 0,01. Para esta bacia, não foi possível ajustar um modelo matemático a partir das variáveis hidrológicas analisadas neste trabalho.

REFERÊNCIAS

1. Dhakal, N.; Fang, P. E. X.; Cleveland, T. G.; Thompson, D. B.; Asquith, W. H.; Marzen, L. J. Estimation of volumetric runoff coefficients for Texas watersheds using land-use and rainfall-runoff data. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Vol. 138, No. 1, January 1, 2012.

2. Mello, C. R., Silva, A. M. **Hidrologia**: Princípios e aplicações em sistemas agrícolas. Ed. da Universidade UFLA. 2013, 455 pág.

3. Tucci, C. E. M.; **Coefficiente de escoamento e vazão máxima de bacias urbanas**. Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS/2000.