Lista de Exercícios Resolvidos 1

Precipitação e Escoamento Superficial

Lucas Monteiro Nogueira

Problemas

1. Ciclo Hidrológico I

2. Ciclo Hidrológico II

3. Precipitação Desconhecida I: Média Ponderada

4. Precipitação Desconhecida II: Polígonos de Thiessen

5. Determinando o Número de Pluviômetros

6. Análise Precipitação-*Runoff*

7. Análise Pluviométrica em um Ano Hidrológico

8. Método Racional I

9. Método Racional II

10. Método USCS-CN I

11. Método USCS-CN II

12. Precipitação e o Índice ϕ – Problema I

13. Precipitação e o Índice ϕ – Problema II

14. Precipitação e o Índice ϕ – Problema III

15. Precipitação e o Índice ϕ – Problema IV

16. Infiltração I: Equação de Horton

17. Infiltração II: Equação de Philip

18. Equação de Green-Ampt I

19. Equação de Green-Ampt II

As tabelas referentes aos problemas 6, 7, 18 e 19 podem ser encontradas nessa pasta de Google Drive.

Problema 1 **(Ciclo Hidrológico I)**

Estima-se que 60% da precipitação anual em uma bacia de 400 km^2 de área é perdida por evaporação. Sabendo que a vazão observada na saída da bacia é de 3.2 m^3/sec durante todo o ano hidrológico, determine a precipitação anualmente observada na região da bacia.

Problema 2 **(Ciclo Hidrológico II)**

Ao fim de uma tempestade de duas horas de duração, a lâmina d'água atribuída a precipitação em uma área de 40 hectares é igual a 30 mm. Há uma taxa constante de infiltração igual a 10 mm/hora e o volume armazenado é de 0.6 hectare-m. Verifique se há escoamento superficial e, em caso positivo, estime-o.

Problema 3 **(Precipitação Desconhecida I: Média Ponderada)**

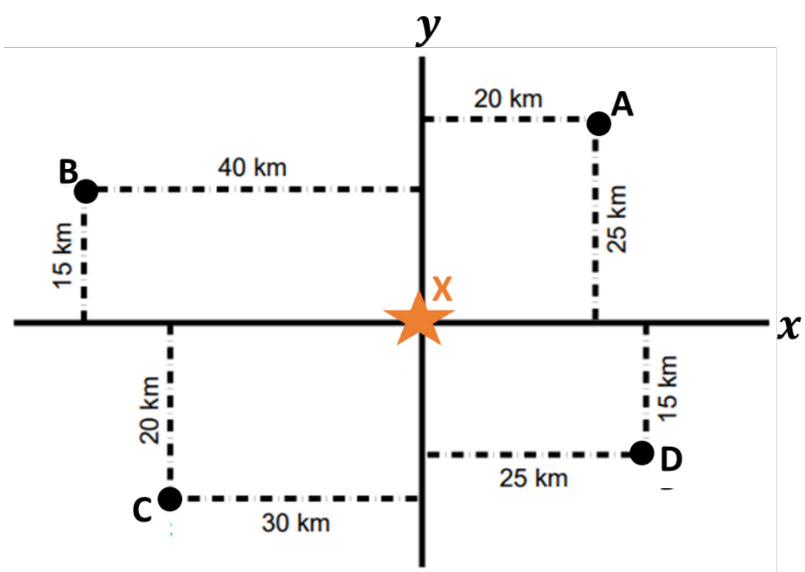
As coordenadas em km de quatro estações pluviométricas com relação a um quinto pluviômetro estão listadas a seguir.

Estação	**X**	**A**	**B**	**C**	**D**
Coord. (*x*,*y*) (km)	0, 0	20, 25	−40, 15	−30, −20	25, −15

Não temos a precipitação anual em *X* para o ano 2022, mas sabemos que os valores registrados nas quatro demais estações foram os seguintes:

Estação	**A**	**B**	**C**	**D**
Precip. em 2022 (mm)	2690	2800	2670	2550

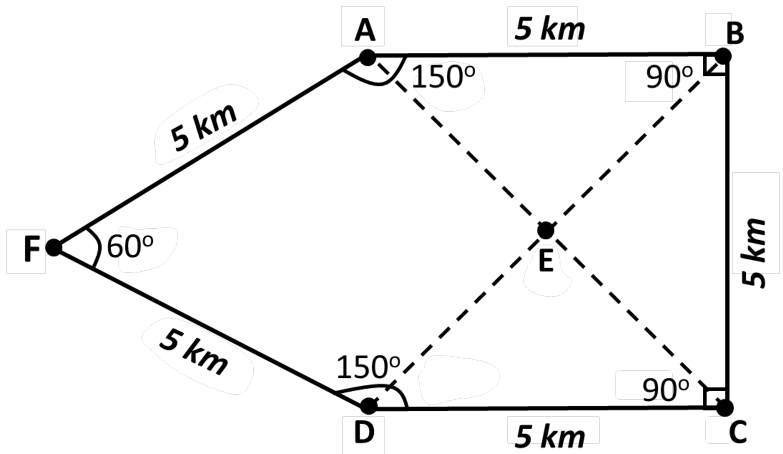
Use essas informações para estimar a precipitação registada em *X* no ano em questão.



Problema 4 **(Precipitação Desconhecida II: Polígonos de Thiessen)**

A figura a seguir representa o território de uma bacia de captação. Há seis estações pluviométricas nos pontos *A*, *B*, *C*, *D*, *E* e *F*. Os valores de precipitação observados nas seis estações durante o mês de Novembro de 2023 estão na tabela a seguir. Use essas informações para estimar a precipitação média na bacia.

Estação	A	B	C	D	E	F
Precipitação (mm)	110	140	120	180	90	160



Problema 5 **(Determinando o Número de Pluviômetros)**

Uma bacia é monitorada por 6 estações pluviométricas. Registros de precipitação fornecidos pelos seis pluviômetros em um determinado ano estão na tabela a seguir. Calcule o número de pluviômetros necessário para assegurar que o erro no cálculo da precipitação anual média seja inferior a 10%.

Pluviômetro	1	2	3	4	5	6
Precipitação Anual (cm)	48	75	81	63	104	89

Problema 6 **(Análise Precipitação-Runoff)**

Engenheiros estudam um rio com alto potencial para exploração hidrelétrica. Sabe-se que a bacia local tem 800 km^2 e, em uma análise simplificada, pode ser considerada impermeável. A tabela a seguir apresenta uma série histórica de precipitação anual *P* (mm) e vazão anual *Q* (m^3/s) observados na bacia ao longo de 10 anos hidrológicos.

(a) Calcule o volume de escoamento superficial em m^3 e a altura d'água correspondente para os 10 anos em estudo.

(b) Calcule a evapotranspiração registrada na bacia em mm e m^3 para cada ano.

(c) Calcule o coeficiente de *runoff* para cada ano da série hidrológica. Em seguida, calcule o coeficiente de *runoff* para o período total em estudo.
(d) Calcule o volume de água que pode ser explorado anualmente, sabendo que as perdas totais (envolvendo evaporação, infiltração, etc.) são de 18% do ingresso de água na bacia.
(e) Calcule a área de terra arável que pode ser irrigada com o volume de água obtido na parte (d) se a evapotranspiração potencial do cultivo selecionado durante o período de irrigação é 800 mm e a precipitação anual durante o mesmo período é desprezível.

Ano hidrológico	*P* (mm)	*Q* (m^3/s)
2013 – 2014	1485	23.74
2014 – 2015	1338	17.11
2015 – 2016	1359	24.88
2016 – 2017	994	15.60
2017 – 2018	1541	23.12
2018 – 2019	1183	14.58
2019 – 2020	1170	13.87
2020 – 2021	1246	12.43
2021 – 2022	762	5.69
2022 – 2023	1479	20.35

■ Problema 7 (Análise Pluviométrica em um Ano Hidrológico)

A bacia de drenagem de um rio tem área total de 855 km^2 e é monitorada por quatro estações pluviométricas *A*, *B*, *C* e *D*. As porcentagens da área total estudadas por cada estação são respectivamente 30%, 25%, 35% e 10%. Durante o ano hidrológico 2022 – 2023, as estações supracitadas forneceram as seguintes medidas mensais de precipitação; todos os valores estão em mm.

Mês	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.
P(A)	64	106	114	84	109	60	56	58	20	19	9	26
P(B)	70	111	133	89	107	71	64	60	33	23	7	25
P(C)	83	144	122	94	120	77	65	59	29	19	20	19
P(D)	77	139	145	102	118	81	71	66	45	11	5	17

(a) Calcule a altura pluviométrica anual pontual registrada em cada um dos quatro pluviômetros.
(b) Calcule a altura pluviométrica anual na bacia inteira e o volume precipitado na bacia inteira.
(c) Calcule o volume anual de *runoff* na bacia inteira e a altura da lâmina d’água correspondente, sabendo que a vazão de escoamento superficial na saída da bacia é constante e igual a 8.3 m^3/s.
(d) Calcule o coeficiente de *runoff* para o ano hidrológico em questão.

(e) Calcule o volume e a altura d'água das perdas hidrológicas registradas ao fim do ano hidrológico em foco.
(f) Calcule a evapotranspiração, sabendo que as perdas hidrológicas devido a infiltração e percolação subterrânea são de 45% da precipitação total.
(g) Qual é o mês do ano hidrológico em estudo no qual foi registrada a maior altura pluviométrica na bacia inteira?

Para resolver os problemas 8 a 11, utilize os gráficos e tabelas fornecidos na seção *Informações Adicionais*.

■ Problema 8 **(Método Racional I)**

Determine o escoamento superficial em uma bacia que irriga 30 hectares de pastos argilosos com declividade média de 2.0%. O curso d'água na bacia estende-se por 600 m e apresenta gradiente de 0.05%. Utilize um intervalo de recorrência de 5 anos.

■ Problema 9 **(Método Racional II)**

Determine o escoamento superficial esperado de uma tempestade com período de recorrência de 50 anos em uma bacia composta por três tipos de cobertura territorial, como descreve a tabela a seguir. O curso d'água local estende-se por 1800 m e possui gradiente de 0.05%.

	Cobertura 1	Cobertura 2	Cobertura 3
Área	50 ha	26 ha	24 ha
Declividade	2%	8%	11%
Vegetação	Cultivada	Pasto	Bosque
Textura do solo	Argiloso	Arenoso	Siltoso

■ Problema 10 **(Método USCS-CN I)**

Uma bacia consiste de dois tipos de cobertura territorial:

(1) 400 ha de plantações terraceadas regulares;
(2) 100 ha de pastagens de qualidade média.

Sabe-se que o solo pertence ao grupo hidrológico *B*. Estime a lâmina d'água de *runoff* após dois dias chuvosos sucessivos nos quais observaram-se alturas pluviométricas de 100 mm e 90 mm, respectivamente. Utilize condições antecedentes de umidade III.

■ Problema 11 **(Método USCS-CN II)**

Considere uma bacia de 600 ha de superfície. Os solos que ocorrem na bacia são 50% grupo *B* e 50% grupo *C*; em uma análise simplificada, pode-se considerar que os dois grupos hidrológicos estão aleatoriamente distribuídos ao longo do território. A cobertura territorial é 55% de parques e 45% de áreas comerciais altamente impermeáveis. Supondo condições antecedentes de umidade tipo III, calcule o volume de *runoff* observado após 15 cm de precipitação.

■ Problema 12 **(Precipitação e o Índice ϕ – Problema I)**

As intensidades de precipitação para cinco períodos sucessivos de 20 min são listadas a seguir. O *runoff* direto obtido com essa tempestade é 2.5 in. Determine **(a)** a precipitação total e **(b)** o índice ϕ da bacia.

Período de 20 min	1	2	3	4	5
Intensidade da precipitação (in./h)	2.5	5.0	6.5	3.5	1.0

■ Problema 13 **(Precipitação e o Índice ϕ – Problema II)**

Considere uma bacia de captação cuja área é de 50 km^2. As taxas de precipitação registradas na bacia em sete períodos sucessivos de 30 min cada foram 16, 20, 24, 36, 28, 12 e 4 mm/hr. Sabendo que o índice ϕ é 22 mm/h, encontre **(a)** a precipitação total em mm e **(b)** o *runoff* em hectare-metro.

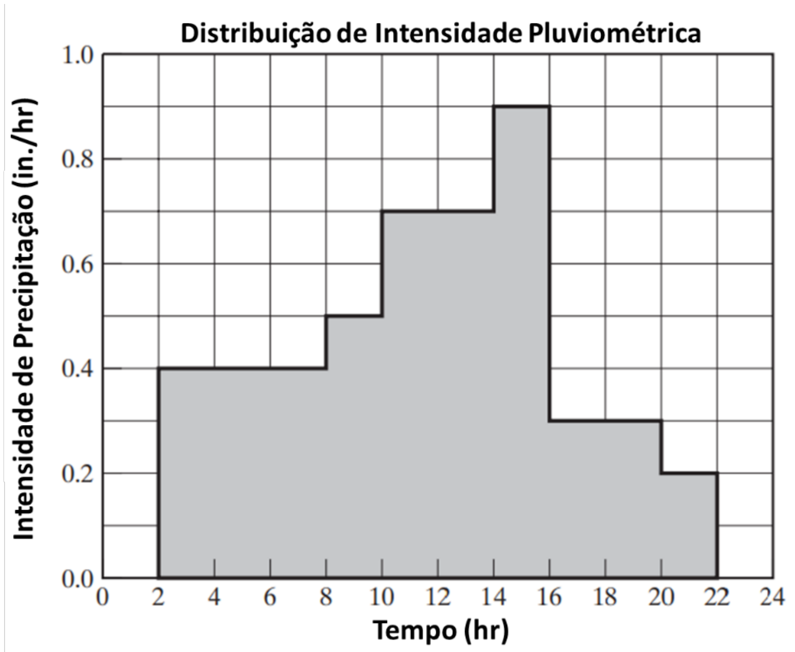
■ Problema 14 **(Precipitação e o Índice ϕ – Problema III)**

Determine o volume de escoamento superficial direto, em hectare-metro, que resultará da tempestade descrita pela tabela a seguir. A bacia local tem 800 hectares e o índice ϕ é 13 mm/hr.

Período de 30 min	1	2	3	4
Intensidade da precipitação (mm/h)	23	13	15	13

Problema 15 **(Precipitação e o Índice ϕ – Problema IV)**

Determine o índice ϕ da tempestade descrita pelo gráfico a seguir. Sabe-se que a lâmina d'água observada na bacia local é de 6 in.



Problema 16 **(Infiltração I: Equação de Horton)**

Uma pequena bacia pode ser descrita através da equação de Horton com capacidade inicial de infiltração f_0 = 3.0 cm/hr e constante temporal t = 0.29 hr^{-1}. Sabe-se também que a capacidade de infiltração limitante é 0.55 cm/hr.

(a) Forneça uma expressão que descreve a capacidade de infiltração da bacia em função do tempo.

(b) Estime a lâmina d'água infiltrada após 10 horas.

Problema 17 **(Infiltração II: Equação de Philip)**

Em um teste de infiltração envolvendo um solo arenoso, os conteúdos volumétricos de água inicial e saturado são θ_{vi} = 0.15 e θ_{vs} = 0.56, respectivamente. Observou-se que a frente de umedecimento progrediu 10 cm a partir da origem em 16 min. A condutividade hidráulica saturada do solo é 0.03 cm/min. Plote as infiltrações vertical e horizontal para 1, 10, 100, 1000, 10.000 e 100.000 minutos.

Problema 18 **(Equação de Green-Ampt I)**

Um solo franco-arenoso tem teor de umidade inicial 0.18, condutividade hidráulica 7.8 mm/hr e sucção capilar média 100 mm. Ao fim de uma chuva de intensidade igual a 2.9 cm/hr, verifica-se que o teor de umidade do solo é de 0.45. Qual é o tempo (em horas) para que ocorra saturação do solo superficial? Use o modelo de Green-Ampt para obter um gráfico de taxa de infiltração *versus* volume de infiltração.

Problema 19 **(Equação de Green-Ampt II)**

Prepare gráficos de taxa de infiltração *versus* volume de infiltração para os dois tipos de solo descritos na tabela a seguir. Sabe-se que a intensidade pluviométrica da tempestade recente foi de 1.5 cm/hr durante várias horas, e que o teor de umidade inicial de ambos os solos é igual a 0.15. Forneça curvas diferentes para os dois extremos de porosidade. Por exemplo, a tabela indica que o solo franco-siltoso tem porosidade entre 0.42 e 0.58; portanto, deve-se preparar uma curva para n = 0.42 e outra para n = 0.58.

Solo	Porosidade	Sucção capilar (cm)	Condutividade hidráulica (cm/h)
Franco-siltoso	0.42 – 0.58	16.75	0.65
Argila arenosa	0.35 – 0.49	23.95	0.10

Informações Adicionais

Figura 1. *Exemplo de curva intensidade-duração-recorrência. Os números próximos às curvas são períodos de recorrência em anos. As intensidades no eixo vertical são dadas em in./hora.*

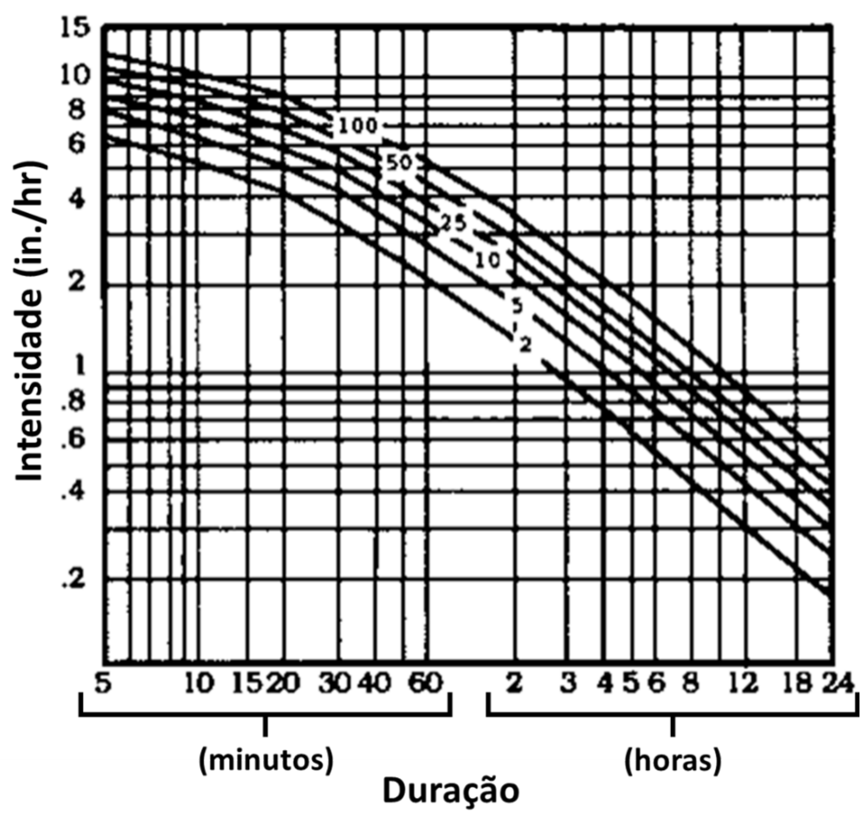


Tabela 1. *Coeficientes de runoff (escoamento superficial) para uso com o método racional.*

Topografia, vegetação e declividade (%)		Solo		
		Arenoso	Siltoso	Argiloso
Bosque	*Plano (0 – 5)%*	0.10	0.30	0.40
	Médio (5 – 10)%	0.25	0.35	0.50
	Montanhoso (10 – 30)%	0.30	0.50	0.60
Pasto	*Plano (0 – 5)%*	0.10	0.30	0.40
	Médio (5 – 10)%	0.16	0.36	0.55
	Montanhoso (10 – 30)%	0.22	0.42	0.60
Área cultivada	*Plano (0 – 5)%*	0.30	0.50	0.60
	Médio (5 – 10)%	0.40	0.60	0.70
	Montanhoso (10 – 30)%	0.52	0.72	0.82

Tabela 2. *Tempos de concentração (min) para bacias hidrográficas pequenas.*

Extensão de escoamento (m)	Gradiente (%)					
	0.05	0.10	0.50	1.0	2.0	5.0
150	18	13	7	6	4	3
600	30	23	11	9	7	5
900	51	39	20	16	12	9
1200	86	66	33	27	21	15
1800	119	91	46	37	29	20
2400	149	114	57	47	36	25
3000	175	134	67	55	42	30

Tabela 3. *Números de Curva CN para uso com o método USCS-CN.*

Aplicações Rurais		A	B	C	D
Solo lavrado genérico	Com sulcos retiíneos	77	86	91	94
	Com laterita	79	88	93	97
Plantações regulares	Em curvas de nivel	67	77	83	87
	Terraceado	64	76	84	88
	Fileiras retas	64	76	84	88
Plantações de cereais	Em curvas de nível	62	74	82	85
	Terraceado	60	71	79	82
	Fileiras retas	62	75	83	87
Pastagens	Pobres	47	67	81	88
	Médias	25	59	75	83
	Boas	6	35	70	79
Florestas	Cobertura boa	45	66	77	83
	Cobertura ruim	25	55	70	77
Aplicações Urbanas					
Gramados e parques		39	61	74	80
Áreas Residenciais (impermeabilidade ≈ 65%)		77	85	90	92
Áreas comerciais (impermeabilidade ≈ 85%)		89	92	94	95
Distritos industriais (impermeabilidade ≈ 72%)		81	88	91	93
Estacionamentos, pavimentos asfálticos, telhados		98	98	98	98
Estradas não-pavimentadas	Cascalho	76	85	89	91
	Barro	72	82	87	89

■ Soluções

■ Prob. 1

O balanço hidrológico *no longo prazo* pode ser escrito como

$$P-E-Q=0$$

onde P é precipitação, E é evapotranspiração e Q é o escoamento total líquido (entrada menos saída). No presente caso, sabendo que E = 0.6P e Q = 3.2 m^3/sec, podemos escrever

$$P-0.6P-Q=0$$
$$\therefore P=2.5Q$$
$$\therefore P=2.5\times 3.2=8.0\ \text{m}^3/\text{sec}$$

Utilizamos esse resultado para obter a lâmina d'água observada anualmente na bacia:

$$P_{\text{ano}} = \frac{8\ \text{m}^3/\text{sec}}{400\ \text{km}^2} \times \frac{1}{10^6}\frac{\text{km}^2}{\text{m}^2} \times 86,400\ \frac{\text{sec}}{\text{dia}} \times 365\ \frac{\text{dias}}{\text{ano}} = 0.631\ \text{m}$$

$$\therefore \boxed{P_{\text{ano}} = 631\ \text{mm}}$$

■ Prob. 2

Recorrendo à equação do balanço hidrológico *no curto prazo*, escrevemos

$$P - E - I - S_D - R = 0$$

onde P é precipitação, E é evaporação, I é infiltração, S_D é o volume de armazenamento e R é o *runoff* ou escoamento superficial. Ignorando a contribuição associada a evaporação e resolvendo para R, temos

$$P - \cancel{E} - I - S_D - R = 0$$
$$\therefore P - I - S_D - R = 0$$
$$\therefore R = P - I - S_D \quad \textbf{(I)}$$

O volume precipitado em hectare-metro é

$$P = 0.03\ \text{m} \times 40\ \text{ha} = 1.2\ \text{ha-m}$$

O volume infiltrado é, por sua vez,

$$I = 0.01\ \frac{\text{m}}{\text{h}} \times 2\ \text{h} \times 40\ \text{ha} = 0.8\ \text{ha-m}$$

Finalmente, temos S_D = 0.6 ha-m. Substituindo em **(I)**, vem

$$R = P - I - S_D = 1.2 - 0.8 - 0.6 = \boxed{-0.2\ \text{ha-m}}$$

o fato de o R obtido ser negativo implica que *não há runoff*.

■ Prob. 3

Primeiramente, usamos as coordenadas fornecidas na primeira tabela para estimar as distâncias entre o pluviômetro de interesse X e as quatro demais estações.

$$\overline{AX} = \sqrt{20^2 + 25^2} = 32.02\ \text{km}$$
$$\overline{BX} = \sqrt{40^2 + 15^2} = 42.72\ \text{km}$$
$$\overline{CX} = \sqrt{30^2 + 20^2} = 36.06\ \text{km}$$
$$\overline{DX} = \sqrt{25^2 + 15^2} = 29.15\ \text{km}$$

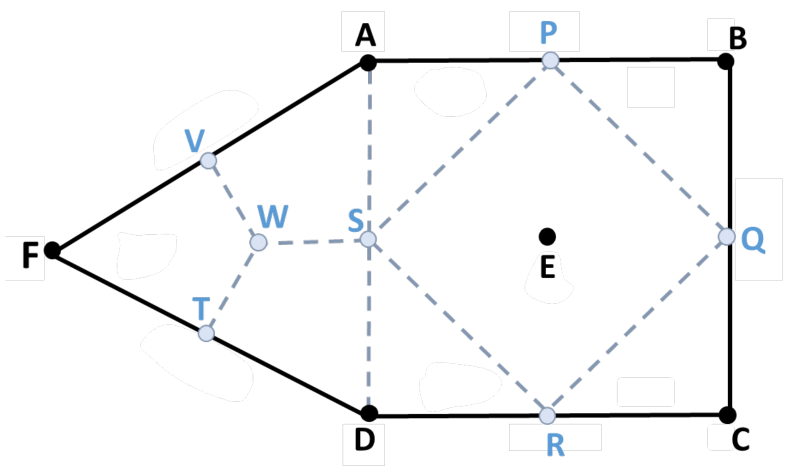
Em seguida, estimamos a precipitação desconhecida através do método da média ponderada,

$$P_X = \frac{\dfrac{P_A}{AX^2} + \dfrac{P_B}{BX^2} + \dfrac{P_C}{CX^2} + \dfrac{P_D}{DX^2}}{\dfrac{1}{AX^2} + \dfrac{1}{BX^2} + \dfrac{1}{CX^2} + \dfrac{1}{DX^2}}$$

$$\therefore P_X = \frac{\dfrac{2690}{32.02^2} + \dfrac{2800}{42.72^2} + \dfrac{2670}{36.06^2} + \dfrac{2550}{29.15^2}}{\dfrac{1}{32.02^2} + \dfrac{1}{42.72^2} + \dfrac{1}{36.06^2} + \dfrac{1}{29.15^2}} = \boxed{2655 \text{ mm}}$$

■ Prob. 4

Primeiramente, devemos unir os segmentos *AB*, *BC*, *CD*, *DA*, *AE*, *BE*, *CE*, *DE*, *DF* e *FA*. Traçam-se os bissetores perpendiculares de cada segmento. Os bissetores se encontram nos pontos *P*, *Q*, *R*, *S*, *T*, *V* e *W*, como mostra a figura a seguir.



Em seguida, utilizamos geometria elementar para obter as áreas de cada polígono; a tabela pertinente está a seguir.

Estação	Polígono	Área (km²)
A	APSWV	$A_{APSWV} = A_{APS} + A_{ASWV}$ $A_{APS} = \frac{1}{2} \times 2.5 \times 2.5 = 3.13 \text{ km}^2$ $A_{ASWV} = \frac{1}{3} \times A_{ADF} = \frac{1}{3} \times \frac{1}{2} \times \left(5 \times \frac{5\sqrt{3}}{2}\right) = 3.61 \text{ km}^2$ $A_{APSWV} = 3.13 + 3.61 = 6.74 \text{ km}^2$

B	BQP	$A_{BQP} = \frac{1}{2} \times 2.5 \times 2.5 = 3.13 \text{ km}^2$
C	CRQ	$A_{CRQ} = A_{BQP} = 3.13 \text{ km}^2$
D	DTWSR	$A_{DTSWR} = A_{APSWV} = 6.74 \text{ km}^2$
E	PQRS	$PQ = QR = RS = SP = \sqrt{2.5^2 + 2.5^2} = 3.54 \text{ km}$ $A_{PQRS} = 3.54^2 = 12.53 \text{ km}^2$
F	FVWT	$A_{FWT} = \frac{1}{3} \times A_{ADF} = 3.61 \text{ km}^2$

Também precisamos da área total:

$$\Sigma A = \begin{pmatrix} 6.74 + 3.13 + 3.13 + 6.74 \\ +12.53 + 3.61 \end{pmatrix} = 35.88 \text{ km}^2$$

Usando as medidas pluviométricas fornecidas no enunciado, a precipitação média torna-se

$$\overline{P} = \frac{6.74 \times 110 + 3.13 \times 140 + 3.13 \times 120 + 6.74 \times 180 + 12.53 \times 90 + 3.61 \times 160}{35.88}$$

$$\therefore \boxed{\overline{P} = 124.7 \text{ mm}}$$

■ Prob. 5

O número de pluviômetros necessários pode ser calculado através da fórmula simplificada

$$N = \left(\frac{C_u}{\varepsilon}\right)^2 \quad \textbf{(I)}$$

onde C_u é o coeficiente de variação das medidas e ε é o erro percentual permitido. O coeficiente C_u é tal que $C_u = 100S/P$, onde P é a média aritmética das medidas e S é o desvio padrão. No presente caso, temos

$$P = \frac{(48 + 75 + 81 + 63 + 104 + 89)}{6} = 76.67 \text{ mm}$$

e o valor de S é

$$S=\sqrt{\left[\sum_{i=1}^{m}\frac{\left(x_i-\overline{x}\right)^2}{m-1}\right]}=19.64\text{ cm}$$

Portanto,

$$C_u=\frac{100S}{P}=\frac{100\times 19.64}{76.67}=25.62\%$$

e o número de estações necessário é dado por **(I)**,

$$N=\left(\frac{C_u}{\varepsilon}\right)^2=\left(\frac{25.62}{10}\right)^2=6.56\approx\boxed{7}$$

Já que temos seis pluviômetros, faz-se necessária a instalação de uma estação adicional.

■ Prob. 6

Parte (a): O volume de escoamento superficial é obtido ao multiplicarmos a vazão anual (coluna [3] na tabela ao fim da solução) pela duração de um ano (= 31,536,000 sec). Os volumes assim obtidos estão na coluna [4] da tabela. As alturas d'água correspondentes podem ser obtidas ao dividirmos os volumes da coluna [4] pela área da bacia (= 800 km^2). As alturas assim obtidas estão na coluna [5].

Parte (b): Sabendo que a bacia é impermeável, as perdas podem ser exclusivamente atribuídas à evapotranspiração, que é calculada como a diferença entre a altura pluviométrica (coluna [2]) e a lâmina d'água associada a *runoff* (coluna [5]). Os valores de *ET* assim obtidos estão nas colunas [6] (em termos de altura) e [7] (em volume).

Parte (c): O coeficiente de *runoff* de cada ano é definido como a razão entre a quantidade de água descarregada na saída da bacia (coluna [5]) e a quantidade de água recebida por precipitação (coluna [2]). Os coeficientes assim obtidos estão listados na coluna [8]. Lembramos que o coef. de *runoff* é um parâmetro adimensional.

O coeficiente de *runoff* para todo o período da série hidrológica (ou seja, 10 anos) é dado pela razão entre a soma dos valores de altura d'água oriunda de escoamento superficial (coluna [5]) e a soma dos valores de altura d'água por precipitação (coluna [2]),

$$C_{\text{tot}}=\frac{\Sigma\text{Runoff}}{\Sigma\text{Precipitação}}=\frac{6755}{12{,}560}=\boxed{0.536}$$

É importante observar que o coeficiente de *runoff* total *não* é igual à média aritmética dos coeficientes anuais listados na coluna [8].

Parte (d): O ingresso médio anual no reservatório do rio é igual à razão entre a quantidade de água transportada na bacia por escoamento superficial (≈5.404×10^9 m^3, coluna [4]) e a extensão da série hidrológica (= 10 anos),

$$\overline{V}_{\text{ingresso}} = \frac{\Sigma \text{V}_{\text{runoff}}}{10} = \frac{5,404,000,000}{10} = 5.404 \times 10^8 \text{ m}^3$$

A quantidade de água explorável é de 82% do valor acima, ou (5.404×10^8) × 0.82 ≈ 443 milhões de metros cúbicos.

Parte (e): Convém supor que as necessidades de irrigação das plantas são iguais à evapotranspiração potencial fornecida na descrição do problema. Nesse caso, a área de terra arável que poderia ser irrigada na região é

$$A_{\text{exp}} = \frac{\overline{V}_{\text{ingresso}}}{ETP} = \frac{443 \times 10^6 \text{ m}^3}{0.8 \text{ m}} = 554 \times 10^6 \text{ m}^2 = \boxed{554 \text{ km}^2}$$

[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]
Ano hidrológico	***P* (mm)**	***Q* (m^3/s)**	**Volume *runoff* (m^3)**	**Altura *runoff* (mm)**	**Altura evapotransp. (mm)**	**Volume evapotransp. (m^3)**	**Coef. *runoff***
2013 – 2014	1485	23.74	7.49E+08	936	549	4.39E+08	0.630
2014 – 2015	1338	17.11	5.40E+08	674	664	5.31E+08	0.504
2015 – 2016	1359	24.88	7.85E+08	981	378	3.03E+08	0.722
2016 – 2017	994	15.6	4.92E+08	615	379	3.03E+08	0.619
2017 – 2018	1541	23.12	7.29E+08	911	630	5.04E+08	0.591
2018 – 2019	1183	14.58	4.60E+08	575	608	4.87E+08	0.486
2019 – 2020	1170	13.87	4.37E+08	547	623	4.99E+08	0.467
2020 – 2021	1246	12.43	3.92E+08	490	756	6.05E+08	0.393
2021 – 2022	762	5.69	1.79E+08	224	538	4.30E+08	0.294
2022 – 2023	1479	20.35	6.42E+08	802	677	5.41E+08	0.542
Soma	**1.256E+04**	**1.714E+02**	**5.404E+09**	**6755**	**5802**	**4.641E+09**	

■ Prob. 7

Parte (a): Para obter a altura pluviométrica anual pontual de um dado pluviômetro, basta somar as 12 alturas mensais listadas na tabela. Os resultados aparecem nas células azuis ao fim da solução.

Parte (b): Para obter a altura pluviométrica anual na bacia inteira, deve-se primeiramente transformar as medidas pontuais de precipitação; multiplicam-se as medidas pontuais em um dado mês pela porcentagem de área que cada estação representa. Por exemplo, no mês de Outubro, a altura pluviométrica média é

$$P(\text{Outubro}) = (64 \times 0.30) + (70 \times 0.25) + (83 \times 0.35) + (77 \times 0.10) = 73.45 \text{ mm}$$

A altura pluviométrica anual é dada pela soma dos valores calculados de acordo com essa regra; como mostra a célula em vermelho ao fim da solução, conclui-se que a precipítação anual é de 801.3 mm. Multiplicando esse valor pela área da bacia, obtém-se o volume precipitado V_{chuva},

$$V_{\text{chuva}} = 0.8013 \times \left(855 \times 10^6\right) = \boxed{6.85 \times 10^8 \text{ m}^3}$$

Parte (c): Para obter o volume anual de *runoff*, multiplicamos a vazão Q_{out} = 8.3 m^3/s na saída da bacia pela duração de um ano,

$$V_{\text{runoff}} = Q_{\text{out}} \times 1 \text{ ano} = 8.3 \times \left(86{,}400 \times 365\right) = \boxed{2.62 \times 10^8 \text{ m}^3}$$

Dividindo V_{runoff} pela área da bacia, obtemos a altura da lâmina d'água correspondente,

$$h_{\text{runoff}} = \frac{V_{\text{runoff}}}{A} = \frac{2.62 \times 10^8}{855 \times 10^6} = 0.306 \text{ m} = \boxed{306 \text{ mm}}$$

Parte (d): O coeficiente de *runoff*, C, é dado pela razão entre a altura pluviométrica oriunda do escoamento superficial e a altura pluviométrica precipitada,

$$C = \frac{V_{\text{runoff}}}{V_{\text{chuva}}} = \frac{306}{801.3} = \boxed{0.382}$$

Parte (e): O volume das perdas hidrológicas é dado pela diferença entre o volume total precipitado e o volume perdido como *runoff*, isto é,

$$V_{\text{perda}} = V_{\text{chuva}} - V_{\text{runoff}} = \left(6.85 - 2.62\right) \times 10^8 = \boxed{4.23 \times 10^8 \text{ m}^3}$$

A lâmina d'água correspondente é

$$h_{\text{perda}} = \frac{V_{\text{perda}}}{A} = \frac{4.23 \times 10^8}{855 \times 10^6} = 0.495 \text{ m} = \boxed{495 \text{ mm}}$$

Parte (f): Aqui, devemos recorrer à equação do balanço hidrológico,

$$P - E - \left(I + S_D\right) - R = 0$$

onde P é a precipitação, E é a evaporação, I é a infiltração, S_D é o volume armazenado e R é o *runoff* ou escoamento superficial. No presente caso, temos P = 801.3 mm (parte (b) do problema), R = 306 mm (parte (c)) e, segundo o enunciado, $(I + S_D) = 0.45P$. Substituindo na equação acima e resolvendo para E, temos

$$P - E - \left(I + S_D\right) - R = 0 \quad \rightarrow \quad 801.3 - E - \left(0.45 \times 801.3\right) - 306 = 0$$

$$\therefore 801.3 - E - 360.5 - 306 = 0$$

$$\therefore E = 801.3 - 360.5 - 306 = \boxed{134.8 \text{ mm}}$$

Parte (g): O mês com maior altura pluviométrica é Dezembro, no qual registra-se um valor ponderado de ≈125 mm (célula verde na tabela a seguir).

Mês	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Altura anual do pluviômetro
P(A)	64	106	114	84	109	60	56	58	20	19	9	26	**725**
P(B)	70	111	133	89	107	71	64	60	33	23	7	25	**793**
P(C)	83	144	122	94	120	77	65	59	29	19	20	19	**851**
P(D)	77	139	145	102	118	81	71	66	45	11	5	17	**877**
Altura pluv. pontual	73.45	123.9	**124.7**	90.55	113.3	70.8	62.65	59.65	28.9	19.2	11.95	22.4	**801.3**

■ Prob. 8

Pela equação do método racional, o escoamento superficial ou *runoff* é dado pelo produto

$$Q = CiA$$

onde *C* é o coeficiente de *runoff*, i é a intensidade de precipitação e *A* é a área da bacia. A área é a variável mais óbvia: pelo enunciado do problema, temos *A* = 30 ha ou 300,000 m^2. O coeficiente de *runoff*, por sua vez, pode ser lido na Tabela 1; para um pasto argiloso razoavelmente plano, temos *C* = 0.40. Resta obter a intensidade de precipitação i; para tanto, note que, pela Tabela 2, o tempo de concentração para um curso d'água com 600 m de extensão e gradiente de 0.05% pode ser lido como 30 min. Entrando com esse valor na Figura 1 e considerando a curva para um intervalo de recorrência de 5 anos, lê-se a intensidade i = 4 in./hr ou, de modo equivalente, 0.102 m/hr. Substituindo na fórmula do método racional, vem

$$Q = CiA = 0.40 \times \left(0.102 \ \frac{\text{m}}{\text{hr}}\right) \times \left(300{,}000 \text{ m}^2\right)$$

$$\therefore Q = 12{,}240 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$\therefore \boxed{Q = 3.4 \text{ m}^3/\text{s}}$$

É recorrente denotar vazões de escoamento superficial em hectare-metro/hora ou, no sistema USCS, acre-ft/hora. Sendo 1 ha-m/hr ≈ 2.78 m^3/sec, podemos reescrever o resultado acima como *Q* = 3.4/2.78 = 1.22 hectare-metro/hora.

■ Prob. 9

Para bacias compostas por mais de um tipo de cobertura superficial, faz-se necessário o uso de um *coeficiente de runoff ponderado* que represente a bacia como um todo. Esse coeficiente é dado pela média ponderada dos produtos entre os *C*'s individuais de cada área e a extensão territorial de cada área. No presente caso, temos 3 áreas e podemos escrever

$$\overline{C} = \frac{C_1 A_1 + C_2 A_2 + C_3 A_3}{A_1 + A_2 + A_3}$$

onde A_1 = 50 ha, A_2 = 26 ha e A_3 = 24 ha. Os coeficientes atinentes a cada região podem ser lidos na Tabela 1. Na região 1, temos uma área cultivada em solo argiloso sobre terreno de baixa declividade; recorrendo à tabela, tem-se C_1 = 0.60. Na região 2, tem-se um pasto em solo arenoso sobre território de média declividade; recorrendo à tabela, tem-se C_2 = 0.16. Na região 3, tem-se um bosque em solo siltoso sobre relevo de caráter montanhoso; recorrendo à tabela, tem-se C_3 = 0.50. Munidos de tais coeficientes, podemos estimar $\bar{C}$ como

$$\overline{C} = \frac{0.60 \times 50 + 0.16 \times 26 + 0.50 \times 24}{50 + 26 + 24} = 0.462$$

Os passos seguintes são idênticos aos adotados no Problema 8. Sendo o curso d'água dotado de extensão igual a 1800 m e gradiente de 0.05%, podemos recorrer à Tabela 2 e extrair um tempo de concentração igual a 119 min ou ≈ 2 h. Em seguida, entramos com esse tempo de concentração no gráfico da Fig. 1 e, tomando como base a curva para um tempo de recorrência de 50 anos, obtemos a intensidade $i \approx$ 3.0 in./hr ≈ 76.2 mm/hora. Finalmente, notando que a área total da bacia é *A* = 100 ha = 10^6 m^2, o escoamento superficial é

$$Q = CiA = 0.462 \times \left(0.0762 \ \frac{\text{m}}{\text{hr}}\right) \times \left(10^6 \ \text{m}^2\right) = 35{,}200 \ \text{m}^3/\text{hr}$$

$$\therefore \boxed{Q = 9.78 \ \text{m}^3/\text{sec}}$$

ou, de modo equivalente, ≈ 3.52 ha-m/hr.

■ Prob. 10

O solo pertence à categoria *B*. Recorrendo à Tabela 3, uma cobertura de plantações terraceadas regulares corresponde a *CN* = 76. Para pastagens de média qualidade, tem-se *CN* = 59. Usando os valores de área fornecidos, calculamos o número de curva ponderado

$$\overline{CN}_{II} = \frac{400 \times 76 + 100 \times 59}{400 + 100} = 72.6$$

Em seguida, convertemos esse valor para condições antecedentes de umidade tipo III,

$$\overline{CN}_{III} = \frac{\overline{CN}_{II}}{0.427 + 0.00573\overline{CN}_{II}} = \frac{72.6}{0.427 + 0.00573 \times 72.6} = 86.1$$

Segue que o parâmetro de retenção *S* é

$$S = \frac{25,400}{\overline{CN}} - 254 = \frac{25,400}{86.1} - 254 = 41.0$$

Utilizando a equação do método SCS-CN,

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} = \frac{(P - 0.2 \times 41.0)^2}{P + 0.8 \times 41.0} = \frac{(P - 8.2)^2}{P + 32.8}$$

Podemos utilizar a fórmula acima para computar o escoamento superficial associado aos dois dias chuvosos. No primeiro dia, registrou-se 100 mm de precipitação e, por conseguinte, a lâmina d'água de *runoff* foi

$$Q_1 = \frac{(100 - 8.2)^2}{100 + 32.8} = 63.46 \text{ mm}$$

No segundo dia, observou-se 90 mm de precipitação e, portanto, a lâmina d'água de *runoff* foi

$$Q_2 = \frac{(90 - 8.2)^2}{90 + 32.8} = 54.49 \text{ mm}$$

Por fim, o *runoff* total é

$$\Sigma Q = Q_1 + Q_2 = 63.46 + 54.49 \approx \boxed{118 \text{ mm}}$$

■ Prob. 11

Usando os dados territoriais descritos no enunciado e a Tabela 3, preparamos os seguintes cálculos:

Aplicação	**Grupo Hidrológico**	**% Área**	**CN**	**Área × CN**
Parques	B	55 × 0.5 = 27.5%	61	1678
	C	55 × 0.5 = 27.5%	74	2035
Áreas comerciais	B	45 × 0.5 = 22.5%	92	2070
	C	45 × 0.5 = 22.5%	94	2115

O número de curva ponderado é então

$$\overline{CN}_{II} = \frac{\Sigma\left(\text{Área} \times CN\right)}{100} = \frac{1678 + 2035 + 2070 + 2115}{100} \approx 79.0$$

Convertemos esse *CN* para condições antecedentes de umidade tipo III,

$$\overline{CN}_{III} = \frac{\overline{CN}_{II}}{0.427 + 0.00573\overline{CN}_{II}} = \frac{79.0}{0.427 + 0.00573 \times 79.0} = 89.8$$

O parâmetro de retenção *S* é

$$S = \frac{25,400}{\overline{CN}} - 254 = \frac{25,400}{89.8} - 254 = 28.85$$

Em seguida, escrevemos a equação SCS-CN,

$$Q = \frac{\left(P - 0.2S\right)^2}{P + 0.8S} = \frac{\left(P - 0.2 \times 28.85 \times S\right)^2}{P + 0.8 \times 28.85} = \frac{\left(P - 5.77\right)^2}{P + 23.08}$$

Substituindo *P* = 15 cm = 150 mm, a lâmina d’água de *runoff* é

$$Q = \frac{\left(100 - 5.77\right)^2}{100 + 23.08} = 72.1 \text{ mm}$$

ou 7.21 cm. Multiplicando esse resultado pela área da bacia, obtemos o volume de escoamento superficial *V*,

$$V = \left(600 \times 10^4 \text{ m}^2\right) \times \left(0.0721 \text{ m}\right) = \boxed{432,600 \text{ m}^3}$$

■ Prob. 12

Parte (a): Para determinar a precipitação total, basta somar os produtos entre duração (que, no caso, é de 20 min para cada período) e intensidade de precipitação,

$$\text{Precipitação} = \left[\begin{array}{c} 2.5 \times \left(\frac{20}{60}\right) + 5.0 \times \left(\frac{20}{60}\right) + 6.5 \times \left(\frac{20}{60}\right) \\ + 3.5 \times \left(\frac{20}{60}\right) + 1.0 \times \left(\frac{20}{60}\right) \end{array}\right] = \boxed{6.17 \text{ in.}}$$

Parte (b): Primeiramente, note que a infiltração associada à tempestade em foco é

$$\text{Infiltração} = \text{Precipitação total} - \text{Runoff direto}$$
$$\therefore \text{Infiltração} = 6.17 - 2.5 = 3.67 \text{ in.}$$

O índice ϕ é calculado a seguir,

$$\text{Índice } \phi = \frac{\text{Infiltração}}{\text{Duração total da tempestade}} = \frac{3.67}{(100/60)} = \boxed{2.20 \text{ in./hr}}$$

■ Prob. 13

Parte (a): Sabendo que todos os intervalos considerados são de 30 min ou 0.5 hora, a precipitação total é calculada como

$$\text{Precip. total} = 0.5 \times (16+20+24+36+28+12+4) = \boxed{70 \text{ mm}}$$

Parte (b): Sabendo que a taxa de infiltração é maior que o índice ϕ (= 22) apenas no caso do terceiro, quarto e quinto períodos, a altura d'água referente ao *runoff* torna-se

$$\text{Runoff } = 0.5 \times \left[(24-22)+(36-22)+(28-22)\right] = 11 \text{ mm}$$

Para obter o volume total de escoamento superficial, multiplica-se o resultado acima pela área da bacia,

$$\text{Vol. Runoff } = 0.011 \times \left(50 \times 10^6\right) = 550{,}000 \text{ m}^3$$

Mas 1 ha-m = 10,000 m^3, portanto

$$\text{Vol. Runoff } = 550{,}000 \text{ m}^3 \times \frac{1}{10{,}000} \frac{\text{ha-m}}{\text{m}^3} = \boxed{55 \text{ ha-m}}$$

■ Prob. 14

A intensidade de *runoff* em cada intervalo de 30 min pode ser obtida subtraindo o índice ϕ da intensidade de precipitação registrada naquele intervalo; assim sendo, temos

$$\text{Intensidade de runoff } = \text{Intensidade da precipitação} - \text{Índice } \phi$$

$$(\text{Período 1}) \text{Intensidade de runoff } = 23 - 13 = 10 \text{ mm/h}$$

$$(\text{Período 2}) \text{Intensidade de runoff } = 13 - 13 = 0 \text{ mm/h}$$

$$(\text{Período 3}) \text{Intensidade de runoff } = 15 - 13 = 2 \text{ mm/h}$$

$$(\text{Período 4}) \text{Intensidade de runoff } = 13 - 13 = 0 \text{ mm/h}$$

Para obter o runoff total, escrevemos

$$\text{Runoff total} = 10 \times \left(\frac{30}{60}\right) + 2 \times \left(\frac{30}{60}\right) = 6 \text{ mm}$$

Multiplicando pela área da bacia, encontramos o volume de escoamento superficial registrado no território inteiro:

$$\text{Runoff total} = 800\text{ ha} \times \left(6 \times 10^{-3}\right)\text{ m} = \boxed{4.8\text{ ha-m}}$$

■ Prob. 15

Para determinar o valor de ϕ, recorremos ao gráfico fornecido e preparamos a equação

$$\left[\begin{array}{c}(0.4-\phi)\times(8-2)+(0.5-\phi)\times(10-8)+(0.7-\phi)\times(14-10) \\ (0.9-\phi)\times(16-14)+(0.3-\phi)\times(20-16)+(0.2-\phi)\times(22-20)\end{array}\right] = 6.0$$

A expressão acima é uma equação de primeiro grau em ϕ. Podemos economizar tempo resolvendo-a com o Mathematica:

```
In[17]:= Solve[(0.4 - ϕ) * 6 + (0.5 - ϕ) * 2 + (0.7 - ϕ) * 4 + (0.9 - ϕ) * 2 +
           (0.3 - ϕ) * 4 + (0.2 - ϕ) * 2 == 6.0, ϕ]

Out[17]= {{ϕ → 0.18}}
```

Como mostra o código acima, concluímos que

$$\boxed{\phi = 0.18\text{ in./hr}}$$

■ Prob. 16

Parte (a): Temos a capacidade inicial de infiltração f_0 = 3.0 cm/hr, a capacidade limitante f_f = 0.55 cm/hr e a constante temporal k = 0.29 hr^{-1}. Substituindo na equação de Horton, vem

$$f(t) = f_f + \left(f_0 - f_f\right)e^{-kt}$$

$$\therefore f(t) = 0.55 + (3.0 - 0.55) \times e^{-0.29t}$$

$$\therefore f(t) = \boxed{0.55 + 2.45e^{-0.29t}}$$

Parte (b): Para determinar a lâmina d'água infiltrada após 10 horas, temos de integrar a equação de Horton obtida em (a):

$$F_{0-10} = \int_{t=0}^{10} f(t)\,dt = \int_0^{10} \left(0.55 + 2.45e^{-0.29t}\right)dt$$

$$\therefore F_{0-10} = \left(0.55t - \frac{2.45}{0.29} e^{-0.29t} \right) \Bigg|_{t=0}^{10}$$

$$\therefore F_{0-10} = \left(0.55 \times 10 - \frac{2.45}{0.29} \times e^{-0.29 \times 10} \right) - \left(0.55 \times 0 - \frac{2.45}{0.29} \times e^{-0.29 \times 0} \right)$$

$$\therefore \boxed{F_{0-10} \approx 13.5 \text{ cm}}$$

■ Prob. 17

Esse problema já foi discutido em nosso post acerca das equações de Horton e Philip. Sabemos que, onde há uma frente de umedecimento acentuada, a sortividade pode ser estimada pela relação

$$S = \frac{(\theta_{vs} - \theta_{vi})h}{t^{1/2}} = \frac{(0.56 - 0.15) \times 10}{16^{1/2}} = 1.03 \text{ cm/min}^{1/2}$$

O coeficiente *A* pode ser igualado à condutividade hidráulica = 0.03 cm/min. Podemos então calcular as infiltrações cumulativas através da equação de Philip. Por exemplo, para *t* = 10 min,

$$St^{1/2} = 1.03 \times 10^{1/2} = 3.26 \text{ cm}$$
$$At = 0.03 \times 10 = 0.3 \text{ cm}$$

de modo que a infiltração horizontal torna-se

$$I_x = St^{1/2} = 3.26 \text{ cm}$$

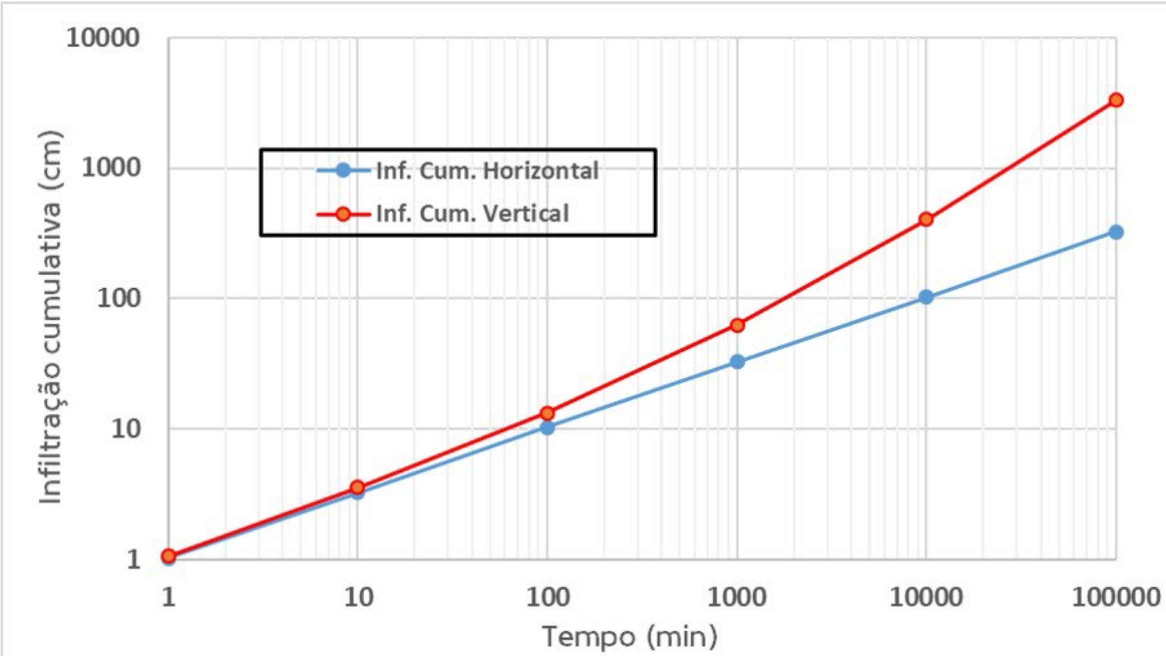
e a infiltração vertical é

$$I_y = St^{1/2} + At = 3.26 + 0.3 = 3.56 \text{ cm}$$

Resultados para outros valores de tempo estão listados na tabela a seguir.

Tempo (min)	$St^{1/2}$ (cm)	At (cm)	Inf. cumulativa (cm)	
			Horizontal	Vertical
1	1.03	0.03	1.03	1.06
10	3.26	0.3	3.26	3.56
100	10.30	3	10.30	13.30
1000	32.57	30	32.57	62.57
10000	103.00	300	103.00	403.00
100000	325.71	3000	325.71	3325.71

Os dados em questão estão plotados na figura a seguir; por conveniência, utilizamos uma escala bilogarítmica.



As curvas evidenciam que, para valores pequenos de tempo, as infiltrações horizontal e vertical são semelhantes; no entanto, para valores elevados de tempo, a infiltração vertical ultrapassa a infiltração horizontal substancialmente.

■ Prob. 18

Temos o teor inicial de umidade θ_i = 0.18, o teor final θ_f = 0.45, a condutividade hidráulica K_s = 7.8 mm/hr = 0.78 cm/hr, a sucção capilar Ψ = −100 mm = −10 cm e a intensidade da tempestade i = 2.9 cm/hr. A diferença entre teores de umidade é então $M_d = \theta_s - \theta_i$ = 0.45 − 0.18 = 0.27. Designamos como F_s a lâmina d'água que se infiltrará antes que haja saturação superficial; o valor de F_s é tal que

$$F_s = \frac{-\Psi M_d}{\left(1 - i/K_s\right)} = \frac{10 \times 0.27}{\left(1 - 2.9/0.78\right)} = 0.993 \text{ cm} = 9.93 \text{ mm}$$

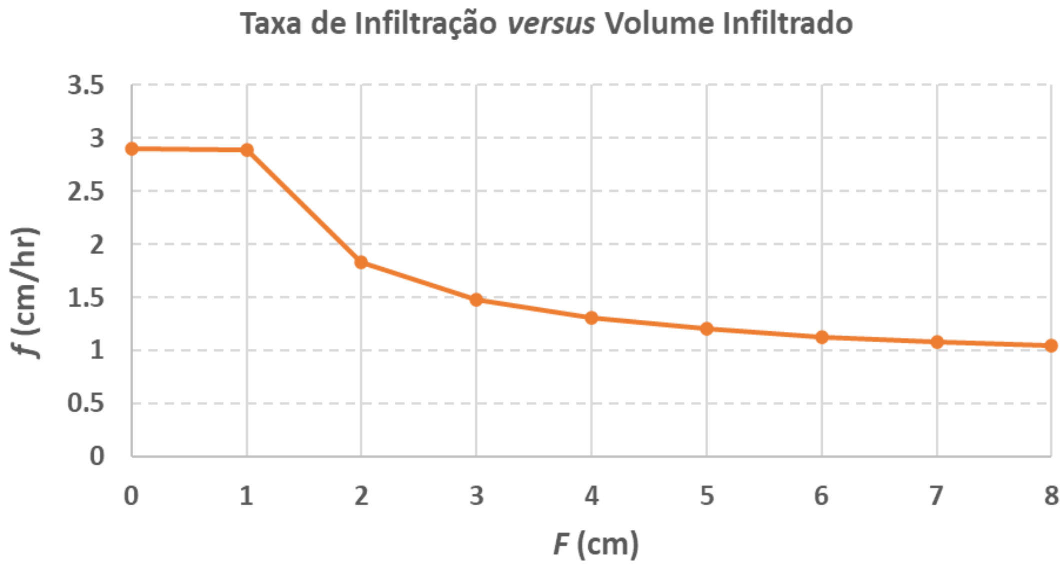
Sendo a intensidade da precipitação igual a 2.9 cm/hr, o tempo necessário para que seja atingida a saturação superficial do solo é 0.993/2.9 = 0.342 h ≈ 20.5 minutos. Após a saturação superficial, a taxa de infiltração pode ser calculada como

$$f = K_s\left(1 - \frac{M_d \Psi}{F}\right)$$

Por exemplo, para F = 2 cm temos

$$f = 0.78 \times \left[1 - \frac{(-0.27)\times 10}{2}\right] = 1.833 \text{ cm/hr}$$

O gráfico desejado é mostrado a seguir.



■ Prob. 19

Considere o solo franco-siltoso. Temos a condutividade hidráulica K_s = 0.65 cm/h, a sucção capilar Ψ = −16.75 cm, o teor de umidade inicial θ_i = 0.15 e a intensidade de precipitação i = 1.5 cm/hr. A lâmina d'água precipitada antes que haja saturação superficial é designada como F_s e calculada pela equação usual

$$F_s = \frac{-\Psi M_d}{(1 - i/K_s)} = \frac{16.75 \times M_d}{(1 - 1.5/0.65)} = 12.81 M_d \quad \textbf{(I)}$$

Considerando primeiramente a porosidade mínima n_{min} = 0.42, podemos escrever

$$M_d = 0.42 - 0.15 = 0.27$$

(Lembrando que, na iminência de saturação superficial, a condutividade hidráulica do solo iguala-se à porosidade.) Substituindo em **(I)**, vem

$$F_s = 12.81 M_d = 12.81 \times 0.27 = 3.46 \text{ cm}$$

Dividindo esse valor pela intensidade da precipitação em foco, obtém-se o tempo necessário para saturação superficial,

$$\Delta t = \frac{3.46 \text{ cm}}{1.5 \text{ cm/hr}} = 2.31 \text{ hr}$$

Em seguida, considerando a porosidade máxima n_{max} = 0.58, temos

$$M_d = 0.58 - 0.15 = 0.43$$

$$F_s = 12.81 M_d = 12.81 \times 0.43 = 5.51 \text{ cm}$$

$$\Delta t = \frac{5.51 \text{ cm}}{1.5 \text{ cm/hr}} = 3.67 \text{ hr}$$

Considere agora o solo argiloso arenoso. São conhecidos a condutividade hidráulica K_s = 0.10 cm/h, a sucção capilar Ψ = −23.95 cm, o teor de umidade inicial θ_i = 0.15 e a intensidade de precipitação i = 1.5 cm/hr. De modo semelhante ao que foi feito para o solo anterior, a lâmina d'água precipitada antes que haja saturação superficial é

$$F_s = \frac{-\Psi M_d}{\left(1 - i/K_s\right)} = \frac{23.95 \times M_d}{\left(1 - 1.5/0.10\right)} = 1.711 M_d \quad \textbf{(II)}$$

Considerando primeiramente a porosidade mínima n_{min} = 0.3, tem-se

$$M_d = 0.35 - 0.15 = 0.20$$

Substituindo em **(II)**,

$$F_s = 1.711 M_d = 1.711 \times 0.20 = 0.342 \text{ cm}$$

Dividindo pela intensidade da chuva,

$$\Delta t = \frac{0.342 \text{ cm}}{1.5 \text{ cm/hr}} = 0.228 \text{ hr}$$

Em seguida, considerando a porosidade máxima n_{max} = 0.49, temos

$$M_d = 0.49 - 0.15 = 0.34$$

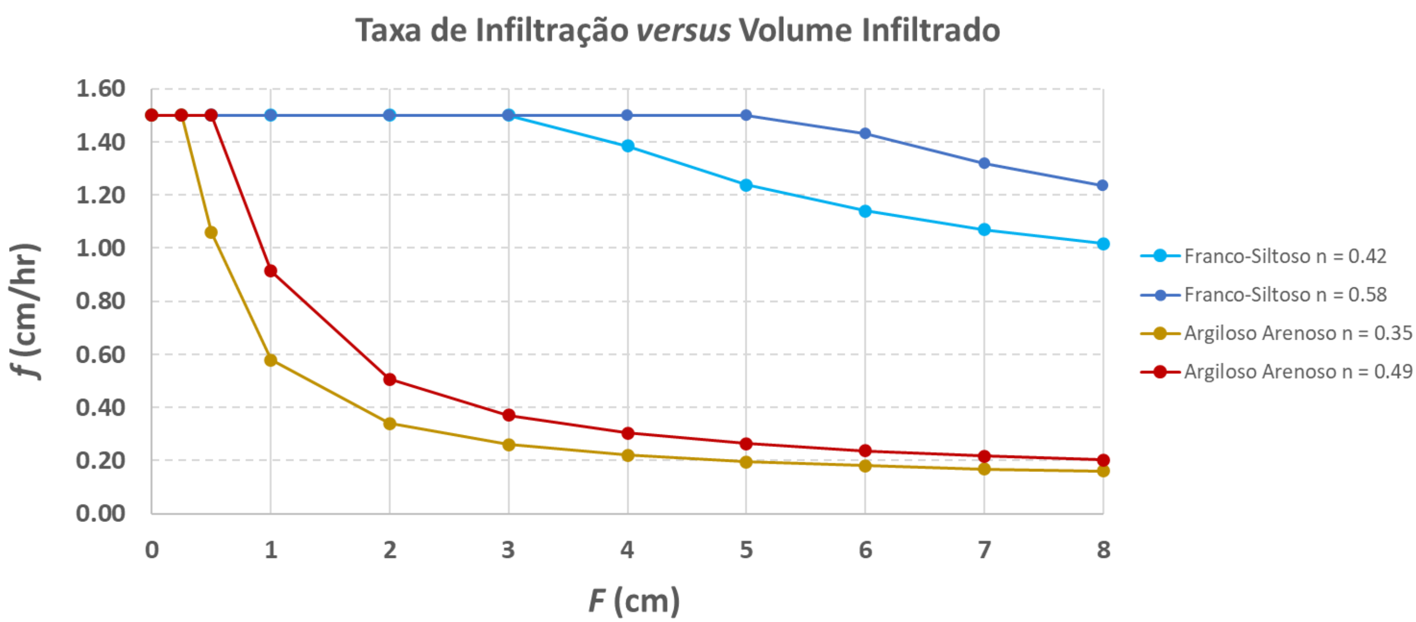
$$F_s = 1.711 M_d = 1.711 \times 0.34 = 0.582 \text{ cm}$$

$$\Delta t = \frac{0.582 \text{ cm}}{1.5 \text{ cm/hr}} = 0.388 \text{ hr}$$

Resta preparar os gráficos solicitados. Os cálculos estão na próxima página.

	Solo Franco-Siltoso		Solo Argiloso Arenoso	
F (cm)	*n* = 0.42	*n* = 0.58	*n* = 0.35	*n* = 0.49
0	1.500	1.500	1.500	1.500
0.25	1.500	1.500	1.500	1.500
0.5	1.500	1.500	1.058	1.500
1	1.500	1.500	0.579	0.914
2	1.500	1.500	0.340	0.507
3	1.500	1.500	0.260	0.371
4	1.385	1.500	0.220	0.304
5	1.238	1.500	0.196	0.263
6	1.140	1.430	0.180	0.236
7	1.070	1.319	0.168	0.216
8	1.017	1.235	0.160	0.202
9	0.977	1.170	0.153	0.190
10	0.944	1.118	0.148	0.181
11	0.917	1.076	0.144	0.174
12	0.895	1.040	0.140	0.168
13	0.876	1.010	0.137	0.163
14	0.860	0.984	0.134	0.158

As quatro curvas de taxa de infiltração são mostradas abaixo.



Referências (★ → Livro altamente recomendado)

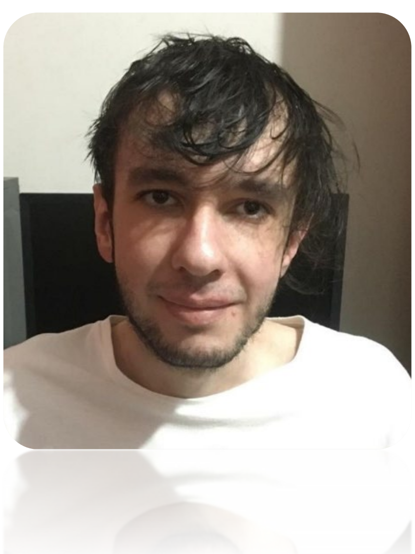
1. BEDIENT, P.; HUBER, W.; VIEUX, B. **Hydrology and Floodplain Analysis**. 5ª ed. Pearson, 2013. ★
2. DEODHAR, M. **Elementary Engineering Hydrology**. Pearson, 2009.
3. GUPTA, R. **Hydrology and Hydraulic Systems**. 4ª ed. Waveland Press, 2017. ★
4. MIMIKOU, M.; BALTAS, E.; TSIHRINTZIS, V.. **Hydrology and Water Resource Systems Analysis**. CRC Press, 2016.
5. ROTH, L.; FIELD, H. **An Introduction to Agricultural Engineering**. 2ª ed. Aspen Publishers, 1999.
6. SUBRAMANYA, K. **Engineering Hydrology**. 3ª ed. Tata-McGraw-Hill, 2008. ★

➜ Referências de cada problema

Problema	Ref.	Problema	Ref.
1	[3]	11	[6]
2	[3]	12	[6]
3	[2]	13	[6]
4	[2]	14	[6]
5	[4]	15	[1]
6	[4]	16	[1]
7	[4]	17	*
8	[5]	18	[1]
9	[5]	19	[1]
10	[6]		

***** O Prob. 17 foi originalmente postado em um artigo no blog Hoek.

Sobre mim



Sou aluno de graduação em Engenharia Civil na Universidade de Brasília (UnB). Meus principais interesses são hidrologia, engenharia hidráulica, engenharia ambiental, geotecnia e métodos geofísicos. Tenho proficiência certificada em sete idiomas e busco me posicionar na comunidade brasileira de engenheiros e especialistas em infraestrutura.

WhatsApp: (61) 981247059
Email: lucas_0150@hotmail.com