



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
DEPARTAMENTO DE SOLOS E ENGENHARIA AGRÍCOLA

® **M** Plataforma Moretti

Disciplina: Fundamentos de Hidrologia, Irrigação e Drenagem

# UNIDADE 6 – Infiltração da água no solo

**Prof. Jorge Luiz Moretti de Souza**

E-mail: [jmoretti@ufpr.br](mailto:jmoretti@ufpr.br)

<http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/index.htm>

## **Objetivo da Unidade didática**

Identificar e caracterizar as principais variáveis, propriedades e atributos envolvendo a relação água-solo-planta-atmosfera, necessários ao entendimento de como ocorre o **movimento** da água no solo.

# 1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

- A Infiltração consiste na entrada de água no solo através de sua superfície, iniciando na interface solo-atmosfera.

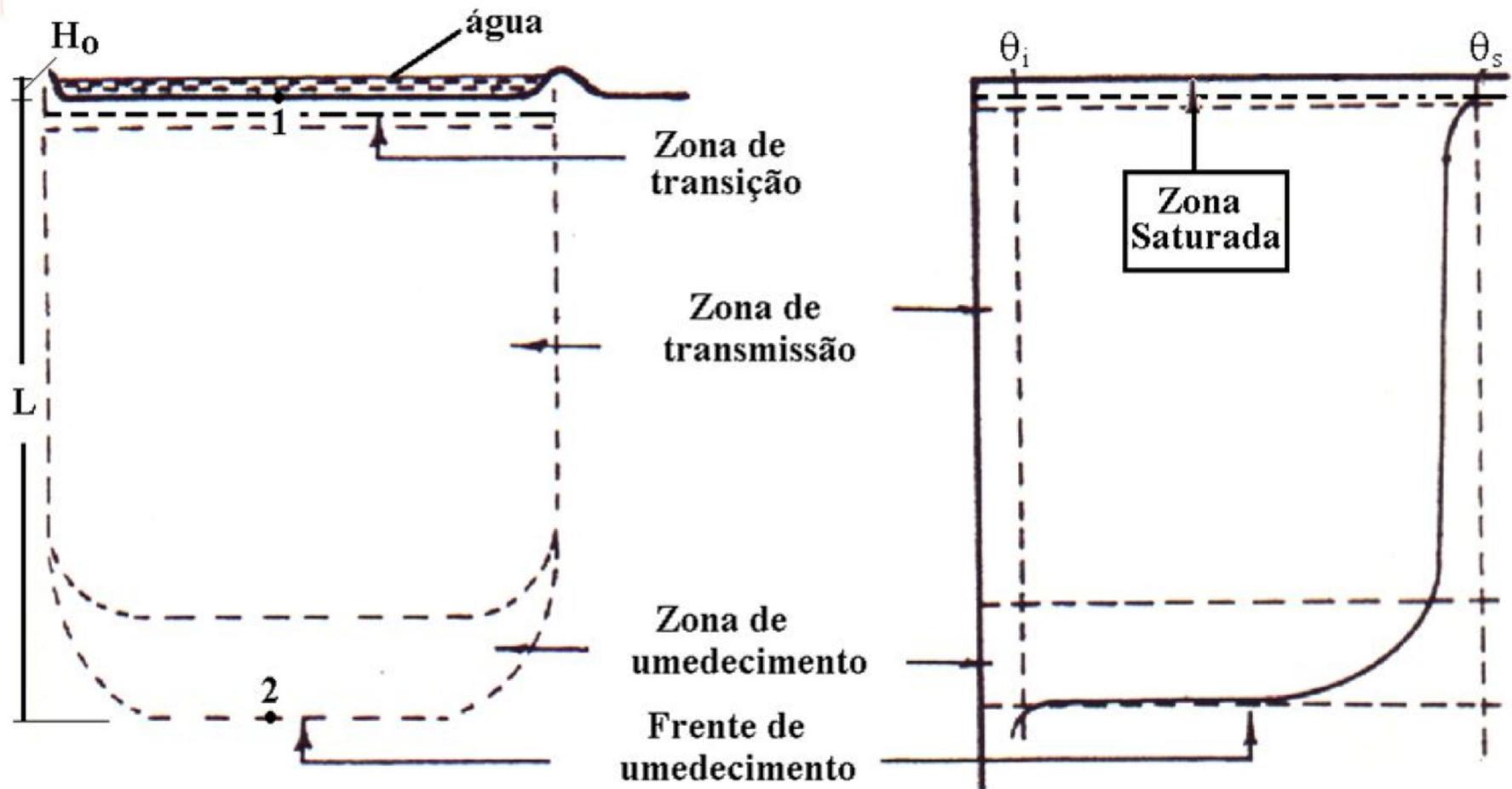


Figura 6.1 – Perfil de umedecimento de um solo uniforme durante a infiltração da água.

## 2 ASPECTOS TEÓRICOS SOBRE O MOVIMENTO DA ÁGUA NO SOLO

### ➤ Unidade anterior

- Equações: Darcy (1856); Buckingham (1907); e, Darcy-Buckingham

$$q = -K_o \cdot \frac{\partial H}{\partial z}$$

$$q = \frac{V}{A \cdot t}$$

$$q = -K(\theta) \cdot \frac{\partial}{\partial z} (\psi_m + z)$$

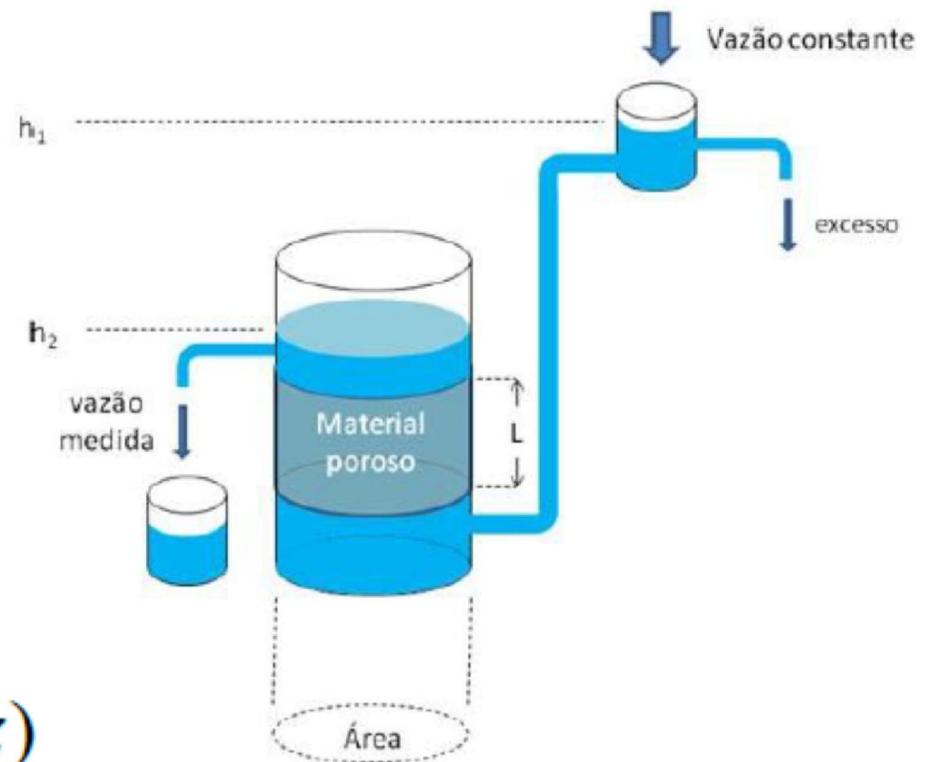


Figura 6.2 – Experimento de Darcy

# 3 GRANDEZAS CARACTERÍSTICAS DA INFILTRAÇÃO

## 3.1 Lâmina de água infiltrada ( $I$ )

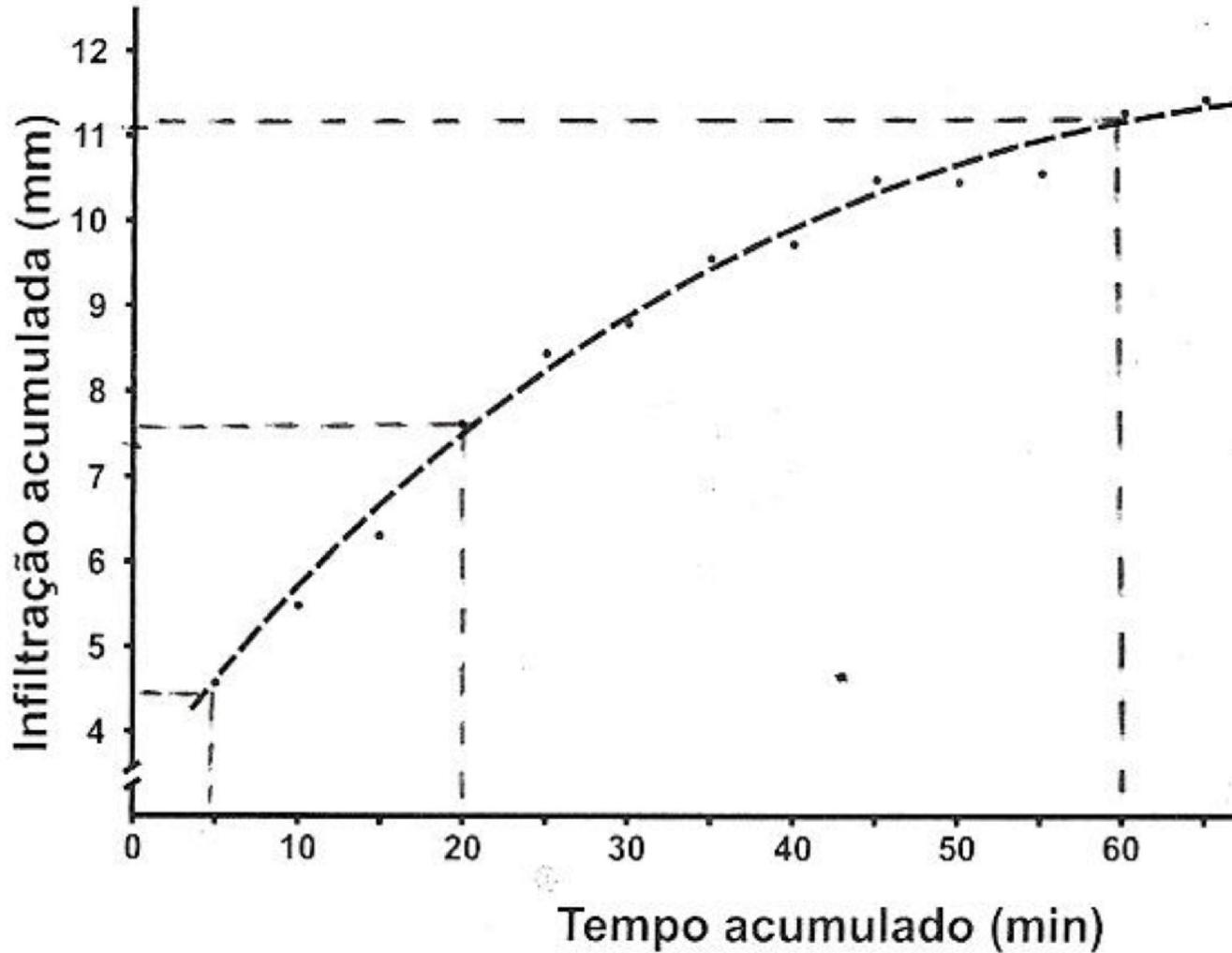


Figura 6.3 – Curva de infiltração de água acumulada ( $I$ ) de um determinado solo.

# 3 GRANDEZAS CARACTERÍSTICAS DA INFILTRAÇÃO

## 3.2 Capacidade de infiltração ( $C_I$ )

## 3.3 Taxa (ou velocidade) de infiltração ( $i$ )

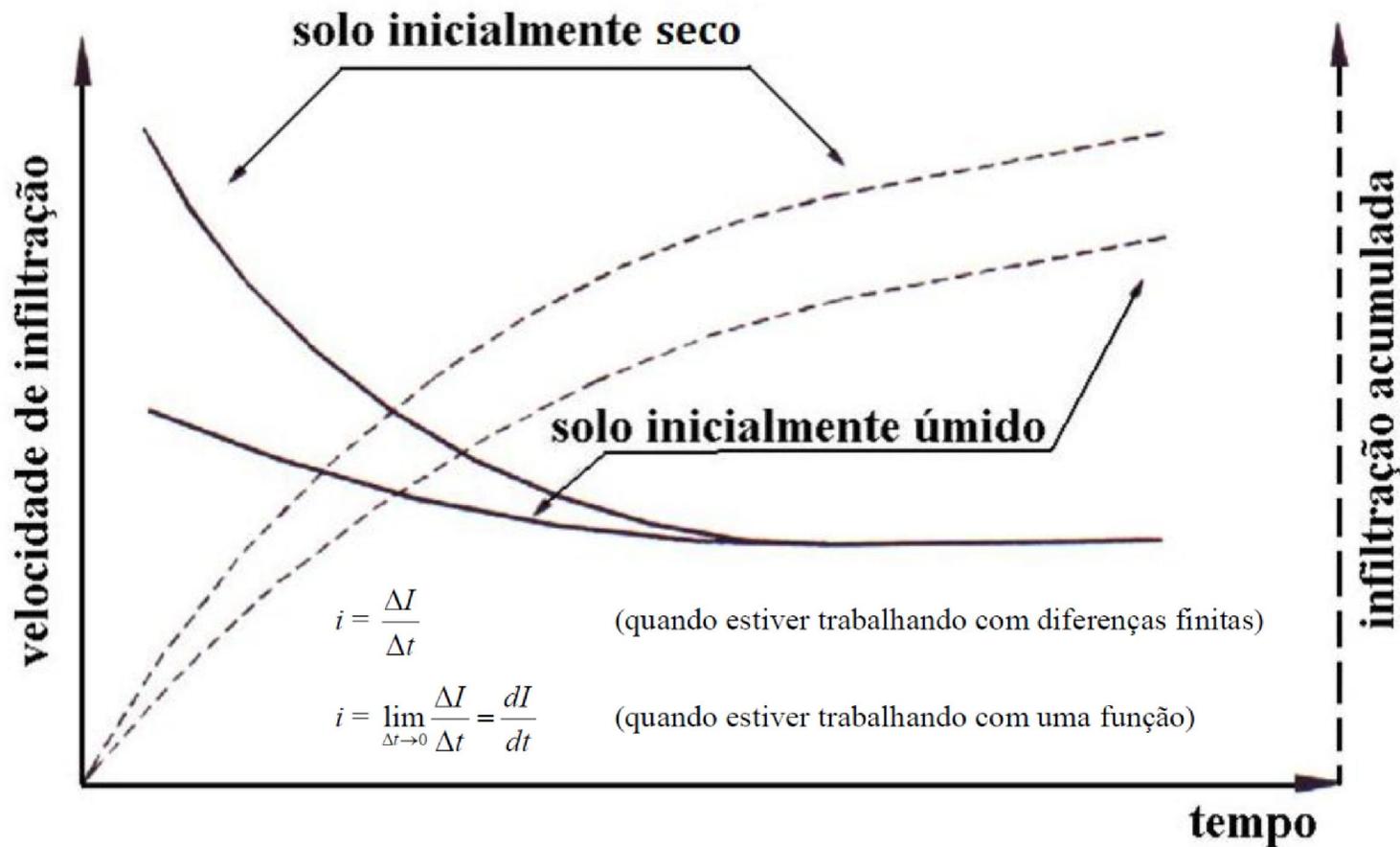


Figura 6.4 – Infiltração acumulada e taxa de infiltração (velocidade de infiltração) em função do tempo, para diferentes condições de umidade inicial do solo.

Exemplo 6.1: Supondo a capacidade de infiltração de água de um solo de  $80 \text{ mm h}^{-1}$ , faça uma consideração sobre o que ocorrerá com a capacidade de infiltração e taxa de infiltração do solo no momento de uma chuva, quando:

i) a precipitação que cai sobre a superfície do solo tem intensidade de  $40 \text{ mm h}^{-1}$ :

ii) a precipitação que cai sobre a superfície do solo tem intensidade de  $100 \text{ mm h}^{-1}$ :

$$i_{\text{precipitação}} \leq CI \rightarrow i_{\text{taxa de infiltração}} = i_{\text{precipitação}} \quad (\text{não há escoamento superficial})$$

$$i_{\text{precipitação}} > CI \rightarrow i_{\text{taxa de infiltração}} = CI \quad (\text{ocorre acúmulo de água na superfície e possibilidade de ocorrer escoamento superficial})$$

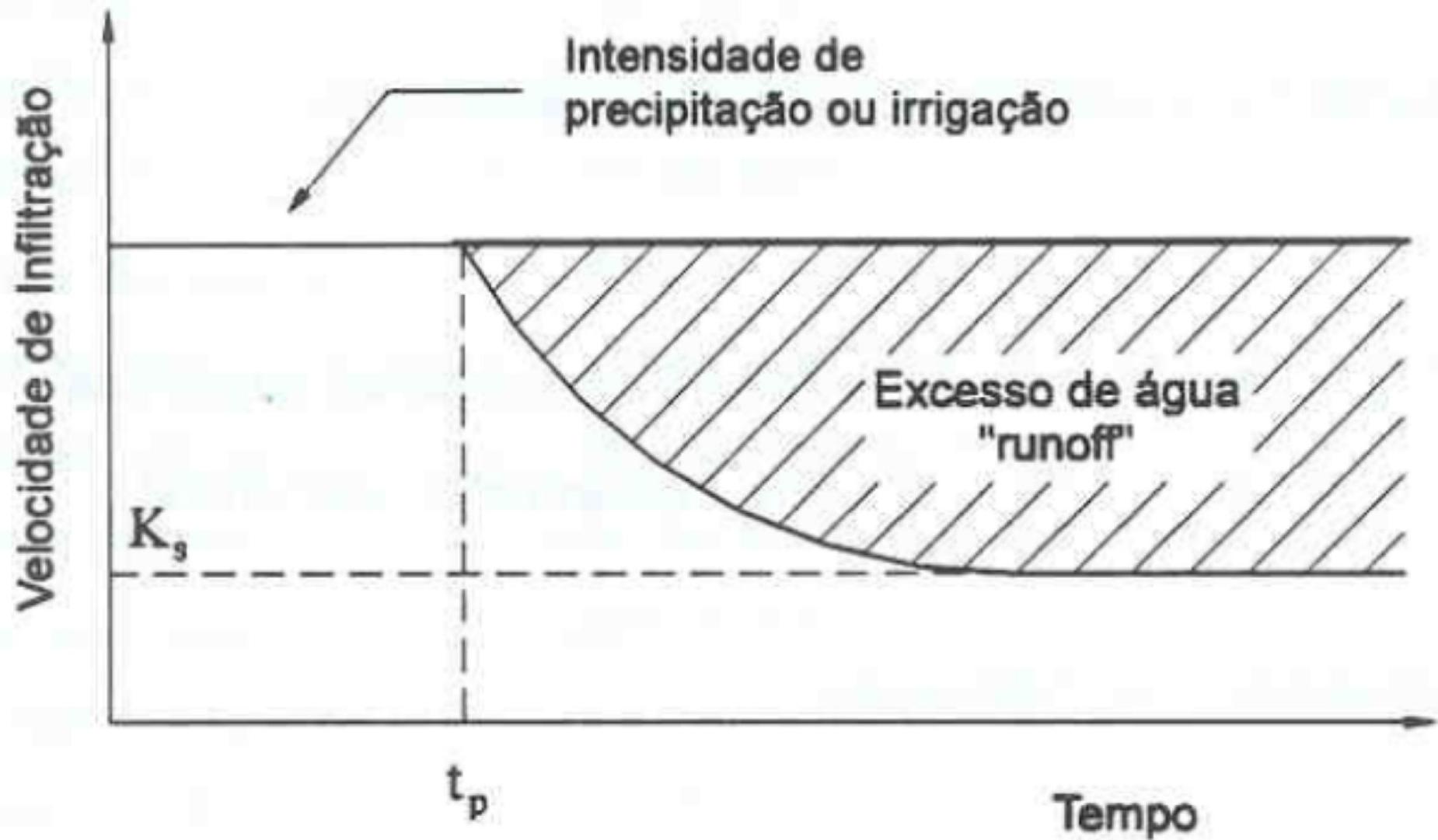


Figura 6.5 – Variação da velocidade de infiltração com o tempo.

Exemplo 6.2 – A partir da evolução temporal da infiltração real e da capacidade de infiltração com a ocorrência de precipitação pluvial (Figura 6.6), descreva o que está ocorrendo nos tempos A, B e C das curvas representativas:

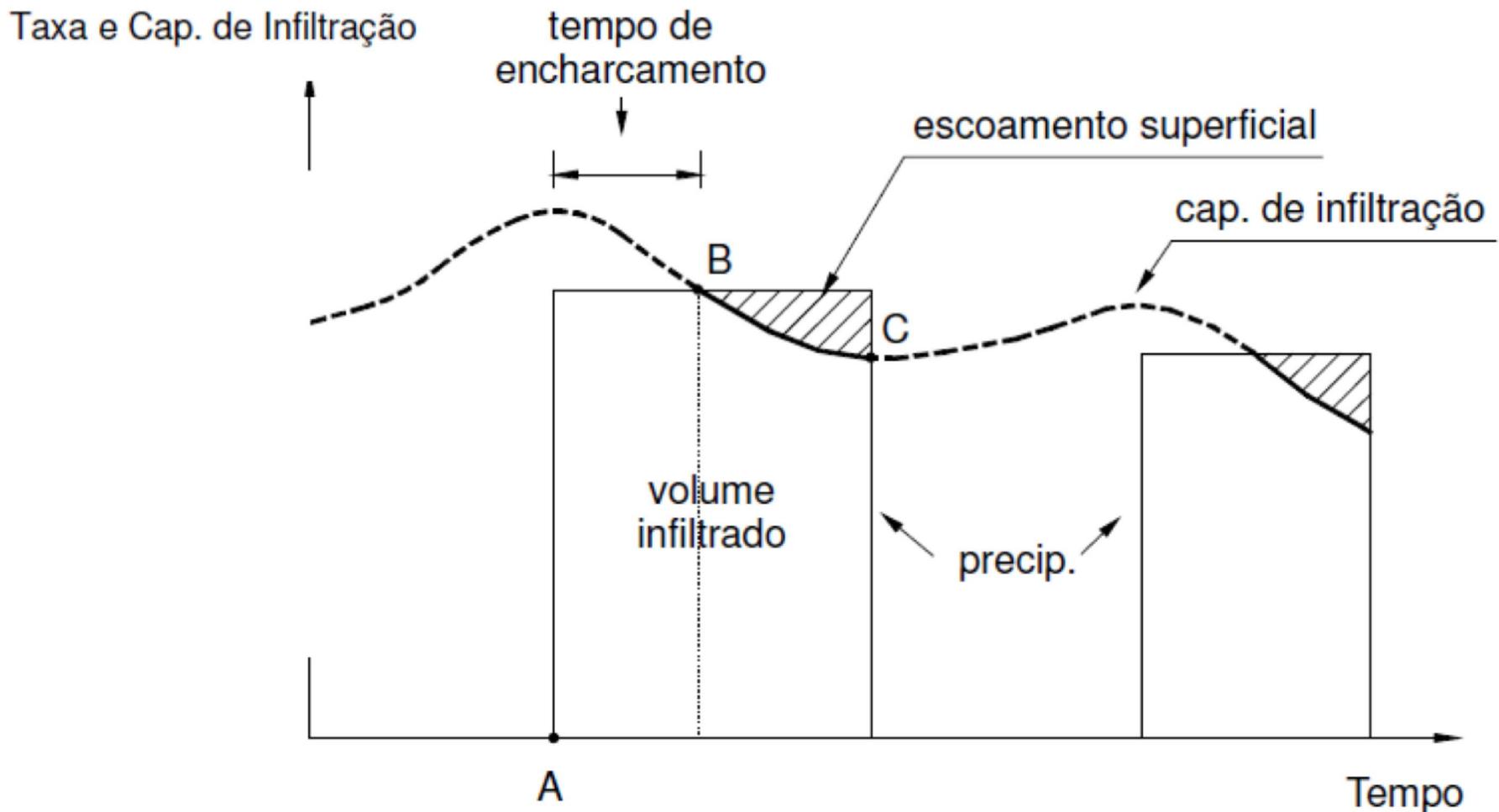


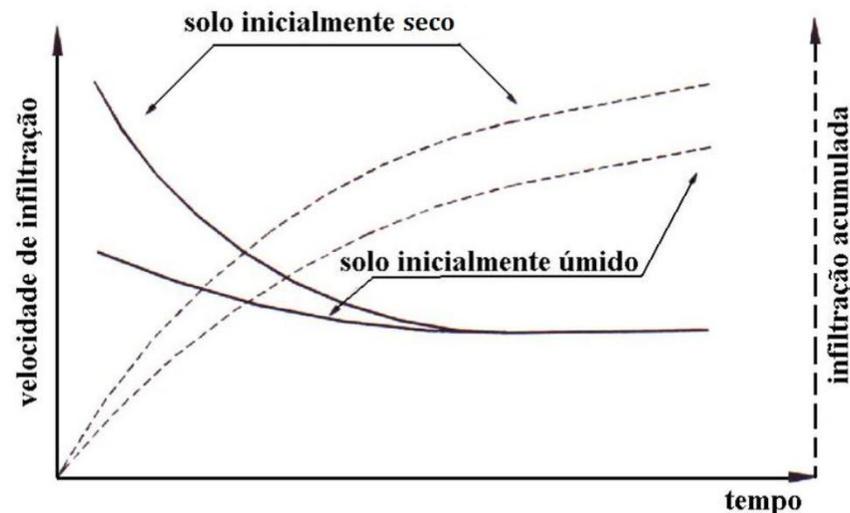
Figura 6.6 – Evolução temporal da infiltração com a ocorrência de precipitação.

# 3 GRANDEZAS CARACTERÍSTICAS DA INFILTRAÇÃO

## 3.4 Velocidade básica de infiltração (VIB)

➤ Classificação dos solos conforme a velocidade de infiltração básica (VIB)

- Solo de VIB baixa →  $VIB \leq 5 \text{ mm h}^{-1}$ ;
- Solo de VIB média →  $5 < VIB \leq 15 \text{ mm h}^{-1}$ ;
- Solo de VIB alta →  $15 < VIB \leq 30 \text{ mm h}^{-1}$ ;
- Solo de VIB muito alta →  $VIB > 30 \text{ mm h}^{-1}$ .



## 4 MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA INFILTRAÇÃO DA ÁGUA NO SOLO

- Métodos e materiais para quantificar a infiltração da água no solo:
  - “Infiltrômetro de anel” ou “cilindro Infiltrômetro”: irrigação por inundação;
  - Simulador de chuva: irrigação por aspersão;
  - Entrada e saída de água no sulco (inflow-outflow): irrigação por superfície (sulcos);
  - Infiltrômetro de sulco: irrigação por superfície.

# 4 MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA INFILTRAÇÃO DA ÁGUA NO SOLO

➤ Importância das relações:

“Lâmina infiltrada acumulada vs Tempo”

OU

“Taxa (velocidade) de infiltração vs Tempo”

## Exemplos:

- Sistemas de irrigação por gravidade
- Sistemas de irrigação por aspersão ( $i_{\text{aspersão}} \leq VIB$ )
- Recomendações de intensidade dos aspersores para solos planos:
  - 5 a 12 mm h<sup>-1</sup> (solos de textura argilosa);
  - 12 a 20 mm h<sup>-1</sup> (solos de textura normal);
  - 20 a 40 mm h<sup>-1</sup> (solos arenosos).

## 4.1 Método do “infiltrômetro de anel” ou “cilindro infiltrômetro”

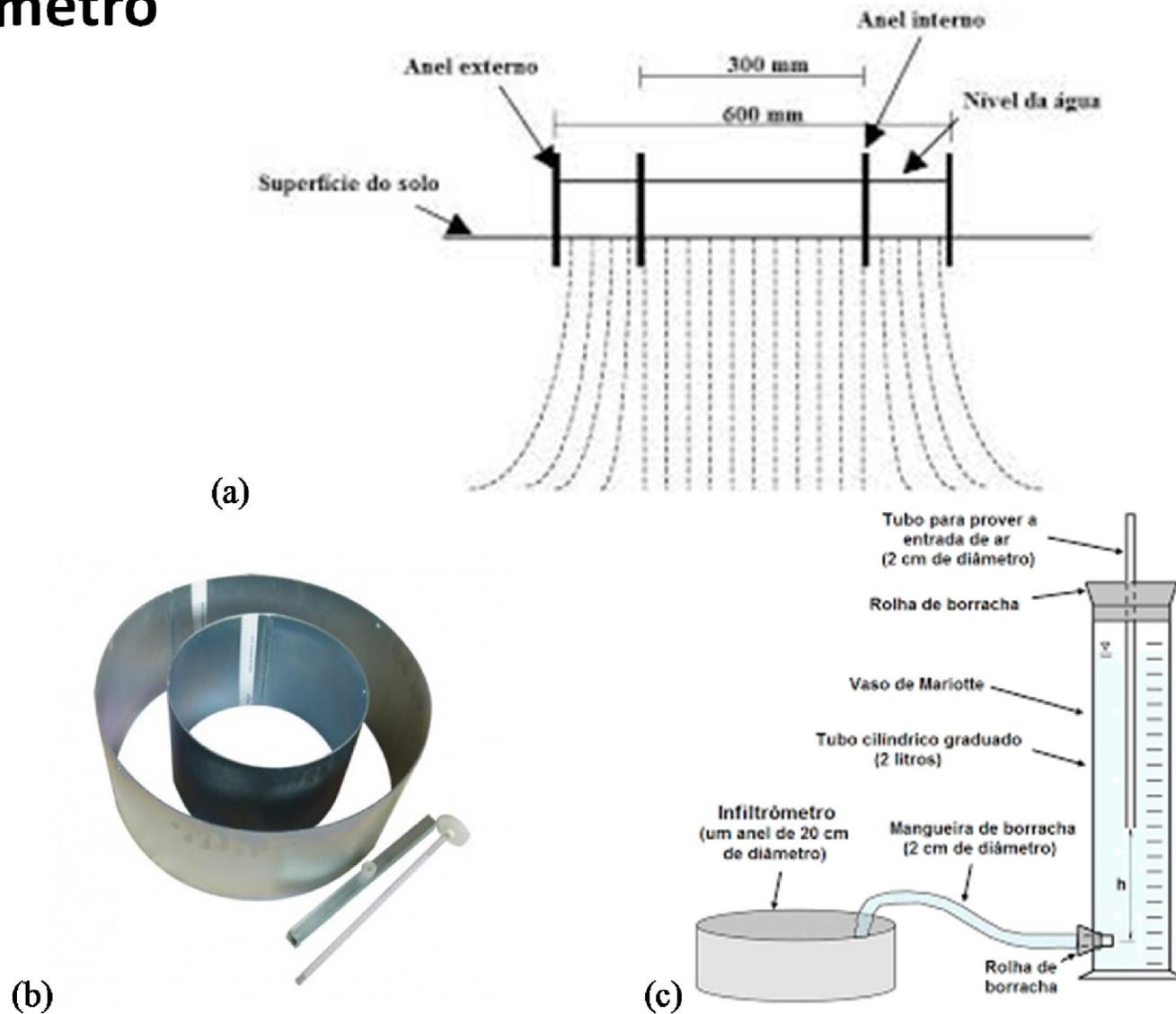


Figura 6.7 – Ensaio de infiltração com o infiltrômetro de anel: (a) perfil dos infiltrômetros instalados; (b) infiltrômetro de carga variável; e, (c) infiltrômetro de carga constante.

## 4.1 Método do “infiltrômetro de anel” ou “cilindro infiltrômetro”

- Considerações para instalação dos cilindros de infiltração:
  - Número de testes de infiltração simultâneos (cinco);
  - Instalação em local representativo das condições de campo;
  - Cuidados para fixação dos cilindros;
  - Finalidade dos cilindros interno e externo.
  
- Operações e medidas nos ensaios de infiltração:
  - Cuidados com a superfície do solo no início do teste (plástico);
  - Lâmina de água no interior do cilindro (entre 10 e 15 cm);
  - Início do teste;
  - Leitura e registro da altura do nível de água no cilindro (Ex.: 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 60, 90, 120, 150 min);
  - Cuidado com o nível da água no cilindro (3 a 5 cm);
  - Cálculo da infiltração vertical no período;
  - Finalização do teste (geralmente entre 90 e 120 minutos, dependendo a umidade inicial do solo).

## 4.2 Método do simulador de chuva

- A água é aplicada uniformemente por aspersão, com intensidade de precipitação superior à capacidade de infiltração do solo ( $C_i$ );
- O ensaio consiste em coletar a lâmina de escoamento superficial;
- Considerações sobre o teste.

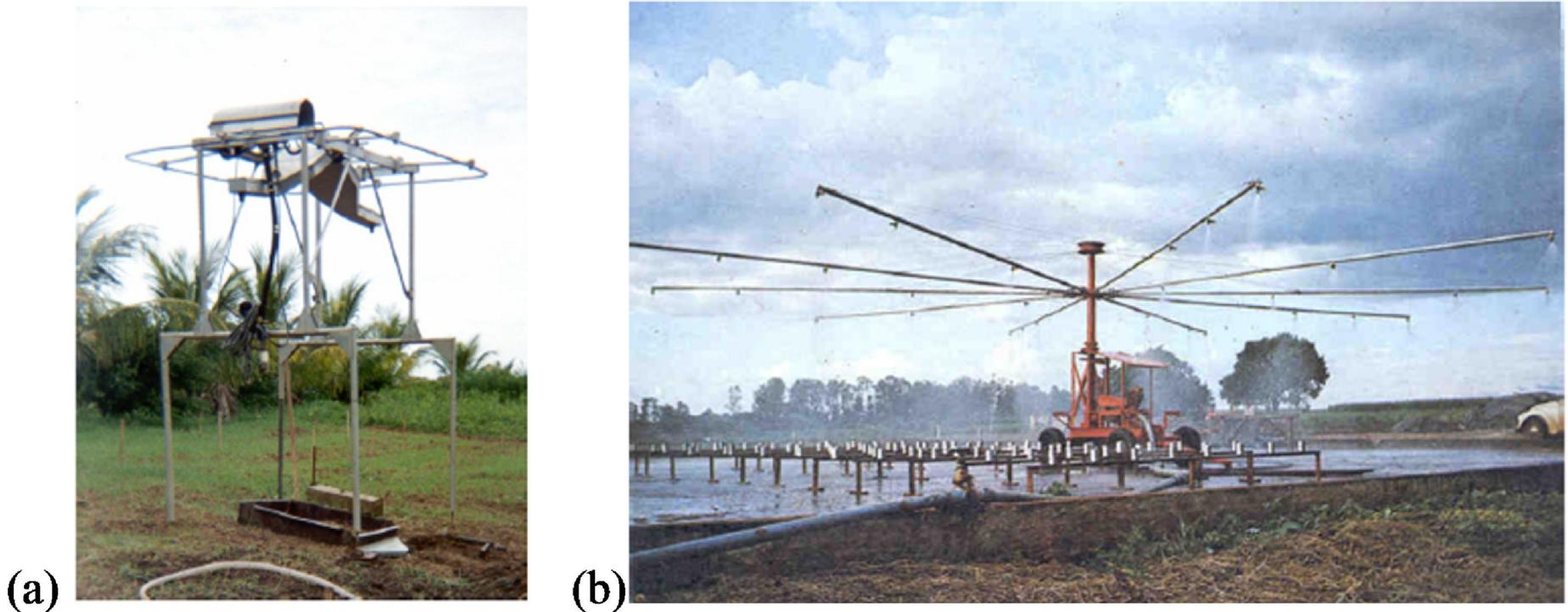


Figura 6.8 – Simulador de chuva: (a) Pendular; e, (b) Rotativo.

## 4.3 Método da entrada e saída de água no sulco

➤ Considerações sobre o teste.

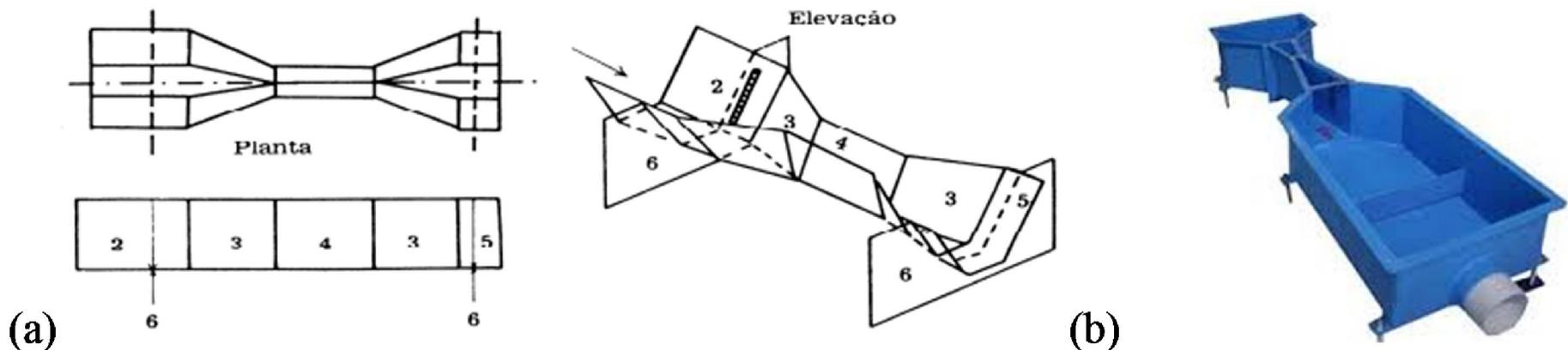
$$Q_i = Q_e - Q_s$$

Sendo:  $Q_i$  – vazão infiltrada ( $L s^{-1}$ );  $Q_e$  – vazão de entrada ( $L s^{-1}$ );  $Q_s$  – vazão saída ( $L s^{-1}$ )

A partir da  $Q_i$  obtém-se a taxa de infiltração ( $i$ ) para cada intervalo de tempo  $\Delta t$  correspondente, em “ $mm h^{-1}$ ” ou “ $cm h^{-1}$ ”.

$$i = \frac{3600 \cdot Q_i}{E \cdot L}$$

Sendo:  $i$  – taxa (velocidade) de infiltração ( $mm h^{-1}$ );  $Q_i$  – vazão de infiltração ( $L s^{-1}$ );  $L$  – comprimento do sulco de irrigação (m);  $E$  – espaçamento entre sulcos de irrigação (m).



**Figura 6.9** – Calhas WSC-flume: (a) esquema com as partes da calha; e, (b) imagem de uma calha.

## 5 MODELOS MATEMÁTICOS QUE ESTIMAM A INFILTRAÇÃO

- Modelos utilizados (Green e Ampt, 1911; Horton, 1940; Kostikov, 1932; Kostikov-Lewis, 1945; Philip, 1955 e 1957; entre outros)

Equação potencial, sendo  $a > 0$ :  $y = a \cdot x^b$

Equação exponencial, sendo  $a > 0$ :  $y = a \cdot e^{b \cdot x}$

### 5.1 Equação de Kostikov (1932)

- Infiltração acumulada ( $I$ )

$$I = k \cdot t^a$$

Sendo:  $I$  – infiltração acumulada (mm);  $t$  – tempo de infiltração (min.);  $k$  e  $a$  – constantes que dependem do solo (adimensional), sendo que  $a$  varia entre 0 e 1.

- Taxa ou velocidade de infiltração ( $i$ )

$$i = \frac{dI}{dt} = \frac{d}{dt} k \cdot t^a$$

$$i = k \cdot a \cdot t^{(a-1)}$$

## 5.1 Equação de Kostiakov (1932)

- Taxa ou velocidade de infiltração ( $i$ )

$$i = \frac{dI}{dt} = \frac{d}{dt} k \cdot t^a$$

$$i = k \cdot a \cdot t^{(a-1)}$$

- Tempo em que a  $VIB$  ocorre ( considerando  $VIB \cong K_o$  )

$$i = k \cdot a \cdot t^{(a-1)} \quad \rightarrow \quad K_o = i_i \cdot t^{(a-1)}$$

$$t = \left( \frac{K_o}{i_i} \right)^{\frac{1}{(1-a)}}$$

- Taxa ou velocidade de infiltração média ( $i_m$ )

$$i_m = \frac{I}{t} \quad \rightarrow \quad i_m = \frac{k \cdot t^a}{t} \quad \rightarrow \quad i_m = k \cdot t^{(a-1)}$$

## 5.1 Equação de Kostiakov (1932)

### Determinação dos coeficientes “ $\alpha$ ” e “ $k$ ”

#### a) Método Gráfico

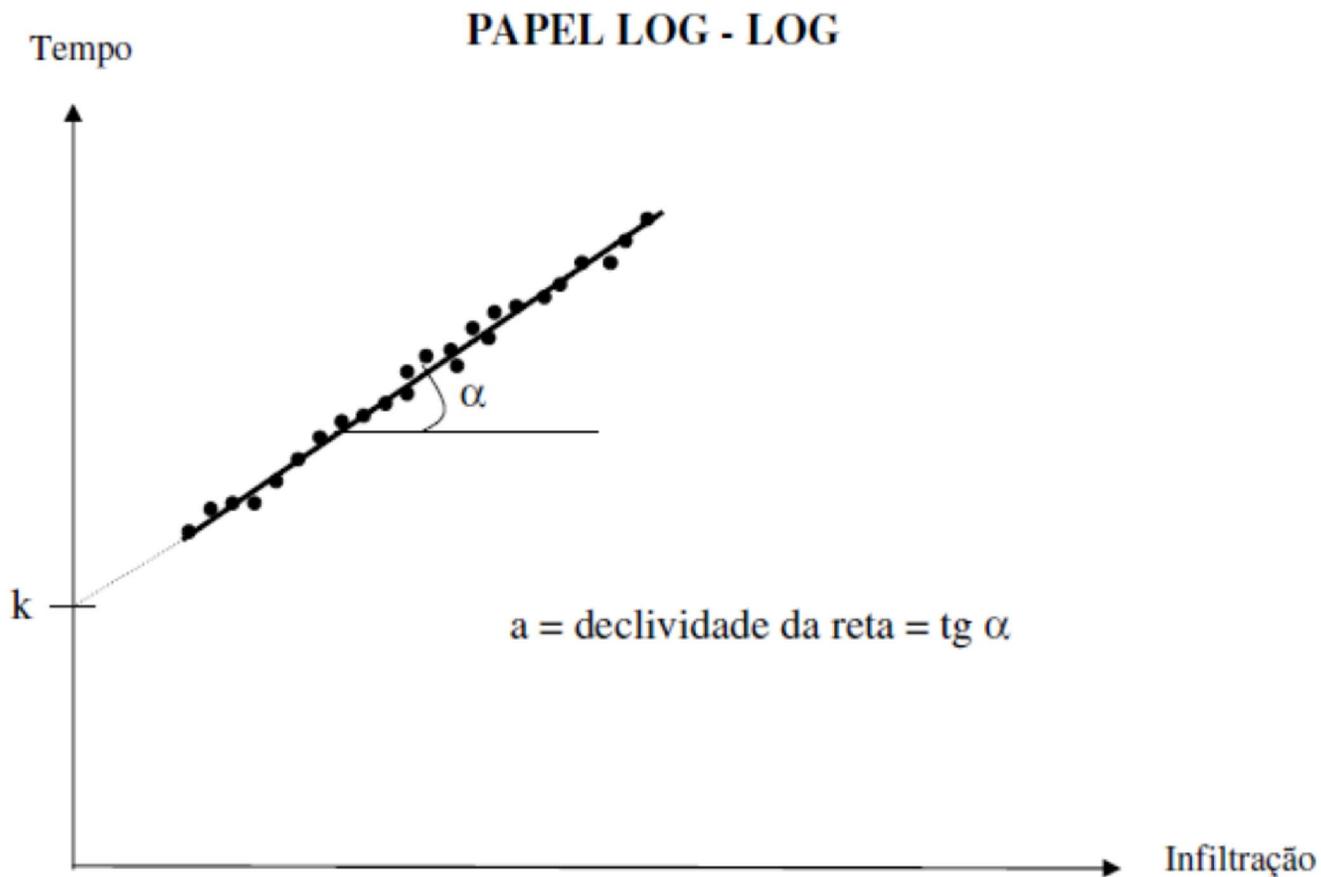


Figura 6.10 – Linearização da relação infiltração acumulada ( $I$ ) versus tempo ( $t$ ) a partir do papel logaritmo log-log

## 5.1 Equação de Kostiakov (1932)

Determinação dos coeficientes “ $a$ ” e “ $k$ ”

b) Método analítico por regressão linear

$$I = k \cdot t^a \quad \rightarrow \quad \log I = \log (k \cdot t^a) \quad \rightarrow \quad \log I = \log k + \log t^a$$
$$\log I = \log k + a \cdot \log t$$

Fazendo a transformação, tem-se:

$$y = \log I; \quad a_0 = \log k; \quad a_1 = a; \quad x = \log t$$

➤ A equação fica na forma de uma reta:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x$$

## 5.1 Equação de Kostiakov (1932)

### b) Método analítico por regressão linear

$$y = a_0 + a_1 \cdot x$$

- Os valores de  $a_0$  e  $a_1$  são determinados com as expressões:

$$a_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - a_1 \cdot \sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (6.1)$$

$$a_1 = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n (x_i \cdot y_i) - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (6.2)$$

Obtidos os valores de  $a_0$  e  $a_1$ , determina-se  $k$  e  $a$ , retornando-se à equação exponencial de origem. O valor de  $k$  e  $a$  são obtidos fazendo:

$$a_0 = \log k \quad \rightarrow \quad k = \text{antilog } a_0 \quad \rightarrow \quad k = 10^{a_0}$$

$$a_1 = a \quad \rightarrow \quad \text{então, } a = a_1$$

Exemplo 6.3 – Considerando o ensaio com o Método do infiltrômetro de anel, realizado no Setor de Ciências Agrárias, na área Experimental do Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, Curitiba-PR (Tabela 6.1), determine para a equação de **Kostiakov (1932)**:

i) Os coeficientes da equação de infiltração acumulada ( $I$ ), ajustados aos pares de pontos obtidos no ensaio de infiltração:

– Número de pares de valores  $I$  vs  $t$ :  $n = 22$

– Determinação dos valores  $x_i$  e  $y_i$  para a realização da linearização dos dados (Tabela 6.1)

– Cálculo dos valores de  $a_0$  e  $a_1$  com as Equações 6.2 e 6.1, respectivamente:

$$a_1 = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n (x_i \cdot y_i) - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2} = \frac{(22 \cdot 51,6683) - (27,2278 \cdot 37,7595)}{(22 \cdot 40,9403) - (27,2278)^2} = 0,6815$$

$$a_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - a_1 \cdot \sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{37,7595 - 0,6815 \cdot 27,2278}{22} = 0,8728$$

$$y = a_0 + a_1 \cdot x \quad \rightarrow \quad y = 0,8728 + 0,6815 \cdot x$$

Tabela 6.1. Ensaio e dados de infiltração realizado com o Método do infiltrômetro de anel.

Tempo no campo (minuto)	Leitura da régua (mm)	Tempo acumulado ( $t_{AC}$ ) (minuto)	$I$ (mm)	$x_i = \log t_{AC.i}$	$y_i = \log I_i$	$x_i^2$	$x_i \cdot y_i$
0	587	0	0	—	—	—	—
1	580	1	7,0	0,0000	0,8451	0,0000	0,0000
1	575	2	12,0	0,3010	1,0792	0,0906	0,3249
1	571/610*	3	16,0	0,4771	1,2041	0,2276	0,5745
1	605	4	21,0	0,6021	1,3222	0,3625	0,7961
1	602	5	24,0	0,6990	1,3802	0,4886	0,9647
1	600	6	26,0	0,7782	1,4150	0,6055	1,1011
2	595	8	31,0	0,9031	1,4914	0,8156	1,3468
2	590	10	36,0	1,0000	1,5563	1,0000	1,5563
2	587	12	39,0	1,0792	1,5911	1,1646	1,7170
3	581	15	45,0	1,1761	1,6532	1,3832	1,9443
3	576/618*	18	50,0	1,2553	1,6990	1,5757	2,1327
5	606	23	62,0	1,3617	1,7924	1,8543	2,4407
5	597	28	71,0	1,4472	1,8513	2,0943	2,6791
5	588	33	80,0	1,5185	1,9031	2,3059	2,8899
5	580	38	88,0	1,5798	1,9445	2,4957	3,0719
5	571/610*	43	97,0	1,6335	1,9868	2,6682	3,2453
10	596	53	111,0	1,7243	2,0453	2,9731	3,5267
10	581	63	126,0	1,7993	2,1004	3,2376	3,7793
10	569/620*	73	138,0	1,8633	2,1399	3,4720	3,9873
15	596	88	162,0	1,9445	2,2095	3,7810	4,2964
15	578	103	180,0	2,0128	2,2553	4,0515	4,5395
15	561	118	197,0	2,0719	2,2945	4,2927	4,7539
Total		118	197,0	27,2278	37,7595	40,9403	51,6683

\* Segunda leitura no nível da água, devido ao reabastecimento do cilindro interno.

Retornando os coeficientes  $a_0$  e  $a_1$  para os coeficientes da equação de Kostiakov ( $k$  e  $a$ ), tem-se:

$$a_0 = \log k \rightarrow k = \text{antilog } a_0 \rightarrow k = 10^{(0,8728)} \rightarrow k = 7,4611$$

Determinação do valor de  $a$ :

$$a_1 = a \rightarrow a = 0,6815$$

Assim, a equação de infiltração acumulada ( $I$ ) será:

$$I = 7,4611 \cdot t^{0,6815} \quad (\text{mm})$$

*ii)* A equação da taxa ou velocidade de infiltração ( $i$ )

$$i = \frac{dI}{dt} = \frac{d}{dt} k \cdot t^a \rightarrow i = k \cdot a \cdot t^{(a-1)}$$

$$i = 7,4611 \cdot 0,6815 \cdot t^{(0,6815-1)}$$

$$i = 5,0847 \cdot t^{-0,3185} \quad (\text{mm min.}^{-1})$$

iii) A taxa de infiltração média ( $i_m$ ):

$$i_m = \frac{I}{t} \quad \rightarrow \quad i_m = \frac{k \cdot t^a}{t} \quad \rightarrow \quad i_m = k \cdot T^{(a-1)}$$

$$i_m = 7,4611 \cdot t^{(0,6815-1)}$$

$$i_m = 7,4611 \cdot t^{-0,3185} \quad (\text{mm min.}^{-1})$$

## 5.2 Equação de Kostiaikov-Lewis (1945)

$$I = k \cdot t^a + \text{VIB} \cdot t$$

$$i = \frac{dI}{dt} = \frac{d}{dt} k \cdot t^a + \text{VIB} \cdot t$$

$$i = k \cdot a \cdot t^{a-1} + \text{VIB}$$

Sendo:  $I$  – infiltração acumulada (mm);  $t$  – tempo ou período de infiltração (min.); VIB – velocidade de infiltração básica (mm min.<sup>-1</sup>);  $k$  e  $a$  – constantes que dependem do solo (adimensional), sendo que  $a$  varia entre 0 e 1.

### 5.3 Equação Horton (1940)

$$I = i_f \cdot t - \frac{(i_i - i_f)}{\beta} \cdot (1 - e^{-\beta \cdot t})$$

$$i = \frac{dI}{dt} = \frac{d}{dt} \left( i_f \cdot t - \frac{(i_i - i_f)}{\beta} \cdot (1 - e^{-\beta \cdot t}) \right)$$

$$i = i_f + (i_i - i_f) \cdot e^{-\beta \cdot t}$$

Sendo:  $I$  – infiltração acumulada (mm);  $i_i$  – taxa de infiltração inicial (mm min.<sup>-1</sup>);  $i_f$  – taxa de infiltração final, equivalendo à condutividade hidráulica à saturação natural  $K_{sat}$  (mm min.<sup>-1</sup>);  $t$  – tempo ou período de infiltração (min.);  $\beta$  – constantes de decaimento associada à umidade inicial e ao tipo de solo (adimensional).

## 5.4 Equação de PHILIP (1957)

$$I = S \cdot t^{1/2} + A \cdot t$$

$$i = \frac{dI}{dt} = \frac{d}{dt} (S \cdot t^{1/2} + A \cdot t)$$

$$i = \frac{1}{2} \cdot S \cdot t^{-\frac{1}{2}} + A$$

Sendo:  $I$  – infiltração acumulada (mm);  $t$  – tempo acumulado (min.);  $S$  – sorptividade da água no solo (mm min.<sup>-1/2</sup>);  $A$  – transmissividade (mm min.<sup>-1</sup>).

Exemplo 6.4 – Considerando o Método dos mínimos quadrados, a partir do ensaio com o Método do infiltrômetro de anel, realizado no Setor de Ciências Agrárias, na área Experimental do Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, Curitiba-PR (Tabela 6.1), determine para as equações de **Kostiakov**, **Kostiakov-Lewis**, **Horton e Philip**:

i) Os coeficientes da equação de infiltração acumulada ( $I$ ), ajustados aos pares de pontos obtidos no ensaio de infiltração:

– Com o Método dos mínimos quadrados, a resolução do problema consiste em determinar os parâmetros das equações de infiltração (Kostiakov, Kostiakov-Lewis, Horton e Philip) de tal modo que a soma dos quadrados dos erros seja um mínimo. Nestas condições, tem-se:

$$Z = \sum_{i=1}^n e_i^2$$

$$Z = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad \rightarrow \quad \text{Minimizar } Z = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2$$

Sendo:  $Z$  – soma dos quadrados dos desvios entre os valores medidos e estimados com a equação de infiltração acumulada de interesse ( $\text{mm}^2$ );  $Y_i$  –  $i$ -ésimo valor da infiltração acumulada medido no ensaio com infiltrômetro de anel (mm);  $\hat{Y}_i$  –  $i$ -ésimo valor da infiltração acumulada estimado com a equação de infiltração acumulada de interesse (mm).

– A partir de uma planilha montada especialmente para essa finalidade, as análises foram realizadas (Figura 6.11 e 6.12), chegando-se aos seguintes coeficientes para o estabelecimento das equações de infiltração acumulada (mm):

– Kostiakov  $\rightarrow I = k \cdot t^a \rightarrow I = 6,9015 \cdot t^{0,7021}$

– Kostiakov-Lewis  $\rightarrow I = k \cdot t^a + \text{VIB} \cdot t \rightarrow I = 7,4548 \cdot t^{0,5973} + 0,5886 \cdot t$

– Horton  $\rightarrow I = i_f \cdot t - \frac{(i_i - i_f)}{\beta} \cdot (1 - e^{-\beta \cdot t})$

$$I = 1,4141 \cdot t - \frac{(4,9913 - 1,4141)}{0,1040} \cdot (1 - e^{-0,1040 \cdot t})$$

– Philip  $\rightarrow I = S \cdot t^{1/2} + A \cdot t \rightarrow I = 8,4161 \cdot t^{1/2} + 0,9119 \cdot t$

ii) A equação da taxa ou velocidade de infiltração ( $i$ ; mm min.<sup>-1</sup>):

– Kostiakov  $\rightarrow i = k \cdot a \cdot t^{a-1} \rightarrow i = 4,8455 \cdot t^{-0,2979}$

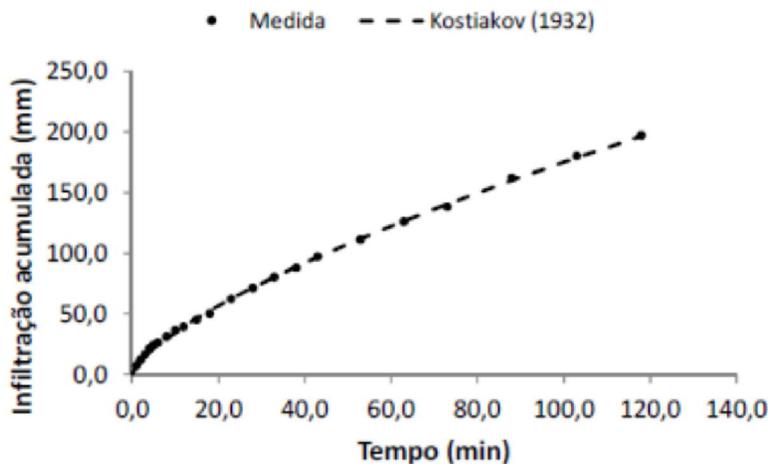
– Kostiakov-Lewis  $\rightarrow i = k \cdot a \cdot t^{a-1} + \text{VIB} \rightarrow i = 4,4528 \cdot t^{-0,4027} + 0,5896$

– Horton  $\rightarrow i = i_f + (i_i - i_f) \cdot e^{-\beta \cdot t} \rightarrow i = 1,4141 + 3,5772 \cdot e^{-0,1040 \cdot t}$

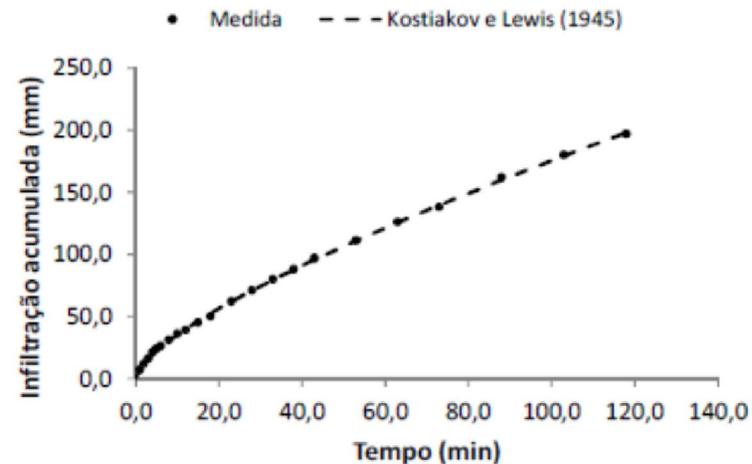
– Philip  $\rightarrow i = \frac{1}{2} S t^{-\frac{1}{2}} + A \rightarrow i = \frac{1}{2} \cdot 8,4161 \cdot t^{-\frac{1}{2}} + 0,9119$

Essa planilha, com o auxílio do "Solver", ajusta os coeficientes de alguns modelos de estimativa da infiltração acumulada da água no solo			$I(t) = k \cdot t^a$		$I(t) = k \cdot t^a + VIB \cdot t$		$I(t) = i_f \cdot t + \frac{i_i - i_f}{\beta} \cdot (1 - e^{-\beta \cdot t})$		$I(t) = A \cdot t + S \cdot t^{\frac{1}{2}}$	
Leitura	Tempo acumulado	Infiltração acumulada	Kostiakov (1932)		Kostiakov-Lewis (1945)		Horton (1940)		Philip (1957)	
	Dados obtidos no campo	Dados obtidos no campo	$k =$	<b>6,9015</b>	$k =$	<b>7,4558</b>	$i_i =$	<b>4,9913</b>	$S =$	<b>8,4861</b>
			$a =$	<b>0,7021</b>	$VIB =$	<b>0,5886</b>	$i_f =$	<b>1,4141</b>	$A =$	<b>0,9119</b>
					$a =$	<b>0,5973</b>	$\beta =$	<b>0,1040</b>		
			<b>Soma:</b>	<b>44,29</b>	<b>Soma:</b>	<b>27,39</b>	<b>Soma:</b>	<b>129,36</b>	<b>Soma:</b>	<b>44,85</b>
	$t$ (minutos)	$I$ (mm)	$I$ (mm)	Erro (mm)	$I$ (mm)	Erro (mm)	$I$ (mm)	Erro (mm)	$I$ (mm)	Erro (mm)
0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	1,0	7,0	6,90	0,01	8,04	1,09	4,81	4,79	9,40	5,75
2	2,0	12,0	11,23	0,60	12,46	0,21	9,29	7,36	13,82	3,33
3	3,0	16,0	14,93	1,15	16,14	0,02	13,46	6,45	17,43	2,06
4	4,0	21,0	18,27	7,47	19,42	2,50	17,36	13,24	20,62	0,14
5	5,0	24,0	21,36	6,94	22,44	2,43	21,02	8,90	23,53	0,22
6	6,0	26,0	24,28	2,95	25,27	0,53	24,45	2,40	26,26	0,07
7	8,0	31,0	29,72	1,64	30,53	0,22	30,74	0,07	31,30	0,09
8	10,0	36,0	34,76	1,54	35,38	0,38	36,38	0,14	35,95	0,00
9	12,0	39,0	39,50	0,25	39,96	0,91	41,49	6,18	40,34	1,79
10	15,0	45,0	46,21	1,45	46,41	1,99	48,37	11,38	46,54	2,39
11	18,0	50,0	52,52	6,33	52,50	6,26	54,55	20,72	52,42	5,84
12	23,0	62,0	62,38	0,14	62,05	0,00	63,77	3,12	61,67	0,11
13	28,0	71,0	71,62	0,38	71,04	0,00	72,11	1,23	70,44	0,32
14	33,0	80,0	80,37	0,14	79,61	0,15	79,94	0,00	78,84	1,34
15	38,0	88,0	88,74	0,55	87,85	0,02	87,46	0,29	86,96	1,07
16	43,0	97,0	96,79	0,04	95,81	1,42	94,80	4,86	94,86	4,59
17	53,0	111,0	112,09	1,19	111,07	0,01	109,19	3,27	110,11	0,79
18	63,0	126,0	126,56	0,31	125,65	0,12	123,42	6,65	124,80	1,43
19	73,0	138,0	140,35	5,51	139,68	2,82	137,59	0,17	139,07	1,15
20	88,0	162,0	160,03	3,90	159,93	4,29	158,82	10,13	159,85	4,61
21	103,0	180,0	178,72	1,63	179,42	0,34	180,03	0,00	180,05	0,00
22	118,0	197,0	196,62	0,14	198,30	1,68	201,24	18,00	199,78	7,75

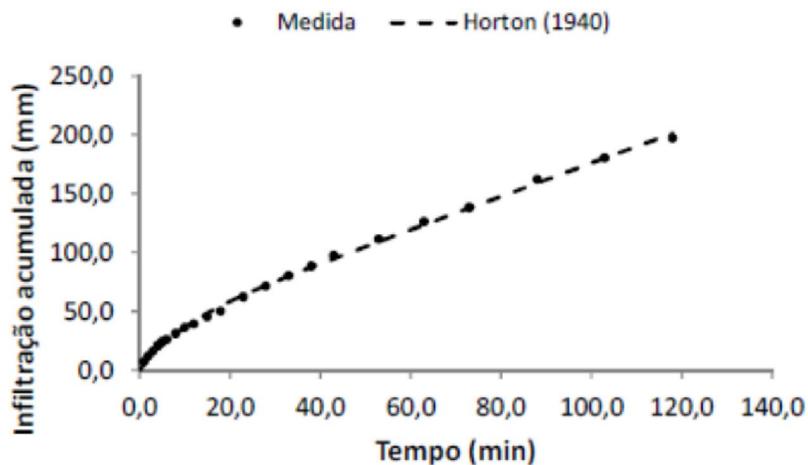
Figura 6.11 – Planilha montada para encontrar os parâmetros da equação de infiltração acumulada de Kostiakov, Kostiakov-Lewis, Horton e Philip, com os Métodos dos mínimos quadrados e ferramenta *Solver* (Atingir Meta).



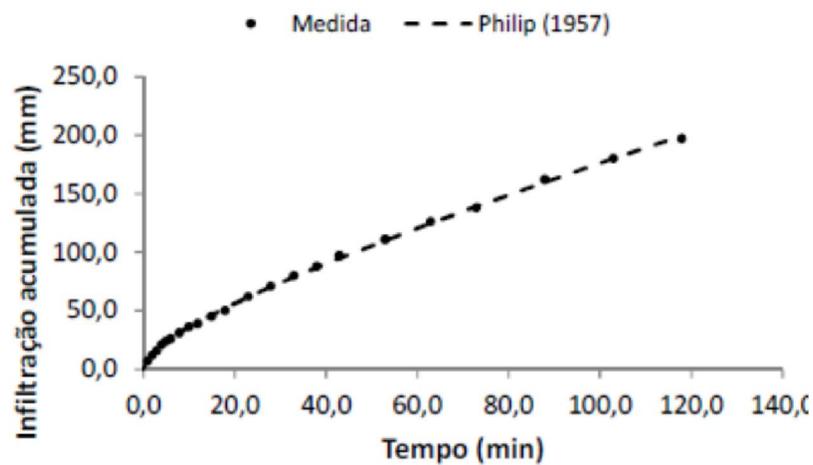
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 6.12 – Pares de pontos ( $I$  vs  $t$ ) obtidos em teste de infiltração com “infiltrômetro de anel”, e ajuste obtidos aos pontos com as equações de: a) Kostiakov; b) Kostiakov-Lewis, c) Horton; e, c) Philip.

## 6 REFERÊNCIAS

BERNARDO, S. **Manual de irrigação.** Viçosa: Imprensa Universitária, 1989. 596p.

FRIZZONE, J.A.; ANDRADE JÚNIOR, A.S. de; SOUZA, J.L. M.de; ZOCOLER, J.L. **Planejamento da Irrigação:** análise de decisão de investimento. Brasília: EMBRAPA, 2005. 627p.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo.** São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005. 329p.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A **Hidrologia estatística.** Belo Horizonte: CPRM. 2007. 561p.

REICHARDT, K; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações.** Barueri: Manole, 2004. 478p.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia:** ciência e aplicação. 2.ed. Porto Alegre: ABRH/ Editora da UFRGS, 1997. (Col. ABRH de Recursos Hídricos, v.4).

**FIM**