



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental
Disciplina de Hidrologia

Prof.^a: Ana Cristina Souza da Silva

Colaboradores Monitores: Ariane Marina de A. Teixeira

Pedro Henrique Pereira do Amaral

Rafaela Thaís de Andrade Silva

Aline Dantas

Emanuel Gomes Soares

Natalia Maria Mendes Silva

Experimento prático de infiltração utilizando o método do cilindro concêntrico

1. Introdução

A infiltração é o processo pelo qual a água penetra verticalmente o interior do solo a partir da superfície. Segundo BERNARDO et al. (2006), a velocidade com que essa água infiltra no solo (V_I) depende diretamente da textura e da estrutura dos solos, da temperatura e porosidade, da existência de camada menos permeável ao longo do perfil, da cobertura vegetal, entre outros fatores.

Partindo do solo seco, inicialmente a infiltração é bastante elevada, diminuindo com o passar do tempo, até se tornar constante quando o solo fica saturado. Dessa maneira, sob chuva ou irrigação contínua, a taxa de infiltração se aproxima, gradualmente, de um valor mínimo e constante, conhecido por taxa de infiltração básica ou velocidade de infiltração básica (V_{IB}) (CARVALHO et al., 2006). Essa capacidade máxima que um solo consegue absorver influencia o crescimento da vegetação, o abastecimento dos aquíferos (reservatórios de água subterrânea), o armazenamento de água que mantém o fluxo nos rios durante as estiagens, a redução do escoamento superficial e de cheias, além da diminuição da erosão (COLLISHONN, 2013).

Existem alguns métodos para a determinação da capacidade de infiltração de um solo, um deles é o infiltrômetro de anéis concêntricos, que é um método simples e de fácil execução. Nesse método, é medido em campo, através de uma régua graduada, a diminuição do nível da água a medida que ela infiltra no solo, além de que, é cronometrado o tempo que isso demora para ocorrer. Com

essas informações de campo, é possível determinar a taxa de infiltração do solo em cada instante de tempo.

Além disso, a taxa de infiltração d'água no solo pode ser descrita pôr várias equações, nesse experimento, será mostrado duas dessas equações empíricas muito utilizadas: a de Kostiakov-Lewis (1932) e a de Horton (1939).

Considerando o exposto, o objetivo desse experimento é determinar a taxa de infiltração por unidade de tempo de um determinado solo, utilizando o método dos anéis concêntricos, além de modelar a equação de *Kostiakov-Lewis* e determinar as capacidades de infiltração máxima e de solo saturado da equação de Horton.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Equipamentos

Para a realização da prática de hidrologia de infiltração com anéis concêntricos são necessários os seguintes equipamentos:

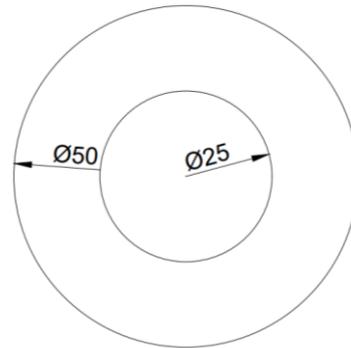
- Dois cilindros metálicos de diâmetros diferentes, com valores variando entre 16 e 90 cm;
- Cronômetro;
- Régua graduada;
- Água em abundância.

Figura I - Infiltrômetro de anéis concêntrico utilizado na prática.



Fonte: Autores

Figura II – Representação de anel concêntrico similar ao utilizado na prática.



Fonte: Autores, 2022.

2.2. Procedimentos

O infiltrômetro de anel duplo é um instrumento bastante utilizado para determinar a condutividade hidráulica saturada do solo superficial em campo. Ele consiste em dois anéis concêntricos, sendo um interno e outro externo, que são cravados verticalmente no solo a uma profundidade específica. Normalmente, os diâmetros dos anéis são de 20 cm para o anel interno e 30 cm para o anel externo, mas pode haver variações em alguns casos. A profundidade de penetração dos anéis metálicos é limitada a no máximo 25 cm para minimizar a perturbação do solo. Para realizar o teste, siga os seguintes passos:

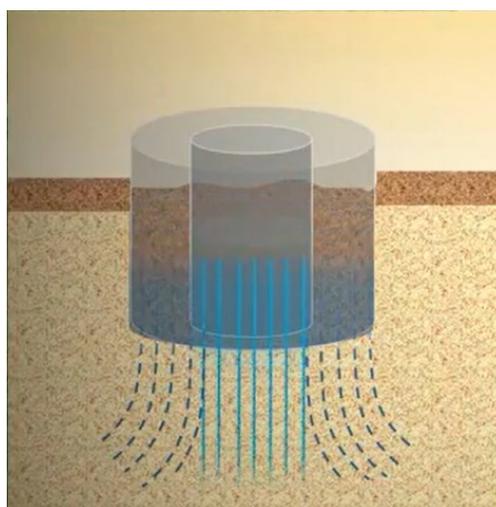
- I. Instale os anéis concêntricos no solo, deixando uma certa altura livre acima da superfície do solo, como mostrado na Figura III.
- II. Coloque um saco plástico no anel externo e, em seguida, coloque água até cobrir toda a superfície do anel, garantindo que a água comece a infiltrar igualmente em toda a área antes de retirar o saco.

- III. Encha também o anel interno com água e, com auxílio de uma régua graduada, faça a leitura da lâmina d'água no cilindro interno.

Observação: utiliza-se o anel externo para evitar que a água do anel interno infiltre lateralmente, o que poderia mascarar o resultado do teste, como é possível observar nas Figura III e Figura IV. Por isso, a taxa de infiltração é medida apenas no anel interno. O uso de dois anéis é para reduzir a divergência lateral de fluxo sob o anel interno resultante de condições de fluxo tridimensional, de modo que o fluxo vertical ocorra no anel interno. Isso pode ser alcançado mantendo a altura da água no mesmo nível em ambos os anéis.

- IV. O teste termina quando a taxa de infiltração permanecer constante, ou seja, quando o nível de água em função do tempo estabilizar. Nesse ponto, diz-se que o solo atingiu a velocidade de infiltração básica (VIB) e considera-se que o solo atingiu a chamada taxa de infiltração estável.

Figura III - Infiltração da água nos anéis externos e internos.



Fonte: UESPI, 2020

- V. A taxa de infiltração I_t ou ainda, $VI_{Aprox.}$ é calculada pela Equação 1:

$$I_t = \frac{\Delta h}{\Delta T} \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que:¹

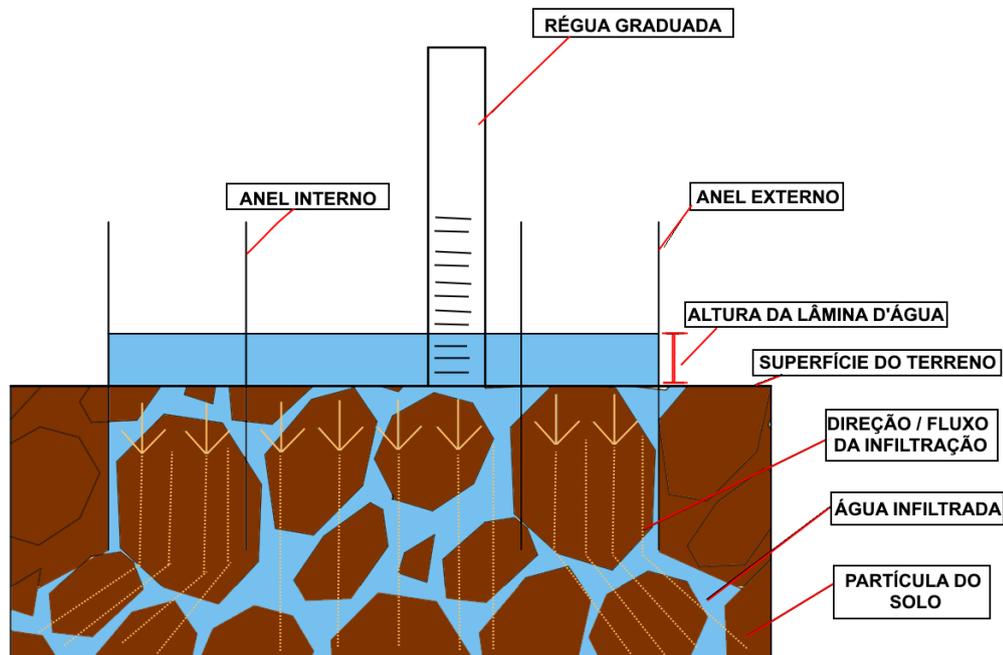
¹ É importante lembrar que a taxa de infiltração pode ser expressa em diferentes unidades, como milímetros por hora (mm/h) ou centímetros por hora (cm/h), dependendo da escala utilizada no experimento.

I_t = Taxa de infiltração (mm/h ou cm/h etc.);

Δh = a variação da lâmina d'água (mm);

Δt = ao intervalo de tempo (h);

Figura IV – Esquema representativo do que ocorre durante o teste utilizando o infiltrômetro.



Fonte: Autores, 2022

Para obter dados mais precisos de infiltração, é comum utilizar a Tabela 4, em que a variável $h_{Acumulada}$ representa a infiltração acumulada em centímetros ou milímetros. A $VI_{Média}$ é a velocidade de infiltração média obtida pela razão entre a infiltração acumulada e o tempo em que ocorreu o acúmulo, conforme a Equação 2.

$$VI_{Média} = \frac{h_{acumulada}}{T_{acumulado}} \quad (\text{Eq. 2})$$

Para preencher a tabela, basta anotar a infiltração acumulada em intervalos regulares de tempo e calcular a velocidade média para cada intervalo. Com os dados da tabela, é possível determinar a velocidade de infiltração básica (VIB) (será a menor $VI_{Média}$), ou seja, e plotar os gráficos de **Velocidade de Infiltração x Tempo** e de **Infiltração Acumulada x Tempo**. Esses gráficos são importantes para analisar a dinâmica da infiltração no solo e identificar possíveis mudanças na taxa de infiltração ao longo do tempo. Além disso, o conhecimento

da VIB é útil para o dimensionamento de sistemas de drenagem e irrigação, entre outras aplicações. A seguir serão apresentados métodos para modelar a infiltração de água no solo ao longo do tempo.

2.2.1. Equação de Kostiakov-Lewis

A Equação de Kostiakov-Lewis é uma relação empírica utilizada para descrever a relação entre a taxa de infiltração e o tempo de infiltração em um solo. A equação foi desenvolvida por Kostiakov em 1932 e posteriormente modificada por Lewis em 1954. A equação modificada de Kostiakov-Lewis é expressa como:

$$h = K * T^a + (VIB * T) \quad (\text{Eq. 3})$$

Em que:

VIB = Velocidade de infiltração básica (em cm/min);

T = tempo de infiltração (em min);

h = variação da lâmina (no intervalo de tempo T) (em cm);

a e K = constantes a serem encontradas.

É necessário realizar algumas operações algébricas para encontrar as constantes a e K na equação de Kostiakov modificada:

$$h - (VIB * T) = K * T^a \quad (\text{Eq. 4})$$

Aplicando o logaritmo:

$$\log * \log(h - (VIB * T)) = \log(K) + a * \log(T) \quad (\text{Eq. 5})$$

Podemos reescrever essa equação na forma de uma equação linear: $Y = A + B * X$, temos que:

$$Y = \log * \log(h - (VIB * T)) \quad (\text{Eq. 6})$$

Assim:

$$A = \log(K)$$

$$B = a$$

$$X = \log (T)$$

Para auxílio da obtenção da equação de Kostiakov modificada é utilizada a Tabela 1. O T é o tempo acumulado e o h é a infiltração acumulada.

Tabela 1 - Dados para obtenção dos coeficientes do método de *Kostiakov*

	T (min)	h (cm)	$X = \log (T)$	$Y = \log(h - VIB * T)$	X^2	$X * Y$
N						
Total (Σ)						
Média						

Para facilitar a obtenção dos valores de a e K , pode-se utilizar um programa de planilhas como o Microsoft Excel ou o Google Sheets. Primeiramente, deve-se inserir os dados de infiltração acumulada e tempo acumulado na tabela, conforme indicado na Tabela 1. Para obter os valores dos coeficientes a e K utiliza-se a regressão linear. Sendo assim:

$$a = \frac{\Sigma(X*Y) - \frac{\Sigma X * \Sigma Y}{N}}{\Sigma X^2 - \frac{(\Sigma X)^2}{N}} \quad (\text{Eq. 7})$$

Em que:

N = número de leituras

E o parâmetro K é obtido através da seguinte equação:

$$K = \text{antilog} (\bar{Y} - a * \bar{X}) \quad (\text{Eq. 8})$$

Em que:

\bar{Y} = Valor médio da coluna $Y = \log(h - VIB * T)$;

\bar{X} = Valor médio da coluna $X = \log (T)$.

Com esses valores de a e K obtidos, é possível calcular a equação de Kostiakov modificada (Eq. 3) e utilizá-la para prever a infiltração em outros períodos. Com

o resultado do parâmetro α é possível classificar o solo de acordo com a Tabela 2 e Tabela 3.

Tabela 2 – Tipo de solo por Kostiakov

Tipo de solo obtido pela variável α	
< 0,25	Areia
0,25 - 0,5	Areia franco
0,5 - 0,75	Franco arenoso
0,75 - 1	Franco
1 - 1,25	Franco argiloso
1,25 - 1,5	Argila arenosa
> 1,5	Argila

Fonte: Maidment. (1993)

E quanto a sua VIB.

Tabela 3 – Classificação em relação a VIB

Classificação do solo a partir de sua VIB em cm.h^{-1}
Solo de VIB muito alta > 3,0 cm.h^{-1}
Solo de VIB alta 1,5 - 3,0 cm.h^{-1}
Solo de VIB média 0,5 - 1,5 cm.h^{-1}
Solo de VIB baixa < 0,5 cm.h^{-1}

Fonte: Bernardo et al. (2008)

2.2.2. Equação do método de Horton

A Equação de Horton (Equação 9) descreve a capacidade de infiltração do solo em relação ao tempo e à taxa de infiltração da água. Essa equação é útil para avaliar o escoamento superficial e a capacidade do solo de absorver a água da chuva.

$$f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-\beta t} \quad (\text{Eq. 9})$$

Em que:

f = capacidade de infiltração no tempo t (mm/h);

f_0 = capacidade de infiltração inicial para $t = 0$ (mm/h);

f_c = capacidade de infiltração final (mm/h);

β = constante para cada curva (h-1);

t = tempo (em horas);

Aqui está a explicação de cada um dos termos:

Quadro 1 – Termos da equação de Horton

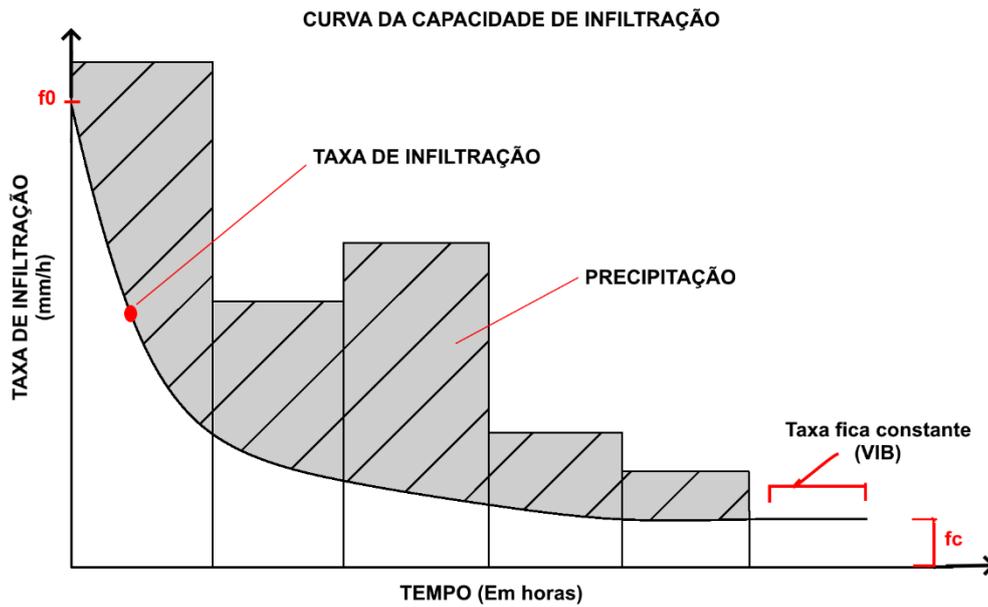
Explicação dos termos da equação de Horton
A capacidade de infiltração (f) é a taxa máxima de infiltração de água no solo, ou seja, é a quantidade máxima de água que pode penetrar no solo por unidade de tempo, dada em milímetros por hora (mm/h).
A capacidade de infiltração inicial (f_o) é a capacidade de infiltração do solo no início do período de infiltração ($t = 0$). Isso pode variar de acordo com as condições do solo e do clima.
A capacidade de infiltração final (f_c) é a capacidade de infiltração do solo quando a infiltração se aproxima do equilíbrio, ou seja, quando a taxa de infiltração se torna constante. Isso pode ocorrer devido ao acúmulo de água no solo, o que pode diminuir a capacidade de infiltração.
A constante β é uma taxa de decaimento que representa a rapidez com que a capacidade de infiltração diminui com o tempo. É dado em horas inversas ($h - 1$).
O tempo (t) é o período de infiltração, dado em horas.

Fonte: Autores, 2023

A equação de Horton deve ser ajustada à curva da capacidade de infiltração. Este ajuste é realizado a partir da variação dos parâmetros β , f_o e f_c da equação.

A expressão de Horton só é válida quando a água adicionada ao solo é sempre superior a capacidade de infiltração do solo. Na Figura V, a área hachurada indica a parcela da chuva que não se infiltra e que, portanto, irá se transformar em escoamento superficial.

Figura V - Variação da infiltração com o tempo segundo Horton.



Fonte: Autores, 2022

Para calcular os parâmetros da equação de Horton, siga os seguintes passos:

1. Crie uma tabela semelhante a essa:

Nº da leitura	Δh	$\Delta h_{acumulada}$	ΔT	$\Delta T_{acumulada}$	f	y'

Δh = Variação da lâmina em mm

$\Delta h_{acumulada}$ = Variação acumulada da lâmina em mm

ΔT = Variação do tempo em horas

$\Delta T_{acumulada}$ = Variação do tempo acumulado em horas

f = Taxa de infiltração em (mm/h)

y' = Taxa de infiltração ajustada em (mm/h) $\rightarrow y' = f - f_c$

2. Determine o valor do parâmetro f_c , que representa a taxa de infiltração final (quando o solo está saturado). Escolha um valor que seja menor do que todos os valores de taxa de infiltração encontrados a partir dos dados de campo.

3. Calcule o valor de y' , que representa a diferença entre a taxa de infiltração observada (f) e a taxa de infiltração final (f_c), ou seja, $y' = f - f_c$.
4. Trace um gráfico de dispersão com as colunas f versus *tempo acumulado (em horas)*, adicione uma linha de tendência exponencial e observe o valor de R^2 .
5. Faça um gráfico de dispersão com os valores de y' versus *tempo acumulado (em horas)*. Adicione uma linha de tendência exponencial e mostre o valor de R^2 . A equação da linha de tendência exponencial será do tipo:

$$y' = a' * e^{-\beta * t} \text{ (Eq. 10)}$$

em que a' e β são números reais.

6. Ajuste o valor chutando valores na célula onde está o valor de f_c até obter o valor de R^2 o mais próximo possível de 1, o que significa uma melhor representação da linha de tendência para os valores do gráfico.

Obtido o valor com melhor R^2 podemos obter a equação de Horton, fazendo algumas alterações algébricas na Equação 10:

Em que:

$$y' = f - f_c;$$

$$a' = f_0 - f_c$$

$$f_0 = a' + f_c$$

Verifica-se que após a realocação dos termos, retornamos ao formato inicial da equação de Horton,

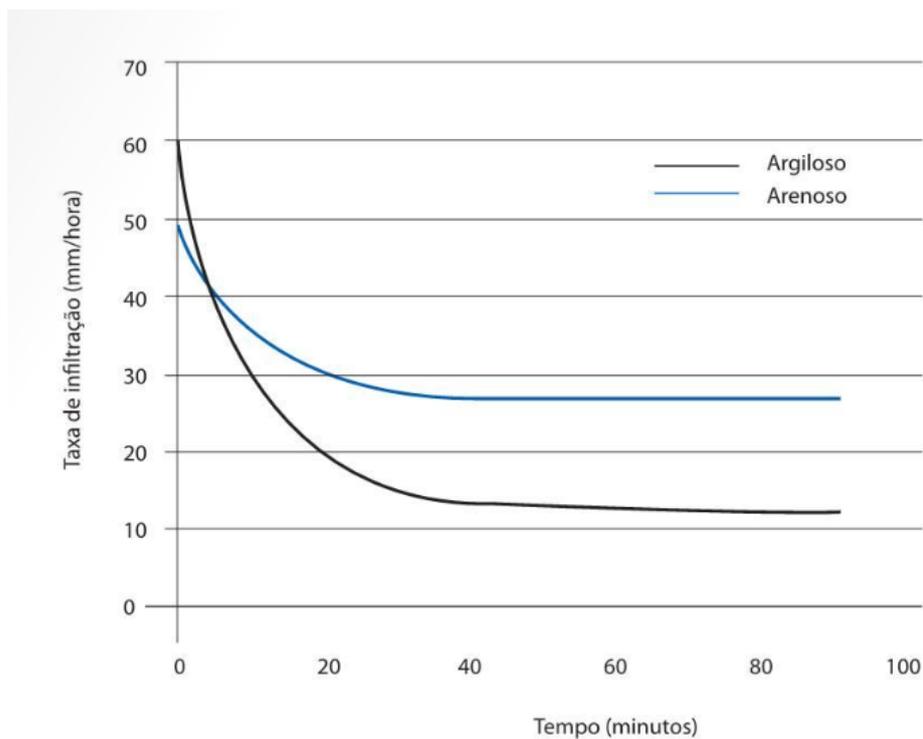
$$f - f_c = (f_0 - f_c) * e^{-\beta * t} \text{ (Eq. 12)}$$

Realizando uma pequena alteração algébrica chegamos ao estado original da equação de Horton.

$$f = f_c + (f_0 - f_c) * e^{-\beta * t} \text{ (Eq. 9)}$$

Reparando atentamente, a Equação 11 nada mais é do que a equação de Horton reescrita de uma forma diferente, no entanto, ela se encaixa perfeitamente no modelo de equação exponencial criado pelo gráfico do *Excel* e, dessa forma, será possível encontrar os parâmetros de infiltração máxima e infiltração saturada, além da variável β . Através da curva obtida é possível definir o tipo de solo, conforme exemplificado na Figura V.

Figura VI – Curva de Horton de acordo com o tipo de solo.



Fonte: (COLLISCHONN, 2013)

*O Professor Bruno Collischonn disponibiliza no Youtube uma aula realizando análise e construção da curva pelo método de Horton <https://youtu.be/fPR9iPYtPSk>

3. ATIVIDADE PROPOSTA PARA ELABORAÇÃO DO RELATÓRIO

- 1) Defina: Infiltração, Capacidade de Infiltração, Velocidade de Infiltração, Velocidade de Infiltração Básica, Condutividade Hidráulica.
- 2) Descreva a atividade realizada em campo e seu objetivo.
- 3) Utilizando a equação de *Kostiakov-Lewis*, determine a infiltração de água no solo com relação ao tempo, para a atividade de campo realizada na disciplina pelo método do infiltrômetro de anel.

- 4) Utilizando o método de Horton determine a Curva da Capacidade de Infiltração de água no solo estudado para a atividade de campo realizada.
- 5) Trace os gráficos Infiltração acumulada *versus* Tempo e Velocidade de infiltração *versus* Tempo.
- 6) Compare os valores obtidos pelos dois métodos, e julgue qual o melhor e justifique sua escolha.
- 7) Quanto é aproximadamente a velocidade de infiltração básica do solo estudado pelo método de Horton?
- 8) Quais os possíveis erros no teste e como próximos testes poderiam ser melhorados.
- 9) Como a mudança no uso do solo interfere na infiltração e, conseqüentemente, em outros componentes hidrológicos?
- 10) O que acontecerá se em um solo com baixa capacidade de infiltração a água for aplicada a uma taxa de infiltração elevada?
- 11) Apresente conclusões sobre a metodologia aplicada para determinação de variáveis da Infiltração.

4. REFERÊNCIAS

BERNARDO, S; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. Ed. Atual. e Ampl. Viçosa: UFV, 2006. 625p.

CARVALHO, D; SILVA, L. **Hidrologia**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais. 2006.

COLLISCHONN, W.; DORNELES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. 1st ed. Porto Alegre, 2013.

Maidment, D.R. (ed.) (1993). Handbook of Hydrology. McGraw-Hill Education.

5. APÊNDICE

Tabela 4 – Dados obtidos em campo para elaboração do relatório.

Leitura (N)	Tempo de infiltração (ΔT)		$\Delta T_{acumulado}$		Variação da lâmina d'água (Δh) em cm	$\Delta h_{acumulada}$		$VI_{Média}$ (cm/min)	$VI_{Aprox.}$ (cm/min)
	minutos	segundos	minutos	horas		cm	mm		
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									

*Necessário realizar as conversões para mm e hora, para realizar os cálculos para Horton.

Em que:

$$VI_{Média} = \frac{h_{acumulada}}{T_{acumulada}} ; \quad VI_{Aprox.} = \frac{\Delta h}{\Delta T} ;$$

$h_{acumulada}$ = Infiltração (variação da lâmina) acumulada no tempo;

$T_{acumulada}$ = tempo acumulado;

$VI_{média}$ = Velocidade de infiltração média;

$VI_{aprox.}$ = Velocidade de aproximação, ou ainda, taxa de infiltração instantânea.

Obs.: 1 segundo = 0,0167 min