



C A P Í T U L O 1

INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO UTILIZANDO INFILTRÔMETRO DE ANEL

Vinícius Villa e Vila

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGESA,
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São
Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

Ana Cláudia Sátiro de Araújo

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGESA,
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São
Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

Jessica Sabrina de Castro Couto

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGESA,
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São
Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

Tiago Alexandre Rozinholli

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGESA,
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São
Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

Fernando Campos Mendonça

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGESA,
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São
Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

Marcos Vinicius Folegatti

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGESA,
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São
Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

Patricia Angélica Alves Marques

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas/PPGESA,
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ESALQ, Universidade de São
Paulo/USP Avenida Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba/SP, Brasil

RESUMO: Através de métodos como o infiltrômetro de anel, é possível determinar parâmetros como a velocidade de infiltração e a velocidade de infiltração básica, que descrevem a dinâmica de entrada da água no solo. A infiltração é influenciada principalmente pela textura, estrutura, porosidade, estabilidade dos agregados, compactação, cobertura vegetal e umidade inicial do solo, fatores que afetam o fluxo de água e a condutividade hidráulica. O procedimento para avaliação inclui escolha e preparo do local, instalação dos anéis concêntricos, abastecimento controlado de água e registro sistemático das leituras. A análise dos dados é realizada por meio do modelo de Kostiakov, que utiliza transformações logarítmicas para ajustar uma equação capaz de representar matematicamente a infiltração acumulada ao longo do tempo. Assim, o estudo da infiltração fornece informações essenciais para o dimensionamento de sistemas de irrigação, manejo da irrigação e a identificação de limitações físicas do solo.

PALAVRAS-CHAVE: manejo da irrigação; porosidade do solo; velocidade de infiltração básica.

ABSTRACT: Through methods such as the double-ring infiltrometer, it is possible to determine parameters such as the infiltration rate and the basic infiltration rate, which describe the dynamics of water entering the soil. Infiltration is mainly influenced by soil texture, structure, porosity, aggregate stability, compaction, vegetation cover, and initial soil moisture—factors that affect water flow and hydraulic conductivity. The evaluation procedure includes selecting and preparing the site, installing the concentric rings, supplying water in a controlled manner, and systematically recording the measurements. Data analysis is performed using the Kostiakov model, which applies logarithmic transformations to fit an equation capable of mathematically representing cumulative infiltration over time. Thus, the study of infiltration provides essential information for irrigation system design, irrigation management, and the identification of physical limitations within the soil.

KEYWORDS: irrigation management; soil porosity; basic infiltration rate

INTRODUÇÃO

A determinação da infiltração de água no solo é um processo fundamental em estudos hidrológicos, agrícolas e de manejo de recursos hídricos. Ela permite entender como a água penetra da superfície no sentido vertical descendente, para as camadas subsuperficiais do solo, influenciando a disponibilidade de água para as plantas, a recarga de aquíferos e a prevenção de problemas de erosão. Um dos métodos mais utilizados para realizar essa determinação é o uso de infiltrômetros de anel. Além do teste de infiltrômetro de anel, há outros testes, como simuladores de chuva, que também representam a irrigação por aspersão e o infiltrômetro de sulcos que representa a irrigação por sulcos.

Os infiltrômetros de anel são dispositivos simples, projetados para medir a taxa de infiltração de água no solo. Consistem em dois anéis de metal concêntricos podendo ser utilizados para avaliar a capacidade de infiltração do solo em diferentes condições, como em solos de diferentes texturas (areia, argila, silte), em áreas com diferentes coberturas vegetais e em solos sob diferentes graus de compactação. Assim, a determinação da taxa de infiltração é importante para a irrigação principalmente para fazer um correto dimensionamento e manejo do sistema de irrigação adotado.

Com o teste de infiltração de água no solo, obtém-se informações como a velocidade de infiltração (VI) – (mm/h) e a velocidade de infiltração básica (VIB) – (mm/h). A VI é definida como a lâmina de água (volume de água por unidade de área) que atravessa a superfície do solo, por unidade de tempo. No início da infiltração, quando o solo está relativamente seco, a velocidade de infiltração é alta, após algum tempo o gradiente de potencial que era grande, vai reduzindo e a velocidade diminui. À medida que a porosidade do solo vai sendo tomada por água, além do processo de expansão das argilas e contração parcial dos poros, a velocidade de infiltração tende a chegar num ponto que se mantém praticamente constante. E este valor de velocidade, chama-se de VIB.

Logo, a determinação da VIB é única para cada tipo de solo, assim é importante conhecer/determinar este parâmetro para o dimensionamento de projetos de irrigação, bem como de manejo. Este conhecimento permite fazer a correta seleção de emissores no sistema de irrigação, bem como na determinação da vazão e do tempo de irrigação. Assim a água será aplicada a uma taxa inferior ao limite de infiltração, gerando pequenos riscos da água não infiltrar e escoar pelo solo.

FATORES QUE AFETAM A INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

A infiltração da água no solo é controlada por um conjunto de propriedades físicas, entre as quais a textura, a estrutura, a porosidade e a estabilidade dos agregados exercem papel central. A capacidade de infiltração aumenta com a presença de macroporos, diretamente relacionada ao tamanho das partículas e à organização estrutural do solo. Solos arenosos, com predominância de macroporos, apresentam maiores taxas de infiltração e condutividade hidráulica, enquanto solos argilosos tendem a infiltrar menos. A continuidade e a forma dos poros, bem como a presença de agentes cimentantes (matéria orgânica, óxidos), são determinantes para o movimento da água. Por exemplo, geralmente em solos argilosos a VIB é menor quando comparada a solos arenosos.

A presença de camadas retardadoras no perfil, sejam elas mais argilosas ou mais arenosas, interfere no avanço da frente de umedecimento: camadas de argila reduzem o fluxo por menor condutividade quando saturadas, enquanto camadas

arenosas dificultam o avanço em condições não saturadas. A compactação, comum em áreas manejadas, reduz a porosidade total e principalmente a macroporosidade, diminuindo a infiltração e reduzindo a água disponível às plantas em até 50%. Outro fator relevante é o encrostamento superficial, formado pelo impacto das gotas de chuva que desagregam a superfície, mobilizam partículas finas e obstruem os poros, criando uma camada delgada e adensada que restringe a infiltração, especialmente em solos descobertos.

O tipo de cobertura do solo influencia diretamente o processo: áreas vegetadas mantêm maior macroporosidade, favorecem caminhos preferenciais através das raízes e reduzem o impacto da chuva, resultando em maiores taxas de infiltração. Em solos sem cobertura, reduções de até 85% podem ocorrer em comparação a solos protegidos por palhada. A umidade inicial do solo também condiciona o processo: em solo seco, o alto gradiente de potencial gera elevada infiltração inicial, que diminui conforme o solo se aproxima da saturação.

Além disso, a infiltração está relacionada à capacidade de armazenamento de água, definida entre a Capacidade de Campo (CC) e o Ponto de Murcha Permanente (PMP), limites que determinam a Capacidade de Água Disponível (CAD). Estas propriedades variam com a proporção e a distribuição de macro e microporos, sendo influenciadas pela textura, tipo de argila, densidade, estrutura e teor de matéria orgânica. Assim, os fatores físicos, estruturais e de manejo interagem de forma complexa para determinar a taxa de infiltração e o comportamento hídrico do solo.

PROCEDIMENTOS

Os materiais necessários para a determinação da infiltração de água no solo com infiltrômetro de anel incluem infiltrômetros de anel, marreta de borracha ou de ferro, cronômetro ou relógio, mangueira ou balde de água, pá ou enxada, régua graduada em milímetros, além de pranchetas com folhas de registro e materiais de anotação como canetas, lápis e borracha. Em que os procedimentos para determinação envolvem cinco principais passos: Escolha do local, preparo do local, montagem do infiltrômetro de anel, aplicação de água e registro de dados (Figura 1).

- I. **Escolha do local:** Um local representativo e homogêneo é selecionado para a realização das medições. A escolha do local deve levar em consideração as características do solo, da vegetação e do relevo.
- II. **Preparação do solo:** O solo ao redor do local escolhido é preparado, limpando a área que será instalada os anéis, removendo a vegetação presente. É importante garantir que não haja compactação excessiva ao redor do anel.

- III. Montagem do infiltrômetro de anel:** O infiltrômetro de anel é inserido no solo de forma que a parte superior do anel fique nivelada com a superfície do solo. Qualquer vazamento ao redor do anel deve ser evitado. Os anéis possuem diâmetro de 50 e 15 cm (sendo o menor dentro do maior), ambos com aproximadamente 30 cm de altura, devem ser cravados no solo a aproximadamente 10 cm de profundidade. Após isso, deve-se fazer a impermeabilização do interior dos anéis, evitando que a água infiltre antes do início do ensaio, lembrando ainda de se fixar uma régua na parede do anel interno para a conferência de nível.
- IV. Aplicação de água:** Inicia-se o abastecimento de água do cilindro externo e interno (ainda com a proteção), ressaltando que a finalidade do cilindro externo é de criar um ambiente padrão para a infiltração do anel interno, reduzindo assim sua infiltração lateral. A água é aplicada no interior do anel de forma controlada, geralmente com um dispositivo que permite um fluxo constante. Com o auxílio de um cronômetro, inicia-se a contagem de tempo, no mesmo momento em que se retira o material que impermeabiliza o fundo do cilindro interno, lembrando-se de realizar a leitura do nível da água na régua.
- V. Registro de dados:** Durante o processo de infiltração, o tempo necessário para que a água penetre completamente no solo é registrado, juntamente com a quantidade de água aplicada. Esses dados serão usados para calcular a velocidade de infiltração, que é calculada dividindo a quantidade de água aplicada pelo tempo necessário para a infiltração. Recomenda-se que as leituras sejam realizadas nos intervalos apresentados no quadro a seguir, entretanto, caso a velocidade de infiltração seja muito alta ou baixa, novos valores de tempo podem ser utilizados, desde que eles sejam anotados no Quadro de dados do ensaio (Quadro 1).



Figura 1. Representação do teste de infiltração de água no solo utilizando anéis concêntricos. Fonte: Jesuz e Ferreira, 2022.

Quadro 1. Quadro exemplo para registro dos dados a campo.

Tempo acumulado (min)	Horas	Intervalo de tempo (min)	Leitura da régua		Infiltração acumulada (cm)
			Instantânea	Diferença	
0					
1					
3					
5					
10					
15					
25					
35					
50					
65					
95					
125					
155					

Deve-se lembrar de realizar a correção para os momentos em que a água no reservatório for reposta. As leituras devem ocorrer até que a velocidade de infiltração convirja para um valor constante e que ele se repita por ao menos três vezes consecutivas.

ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

Após realizar o teste de infiltração em campo e registrar os valores de tempo e infiltração acumulada, inicia-se o processo de determinação da equação que descreve o comportamento da água entrando no solo. Esse procedimento utiliza o modelo potencial de Kostiakov, que relaciona a infiltração acumulada ao tempo por meio de uma equação empírica.

O primeiro passo consiste em organizar todos os valores medidos em uma tabela contendo o tempo e a infiltração acumulada. Em seguida, para cada observação (exceto o tempo zero), é necessário calcular os valores do logaritmo do tempo e do logaritmo da infiltração. Esses valores são importantes porque a equação de Kostiakov, originalmente expressa em forma potencial, é convertida para forma linear por meio de logaritmos, permitindo que se aplique uma regressão linear simples.

Assim, cria-se um quadro com as seguintes colunas: tempo, infiltração acumulada, logaritmo do tempo, logaritmo da infiltração, o produto entre esses dois logaritmos e, por fim, o quadrado do logaritmo do tempo (Quadro 2), representados pelas letras X e Y, respectivamente. Depois que o quadro é preenchido com todas as observações, são calculados os somatórios e médias das colunas de logaritmo do tempo, logaritmo da infiltração, produto entre logaritmos e quadrado do logaritmo do tempo.

Quadro 2. Quadro exemplo para o cálculo dos parâmetros X, Y, X*Y e X².

Tempo acumulado - T (min)	Infiltração acumulada - I (cm)	X = Log T	Y = Log I	X * Y	X ²
0					
1					
3					
5					
10					
15					
25					
35					
50					
65					
95					
125					
155					
Somatório					
Média					

Com esses somatórios e médias de X, Y, X*Y e X², aplica-se o método dos mínimos quadrados para ajustar a linha que melhor representa a relação entre o tempo e a infiltração em escala logarítmica. A partir desse ajuste, obtêm-se os valores dos coeficientes da equação, que correspondem ao parâmetro “n ou B” (que indica a inclinação da reta na escala logarítmica) e ao parâmetro “A”, que é convertido posteriormente para o valor de “K”, o outro coeficiente da equação de infiltração.

$$I = K.T^n$$

Modelo potencial

$$\underbrace{\log I}_{Y} = \underbrace{\log K}_{A} + \underbrace{n}_{B} \cdot \underbrace{\log T}_{X}$$

Modelo linear

$$Y = A + B X$$

O coeficiente angular (B) e a interseção (A) da reta são dados por:

$$B = n$$

$$n = \frac{\sum xy - \frac{\sum x \sum y}{N}}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{N}}$$

$$A = \bar{Y} - B \bar{X}$$

$$\text{Log } K = A$$
$$K = \text{ant log } A = 10^A$$

Após determinar esses parâmetros, a equação final do modelo de Kostiaikov é construída (Equação 1). Essa equação representa a relação entre a infiltração acumulada e o tempo para o solo analisado, descrevendo o comportamento da água infiltrando ao longo do tempo. Com ela, é possível traçar a curva de infiltração acumulada e comparar diferentes solos, tratamentos ou condições de manejo. A representação gráfica da infiltração é apresentada na Figura 2.

$$I(\text{mm}) = 10 \cdot K \cdot T^n$$

Equação 1

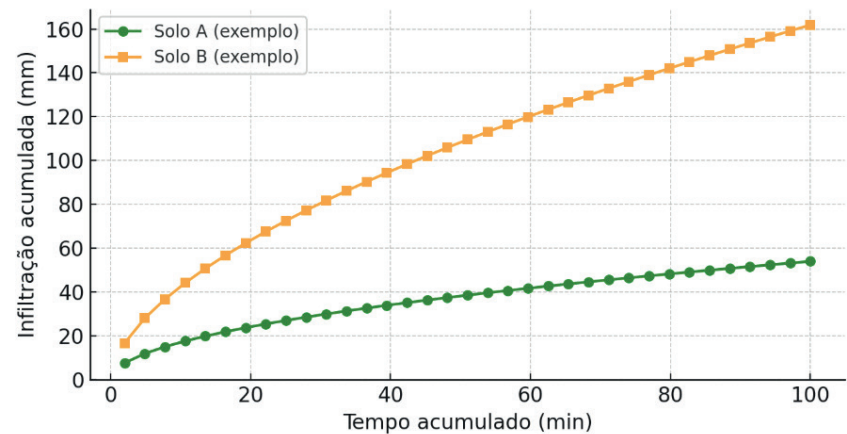


Figura 2. Representação da curva de infiltração de água no solo para dois tipos de solo. Solo A: Argiloso; Solo B: Arenoso.

Depois de obtida a equação de infiltração, o próximo passo é determinar a VI, que representa a taxa com que a água penetra no solo em cada instante. Essa velocidade não é constante; ela começa alta no início do teste e vai diminuindo à medida que o tempo passa, até se aproximar da VIB. A VI é determinada considerando a relação matemática entre a infiltração acumulada e o tempo, e pode ser estimada com base na variação da infiltração ao longo dos intervalos de tempo analisados (Equação 2). A representação gráfica da velocidade de infiltração é apresentada na Figura 3.

$$VI \text{ (mm/h)} = 10 \cdot n \cdot 60 \cdot K \cdot T^{n-1}$$

Equação 2

Quando três leituras consecutivas de 30 minutos apresentarem valores muito semelhantes, considera-se que o solo atingiu sua condição de infiltração estável, encerrando-se o teste. A quantidade de água infiltrada nesse período é então convertida para valores horários para expressar a VIB. EX: ocorrendo uma leitura média de 1,3 cm em 30 minutos, a VIB desse solo será de 26 mm/h. Esse valor final

é fundamental para estudos de irrigação e manejo, pois indica a capacidade real do solo de absorver água em regime permanente, sendo útil para o dimensionamento de sistemas, avaliação de impactos e diagnóstico de condições estruturais do solo.

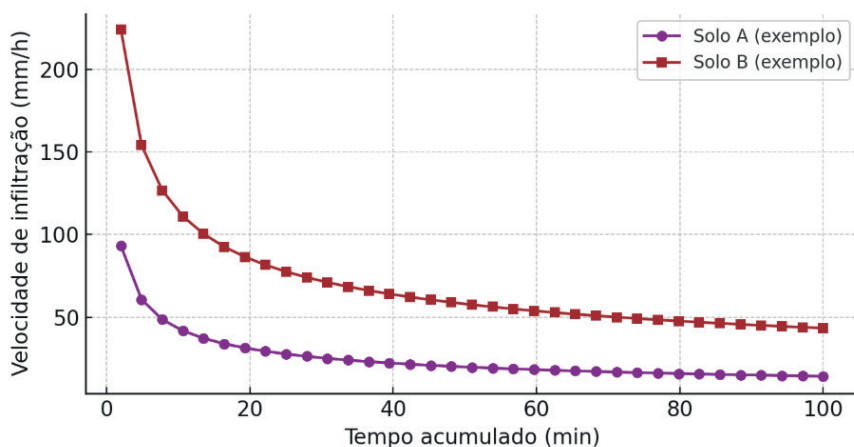


Figura 3. Representação da curva de velocidade de infiltração de água no solo para dois tipos de solo. Solo A: Argiloso; Solo B: Arenoso

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação de infiltração de água no solo constitui uma ferramenta essencial para compreender o comportamento físico, hidráulico e estrutural dos diferentes perfis de solo, fornecendo subsídios fundamentais para o dimensionamento de sistemas e o manejo adequado da irrigação. A determinação da infiltração acumulada, da velocidade de infiltração e da velocidade de infiltração básica permite identificar limitações físicas, como compactação, baixa porosidade ou restrições estruturais que comprometem a redistribuição da água no perfil, bem como auxiliar na correta seleção dos emissores dos sistemas de irrigação. Além disso, o uso de modelos como o de Kostiakov oferece maior precisão na caracterização da dinâmica da água no solo, contribuindo para diagnósticos mais consistentes e para a adoção de práticas que promovam maior eficiência hídrica.

REFERÊNCIAS

Jesuz, C. R., Ferreira, M. E. 2022. Australian Journal of Crop Science. Estimating water infiltration rate in oxisols under pasture and agriculture management in the Brazilian Savanna with support of a Drone-RGB onboard sensor. 16, 233-243.

Bernardo, S.; Soares, A.A; Mantovani, E.C. 2006. Manual de Irrigação. Ed. Universidade Federal de Viçosa. 8 ed. 625p.

Brandão, V.S; Pruski, F. F.; Silva, D. D. 2003. Infiltração da água no solo, Ed. Universidade Federal de Viçosa 2 ed. 98p.

Folegatti, M. V. 2002. Manejo da Água em Sistemas Agrícolas. Apostila LER. 120p.

Reichardt, K. 1990 A água em sistemas agrícolas. Editora Manole Ltda, São Paulo. 188p.