



## C A P Í T U L O 1

# FUNDAMENTOS DA TENSIOMETRIA APLICADOS AO MANEJO DA IRRIGAÇÃO

### **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

### **Lucas Santiago Lima**

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:** A tensiometria é uma das técnicas mais simples e eficientes para o monitoramento do estado hídrico do solo no manejo da irrigação. O método baseia-se na leitura do potencial mátrico do solo. O tensiômetro, corresponde a um tubo preenchido com água e uma cápsula cerâmica porosa na extremidade basal, que estabelece comunicação hidráulica contínua com o solo, registrando as variações de tensão conforme a umidade se altera. Sua instalação em diferentes profundidades possibilita avaliar o perfil de água na zona radicular, orientando decisões precisas sobre o momento de irrigar e a quantidade necessária. A interpretação das leituras é potencializada quando associada à curva de retenção de água do solo, que relaciona umidade e potencial mátrico, permitindo converter tensões em conteúdos de água. Dessa forma, a tensiometria apresenta-se como uma ferramenta fundamental para otimizar o uso da água, evitar desperdícios, reduzir custos e manter a cultura em condições adequadas de desenvolvimento.

**PALAVRAS-CHAVE:** curva de retenção de água; potencial mátrico; umidade do solo.

**ABSTRACT:** Tensiometry is one of the simplest and most efficient techniques for monitoring soil water status in irrigation management. The method is based on measuring the soil matric potential. The tensiometer consists of a water-filled tube with a porous ceramic cup at its lower end, which maintains continuous hydraulic contact with the soil and records tension variations as soil moisture changes. Its installation at different depths makes it possible to evaluate the water profile within the root zone, guiding precise decisions on when to irrigate and how much water to apply. The interpretation of readings is enhanced when combined with the soil water retention curve, which relates moisture content to matric potential, allowing tension values to be converted into soil water content. Thus, tensiometry stands out as a fundamental tool for optimizing water use, avoiding waste, reducing costs, and maintaining crops under adequate development conditions.

**KEYWORDS:** soil water retention curve; matric potential; soil moisture.

## INTRODUÇÃO

O manejo da irrigação é fundamental para otimizar o uso da água, garantir adequadas produtividades e preservar os recursos hídricos, exigindo estratégias de monitoramento que orientem a tomada de decisão sobre quando e quanto irrigar. Três abordagens principais são utilizadas: o manejo via clima, que se baseia na estimativa da evapotranspiração e na reposição da água consumida pela cultura; o manejo via planta, que considera respostas fisiológicas e morfológicas das plantas ao estresse hídrico; e o manejo via solo, que monitora a umidade ou o potencial matricial do solo para indicar o nível de água disponível às raízes. Dentro dessa última estratégia, destaca-se o tensiômetro, um instrumento simples, de baixo custo e altamente eficiente para medir a tensão com que a água é retida no solo.

A relação solo-água descreve os fenômenos físicos que determinam como a água é armazenada, movimentada e disponibilizada para as plantas dentro do perfil do solo. Essa relação é governada principalmente pela interação entre a estrutura do solo, sua composição granulométrica, a distribuição e continuidade dos poros e o potencial energético que controla o movimento da água. A água no solo encontra-se retida por forças de natureza capilar e adsorbtiva, que variam conforme o tamanho dos poros e o grau de saturação. Em solos com predominância de microporos, como os argilosos, a água tende a ser retida com maior energia, dificultando a extração pelas plantas, enquanto solos arenosos, com maior proporção de macroporos, apresentam retenção menor e drenagem mais rápida.

A tensiometria é a técnica que utiliza um tensiômetro para medir a tensão da água no solo, ou seja, baseia-se na medição do potencial mátrico do solo, que representa a força com que as partículas do solo retêm a água. Quanto mais seco o solo, maior é essa força e, portanto, maior é a tensão registrada no tensiômetro. O princípio do funcionamento está na comunicação hidráulica entre o solo e a água dentro do tensiômetro: quando o solo perde água, a água dentro do tensiômetro é “puxada” para fora através da cápsula porosa, criando uma pressão negativa medida pelo vacuômetro ou tensímetro. Antigamente, os tensiômetros apresentavam vacuômetros de mercúrio fixos na sua extremidade, porém era sujeito a danos e exige maior regulação. Hoje, foram substituídos por tensímetros digitais, sendo necessário apenas um tensímetro para efetuar a leitura em vários tensiômetros.

## CONSTITUIÇÃO E PREPARAÇÃO DO TENSIOMETRO

O tensiômetro é normalmente constituído por um tubo cilíndrico, uma cápsula porosa, e um tampão. A cápsula de porcelana fica localizada na extremidade inferior do tubo, é o elemento responsável pela comunicação hidráulica entre o solo e a água interna do tensiômetro. Normalmente feita de cerâmica microporosa, apresenta poros uniformes e suficientemente pequenos para evitar a entrada de ar, mas grandes o bastante para permitir a passagem de água.

O tubo cilíndrico é construído geralmente em PVC rígido ou acrílico transparente, o tubo funciona como reservatório de água e estrutura de sustentação do instrumento. Ele deve ser totalmente preenchido com água, idealmente destilada ou deionizada, sem a presença de bolhas de ar, pois estas prejudicam a leitura. O tubo é selado na extremidade inferior à cápsula porosa e, na extremidade superior, recebe o tampão.

A parte superior possui um sistema de vedação com um tampão de borracha tem a função de permitir a inserção da agulha do tensímetro sem comprometer a vedação interna do equipamento. Esse tampão é fabricado com borracha de alta densidade justamente para que, ao ser perfurado pela agulha, ele se adapte ao furo, mantenha o sistema hermético e evite a entrada de ar.

Cada aparelho deve ser testado e preparado antes de levar ao campo. O aparelho é preenchido com água, tomando-se cuidado para retirar todo o ar presente no seu interior e nos poros da cápsula de cerâmica. A fim de facilitar este trabalho, pode-se promover uma sucção na abertura, usando-se uma seringa hipodérmica e uma rolha de borracha. Isso é feito após preencher o aparelho com água e deixando a ponta porosa também em um recipiente com água limpa.

Por causa da sucção, as bolhas de ar presentes dentro do tubo ou na cápsula, se soltam e vão para a seringa. Em seguida, completa-se o volume com água e coloca-se a tampa hermética. O aparelho está pronto para ser levado ao campo. Assim, quando levar ao campo, o tensiômetro estará com o tubo preenchido com água e a cápsula também imersa em água por um período mínimo de 24h.

## INSTALAÇÃO DO TENSIÔMETRO

A instalação adequada de um tensiômetro é determinante para garantir leituras confiáveis do ambiente radicular da cultura. O processo deve iniciar pela escolha do local onde o equipamento será instalado. Esse local deve refletir a condição média da área de cultivo, evitando pontos de compactação atípica, sombreamento excessivo, acúmulo de água ou regiões que não representem o padrão do solo. Ou seja, próximo às plantas, em área representativa e de fácil acesso.

Após a escolha do local, abre-se uma cova estreita e profunda o suficiente para alcançar a zona radicular da cultura, normalmente entre 15 cm e 60 cm, dependendo do sistema radicular específico. Assim, os tensiômetros podem variar em comprimento, em função do tamanho do tubo PVC. Geralmente, com auxílio de um trado é aberto um buraco no solo, de dimensões semelhantes ao tubo do tensiômetro. No qual é introduzido o aparelho, via ponta porosa, de maneira que a ponta porosa fique na profundidade adequada ao sistema radicular da cultura de interesse.

A profundidade de instalação de tensiômetros varia conforme o sistema radicular da cultura, o tipo de solo e os objetivos do manejo. Em geral, utiliza-se mais de um tensiômetro por ponto para representar adequadamente o perfil de umidade na zona explorada pelas raízes. Normalmente são instalados dois a três por local, sendo um mais raso (camada de maior densidade radicular) e outro mais profundo (camada de sustentação hídrica). Geralmente se instala um tensiômetro para cada 20 cm de camada de solo. Por exemplo, na cultura da cana-de-açúcar, é recomendado instalar 3 tensiômetros, o primeiro na camada de 0-20 cm, o segundo na camada de 20-40 cm e o terceiro na camada de 40-60 cm. Recomenda-se instalar pelo menos uma bateria de tensiômetros em cada área que apresente diferenças na textura, na profundidade de solo, no tipo da cultura ou na declividade do solo.

Para culturas com zona radicular de 0–20 cm, por exemplo, a instalação deve ser planejada para que o centro da cápsula porosa fique exatamente no meio dessa camada. Assim, o tensiômetro representa fielmente a umidade presente na faixa ativa de absorção de água. A instalação no solo deve ser realizada de modo que a cápsula porosa faça contato íntimo com o solo, sem espaços de ar ao seu redor. O preenchimento da cova deve ser feito cuidadosamente, compactando levemente o solo em camadas finas para evitar a formação de vazios. Para isso, recomenda-se antes de inserir o aparelho no buraco aberto com o trado, coloca-se um pouco de água, depois um pouco de solo do local, e depois mais um pouco de água, isso formará uma “lama”, e garantirá maior aderência do solo à cápsula porosa. Após instalado, caso tenha havido redução do volume de água interno, acrescenta-se mais água até o nível marcado no tubo. Após instalado, como medida para proteção contra ressecamento do tampão de borracha, pode-se colocar uma proteção feita com um pedaço de cano PVC e um cap.

Tensiômetros digitais demandam calibração periódica conforme especificações do fabricante. Manutenções rotineiras incluem reposição de água, remoção de bolhas, cerâmica e substituição de peças desgastadas. Um tensiômetro bem instalado e calibrado oferece leituras precisas e maior vida útil, reduzindo erros de manejo. A Figura 1 apresenta tensiômetros instalados em diferentes culturas.



Figura 1. Tensiômetros instalados nas culturas do trigo, alface e tomate.

## FUNCIONAMENTO DO TENSÍÔMETRO

O funcionamento do tensiômetro se baseia no equilíbrio entre a água do seu interior e o solo. Quando menor a umidade do solo, mais água sairá do aparelho e maior será o valor da tensão da água no solo (em módulo) registrado no tensímetro. Por outro lado, quando a umidade do solo aumentar, em virtude de uma chuva ou irrigação, ocorre o fluxo inverso: a água passará do solo para o interior do aparelho, reduzindo o valor registrado no tensímetro (em módulo).

Esse funcionamento ocorre porque o tensiômetro atua como uma ponte hidráulica entre o solo e o sistema de medição de pressão interna. O equilíbrio entre a água interna e a água do solo é dinâmico, e o tensiômetro responde rapidamente às mudanças, desde que não ultrapasse seu limite operacional (aproximadamente  $-80$  kPa). Por isso, seu funcionamento baseia-se inteiramente em princípios de fluxo capilar, continuidade hidráulica e diferença de potenciais hídricos, permitindo uma leitura precisa do estado de umidade do solo e auxiliando de forma eficiente o manejo da irrigação, em que os valores de tensão medidos devem ser comparados com as faixas recomendadas para a cultura, que podem auxiliar no momento para a realização da irrigação, mas também podem fornecer a quantidade, utilizando-se a curva de retenção de água no solo.

## CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

Para o manejo da irrigação utilizando tensiômetros, é necessário dispor da curva de retenção de água no solo. A curva de retenção de água no solo, também chamada de curva característica, é a representação gráfica que relaciona o conteúdo de água do solo com o potencial mátrico. Essa curva apresenta informações essenciais sobre a capacidade de armazenamento hídrico, a capacidade de campo, o ponto de murcha permanente e a quantidade de água efetivamente disponível para as plantas. A inclinação da curva muda conforme a textura: solos argilosos apresentam curvas mais inclinadas e maior variação de conteúdo de água para pequenas mudanças de potencial, enquanto solos arenosos apresentam curvas mais achatadas. Essa curva é fundamental na interpretação da tensiometria, pois permite converter leituras de tensão em estimativas de conteúdo de água e, portanto, na tomada de decisão para irrigação.

A curva de retenção relaciona a umidade com a tensão que a água se encontra retida no solo. Para obtenção dessa curva, deve-se coletar amostras de solo representativas da profundidade efetiva das raízes e encaminhá-las a um laboratório especializado. O tensiômetro indica a tensão, em tempo real, que a água se encontra retida no solo. Desta forma, bastará você fazer a leitura no tensiômetro para determinar a umidade do solo, por meio da curva de retenção. É um método

fácil de monitorar a umidade e realizar as irrigações no momento e na quantidade certa. A Figura 2 apresenta um fluxograma sobre a obtenção da curva de retenção de água no solo.

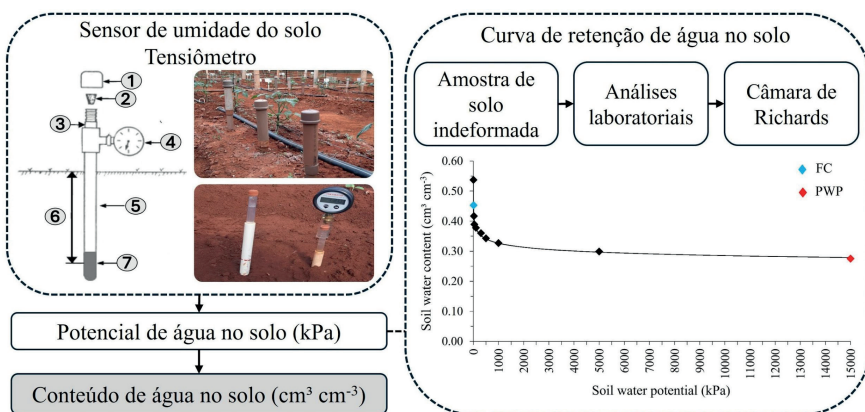


Figura 2. Fluxograma das etapas para monitoramento e determinação do conteúdo de água do solo. (1) cap; (2) rolha de borracha; (3) tubo de acrílico; (4) vacuômetro; (5) tubo de PVC; (6) profundidade de monitoramento; (7) cápsula de cerâmica; Fc: capacidade de campo; PWP: ponto de murcha permanente. Fonte: Adaptado de Villa e Vila et al., 2025.

Para a obtenção dos pontos de umidade do solo que compõem a curva de retenção de água no solo, devem ser retiradas amostras de solo indeformadas, em anéis cilíndricos, na camada de solo de interesse. A obtenção dos pontos de umidade do solo geralmente é realizada submetendo as amostras de solo à câmara de Richards, considerando diferentes pontos de tensão, como 0; -10; -20; -40; -100; -300; -500; -1000 e -1500 kPa, conforme os procedimentos descritos por Camargo et al. (1986). Após isso, a curva de retenção de água no solo pode ser ajustada conforme o modelo de Van Genuchten (Van Genuchten, 1980).

## CRITÉRIOS DE DECISÃO DA IRRIGAÇÃO

Os critérios de decisão de irrigação baseados na tensiometria permitem que o produtor determine o momento ideal para iniciar a irrigação, evitando tanto o estresse hídrico por déficit ou excesso. Cada cultura possui faixas adequadas de potencial mátrico, e ultrapassar esses limites pode comprometer o desenvolvimento radicular, a absorção de nutrientes e o rendimento final da produção. Por exemplo, em módulo, as hortaliças ficam em torno de 10–25 kPa, frutíferas em 20–40 kPa, enquanto culturas anuais podem variar de 25–50 kPa.

A interpretação das leituras do tensiômetro deve considerar não apenas o valor numérico, mas também a profundidade em que o equipamento está instalado. Tensões maiores nas camadas superficiais e menores nas camadas profundas indicam que a planta ainda possui acesso a água em profundidade, podendo-se adiar a irrigação. Já tensões elevadas em todas as profundidades monitoradas sugerem déficit hídrico acentuado e necessidade imediata de irrigação. Além da análise pontual, é fundamental observar a tendência das leituras ao longo dos dias. A taxa de aumento da tensão pode revelar o ritmo de consumo hídrico da planta.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A tensiometria mostra-se uma ferramenta adequada para o manejo da irrigação por permitir medir diretamente o potencial mátrico do solo, que indiretamente reflete a disponibilidade de água às plantas, através da umidade do solo. Para a obtenção de valores representativos, depende de um preparo adequado do tensiômetro, da correta instalação em profundidades representativas da zona radicular e da eliminação de bolhas de ar que possam comprometer as leituras. Seu funcionamento baseia-se no equilíbrio hidráulico entre o solo e o aparelho, registrando variações de umidade em tempo real. A interpretação das leituras torna-se ainda mais precisa quando associada à curva de retenção de água do solo, que permite converter tensões em conteúdos de água, orientando tanto o momento quanto a quantidade de irrigação.

## REFERÊNCIAS

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

Camargo, A.P. de, Sentelhas, P.C., 1997. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. Revista Brasileira de Agrometeorologia 5, 89–97.

Dourado Neto, D.; Botrel, T. A.; Libardi, P. L. Curva de retenção de água no solo: algoritmo em QuickBasic para estimativa dos parâmetros empíricos do modelo de Genuchten. Piracicaba: EDUSP, 1990. 34 p.

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

Klar, A. E. Irrigação: frequência e quantidade. São Paulo: Nobel, 1991. v. 1. 156 p.

Van Genuchten, M.Th., 1980. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. Soil Science Society of America Journal 44, 892–898.

Villa e Vila, V.; Souza, S. A.; Mendonça, F. C.; Gomes, T. M.; Fiorio, P. R.; Marques, P. A. 2025. Potential of thermal imaging for yield and soil water content prediction in leafy vegetables. Smart Agricultural Technology, 12, 101587.