

Potencial total da água no solo: componentes do potencial total; determinação e aplicações.

1. Introdução

A retenção e o movimento da água no solo, sua absorção e translocação nas plantas, e sua perda para a atmosfera são fenômenos relacionados à energia. Diferentes tipos de energia estão envolvidos, incluindo energia potencial e cinética. A energia cinética é certamente um fator importante no movimento da água em um rio, mas o movimento da água nos solos é tão lento que o componente da energia cinética pode ser desprezado. A energia potencial é a mais importante na determinação do estado e movimento da água no solo. Chamamos essa energia potencial de potencial total da água no solo.

O potencial total da água no solo ocorre devido à diversas forças, cada uma delas é um componente deste potencial total da água no solo Ψ_t . Estes componentes são originados das diferenças nos níveis de energia resultantes das forças gravitacional, mátrica, de pressão e osmótica, e são chamados de potencial gravitacional Ψ_g , potencial mátrico Ψ_m , potencial de pressão e potencial osmótico Ψ_o , respectivamente. Todos esses componentes agem influenciando o comportamento da água no solo.

A adesão ou a atração da água pelos sólidos do solo (matriz), promovem uma força mátrica (responsável pela adsorção e capilaridade) que reduz consideravelmente o estado de energia da água próximo às superfícies das partículas. A atração da água aos íons e outros solutos, resulta em forças osmóticas, que tendem a reduzir o estado de energia da água na solução do solo. O movimento osmótico da água pura através de uma membrana semi-permeável em direção a uma solução (osmose) é uma evidência do menor estado de energia da água na solução. A principal força que atua sobre a água no solo é a gravidade, que sempre puxa a água para baixo. O nível de energia da água no solo a uma dada elevação no perfil é maior do que da água a um nível inferior. Essa diferença de energia faz com que a água flua descendentemente.

Dessa forma, os principais potenciais que compõem o potencial total da água no solo são:

- a) O potencial gravitacional, sempre presente na superfície terrestre;
- b) O potencial de pressão, presente quando o solo está saturado com água, ou seja, quando todos os seus poros contêm água;
- c) O potencial matricial, que atua somente quando o solo não está saturado, ou seja, quando alguns de seus poros contêm água e outros ar;
- d) O potencial osmótico, presente quando há solutos dissolvidos na água do solo.

Observa-se que o potencial de pressão e o matricial não coexistem, uma vez que o de pressão só existe no solo saturado e o matricial somente no não-saturado. Dessa forma, é possível expressar o potencial total da água no solo como a soma dos potenciais que o compõem de acordo com a equação 1, com reticências indicando que nem todo o componente do potencial total é conhecido e que podem haver forças que atuem em menor escala que os componentes mais abordados nos estudos sobre a energia da água no solo.

$$\Psi_t = \Psi_g + \Psi_m + \Psi_o + \dots \quad (1)$$

Dessa forma, o termo potencial, implica uma diferença no estado de energia. Se todos os valores do potencial da água considerados têm um ponto de referência comum, (o estado de energia da água pura), as diferenças no potencial da água entre duas amostras de solo refletem a diferença em seus níveis absolutos de energia. Isso significa que a água se moverá de uma zona do solo possuindo um alto potencial para outra que tenha menor potencial. Este fato deve ser considerado sempre que se abordar o comportamento da água do solo.

2. Potencial gravitacional

A força gravitacional atua na água do solo do mesmo modo que em qualquer outro corpo, sendo a atração gravitacional em direção ao centro da Terra. O potencial gravitacional Ψ_g da água do solo pode ser expresso matematicamente de acordo com a equação 2:

$$\Psi_g = g \cdot h \quad (2)$$

Em que g é a aceleração da gravidade e h é a altura da ascensão da água no solo acima do nível de referência. O nível de referência é normalmente escolhido dentro do perfil ou no seu limite inferior, para assegurar que o potencial gravitacional da água no solo, acima do ponto de referência, seja sempre positivo.

Após chuvas pesadas ou irrigação, a gravidade desempenha um papel importante na remoção do excesso de água dos horizontes superficiais e no reabastecimento do lençol freático abaixo do perfil de solo.

Um perfil do potencial gravitacional em função da profundidade no solo será, uma simples linha reta com inclinação unitária e, com a referência gravitacional na superfície ($\Psi_g = 0$), passando pela origem.

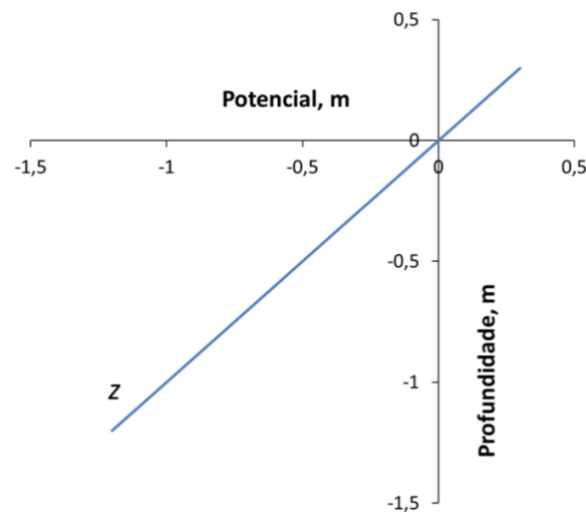


Figura 1. Perfil do potencial gravitacional em função da profundidade no solo, considerando a referência gravitacional na superfície do solo.

3. Potenciais de pressão e mátrico

Este componente considera os efeitos de todos os fatores com exceção da gravidade e concentração da solução. Incluindo (1) a pressão hidrostática positiva, ocasionada pelo peso da água em solos saturados e aquíferos e (2) a pressão negativa causada pelas forças de atração entre a água e os sólidos do solo ou a matriz do solo.

A pressão hidrostática é responsável pelo que é chamado de potencial de pressão (Ψ_p), um componente que só é considerado em áreas saturadas. Qualquer pessoa que tenha mergulhado até o fundo de uma piscina pode sentir a ação da pressão hidrostática nos ouvidos. O potencial de pressão é dado de acordo com a equação 3.

$$\Psi_p = \rho g \Delta \Psi_p \quad (3)$$

Em que ρ (kg m^{-3}) é a densidade da solução (normalmente considerada igual à densidade da água pura) e g (m s^{-2}) é a aceleração gravitacional e $\Delta \Psi_p$ é a diferença de potencial de pressão entre o ponto medido e o de referência.

O potencial de pressão da água no solo, representa a energia que ela possui em função da pressão exercida pelo fluido (água e ar atmosférico) sobrejacente. Na prática da física do solo, aplica-se como referência a pressão (atmosférica) do ar, ou seja, quando a pressão em determinado ponto é igual à atmosférica local, consideramos o potencial de pressão igual a zero.

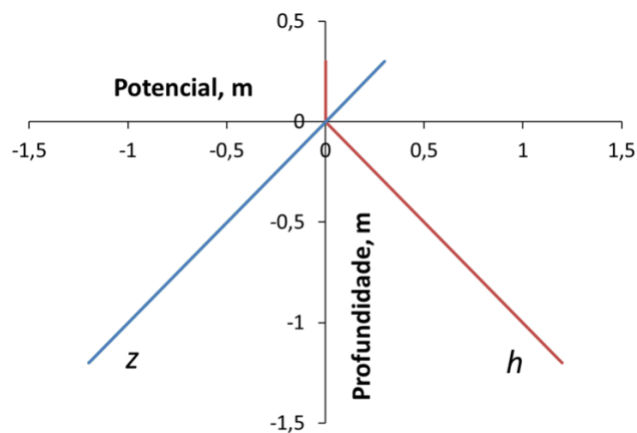


Figura 2. Perfis dos potenciais gravitacional e de pressão em função da profundidade no solo para um solo saturado da superfície para baixo, considerando a superfície do solo como referência de Ψ_g (z) e a pressão atmosférica como referência de Ψ_p (h).

A atração da água pelas superfícies sólidas é responsável pelo que é chamado de potencial mátrico (Ψ_m), o qual é sempre negativo, pois a água atraída à matriz do solo tem estado de energia menor que o da água pura. Estas pressões negativas são algumas vezes chamadas de sucção ou tensão. O potencial mátrico ocorre em condições não saturadas, acima do lençol freático, enquanto o potencial de pressão se aplica a condições saturadas ou abaixo do lençol freático.

O potencial matricial se refere à energia da água em função da sua adesão aos sólidos que formam a matriz do solo. Esse potencial é muito importante e, junto com o potencial gravitacional, dá origem à maior parte do movimento da água no solo em condições não-saturadas. No solo mais seco e no processo de absorção de água pelas plantas, o gradiente de potencial matricial é praticamente a única causa do movimento da água.

Enquanto cada uma destas pressões é significativa em situações específicas de campo, o potencial mátrico é importante em todas as condições de solos não saturados pois neste caso as interações entre os sólidos do solo e água estão sempre presentes. O movimento da água no solo, a disponibilidade de água às plantas, e as soluções para muitos problemas em engenharia civil são em grande parte determinados através do potencial mátrico. Consequentemente, o potencial mátrico receberá especial atenção neste texto, juntamente com os potenciais gravitacional e osmótico.

O potencial mátrico (Ψ_m), que é resultado do fenômeno de adesão (ou adsorção) e da capilaridade, influencia a retenção e/ou movimento de água no solo. Diferenças de Ψ_m entre duas zonas adjacentes de um solo estimulam o movimento da água de zonas mais úmidas (alta estado de energia) para as zonas mais secas (baixa estado energia) ou de poros maiores para menores. Apesar deste movimento ser lento, ele é extremamente importante, especialmente no suprimento de água para as raízes das plantas.

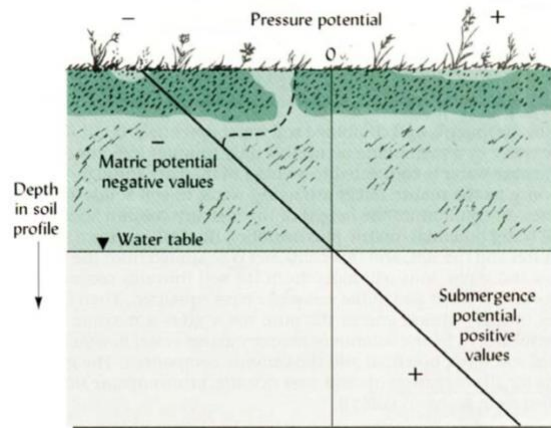


Figura 3. Comparação entre os potenciais de pressão e mátrico.

O potencial mátrico é também um potencial de pressão. O potencial mátrico é sempre negativo e o potencial de pressão é sempre positivo. Quando a água se encontra em solos não saturados acima do lençol freático (parte superior da zona saturada) está sujeita à influência do potencial mátrico. A água abaixo do lençol freático em solo saturado está sujeita ao potencial de pressão. No exemplo mostrado, o potencial mátrico decresce linearmente com a elevação acima do lençol freático, significando que a ascensão da água por atração capilar a partir do lençol freático é a única fonte de água neste perfil. Chuva ou irrigação (linha pontilhada) alterariam ou curvariam a linha reta, mas não mudariam a relação fundamental descrita.

4. Potencial osmótico

O potencial osmótico (Ψ_o) é atribuído à presença de solutos na solução de solo. Os solutos podem ser sais inorgânicos ou componentes orgânicos. Sua presença reduz a energia potencial de água, principalmente por reduzirem a liberdade de movimento das moléculas de água que se agrupam em torno de cada íon soluto ou molécula. Quanto maior a concentração de solutos, menor o potencial osmótico. Como sempre, a água tenderá a se mover de onde seu nível de energia for menor, neste caso a zona com maior concentração de solutos. A determinação do potencial osmótico é dada de acordo com a equação de Van't Hoff (Equação 4), a temperatura absoluta em Kelvin, é a densidade da solução (normalmente considerada igual à densidade da água pura) e é a aceleração gravitacional, calculadas em função da concentração de solutos na solução do solo, de acordo com a equação de Van't Hoff (Equação 4).

$$\Psi_o = - 0,2526C \quad (4)$$

Entretanto, a água se moverá em resposta à diferenças de potencial osmótico (osmose) somente na existência de uma membrana semi permeável entre as zonas de alto e baixo potencial osmótico, permitindo o fluxo da água, mas impedindo o movimento do soluto. Na ausência de membranas, ao invés da água, o soluto geralmente se move para equilibrar a concentração.

Pelo fato das zonas do solo não serem separadas por membranas, o potencial osmótico (Ψ_o) tem pouco efeito sobre o movimento em massa da água no solo. Seu principal efeito se dá sobre a absorção de água pelas células das raízes das plantas, que estão isoladas da solução do solo pelas suas membranas celulares semi-permeáveis. Em solos com alta concentração de sais solúveis, o Ψ_o pode ser mais baixo (ter um alto valor negativo) na solução de solo do que nas raízes das plantas. Isto leva a restrições na absorção de água pelas plantas. Em solos muito salinos, o potencial osmótico da água no solo pode ser tão baixo que causará o colapso (plasmólise) das células em plântulas jovens, a medida que a água sai das células em direção a uma zona de menor potencial osmótico, no solo. O movimento aleatório das moléculas de água faz com que algumas delas escapem de um volume de água, entrem na atmosfera, e se tornem vapor d'água. Como a presença de solutos restringe o movimento das moléculas, algumas delas escapam com o aumento da concentração de solutos. Deste modo, a pressão de vapor da água é menor no ar sobre água salina do que no ar sobre água pura. Por afetar a pressão de vapor da água, o potencial osmótico afeta o movimento de vapor d'água nos solos.

O potencial osmótico somente tem um papel no movimento da água na presença de membranas semipermeáveis pelas quais a água passa, mas os solutos não (como é o caso em células vegetais, por exemplo na absorção de água e solutos pelo sistema radicular) ou quando ocorre a evaporação ou condensação da água, por exemplo nos poros próximos à superfície do solo. Nessas condições, gradientes grandes de potencial osmótico podem surgir que podem afetar o movimento da água correspondente. Em outros cenários, não há geralmente um gradiente de Ψ_o significativo e sua quantificação pode ser ignorada.

Prof. Dr. José Ribeiro S. Junior
Curso: Agronomia

5. Determinação dos potenciais de água no solo

5.1. Tensiômetro

A tensão com que a água é retida é uma expressão do potencial da água do solo (ψ). Tensiômetros de campo medem esta tensão. Tensiômetros de campo (Figura 2.16) medem sua atração ou tensão. O tensiômetro é basicamente um tubo preenchido com água fechado na sua extremidade inferior com uma placa porosa de cerâmica e com sua extremidade superior fechada hermeticamente. Uma vez instalado o tensiômetro no solo, a água contida em seu interior move-se através da placa porosa, em direção ao solo, até que o potencial no tensiômetro se iguale ao potencial mátrico da água no solo. À medida que a água sai do tensiômetro, desenvolve-se um vácuo na extremidade superior, o qual pode ser medido em um manômetro ou através de um dispositivo eletrônico. Se o solo for novamente umedecido por chuva ou irrigação, a água entrará no tensiômetro através da placa porosa, reduzindo o vácuo ou a tensão registrada pelo medidor. Tensiômetros são operantes entre potenciais de 0 a -85 kPa, esta faixa inclui mais da metade da água armazenada na maioria dos solos. Tensiômetros de laboratório, chamados mesas de tensão, operam em uma faixa similar de potenciais. Quando o solo seca além de -80 a -85 kPa, os tensiômetros falham, porque o ar passa através dos poros de cerâmica, reduzindo o vácuo. Um dispositivo eletrônico pode ser adaptado a um tensiômetro de campo, para controlar automaticamente um sistema de irrigação.

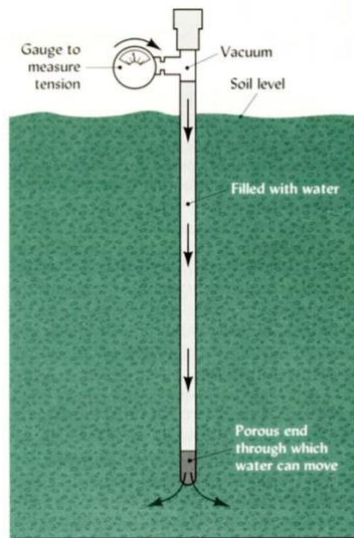


Figura 4. Esquema representativo de um tensiômetro.

5.2. Psicrômetro

Como as plantas devem superar forças mátricas e osmóticas ao absorver água do solo, muitas vezes é necessário um instrumento que meça ambas as forças. A umidade relativa do ar do solo é afetada pelas forças mátricas e osmóticas, as quais restringem a saída de moléculas da água no estado líquido.

Em um psicrômetro, um par termo elétrico localizado em uma pequena (aproximadamente 5 mm) câmara porosa de cerâmica é resfriado o suficiente para provocar a condensação de uma gota de água do ar sobre este par. Quando a corrente é desligada, a

gota de água evapora a uma taxa inversamente proporcional a umidade relativa do ar, a qual, por sua vez é relacionada ao potencial de umidade no solo. A voltagem gerada pela evaporação da gota de água é convertida em uma leitura de potencial de água no solo ($\psi_m + \psi_o$). O psicrômetro é mais útil em solos relativamente secos, onde a imprecisão de ± 50 kPa envolve quantidades desprezíveis de água.

5.3. Câmara de pressão

Uma câmara de pressão (Figura 5.17) é utilizada para submeter o solo a potenciais mátricos tão baixos quanto -10.000 kPa. Após a aplicação de um potencial mátrico específico a um conjunto de amostras de solo, seu conteúdo de água é determinado gravimetricamente. Esta importante ferramenta de laboratório torna possível medidas precisas do conteúdo de água, em uma ampla faixa de potenciais mátricos em um tempo relativamente curto. Ela é usada em conjunto com a mesa de tensão, na obtenção de dados para construir curvas características de água no solo como mostrado na Figura 2.12.

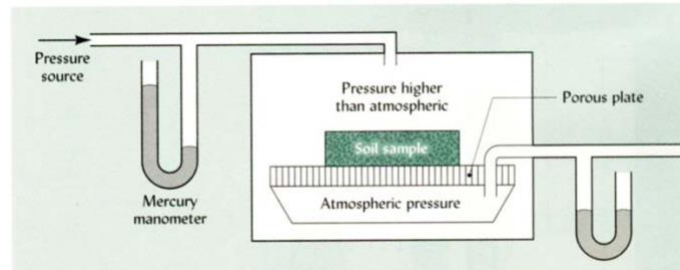


Figura 5. Esquema representativo de uma câmara de pressão.

Uma fonte exterior de gás cria uma pressão dentro da câmara. A água é forçada a sair do solo através de uma placa porosa colocada no interior da câmara na pressão atmosférica. A pressão aplicada quando o fluxo de água cessa dá uma medida do potencial da água no solo. Este equipamento mede valores de potencial muito mais baixos (solos secos) do que os tensiômetros e placas de tensão.

5.4. Blocos de resistência elétrica

Este método utiliza pequenos blocos de gesso poroso, nylon, ou fibra de vidro devidamente incrustadas com eletrodos. Quando os blocos são colocados em solos úmidos eles absorvem água numa quantidade proporcional ao conteúdo de umidade do solo. A resistência ao fluxo de elétrons entre os eletrodos decresce proporcionalmente (Figura 2.18). A precisão e a amplitude da leitura destes dispositivos são limitadas (Tabela 2.2). Entretanto, eles são de baixo custo e podem ser utilizados para medidas aproximadas no conteúdo de umidade do solo, durante uma ou mais estações de cultivo. É possível conectá-los a aparelhos eletrônicos para que sistemas de irrigação possam ser ativados e desativados automaticamente a conteúdos de umidade pré-estabelecidos.

6. Aplicações do conhecimento sobre potenciais da água no solo

Pudemos evidenciar, com base no que foi exposto até então que há uma relação inversa entre o conteúdo de água no solo e a energia com que a água é retida no solo. A água flui mais facilmente de um solo úmido para outro com menor umidade. Muitos fatores afetam a relação entre o potencial da água no solo (Ψ) e o conteúdo de umidade (θ).

A relação entre o potencial da água no solo (Ψ) e conteúdo de água (θ) de três solos com diferentes texturas é mostrada na Figura 2.12. Tais curvas são também conhecidas como curva característica de retenção de água no solo ou simplesmente curva característica. A forma suavizada das curvas indica uma mudança gradual no potencial da água no solo, com o aumento do conteúdo de água e vice-versa. O solo argiloso retém muito mais água, a um determinado potencial, do que o solo franco ou o arenoso. Deste modo, a um dado conteúdo de água, ela é retida mais fortemente no solo argiloso do que nos outros dois, (note que o potencial da água no solo é plotado em escala logarítmica). A quantidade de argila no solo determina a proporção de microporos. Como veremos, quase metade da água retida por solos argilosos, está firmemente retida nos microporos e não está disponível para as plantas. A textura do solo exerce uma influência significativa sobre a retenção de umidade no solo.

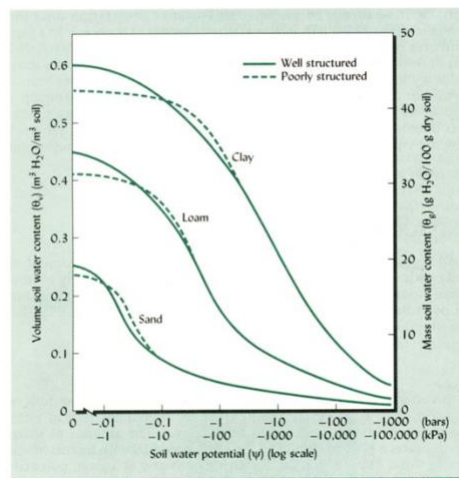


Figura. Curva de retenção de água no solo para três solos minerais representativos.

A estrutura do solo também influencia a relação entre o conteúdo de água e energia. Um solo bem estruturado possui maior porosidade total e maior capacidade de retenção de água do que um mal estruturado ou que tenha sido compactado. Quanto maior a porosidade total maior a capacidade de retenção de água. Além disso, o aumento na porosidade de solos bem estruturados é resultado principalmente de uma maior quantidade de macroporos, nos quais a água é retida com pouca energia. Solos compactados retêm menor quantidade total de água, tendo maior proporção de poros pequenos e médios que retêm água com maior energia do que os poros maiores. Assim, a estrutura do solo influencia predominantemente o formato da curva característica, nos potenciais entre 0 e 100 kPa. O formato da porção restante da curva é geralmente influenciado pela textura do solo. As curvas características de água no solo (Figura 2.12) possuem significado prático para vários processos e medidas de campo. Estas curvas serão

úteis quando considerarmos os aspectos aplicados do comportamento da água no solo, nas seções seguintes.

Outra aplicabilidade é relacionada a relação entre conteúdo de água no solo e potencial, determinada à medida que o solo seca, será diferente da mesma relação determinada à medida que o solo é reumedecido. Esse fenômeno, conhecido como histerese, é ilustrado na Figura 2.13. A histerese é causada por vários fatores, incluindo a desuniformidade dos poros do solo. Quando o solo é umedecido, alguns dos poros de menor tamanho não são preenchidos, deixando ar aprisionado, o que impede a entrada da água. Alguns macroporos em um solo podem estar cercados apenas por microporos, criando um efeito gargalo de garrafa. Neste caso, o macroporo não será drenado até que o potencial mátrico seja baixo o suficiente para esvaziar os poros menores que o cercam (Figura 2.13). Também a expansão e contração de argilas, à medida que o solo seca e é reumedecido, provoca mudanças na estrutura do solo que afetam as relações entre solo e água. Devido ao fenômeno da histerese, é importante saber se o solo está sendo seco ou umedecido, ao comparar suas propriedades com as de outro solo.

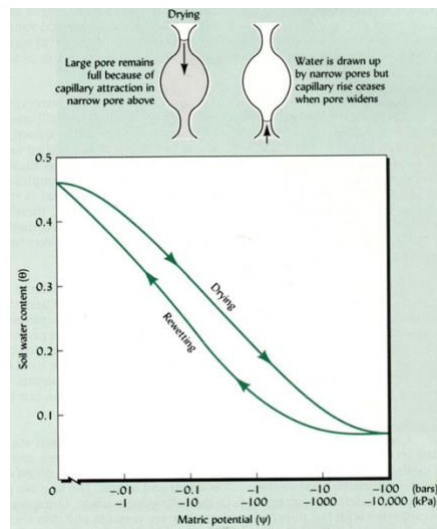


Figura. Relação entre conteúdo de água e potencial mátrico de um solo à medida que ele seca e é umedecido evidenciando o fenômeno conhecido como histerese.

Anexo I

Tabela 2.2 Métodos para medida da água no solo

Note que mais de um método pode ser necessário para abranger toda a amplitude de variação da umidade no solo.

Método	Medidas de água no solo		Amplitude útil (kPa)	Utilização		Comentários
	Conteúdo	Potencial		Campo	Laboratório	
1. Gravimétrico	x		0 a <-10000		x	Amostragem destrutiva; lenta (1 a 2 dias) exceto com utilização de microondas. Método padrão para calibração.
2. Blocos de resistência elétrica	x		-100 a <-1500	x		Pode ser automatizado; não é sensível a conteúdos de umidade próximos ao ótimo para as plantas.
3. Moderação de nêutrons	x		0 a <-1500	x		Necessita licença para o uso (radiação); equipamento de alto custo; apresenta deficiências em solos com alto teor em matéria orgânica; requer tubo de acesso.
4. Reflectometria de microondas (TDR)	x		0 a <-10000	x	x	Pode ser automatizado; precisão de 1 kPa; requer guias de onda; instrumento de alto custo.
5. Tensiômetro		x	0 a -85	x		Precisão de 0,1 a 1 kPa; faixa limitada; barato; pode ser automatizado; necessita de manutenção periódica.
6. Psicrômetro		x	50 a <-10000	x	x	Razoavelmente caro; ampla faixa de leitura; precisão de ± 50 kPa.
7. Câmara de pressão		x	50 a <-10000		x	Utilizado em conjunto com o método gravimétrico para construção da curva característica de água no solo.