

PROBLEMÁTICA DE LAS MEDIDAS TENSIO MÉTRICAS EN LA PARCELA EXPERIMENTAL  
PARA EL ESTUDIO DE LA ZNS EN ARKAUTE (ARABA, PAÍS VASCO)

*J.M. GONZALO, C. LUENGO y I. ANTIGÜEDAD*

Grupo de Hidrogeología. Dpto. de Geodinámica.  
Universidad del País Vasco - Euskal Herriko Unibertsitatea

RESUMEN

Se presentan los fundamentos físicos, limitaciones del funcionamiento y problemática de los tensiómetros. Se analizan los resultados obtenidos con los distintos modelos de tensiómetros instalados en la parcela experimental de Arkaute y se comparan con los datos obtenidos en ensayos en una cámara climática.

ABSTRACT

In this article, physical bases, limitations of operation and problematic of the tensiometers are presented. The obtained results using the different models of installed tensiometers in the test site of Arkaute (Basque Country) are analyzed and are compared with obtained data from tests in a climatic chamber.

INTRODUCCIÓN

El tensiómetro es un dispositivo para medir la tensión en la zona no saturada ampliamente utilizado en diversos campos: agricultura (programa-

ción de riegos...), agronomía, hidrología (medida de la recarga de acuíferos, evapotranspiración...), física del suelo, geotécnia, etc.

En el mercado pueden encontrarse muchos tipos de tensiómetros que fundamentalmente se diferencian en el sistema utilizado para medir la presión que se crea en el interior del dispositivo. En la parcela experimental de Arkaute se han utilizado diversos modelos de tensiómetros que son presentados en este artículo junto con su problemática: puesta a punto, instalación en el terreno, resultados obtenidos y su crítica y mantenimiento.

La instalación por parte del Grupo de Hidrogeología de la UPV/EHU para el Servicio Vasco de Meteorología / Meteorologi Euskal Zerbitzua (SVM/MEZ) de parcelas experimentales para el estudio de la zona no saturada tiene como objetivo principal la determinación de la evaporación y de la infiltración midiendo diversos parámetros del suelo, así como el conocimiento de sus factores condicionantes en diferentes zonas de la C.A.V. (Gonzalo et al., 1995). Esto lleva a la realización de balances hídricos para el cálculo de la cantidad de agua perdida por evapotranspiración e infiltración, utilizando los datos de las Estaciones Meteorológicas Automáticas y la evolución de los contenidos en humedad en perfiles del suelo junto con el método del plano de flujo nulo (Royer y Vachaud, 1974) y balances de masas utilizando los datos analíticos de las aguas tomadas por los tomamuestras de succión.

En la parcela experimental de Arkaute la instalación de tensiómetros con medida en continuo tiene por objeto determinar la evaporación y la infiltración estudiando la evolución de los contenidos de humedad en el perfil de la parcela (con TDR y WCR-Water Content Reflectometry) junto con el método del plano de flujo nulo (Royer y Vachaud, 1974), determinado por los tensiómetros.

#### POTENCIAL DEL AGUA EN LA ZNS

La energía potencial es la energía que posee un cuerpo en virtud de su posición en un campo de fuerza. Se mide por la fuerza requerida para mover el cuerpo directamente contra el campo de fuerza y es el producto de la fuerza por la distancia recorrida.

En un material poroso como el suelo actúan sobre el agua diversas fuerzas (campo gravitatorio, atracción de superficies de sólidos, etc.). La diversidad de fuerzas y de las direcciones en que actúan hace difícil describir la red de fuerzas del agua del suelo. Sin embargo, es posible evaluar la energía potencial asociada con un aumento del agua como consecuencia de las fuerzas que actúan sobre ella. Diferencias de energía potencial de un punto a otro determinan la dirección del flujo, la cantidad de trabajo disponible para producirlo y la cantidad de trabajo que debe llevarse al sistema desde el exterior para causar el movimiento. La energía potencial por unidad de masa o de volumen de agua es el *potencial* del líquido (Baver et al., 1972).

En la ZNS el agua está sometida a una presión menor que la atmosférica, presenta valores negativos de potencial, debido a las fuerzas generadas entre la matriz del suelo y el agua. Este potencial es la resultante de varios potenciales que actúan sobre el agua. Teóricamente, a cada fuerza que actúa sobre el agua le corresponde un potencial, aunque para simplificar algunos potenciales se agrupan en una sola denominación.

Los tres potenciales más importantes en la ZNS son el potencial gravitacional, el potencial de solutos y el potencial matricial (Wilson et al, 1995).

- a) El potencial gravitacional es el potencial resultante del campo de fuerza gravitatorio.
- b) El potencial de solutos resulta de la diferencia en energía potencial entre la solución del suelo y el agua pura libre. La contribución del potencial de solutos es, a menudo, ignorada ya que su contribución al flujo de agua es despreciable (excepto en la interfase suelo-raíz donde la diferencia en el potencial de solutos es el más importante para la entrada de agua a las raíces).
- c) El potencial matricial o tensiométrico resulta de la capilaridad y otras interacciones del agua con la matriz en suelos no saturados. Es un valor siempre negativo en suelos no saturados. En suelos saturados las fuerzas capilares son cero y bajo el nivel freático están sujetas a la presión de la capa de agua situada por encima y es a menudo expresada en unidades de carga y es también llamada presión de carga.

El valor absoluto del potencial matricial negativo en suelos no saturados es también llamado tensión. En la práctica, sólo se considera el *potencial de succión* (F), incluido en el matricial, y el *potencial gravitacional* (z), de manera que el *potencial total* (h) se expresa como:

$$h = z - F$$

La energía potencial debe definirse con respecto a un nivel arbitrario de referencia. Si se toma como altura de referencia la superficie del suelo:

$$h = F$$

A ésta presión se le denomina *succión* o *tensión* ( $\Phi$ ) y se suele expresar en centímetros de altura de agua. En estudios edafológicos se suele utilizar el *potencial pF*, correspondiente al logaritmo decimal de la tensión. El potencial se mide con tensiómetros.

La unidad de presión en el Sistema Internacional, S.I., es el pascal (Pa):

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

Es muy frecuente que se utilicen otras unidades de presión. La conversión a unidades del S.I. en la Tabla 1.

Tabla 1.

Conversión a unidades del Sistema Internacional de las unidades de presión más comunmente utilizadas. En el rango de actuación de los tensiómetros resulta útil usar los siguientes múltiplos del pascal:

1hPa (hectopascal) = 100 Pa. 1kPa (kilopascal) = 1000 Pa.

Unidades de Presión	Unidades de Presión (S.I.)
1 bar	10 <sup>5</sup> Pa
1 atm = 76,00021 cm Hg	1,01325 • 10 <sup>5</sup> Pa
1 cm Hg (0°C)	1,33322 • 10 <sup>3</sup> Pa
1 baria = 1 dina/cm <sup>2</sup> (C.G.S.)	10 <sup>-1</sup> Pa
1 kg/cm <sup>2</sup>	9,80665 • 10 <sup>4</sup> Pa
1 psi (pound per square inch)	6,89476 • 10 <sup>3</sup> Pa
1 torr (mm Hg a 0°C)	1,33322 • 10 <sup>3</sup> Pa
1 in. Hg (1 pulgada de Hg)	3,386 • 10 <sup>3</sup> Pa
1 kp/cm <sup>2</sup>	9,807 • 10 <sup>4</sup> Pa
1 m de H <sub>2</sub> O - 0,1 kg/cm <sup>2</sup>	9,806,65 Pa
1 cm de H <sub>2</sub> O (1 cm ca)	98,0665 Pa = 0,98 hPa

#### TENSIO MÉTROS. MODELOS INSTALADOS Y SU PROBLEMÁTICA

Desde su instalación, en la parcela experimental de Arkaute se han utilizado diversos modelos de tensiómetros. Su funcionamiento y problemática, en general y en el caso de la parcela experimental de Arkaute, es analizado a continuación.

#### Tensiómetros

Para medir la tensión matricial en un suelo se utiliza el tensiómetro. El término "tensiómetro" fue usado por Richards y Gardner (1936) en referencia a una combinación de cerámica porosa y manómetro para la medida de la tensión capilar o de la energía con la cual el agua es retenida por el suelo (Schmugge et al., 1980). Sin embargo, ya fueron usados para medir la tensión del agua del suelo en suelos no saturados por Gardner et al., 1922. En la actualidad su utilización en diversos campos está ampliamente extendida.

Consta de un tubo (caña) cerrado, de unos 2 cm de diámetro exterior, lleno de agua cuyo extremo inferior termina en una cápsula de cerámica porosa y en su parte superior posee un manómetro medidor de vacío. Para determinar el valor de la tensión matricial del terreno a la profundidad deseada se introduce el tensiómetro en un sondeo realizado en el suelo.

Tras su instalación, y si el terreno no está saturado, se produce la succión de agua del interior del tensiómetro hasta que se alcance el equilibrio a ambos lados de la cerámica. La cerámica es porosa y permite el paso del agua y los solutos pero no del aire hasta no alcanzar valores de tensión de 800-900

hPa. Cuando se alcanzan estos valores penetra aire a través de la cápsula y el tensiómetro deja de funcionar.

En agronomía, de un modo general, las lecturas indican:

- Tensiones de 0 a 100 hPa. El suelo está saturado. Se dan en los días siguientes a un riego o lluvia copiosa.
- Tensiones de 100 a 200 hPa. El suelo está a capacidad de campo. Se interrumpe el riego que no sea por goteo, para evitar desperdicio de agua y pérdida de elementos nutritivos.
- Tensiones de 300 a 600 hPa. Intervalo para iniciar el riego. La mayoría de las plantas cuyo sistema radicular está contenido en los primeros 50 centímetros de suelo no sufren hasta que las lecturas llegan al intervalo de 400 a 500 hPa.
- Tensiones superiores a 700 hPa. En la mayoría de los suelos y cultivos la lectura de 700 hPa indica que las plantas no disponen de todo el agua necesaria para un crecimiento máximo.

Las tensiones del agua disponible son más bajas en los suelos arenosos que en los arcillosos. Como los tensiómetros no son capaces de medir valores más altos de 800-900 hPa son más útiles en suelos arenosos que en los arcillosos.

El equilibrio entre la tensión del suelo y el tensiómetro puede alterarse:

- Si el suelo pierde agua por evaporación o por infiltración y se seca, el agua del tensiómetro pasa a través de los poros de la cerámica hacia el terreno, debido a la diferencia de presión a ambos lados de las paredes de la cápsula y el manómetro indica el valor de la succión.
- Si el terreno se humedece por lluvias, riegos, subida del nivel freático, etc., el flujo se invierte, el agua pasa del terreno al interior de la cápsula y la succión y la lectura del manómetro descienden.

Con respecto a estas medidas es preciso saber que:

La lectura del manómetro incluye el valor del potencial matricial del terreno a la profundidad donde está la cápsula y el peso de la columna de agua en el interior del tensiómetro.

- Debido a procesos de histéresis la curva característica o curva de retención del suelo (que relaciona succión y contenido de humedad) no es única, por lo que una misma lectura del manómetro puede corresponder a diferentes grados de humedad, según que la medida corresponda a la fase de secado o de humedecimiento. No obstante, los tensiómetros se suelen utilizar para determinar el grado de humedad del suelo.

Como la cerámica porosa tiene una cierta longitud (normalmente de 5-6 cm) la medida realizada con el tensiómetro se considera como correspondiente a la profundidad de la cerámica al punto medio de la longitud de la cerámica en contacto con el terreno. Cuando se va a instalar el tensiómetro en el terreno y se perfora con la barrena hay que tener en cuenta esta circunstancia para que la cerámica quede situada a la profundidad deseada. Así mismo, cuando se adquieren los tensiómetros hay que tener en cuenta que estos deberán sobresalir aprox. unos 10 cm del nivel del suelo.

El tensiómetro debe recargarse con agua desmineralizada para evitar en lo posible que se produzcan precipitaciones de sustancias químicas sobre cualquiera de sus componentes (manómetro, caña, cerámica) que puedan alterar su funcionamiento.

Además, el agua debe ser desgasificada ya que la presencia de burbujas de aire en el circuito hidráulico provoca una atenuación en la transmisión de presiones. La variación del volumen de agua contenida en la caña tensiométrica es medida por el captador de presión por lo que la presencia de aire en el circuito debe ser evitada por razones evidentes de compresibilidad (Royer y Vachaud, 1974). La desgasificación del agua se puede hacer por ebullición del agua (generalmente durante 30 minutos) o por depresión de ésta mediante bomba de vacío.

Hay fabricantes de tensiómetros con transductor de presión que incorporan la presencia de una burbuja de aire e incluso en tensiómetros con manómetro de Hg en el circuito se incluye la presencia de depósitos de aire (System DTE 1000 de Nardeux-Humisol). Además, los tensiómetros son sensibles a los cambios de temperatura (Candela y Varela, 1993). Thony et al. (1989) advierten del inconveniente de la presencia del aire en el sistema tensiométrico que puede hacer la medida in situ sensible a la temperatura por la dilatibilidad del aire. Estos efectos térmicos pueden afectar a la amplitud de las medidas si las variaciones de origen térmico del volumen de aire no son compensadas en continuo por las transferencias de agua a través de la cerámica porosa. Esta compensación supone que la variación del volumen de aire induce la transferencia de agua al exterior de la cerámica y que se modificará en consecuencia el estado hídrico del suelo que está alrededor de la cerámica.

Cuando un tensiómetro está completamente lleno de agua su respuesta a los cambios de humedad del suelo es muy rápida, del orden del minuto dependiendo de la conductividad hidráulica de la cerámica porosa y del estado hídrico del suelo (Thony et al., 1989). El aire cambia de volumen (V) con la presión (P) y la temperatura (T) según la ley de los gases ideales:  $PV = nRT$ , n (número de moles del gas) R (cte. universal de los gases). Así, si hay una burbuja presente dentro del tensiómetro, esta se expandirá hasta que la nueva presión interna se alcance lo que refleja la nueva presión de succión.

Si la temperatura ambiente desciende por debajo de 0°C, el agua del tensiómetro se congelará. Este proceso de congelación lleva asociado un

aumento de volumen respecto al ocupado por el agua líquida a 0°C (la densidad pasa de 999,87 kg/m<sup>3</sup> a 921 kg/m<sup>3</sup>) y la presión generada es capaz de romper la cerámica y/o la caña del tensiómetro. Para prevenir estos daños, se añade al agua un anticongelante (sustancia cuyo punto de congelación es < 0°C) como el metanol (CH<sub>3</sub>OH), etilenglicol (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub>), etc:

Sustancia	Punto de congelación (K)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
Agua líquida	273 K = 0°C	1000
Hielo	273 K = 0°C	921
Etilenglicol	262 K = -11°C	1109
Metanol	175 K = -98°C	791

Gorden et al. (1995) muestran que la adición de metanol en el agua del tensiómetro (en un rango de concentraciones de 100 a 500 cm<sup>3</sup> L<sup>-1</sup>) no provoca diferencias estadísticamente significativas. En la parcela de Arkaute los tensiómetros se rellenan con una mezcla formada por un 30% de metanol y 70% de agua desmineralizada (mezcla de metanol al 30%).

Si se congela el suelo la tensión del agua no congelada es de 800 hPa y el sistema tensiométrico falla (Schmugge et al., 1980).

#### *Puesta a punto e instalación de los tensiómetros*

La exactitud de las medidas obtenidas depende del cuidado en la preparación e instalación de los tensiómetros.

Previamente a la instalación de los tensiómetros en el terreno hay que obtener una saturación completa de todos los poros de la cerámica de modo que no quede ninguna burbuja de aire que reduzca la permeabilidad de la cerámica o atenua la transmisión de la presión. Para conseguirlo se hace circular agua desgasificada y desmineralizada a través de la cerámica primero en una dirección y luego en otra. El procedimiento a seguir en laboratorio es el siguiente:

1. En primer lugar, si el tensiómetro tiene diferentes partes, se montan. Se introduce verticalmente en un recipiente con agua desgasificada y desmineralizada (dd) de modo que la cerámica quede totalmente sumergida. Se quita el tapón de cierre del tensiómetro para que el agua entre al tensiómetro y se deja en esta posición durante 12 horas.
2. En esa posición se rellena totalmente de agua dd, sin poner el tapón de cierre de modo que el tensiómetro se vacía de agua. Se mantiene así durante 1/2 hora.
3. En esa posición se vuelve a rellenar completamente el tensiómetro de agua dd, pero en este caso se cierra y durante 5 minutos se procede a hacer el vacío mediante una jeringa de purga (con mecanismo de

bloqueo para mantener la aspiración el tiempo requerido) para extraer las burbujas de aire que pudieran quedar en la cerámica

4. Se coloca verticalmente el tensiómetro en un recipiente con un nivel de agua dd ligeramente superior a la altura de la cerámica y sin tapón de cierre (durante 30 minutos).

A partir de este momento el tensiómetro está preparado para su instalación. Para trasladar los tensiómetros al terreno donde se van a instalar es recomendable llenarlos con agua dd y colocar cada cerámica en un frasco lleno también de agua dd. Para que no se derrame el agua del frasco se puede sellar el espacio que queda entre la caña tensiométrica y el frasco con cinta adhesiva.

Los tensiómetros se pueden instalar verticalmente o inclinados formando distintos ángulos con la superficie del terreno e incluso horizontalmente desde una zanja excavada en el terreno. En caso de su instalación inclinada se consigue que el terreno por encima de la cerámica se encuentre intacto y si se instala horizontalmente además se evitan los flujos preferenciales del agua de lluvia o riego a favor de las paredes de la caña del tensiómetro.

El siguiente objetivo es conseguir un buen contacto entre el suelo y la cerámica. El procedimiento que se sigue en el terreno, independientemente del modelo de tensiómetro a instalar, es el siguiente:

- Una vez elegido el emplazamiento del tensiómetro se practica una perforación con barrena manual hasta la profundidad requerida.
- Se introduce dentro de cada perforación unos  $\text{cm}^3$  de lodo semilíquido sin cuerpos duros (hecho con tierra fina de la perforación y agua desmineralizada), recubriendo la cerámica porosa de este lodo para asegurar un buen contacto y que al meterlo no quede ninguna burbuja adherida a la cerámica.
- A continuación se coloca la caña en el interior de la perforación.
- Se procede a vaciar el tensiómetro del agua que ha tenido durante el transporte del laboratorio al campo para evitar posibles burbujas formadas durante el viaje. Con mucho cuidado para evitar burbujas se llena completamente de agua desmineralizada y desgasificada el tensiómetro. Si existe riesgo de heladas se añade anticongelante al agua. Si es posible la desgasificación se hace en el campo.
- Finalmente se procede a la purga del tensiómetro, con una jeringa de purga, para eliminar burbujas de aire atrapadas.

Después de la instalación es necesario que pase un cierto tiempo hasta que desaparezca la influencia de las perturbaciones originadas durante la instalación del tensiómetro.



### *Mantenimiento de los tensiómetros*

Con el tiempo el sistema hidráulico del tensiómetro se puede llegar a vaciar en exceso o ir rellenándose con agua del suelo que aporta burbujas de aire. Por lo que cada vez que se visita la parcela conviene comprobar que el nivel de agua del tensiómetro se encuentra dentro de un rango aceptable y que las lecturas de los manómetros son lógicas con las condiciones de humedad del suelo. Periódicamente, hay que renovar el agua del tensiómetro y sustituirla por agua desgasificada nueva.

### *Modelos de tensiómetros utilizados en la parcela de Arkaute*

En la parcela de Arkaute se han usado distintos modelos de tensiómetros y en distinto número. En la actualidad hay instalados 10 tensiómetros, 5 con medida en continuo y 5 de medida semanal.

#### *Tensiómetros con manómetro convencional*

Las medidas de la presión en el tensiómetro se realizan con un manómetro convencional esférico (tipo Bourdon). Las tensiones medidas por estos tensiómetros vienen en centibares por lo que carecen de la suficiente resolución para un estudio en detalle de la ZNS, pero sí pueden utilizarse en agronomía para establecer cuando debe regarse un suelo.

En Arkaute se han instalado 4 tensiómetros de la marca Soilmoisture - modelo 2710, dial type- (Figura 1, b) con manómetro convencional a las profundidades de 15, 35, 55 y 75 cm. Tienen la ventaja de ser relativamente sencillos de colocar, de su bajo coste y su funcionamiento es simple. En la actualidad los utilizamos para hacer una aproximación cualitativa del comportamiento de un suelo a la hora de elegir una parcela experimental.

El manómetro viene calibrado de fábrica para la presión atmosférica media a nivel del mar. Si se va a instalar a una altitud superior, hay que ajustarle a la presión atmosférica media existente a esa cota, para lo cual, una vez en el lugar donde se va a instalar, se pone la aguja del dial a cero. Un modelo parecido a este incorpora un depósito de reserva de agua.

Por su diseño se evita la presencia de burbujas de aire al rellenarlo de agua y se puede adquirir o fabricar fácilmente un dispositivo de purgado de burbujas por vacío (jeringa de purga con adaptador).

#### *Tensiómetros con manómetro de columna con líquidos densos*

El conjunto tubo - cerámica porosa es rematado con un tubo reserva unido a un manómetro de Hg. Generalmente estos modelos vienen calibrados en milibares. El conjunto está totalmente lleno de agua por purgado con jeringa de purga.

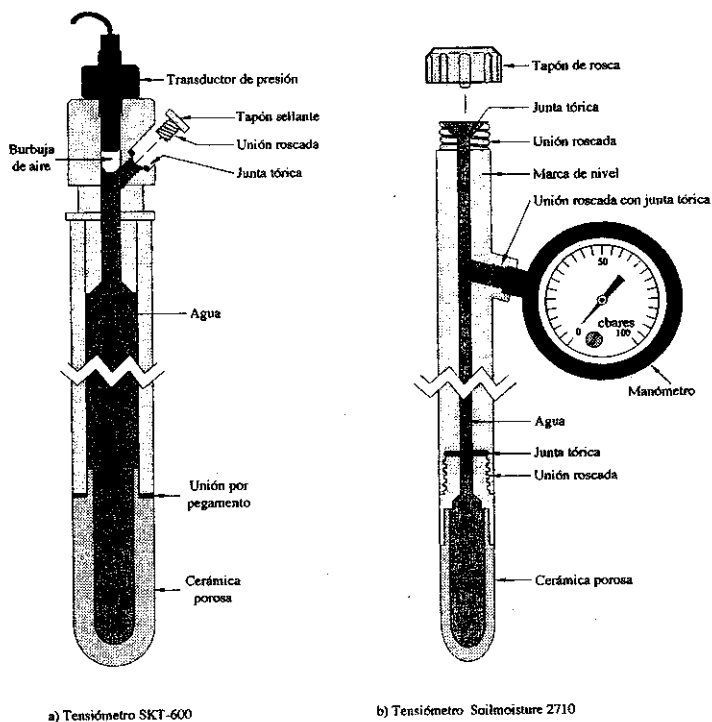


Fig. 1. Dibujo esquemático de dos de los modelos de tensiómetros instalados en la parcela de Arkaute, a) tensiómetro con transductor de presión, b) tensiómetro con manómetro convencional.

Cuando el suelo se seca se produce una depresión en el interior del sistema tensiométrico que se traduce en una subida del Hg.

También pueden utilizarse en los manómetros de columna otros fluidos siempre que:

- Tengan una densidad mayor que el agua.
- Sean inmiscibles en agua.
- Formen una interfase bien definida con el agua.
- Tengan un color que les diferencie del agua o admitan la adición de colorantes.

La precisión de la medida viene determinada por el desplazamiento ( $\Delta$ , en cm) de la columna barométrica por cm ca (centímetro de columna de agua) de variación de la tensión y es igual a:

$$\Delta = \frac{1}{D - 1}$$

siendo D la densidad del líquido barométrico.

La elección de fluido a emplear depende del rango de tensiones a medir y de la precisión que se quiera conseguir:

- Para estudiar la ZNS en un suelo natural el rango de tensiones va de 0 a 800 hPa (por limitaciones de la cerámica). Con el Hg se pueden llegar a tener errores en la medida de 5,5 hPa si no hay aire en el sistema tensiométrico. Las principales causas de error son: la longitud de la cerámica, la precisión que sea capaz de aplicar con la vista el investigador y la variación de la altura del nivel de Hg en el depósito cuando el Hg sube por los capilares.
- En el caso de los sustratos de cultivo, el rango de tensiones es sólo un 10 % de la escala de trabajo del manómetro de Hg. Por ej., Terés et al. (1994) utilizan tetrabromoetano (densidad = 2.9 Kg dm<sup>-3</sup>) coloreado en azul que proporciona una precisión de 0,52 cm por cada 0,98 hPa.

Sustancia	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
Agua	1000
Mercurio	13546
Tetrabromoetano	2900

En Arkaute se han instalado 5 tensiómetros con manómetro de Hg de la marca Nardeux modelo DTM 5000 (a 15, 35, 55, 75 y 95 cm de profundidad). En un principio la lectura, en hPa, se realizaba diariamente pero en la actualidad es semanal. Tiene la ventaja de que si su instalación y mantenimiento se realizan correctamente su funcionamiento es bueno y da bastante precisión.

Los principales problemas que se han observado son:

- El montaje y puesta a punto en el campo de todo el mecanismo (capilares, mastil, caña, etc) es más complejo que otros métodos.
- Obstrucción de capilares por estrangulamiento a la salida de la caña tensiométrica.
- Pequeños pájaros suelen posarse sobre el depósito que contiene el mercurio y utilizalo como atalaya de caza, lo que provoca movimientos en el depósito y la desconexión del circuito de capilares. Este problema puede solucionarse colocando una serie de varillas verticales que hagan de este lugar un sitio incómodo para posarse.
- Imposibilidad de una medición en continuo de los valores de tensión.

### *Tensiómetros con transductor de presión*

La salida de información del tensiómetro la da un transductor de presión que genera una señal eléctrica relacionada de un modo lineal con la presión existente dentro de la caña tensiométrica. Estas señales suelen ser almacenadas en un data-logger para su posterior estudio.

En Arkaute hay 5 tensiómetros con transductor de presión de la marca Skye, modelo SKT600, conectados a un datalogger Campbell CR10 que cada 10 minutos almacena los registros medidos por los transductores de presión.

Para la colocación en la parcela de los tensiómetros Skye se hizo un agujero nuevo y se aprovecharon los 4 agujeros de los tensiómetros Soilmoisture. Estos se quitaron en el mismo momento en que se pusieron los Skye. Como estos últimos tienen un diámetro exterior menor (2 mm) se rellenó el agujero con una gruesa pasta hecha con una mezcla de suelo y agua.

La denominación y profundidad de los tensiómetros con transductor de presión instalados en Arkaute son:

Denominación	Profundidad (cm)
skt1c	95
skt2c	75
skt3c	55
skt4c	35
skt5c	15

### *Resultados obtenidos con los tensiómetros con transductor de presión*

A diferencia de los otros dos modelos instalados en Arkaute, el diseño del SKT600 no permite el llenado completo de la caña con agua ya que incorpora un pequeño espacio entre el transductor de presión y el tornillo de llenado en el que queda una burbuja de aire (Figura 1, a).

Las medidas realizadas con los tensiómetros SKT600 presentan variaciones o ciclos diarios en todos los tensiómetros, siendo de mayor amplitud en los tensiómetros más superficiales, como se puede ver en la Figura 2.

Durante las horas centrales del día la lectura de la tensión descende en los tensiómetros más superficiales. Este hecho se interpretaría como un aumento del contenido en agua de esa franja del suelo. En los días nublados, los ciclos se amortiguan o casi desaparecen. Por la noche se observa la ausencia de variaciones cíclicas, se dan valores constantes o varían ligeramente. En los tensiómetros más profundos ocurre el mismo fenómeno aunque en sentido contrario y a una escala menor.

La morfología de estos ciclos es muy similar a la de los ciclos diarios de temperatura del aire y del suelo por lo que es de esperar que ambos fenómenos estén relacionados (Figura 3).

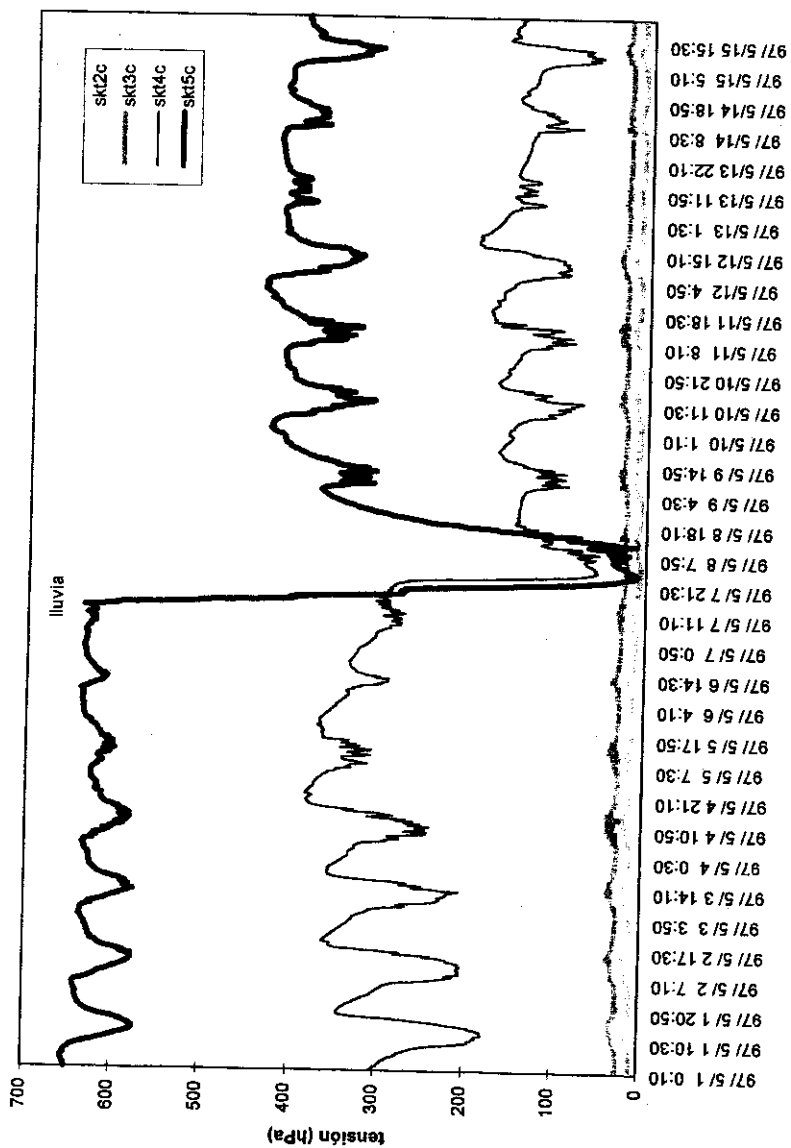


Fig. 2. Variaciones o ciclos diarios de los datos de tensión del suelo registrados en algunos de los tensiómetros instalados en la parcela de Arkautze

Por tal motivo se instalaron dos nuevos tensiómetros (a 35 y 15 cm de profundidad) y se procedió a forrar con aislante térmico la parte que sobresale del suelo. Los datos de estos tensiómetros forrados con aislante siguieron mostrando las mismas variaciones y ciclos que los tensiómetros situados a su misma profundidad y que estaban sin cubrir. Posteriormente se cubrieron estos mismos tensiómetros con tubo de PVC forrado de papel de aluminio para reflejar la radiación solar y que no aumentase tanto su temperatura y el resultado siguió siendo el mismo.

Marfà et al. (1992) realizan medias tensiométricas en sustratos de cultivo artificiales con plantas y observan el mismo fenómeno, aunque de una magnitud menor (30 mb), que interpretan como un cierre parcial de los estomas de las plantas por estrés al recibir radiación solar.

Para comprobar hasta que punto este fenómeno puede ser debido a la actividad de las plantas se procedió a cortar la vegetación que rodea a los tensiómetros skt4b y el skt5b (a 35 cm y 15 cm de profundidad respectivamente) en un radio de 50 cm para comparar sus lecturas con las de otros dos tensiómetros situados a las mismas profundidades pero rodeados de hierba. Los resultados siguieron siendo similares con o sin vegetación por lo que este fenómeno no está relacionado con la actividad de las plantas.

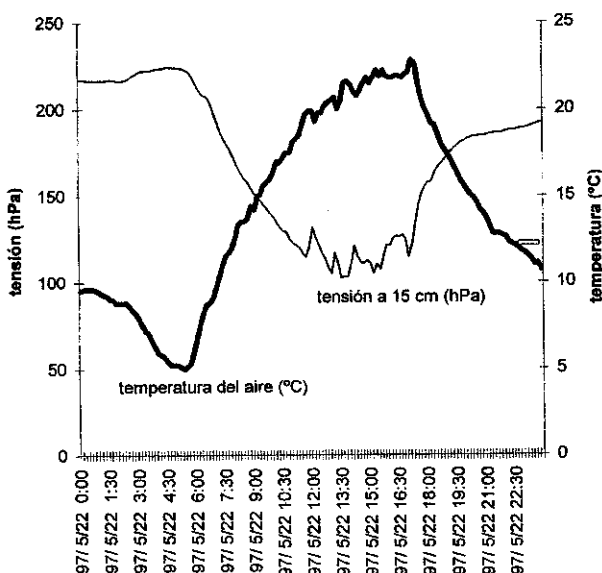


Fig. 3. Ciclo diario de temperatura del aire y de tensión del suelo medida a 15 cm. de profundidad en la parcela de Arkaute.

### Subidas del nivel freático

Normalmente, el suelo se encuentra en un estado de succión y los tensiómetros indican valores de presión negativos. Cuando un tensiómetro muestra valores de presión positivos, se debe a que el suelo se ha saturado, ha dejado de estar sometido a una succión y ha pasado a estar sometido a un presión que es la presión hidrostática ejercida por la columna de agua existente entre la profundidad a la que está instalado el tensiómetro y la profundidad del nivel freático. En esos momentos, el tensiómetro actúa como un piezómetro hidráulico cerrado y permite obtener una medida de la profundidad del nivel piezométrico.

En la parcela de Arkaute el nivel freático suele fluctuar entre 120 y 15 cm de profundidad. Tras las fuertes lluvias de finales de mayo y primeros de junio de 1997 los tensiómetros instalados en la parcela de Arkaute han funcionado como si fueran piezómetros hidráulicos, midiendo cada uno de ellos el valor de la columna de agua por encima de su cerámica (Figura 4).

Si el nivel freático fluctúa a profundidades de medida de los tensiómetros y no se dispone de un piezómetro con sonda de nivel en la parcela o se mide el nivel en un piezómetro alejado se puede utilizar el tensiómetro más profundo como un sensor de medida del nivel freático en la parcela en continuo.

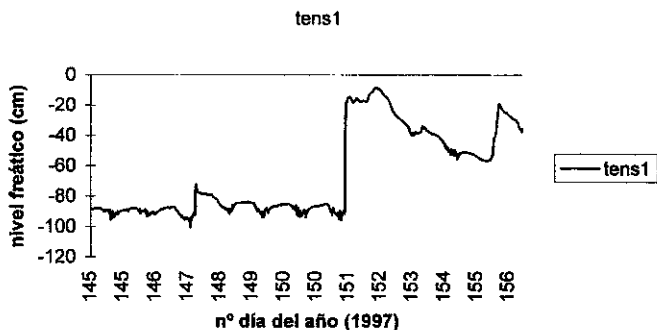


Fig. 4. Subida del nivel freático registrada por el tensiómetro más profundo de Arkaute. Los datos de carga hidráulica se han convertido en profundidad (en cm) del nivel freático. También se aprecia ciclicidad a este nivel.

### Ensayo en cámara climática con los tensiómetros Skye con transductor de presión

Para comprobar la afección de la temperatura en los tensiómetros Skye se han introducido 3 tensiómetros en una cámara climática de las utilizadas para calibración de sensores meteorológicos perteneciente al Laboratorio de Calibración de Sensores Meteorológicos del Servicio Vasco de Meteorología / Meteorología Euskal Zerbitzua. Las características de la cámara son:

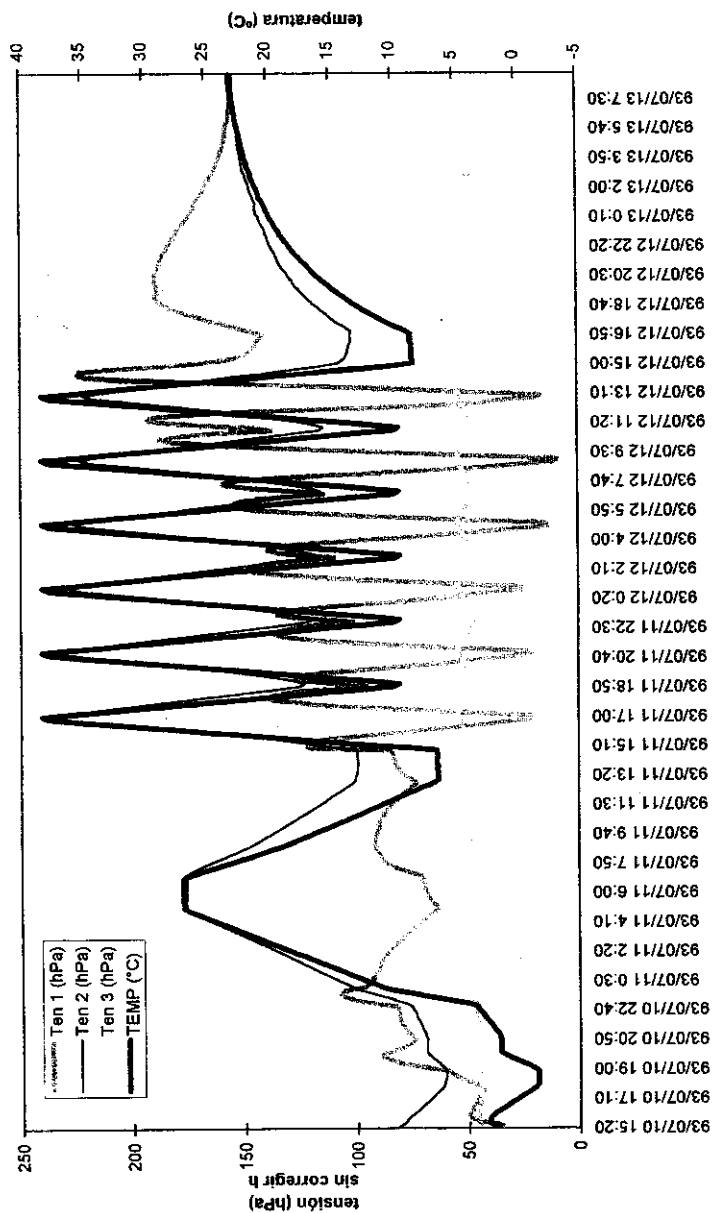


Fig. 5. Variaciones de las tensiones medidas en cámara climática con tensiómetros con transductor de presión. Ten 1: tensiómetro con la cerámica tapada (sistema cerrado). Ten 2: tensiómetro en arena. Ten 3: tensiómetro en agua.



---

Cámara climática de calibración HERAEUS VÖTSCH mod. HC 2033  
Rango de temperaturas: de -20 a + 15°C  
Rango de humedad: de 10 a 98% (entre 10 y 90°C)

---

En el interior de la cámara se instalaron los tensiómetros y un termómetro de precisión conectado a una meteodata de GEONICA.

Los tres tensiómetros de longitudes 110, 90, 70 cm se introdujeron en la cámara rellenos de agua desgasificada y desmineralizada excepto el espacio ocupado por la burbuja de aire, que no se puede eliminar (Figura 1, a). Al más largo se le selló la cerámica con plástico y latex con el objeto de que no saliera agua, es decir, que se comportase como un sistema cerrado. El tensiómetro de 90 cm se introdujo en 15 cm en arena fina húmeda y el de 70 cm se dejó sumergido en agua. Cerrada la cámara climática se programaron las variaciones de temperatura elegidas. Estas variaciones junto con los resultados se pueden ver en la Figura 5. Se puede apreciar como las variaciones de temperatura en el interior de la cámara provocan variaciones de la tensión de magnitudes similares a las que se observan en la parcela.

El tensiómetro sumergido en el agua es el que presenta una atenuación mayor del fenómeno, probablemente porque las variaciones de origen térmico del volumen de la burbuja de aire y de los materiales que componen el tensiómetro son compensadas en continuo por las transferencias de agua a través de la cerámica.

El tensiómetro instalado en la arena presenta una gran amplitud de valores (110 hPa) porque las variaciones térmicas del volumen de la burbuja de aire no son compensadas por la transferencia de agua a través de la cerámica. Se da cierta transferencia de agua del tensiómetro a la arena que se traduce en un aumento del contenido en humedad (muy bajo) del primero al sexto ciclo central de temperatura.

El tensiómetro cerrado presenta las mayores amplitudes de los valores (210hPa) aunque presentan variaciones de orden inverso a las anteriores, respondiendo a los cambios de temperatura de una manera similar a la respuesta de los tensiómetros más superficiales de la parcela de Arkaute.

Se puede considerar, en el caso del tensiómetro cerrado, que en la cámara climática hay dilataciones del sistema tensiométrico que contrarrestan la expansión de la burbuja de aire y que no son absorbidas por transferencias en la cerámica porosa al ser un sistema cerrado. En la parcela de Arkaute la explicación física sería similar, comportandose los tensiómetros más superficiales como un sistema cerrado o casi cerrado.

## CONCLUSIONES

La medida en continuo con tensiómetros es problemática en cuanto que en las medidas manométricas influyen más factores dentro y fuera de la caña

tensiométrica de los que en un principio se consideran (carga hidráulica de la columna de agua del tensiómetro y tensión del terreno). Estos factores distorsionan la medida haciendo que aparezcan variaciones en la humedad del suelo que no se corresponden con las observadas con el TDR, WCR o las observadas en cámara climática.

El factor principal que influye en la distorsión de la medida del tensiómetro es la variación de la temperatura del aire y del suelo que afecta a todos los componentes del tensiómetro (caña, agua, cerámica, burbujas de aire) produciendo dilataciones y contracciones de los mismos. Por tanto, la medida en continuo de la tensión debería implicar la medida de temperatura del suelo y del aire en continuo para poder aplicar la corrección correspondiente a los datos.

Si estos datos no se corrigen sólo se puede medir la tensión en condiciones de igual temperatura para que los datos así obtenidos puedan ser comparables.

Esta influencia de la temperatura es importante en el caso de que los tensiómetros se utilicen en un sistema de riego automático, puesto que factores ajenos a la humedad del suelo pueden provocar la ausencia de riegos en momentos necesarios o viceversa, provocando los consiguientes problemas.

Los datos obtenidos en la parcela de Arkaute son válidos en gran medida para su aplicación al método del plano de flujo nulo (Royer y Vachaud, 1974). El agua circula en el sentido de las variaciones crecientes de tensión entre dos tensiómetros de profundidad sucesiva y estas variaciones entre los cinco tensiómetros de Arkaute se controlan en continuo. Las variaciones de la tensión medida debidas a los cambios de temperatura en cada tensiómetro se producen de manera similar en los más superficiales. Esto hace que sus trayectorias no se crucen salvo cuando una lluvia provoca infiltración o una posterior evaporación del agua no infiltrada. Se puede determinar entonces qué pérdidas del stock de agua del suelo se producen por infiltración o por evaporación y desde qué momento.

#### AGRADECIMIENTOS

Esta investigación está siendo financiada por el Servicio Vasco de Meteorología / Meteorologi Euskal Zerbitzua del Gobierno Vasco y forma parte de un amplio estudio metodológico para la estimación de la evaporación e infiltración a partir de medidas efectuadas en el suelo y su aplicación a la Comunidad Autónoma Vasca.

Los autores y el SVM/MEZ quieren expresar su agradecimiento por la colaboración prestada al C.I.M.A. de Arkaute y al S.I.M.A. de Derio (Departamento de Agricultura y Pesca / Nekazaritza eta Arrantza Saila del Gobierno Vasco).

Las marcas comerciales o productos que se mencionan en el texto son citadas para información del lector pero no constituyen un aval o recomenda-

ción para su utilización por parte del Servicio Vasco de Meteorología, ni por parte de la Universidad del País Vasco.

REFERENCIAS

- BAVER, L.D., GARDNER, W.H. y GARDNER, W.R. (1972). Física de suelos. 4ª edición. Noriega editores. 529 pp.
- CANDELA, L., VARELA, M. (Eds.) (1993). La zona no saturada y la contaminación de las aguas subterráneas. Teoría, medición y modelos. CIMNE, Barcelona. 322 pp.
- GARDNER, W., ISRAELSEN, O.W., EDLEFSEN, N.E. y CONRAD, H. (1922). The capillary potential function and its relation to irrigation practice, *Phys. Rev.*, Ser. 2, 20, 196.
- GONZALO, J.M., ANTIGÜEDAD, I., LUENGO, C. y SANCHEZ-PEREZ, J.M. (1995). Estudio de la zona no saturada en una parcela experimental en Arkaute (Araba). Problemática y resultados preliminares. Avances en la investigación en zona no saturada, ed. J. M. Gonzalo e I. Antigüedad, Gobierno Vasco / Eusko Jaurlaritz, pp: 409-420.
- GORDEN, D.S., y VENEMAN, P.L.M. (1995). Soil water pressure measurements in subzero air temperatures. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59, pp: 1242-1243.
- MARFÀ, O. SERRANO, L. y MARTÍNEZ, A. (1992). Uso de tensiómetros con transductor de presión en sustratos. Actas de horticultura. I Jornadas de sustratos. Soc. Española de Ciencias Hortícolas. pp: 87-96
- NARDEUX, D.T.M. 5000. Manual de los tensiómetros.
- RICHARDS, L.A. y GARDNER, W. (1936). Tensiometers for measuring the capillary tension of soil water. *J. Amer. Soc. Agron.*, 28, pp: 352-358.
- ROYER, J. M. y VACHAUD, G. (1974). Determination directe de l'evapotranspiration et de l'infiltration par mesure des teneurs en eau et des succions. *Hydrological Sciences Bulletin*, XIX, 39, pp: 319-335.
- SCHMUGGE, T.J., JACKSON, T.J. y MCKIM (1980). Survey of methods for soil moisture determination. *Water Resources Research*. Vol. 16, 6, pp: 961-979.
- SKYE Instruments Ltd. SKT 600 Series. Tensiometers: Manual.
- TERÉS, V., ARRIETA, V. y ROZAS, M. (1994). Control de riego en sustratos de cultivo mediante el uso de tensiómetros. *Sustrai*, nº 35, pp.: 36-39.
- THONY, J.L., VACHAUD, G. y VAUCLIN, M. (1989). Analyse critique de mesures tensiométriques par capteur de pression portatif. *Bulletin du G.F.H.N.* nº 25, pp.: 11-34.
- WILSON, L.G., EVERETT, L.G. y CULLEN, S.J. (1995). Handbook of vadose zone characterization and monitoring. Ed. *Lewis Pub.* 752 pp.