

NOTA TECNICA

DETERMINACION DE LA EVAPOTRANSPIRACION CON LISIMETROS

Por: **Manuel Grillo F., I. A., M. Sc.**

I.— INTRODUCCION

En el presente momento aún no hay unanimidad en el mejor método para determinar la evapotranspiración. Los diferentes métodos usados actualmente, difieren en términos de precisión en períodos cortos y largos, conveniencia y costo; consecuentemente, Tanner (1967) manifiesta que la selección de un método cualquiera depende de su aplicación.

Se han efectuado numerosos intentos para obtener estimativos de evaporación a partir de información meteorológica, normalmente tomada con otros propósitos totalmente diferente. Esto ha sido hecho para hacer uso de información de años anteriores o, menos justificables, para hacer uso de redes meteorológicas existentes o estaciones adicionales empleando solamente instrumentos corrientes (Slattery and McIlroy, 1961). Básicamente todas estas fórmulas tratan de estimar evaporación de superficies húmedas, y su aplicación aún para superficies parcialmente secas conduciría a errores considerables. Además, todas éstas fórmulas presentan una considerable simplificación porque la evaporación depende de numerosos factores interrelacionados, algunos atmosféricos y otros dependientes de la superficie evaporante.

Los métodos micrometeorológicos usados con el propósito de determinar el flujo de vapor de agua hacia la atmósfera, son considerados actualmente como los más promisorios en el futuro para mediciones frecuentes de evapotranspiración. En este momento, sin embargo, existen numerosas dificultades teóricas y de instrumentos que deben ser solucionadas (van Bavel, 1961).

Determinaciones en el campo del contenido de humedad en el perfil natural de un suelo es históricamente el método más antiguo y es todavía ampliamente utilizado. Se le denomina "método gravi-

* Profesor Asociado Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Palmira.

métrico" cuando el cambio en contenido de humedad se determina en muestras de suelo tomadas del perfil ó "método del neutrón" cuando se utiliza un dispersador de neutrones para determinar los cambios de humedad *in situ* (Jensen, M. E., 1967). Sin embargo, este método necesita de la asunción de que el agua no se moverá hacia afuera ó dentro de la zona entre los períodos de toma de muestras. La validez de esta asunción, por otra parte, ha sido cuestionada repetidamente. En adición a la extracción de agua por las raíces de las plantas, la redistribución simultánea de agua durante largos períodos de drenajes o el movimiento ascendente de agua de debajo de la zona de máxima profundidad de muestreo puede conducir los cálculos de agotamiento de agua por evapotranspiración a serios errores (Davidson and Nielsen, 1966).

El estudio de cambio de humedad de un cuerpo de suelo confinado en lisímetros permanece como el único método practicable para medir evapotranspiración con una precisión adecuada (van Bavel, 1961).

II.— REQUISITOS PARA LISIMETROS

Los lisímetros pueden también producir fácilmente valores erróneos de evapotranspiración a menos que su construcción y operación llene ciertos requisitos. Slatyer and McIlroy (1961), expresan que un lisímetro diseñado apropiadamente, adecuadamente llenado y expuesto y operado correctamente, constituye indudablemente el más preciso y seguro medio al presente disponible para determinar la evapotranspiración verdadera de casi cualquier tipo de superficie de suelo. Los lisímetros deben ser, además, muestras representativas de la localidad si se desea que ellos suministren información de evapotranspiración útil.

Tanner (1967), Pelton (1961), van Bavel (1961) y otros autores han hecho énfasis en los principales factores que afectan la representatividad de las instalaciones del lisímetro. Estos factores serán estudiados en el siguiente orden:

A.— Factores del suelo

- 1.— Condiciones térmicas
- 2.— Relación de humedad
- 3.— Condiciones físicas

B.— Vegetación

- 1.— Altura
- 2.— Densidad

C.— Area

- 1.— Area efectiva de los lisímetros
- 2.— Forma de la superficie del lisímetro.

A.— Factores del suelo

1.— Condiciones Térmicas

El almacenamiento y transferencia de calor en las paredes del lisímetro no deben ser diferentes de aquel que ocurre en el suelo adyacente si se desean obtener los mejores resultados (Pelton, 1961). Aunque las propiedades térmicas del suelo en el lisímetro después del asentamiento del suelo no varían, algunas diferencias en el gradiente vertical de temperatura cambiará el flujo del calor del suelo (Pruitt and Angus, 1960). Por esta razón los investigadores antes citados no utilizaron un recipiente metálico, el cual conduce rápidamente algún calor a las capas más profundas, en el lisímetro de Davis.

Si la distribución de agua en el lisímetro difiere de aquella del suelo adyacente, la transferencia y almacenamiento de calor será afectada (Tanner, 1967). Sellers (1965) expresa que la tasa a la cual el calor fluye a través de una capa de suelo de una profundidad, Z, debajo de la superficie se determina por la siguiente ecuación:

$$G = - C \frac{\Delta T}{\Delta t} Z$$

donde

- G = Tasa de flujo de calor
 C = Capacidad calórica de la capa del suelo

$\Delta T / \Delta t$ = Tasa de cambio promedio de temperatura para la capa de suelo

Z = Grosor de la capa de suelo.

La capacidad calórica del suelo, C, la cual es una función de volumen de minerales, materia orgánica, aire y agua en el suelo, se expresa como sigue:

$$C = X_s C_s + X_w C_w \quad (\text{Cal. cm.}^{-3} \cdot \text{C}^{\circ -1}) \quad (2)$$

donde:

- X_s = Fracción de volumen de los sólidos en el suelo.
 C_s = Capacidad calórica de los sólidos.
 X_w = Fracción volumen del agua en el suelo.

La ecuación (2) muestra la dependencia de la capacidad calórica del suelo C, en el contenido de humedad del suelo.

Un error en el equilibrio térmico, sin embargo, disminuye cuando el lisímetro es cubierto con vegetación debido a que el balance de calor del suelo es disminuído en esta forma. La representatividad térmica de un lisímetro puede ser probada determinando el flujo del calor dentro y fuera del lisímetro (Tanner, 1967; Harrold, 1966).

2.— Relaciones de humedad.

Los lisímetros deberán ser construídos en forma tal que sus relaciones de humedad correspondan estrechamente a aquellas bajo condiciones naturales (Pelton, 1961). Esta afecta el agua aprovechable por las plantas, la aireación del suelo y el régimen térmico (Tanner, 1967).

Por la naturaleza de su construcción, un lisímetro impide el flujo vertical y distribución natural del agua. Esto es ilustrado en la Figura No. 1, la cual se refiere solamente a la condición inicial después de una lluvia ó riego. En ese momento se presenta un plano de presión cero en el fondo y por lo tanto el perfil de tensión de humedad como también el de contenido de humedad son diferentes a aquellos que se presentan en el suelo bajo condiciones naturales. Esto, a su vez, puede tener dos efectos:

Primero, más agua puede ser aprovechable para evapotranspiración durante un prolongado período seco, y; segundo, el desarrollo del sistema radicular de los cultivos que crecen en el lisímetro puede diferir de aquel que crece en el área adyacente natural. Esta dificultad puede corregirse haciendo un lisímetro profundo, de manera tal que ellas se extienden bien debajo de la zona radicular. Obviamente, es mucho más difícil construir un lisímetro lo suficientemente profundo. Una situación mucho más básica es mantener la tensión de la humedad en el fondo de un lisímetro lo suficiente profundo para permitir un desarrollo normal del sistema radicular. Esto requiere un soporte poroso rígido para el cual la "presión de escape de aire" es superior que la máxima tensión que se desea establecer. La tensión puede, entonces, mantenerse igual ó aproximadamente igual a aquella que se presente en el perfil de suelo adyacente a la misma profundidad. Este principio se ha reconocido desde hace algún tiempo pero todavía no es bien comprendido ó aplicado (van Bavel, 1961).

Los lisímetros monolíticos, construídos por medio del "entubamiento" de un bloque de suelo *in situ*, han sido propuestos para asegurar que la distribución del agua en el lisímetro sea representativa (Tanner, 1967). Los Lisímetros provistos con instrumentos de succión deben ser tan profundos como la máxima profundidad del sistema radicular. Cuando no se use el sistema de control de succión, la profundidad debe permitir que la "zona de humedecimiento capilar" se encuentre debajo de la máxima profundidad de enraizamiento (Tanner, 1967; van Bavel, 1961; Pelton, 1961).

3.— Condiciones físicas.

Idealmente, los lisímetros deben contener un perfil no disturbado y representativo. Esto es importante cuando se adelantan estudios de evapotranspiración real. En un perfil disturbado, la transmisión de humedad, la retención de humedad, y la distribución radicular es muy probable que sea diferente del perfil original y puede no ser representativo (van Bavel, 1961; Harrold, 1966). Cuando se estudia

la evapotranspiración máxima, la constitución física del suelo es de menor importancia.

B.— Vegetación

1.— Altura

Es importante mantener la vegetación en el lisímetro a nivel con la que se encuentra en el campo que lo rodea. Una diferencia en la altura media de aún 2 ó 3 cm. podría inducir a resultados erróneos. La pérdida de agua será excesiva si la vegetación en el lisímetro es más alta que afuera. Esta diferencia de altura influirá en el coeficiente de transferencia, D_w , en la ecuación (3) obtenida de consideraciones de transferencia turbulenta (Sellars, 1965).

$$LE = 0.622 PL \frac{D_w}{p} \left(\frac{e}{s} \right) \quad (3)$$

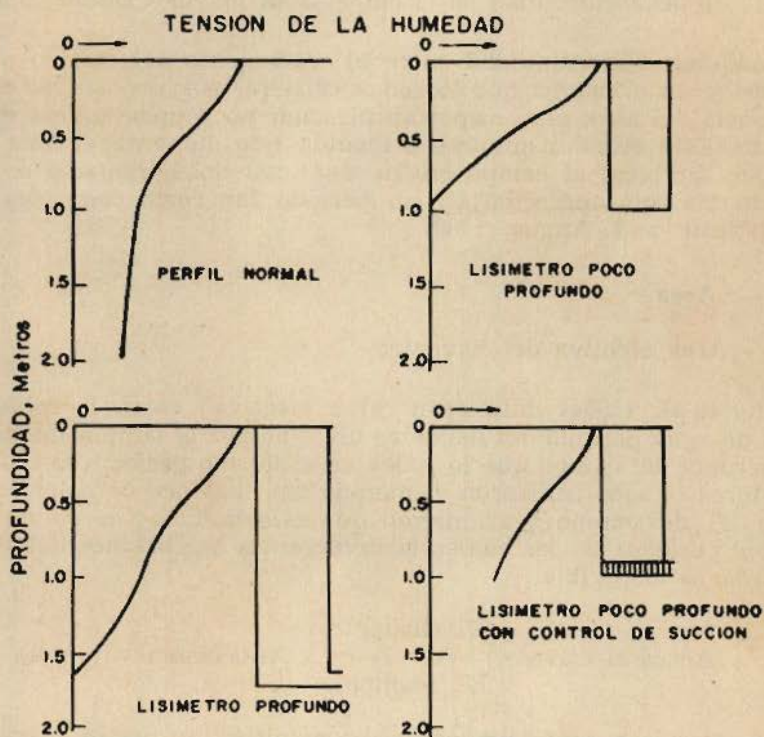


FIG 1- RELACION IDEALIZADA DE LA SUCCION DEL AGUA DEL SUELO vs. LA PROFUNDIDAD EN LISIMETROS (Van Bavel, 1961)

donde: LE = Evapotranspiración en Ly/min
 P = Densidad del aire
 L = Calor latente de evaporización
 Dw = Coeficiente de transferencia
 p = Presión total
 es = Presión de vapor a saturación
 e = Presión de vapor

El coeficiente de transferencia, Dw, puede aumentar un 50% con un incremento de la longitud de regosidad de aproximadamente 0.2 cm. (césped guadañado, 3 cm. de altura) a 0.2 cm. (césped guadañado, 2,5 cm. de altura), (Sellers, 1965).

2.— Densidad.

La discontinuidad de la vegetación dentro y afuera del lisímetro son las mayores fuentes de error. Si la cubierta vegetal es relativamente homogénea espacialmente, tal como con una cubierta de césped ó forraje, el área del lisímetro puede ser menor que cuando la escala de desuniformidad de la cubierta es mayor (Tanner, 1967).

Cualquier discontinuidad entre el crecimiento del cultivo en el lisímetro y en el campo que lo rodea causará, por un cambio en la turbulencia del aire, una evapotranspiración no representativa en el lisímetro. Este error disminuye a medida que aumenta el área del lisímetro; también, el campo en su totalidad debe irrigarse ó cortarse en una sola operación en un período tan corto como sea posible (Pruitt and Angus, 1960).

C.— Area

1.— Area efectiva del lisímetro

King et al. (1954) definieron "área efectiva" como la relación: lámina de agua perdida del lisímetro dividida por la lámina media de agua perdida del campo que lo rodea en el mismo período de tiempo. Los autores citados utilizaron el método del "balance de calor" para estimar ET del campo y asumieron que este método es válido durante los períodos en los cuales la divergencia del balance del calor horizontal es negligible.

$$\text{Área efectiva} = \frac{\text{ET (lisímetro)}}{\text{ET (campo)}} \times \text{Area lisímetro} \quad (4)$$

Los mismos autores citados arriba manifiestan que se presentaron cambios en "Área Efectiva" después de un corte de heno. Parte de la reducción probablemente fué debida al follaje cortado que colgaba de los bordes del lisímetro.

Para obtener la ET verdadera, Tanner (1967) sugiere dividir el volumen medio de agua perdida por el área efectiva del lisímetro.

2.— Forma del lisímetro.

Para lisímetros pequeños, la superficie es de forma circular y cuando son usados con cultivos de hileras que suministran poca cobertura, tales como maíz, soya, etc. la constante de proporcionalidad entre ET del lisímetro y del campo es dudosa debido a que la cantidad de suelo expuesto por hilera de plantas no es representativo y porque el área de muestreo no es adecuada. Hay algunas ventajas en lisímetros rectangulares para obtener muestras uniformes de hileras y relaciones representativas del área del suelo expuesto a área de vegetación.

Por otra parte, Pruitt y Angus (1960), presentan argumentos en los cuales favorece las formas circulares en los lisímetros. Ellos explican que hay una advección en pequeña escala proveniente del área de las paredes del lisímetro. Este efecto puede reducirse haciendo pequeña la relación de perímetro a área del lisímetro. Áreas circulares dan los valores más pequeños de esta relación. Puede también reducirse este efecto haciendo que el área del anillo formado por el recipiente y paredes de retención, más el espacio que los separa, es tan pequeña como sea posible comparada con el área encerrada. Otra vez más, un diseño circular es una ventaja debido a que las paredes del lisímetro y las de retención pueden ser de un grosor mínimo para una resistente dada del material.

III.— PRINCIPIOS DE LISIMETRIA

En lisímetros se usa la ecuación del balance hidrológico (4) para determinar la cantidad de agua perdida por evapotranspiración. Esta es expresada como sigue.

$$E = P - (RO + UD + \Delta W)$$

donde:

E = Evapotranspiración

P = Precipitación

RO = Escorrentía

UD = Drenaje interno

ΔW = Cambio en el contenido de agua del suelo

Midiendo o eliminando todas menos una de estas variables, la restante puede determinarse por diferencia (Slatyer and McIlroy 1961). Este método es en muchas formas el más simple, en principio al menos, debido a que los componentes de la ecuación (4), con excepción de E, pueden determinarse separada y directamente.

En lisímetros, RO y UD puede ser eliminados ó determinados por medición volumétrica. La forma ideal para determinar W es utilizando lisímetros "pesados". En el caso de determinación de ETp donde los lisímetros son frecuentemente irrigados, no debe permitirse que W llegue a ser muy grande, y lisímetros de tanque ó "no pesados" pueden ser útiles para períodos mayores de una semana.

IV. TIPOS DE LISIMETROS

Para el propósito de este trabajo los tipos de lisímetros han sido divididos en dos grupos principales: a) Lisímetros de tanque ó "no pesados", y; b) Lisímetros "pesados"; los cuales a su vez están subdivididos en diferentes diseños.

A.— Lisímetros de tanque

- 1.— Lisímetros de percolación
- 2.— Tabla de agua constante
- 3.— Tanques plásticos.

B.— Lisímetros "pesados"

- 1.— De balanza mecánica
- 2.— Flotantes
- 3.— Hidráulicos.

A.— Lisímetros de tanque

Realmente estos son una forma especializada de lisímetros en los cuales un solo recipiente es colocado directamente en el suelo, y tanto el suelo del lisímetro como el del campo adyacente están constantemente provistos de humedad, ya sea por riego por aspersión ó manteniendo un "nivel freático" alto. La ET es determinada midiendo la cantidad de agua suministrada (más aquella proveniente de lluvia) y substrayendo la cantidad percolada. Este procedimiento asume que existe el mismo estado de humedad a la iniciación y fin de cada período (ejemplo: $W = O$) lo cual generalmente es verdad debido a que el suelo se mantiene casi constantemente cerca de la Capacidad de Campo.

La cantidad medida por estas unidades es llamada comunmente evapotranspiración potencial (ETp). Si el propósito de las determinaciones de ET es obtener solamente valores de ETp para períodos de una semana ó más, los lisímetros de percolación pueden ser usados para proveer una información confiable (Harrold, 1966).

1.— Lisímetros de percolación

Mathers (1954) describió el lisímetro de percolación en Seabrook. La Figura No. 2 muestra algunos detalles de esta instalación. Mathers mismo sugiere que la cantidad de percolación a través del tanque, como un resultado del riego diario, no exceda el 10% de la cantidad aplicada en la superficie del tanque. Este límite es necesario para eliminar la percolación excesiva y la saturación del suelo.

Gilbert y van Bavel (1954) describe una instalación simplificada de campo para la determinación de ETp. Los detalles de construcción se muestran en la Figura N° 3. El tanque es hecho de un tam-

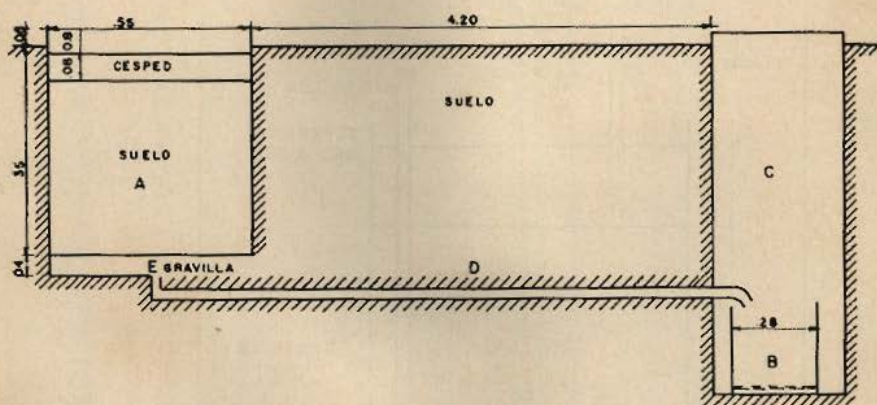


FIG 2 - DIAGRAMA DEL EVAPOTRANSPIROMETRO MODIFICADO (MATHERS, 1954)

- A - TANQUE EVAPOTRANSPIROMETRO DE CAMPO
- B - TANQUE DE PERCOLACION
- C - CILINDRO CON CUBIERTA PARA PROTEGER EL TANQUE DE PERCOLACION
- D - TUBO DE PERCOLACION
- E - SALIDA PARA PERCOLACION

bor de acero para gasolina (55 gl.) pintado en el interior y exterior con pintura asfáltica. Está provisto de un tamiz grueso de cobre nueve pulgadas encima del fondo, dejando un espacio para coleccionar el percolado. El borde del tambor sobresale dos pulgadas de la superficie del suelo. Un tubo de acero de una pulgada de diámetro llega hasta el fondo del tambor, suministrando una apertura a través de la cual el nivel del agua se puede medir con una reglilla. La precisión de la medición es de 0.05 (0.025 cm.). Las lecturas del nivel de agua en fondo se hacen diariamente. El agua es aplicada por aspersión en la superficie en una cantidad suficiente para causar percolación cuando un tensiómetro colocado a una profundidad de dos pulgadas indique una tensión de humedad mayor de 100 cms. de agua. Cuando el agua llega a un nivel muy alto en fondo, es extraída por medio de una bomba y esta cantidad es medida. El cálculo de la pérdida por evapotranspiración es como sigue: Para un período de tiempo, adicione la precipitación al agua aplicada por riego. Reste de esta la cantidad total de agua que ha percolado a través del bloque de suelo. Esta es la pérdida por evapotranspiración si el contenido de humedad del bloque de suelo es el mismo al principio y fin del período.

McIlvay y Angus (1963) proyectaron un diseño similar al descrito por Gilbert y van Bavel pero con algunas modificaciones. Una, es el piso con pendiente en el fondo del tambor para coleccionar el percolante, y la segunda, es una entrada de aire que previene que se aplique succión en la base de la columna del suelo cuando se extrae el percolante con bomba.

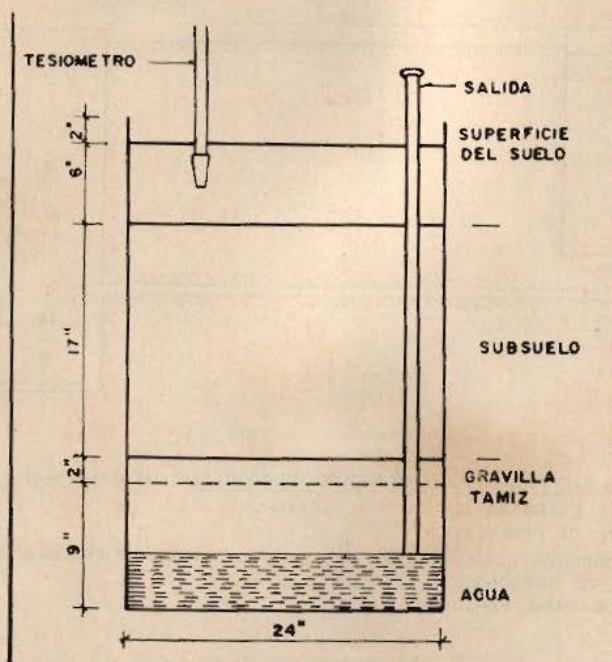


FIG. 3- DISEÑO DE EVAPOTRANSPIROMETRO SENCILLO

(Gilbert y van Bavel, 1954)

2.— Lisímetros de nivel freático constante

Este ha sido ampliamente usado para determinaciones de ETp. El agua requerida para mantener el nivel freático a una profundidad dada es medida para dar ETp. Estos lisímetros no son confiables a menos que sean usados para representar zonas adyacentes con un nivel freático a la misma profundidad (Tanner, 1967).

En la Figura No. 4 se muestran los detalles del diseño descrito por Thornth Waite et. al (1946). El área del tanque es de 4 metros cuadrados y 70 cm. de profundidad para asegurar espacio adecuado para el desarrollo apropiado de las raíces. El agua entra al tanque solamente del tanque de suministro y de la precipitación, mientras deja el tanque por percolación ó evapotranspiración. Lo mismo que en lisímetros de percolación, en períodos de tiempo largos el cambio del contenido de humedad (W) viene a ser negligible. ET se obtiene como la diferencia entre el agua aplicada y la de percolación. Mathers (1954) encontró que la profundidad del nivel freático más satisfactoria fue de 35 cm.

Tanner (1957) previene que si la tabla de agua es controlada a una profundidad que permita una distribución radicular razonablemente normal, el movimiento del agua del nivel freático a la zona radicular es frecuentemente inadecuada para satisfacer la demanda de agua.

3.— Tanques de plástico

Dylla y Tovey (1962) describen tanques de plástico usado en el estudio general para determinar la acumulación de los recursos de agua en la hoya hidrográfica del Río Humboldt.

La mayoría de los tanques son de 10 pies cuadrados y 7.5 pies de profundidad. Se utilizó un plástico negro de polivinilo para recubrir el fondo y paredes del foso cavado en el suelo. Se distribuyó una capa de 10" de grosor encima y debajo de un tubo plástico de 2" de diámetro perforado, en el fondo del tanque para facilitar el manejo del nivel freático. El tanque fue después llenado con el mismo material que se escavó. Un sistema de válvula flotante se utilizó para regular el nivel de la tabla de agua. La ecuación del balance hidrológico se utilizó para evaluar ET.

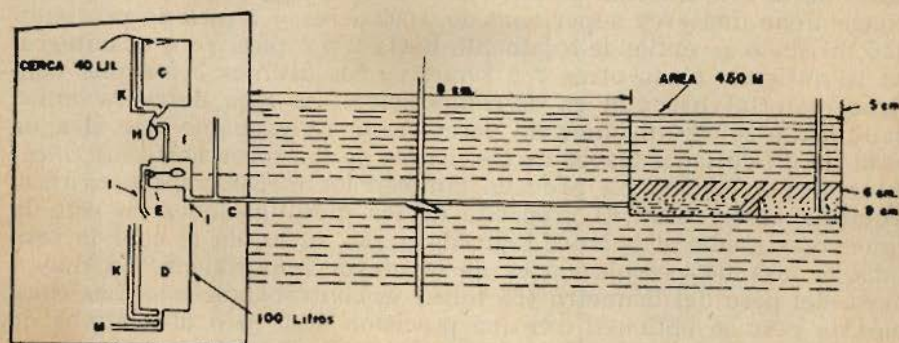


FIG 4— ESQUEMA DEL LISIMETRO DE THORNTHWAITTE (1946)

- A- Tanque evaporimétrico
- B- Tubería de suministro de agua
- C- Tanque de suministro de agua
- D- Tanque de percolación
- E- Mecanismo regular del nivel del agua
- F- Tubo de escape de aire
- G- M: Tapones
- H- Trampa de sedimentos
- I- Tubo plástico
- K- Medidor de nivel de vidrio
- L- Indicador de nivel de agua

B.— Lisímetros “pesados”

El recipiente del lisímetro se coloca dentro de un segundo tanque que retiene las paredes del suelo que lo rodea de manera tal que el recipiente interior está libre para ser pesado. Existen diferentes tipos de lisímetros “pesados” que se diferencian no solamente en el modo de tomar el peso sino también en ciertos aspectos de construcción que afectan la precisión (Tanner, 1967).

Hasta ahora el mejor método es pesar el bloque de suelo con recipiente y todo, lo cual necesita un recipiente exterior y una balanza o sistema hidráulico de funcionamiento apropiado. Aunque esto puede agregar un costo y complejidad adicional en la instalación del lisímetro, el hecho es de que se cuente con un lisímetro “pesado” en cada región climática ó agrícola (Slatyer y McIlroy, 1961).

1.— Lisímetros de Balanza Mecánica.

Los tipos de lisímetros “pesados” más comunes son los que utilizan una balanza mecánica para medir la pérdida de peso.

Kohnke *et al.* (1940) describe las principales características del lisímetro monolítico construido en 1937 en Coshoston, Ohio. Los detalles de la construcción se pueden ver en la Figura N° 5. Este lisímetro tiene una área superficial de 0.002 acres y 8 pies de profundidad; el suelo se extiende solamente hasta 2 ó 3 pies; roca desintegrada se extiende hasta otros 2 ó 3 pies; y los últimos 3 ó 4 pies contiene material parental en descomposición. La roca descansa inmediatamente sobre un tamiz de percolación. Es probable que el agua pase sin dificultad a través de las fisuras de las rocas hasta los colectores de percolación. Se proveen también los mecanismos para recolectar la escorrentía. El propósito de las investigaciones en este lisímetro es medir el balance hidrológico del suelo, en el cual la cantidad y tasa de percolación es de la mayor importancia. La mayor parte del peso del lisímetro (65 tons.) es contrabalanceado. Los cambios de peso se obtienen con una precisión de 5 lb ó una lámina de 0.01 pulgada (0,025 cm.). El peso del registro automáticamente cada 10 minutos.

El lisímetro de Davis descrito por Pruitt y Angus (1960) es un ejemplo de excelente de un lisímetro de gran tamaño, con área mínima entre recipiente interior y exterior, control de la succión de la humedad, control de temperatura en el fondo del recipiente y aire seco a su alrededor. El recipiente es de un diámetro de 20 pies y una profundidad de 3 pies, el área anular es el 3% del área del suelo del lisímetro, y la balanza registra continuamente el peso con una presión de 0.001 pulgada (2 lb.).

Ritchie y Burnet (1968) describen un lisímetro de presión para estudios de consumo de agua en cultivos de hilera. Las principales diseño para evaluar cada hora el consumo en agua en cultivos de hilera y bajo condiciones secas. El recipiente del suelo es de 6 pies de largo y 4 pies de ancho. El área anular es de 4.5% de la área de la

superficie. El drenaje se logra por medio de nueve (9) platos de succión de 15 cms. cuadrados y espaciados proporcionalmente en el fondo del recipiente y el sistema tiene una presión máxima de -75 mb a la superficie del plato. El recipiente del suelo descansa en una balanza disponible en el Comercio y de una capacidad de 6.363 Kg. Los componentes básicos del sistema de la escala de piso se muestran en la Figura No. 8. Se utiliza una célula de carga para trasladar el peso del lisímetro a términos de unidades de voltaje. La sensibilidad del sistema es de una lámina de 0.02 mm. de agua.

Arthur (1955) describe un pequeño lisímetro "pesado". Consiste en un tambor de acero colocado en el suelo de manera que su borde superior se encuentra a nivel con la superficie del suelo. En el tambor hay un recipiente de 3 pies de diámetro y 1 pie y 9 pulgadas de profundo, el cual se llena con el suelo del campo adyacente. El peso total del suelo y su recipiente es de 600 Kg. a la capacidad de campo, y la pérdida de peso debido a la evapotranspiración puede llegar a ser un 15% de este peso. El recipiente está soportado por el brazo de la balanza la cual se proyecta a través de un lado del recipiente y del tambor externo y el diseño permite que el contrapeso cuelgue en un pequeño tambor adyacente al tambor principal. El pivote central del brazo está en una columna que sale del centro del tambor principal. Para operar el sistema, se agregan pesos al plato de la balanza de manera que el brazo sea balanceado y en una escala se lee cero sobre un indicador fijo al tambor. Es posible hacer lecturas hasta una precisión de 5 gm., lo cual corresponde a 75 gm. en el recipiente y representa una sensibilidad de 0.1 mm. de lámina de agua.

2.— Lisímetros flotantes.

Una de las alternativas es cambiar la balanza por un sistema hidráulico. El recipiente del lisímetro está flotando en el líquido, y los cambios en peso se miden de los cambios en flotación.

Aunque este tipo no puede competir en precisión con el uso de balanza de primera clase, los lisímetros flotantes presentan varias características ventajosas. Primero, ellos son más simples y por lo tanto menos costosos y exigen mejor mantenimiento. Segundo, se pueden adaptar fácilmente a un registro remoto y continuo. Tercero, previniendo las filtraciones de los recipientes interior y exterior, y sellando el espacio anular entre ellos, presentan una muy pequeña posibilidad de descalibración (Slatyer y McIlroy, 1961).

La Figura No. 5 muestra el lisímetro flotante descrito por King, Tanner y Suomi (1954). El suelo se coloca en un tanque que flota en agua dentro de un tanque que hace las veces de estanque. Una pérdida ó aumento de peso en el tanque flotante se traducirá en un cambio en el nivel del agua en el estanque en el pozo de aquietamiento. Este nivel se registra por un registrador de nivel de agua sensible que se muestra en la Figura No. 6. Su diseño permite que los cambios en peso se registren en su equivalente de lámina de agua pérdida en el tanque con una precisión de ± 0.025 mm. Las cámaras de aire y lastre se necesitan para mantener estable la flotación.

McMillan y Paul (1961) usaron un lisímetro flotante similar en diseño al descrito anteriormente pero en vez de agua usaron un líquido pesado para flotación. El líquido pesado (cloruro de zinc con

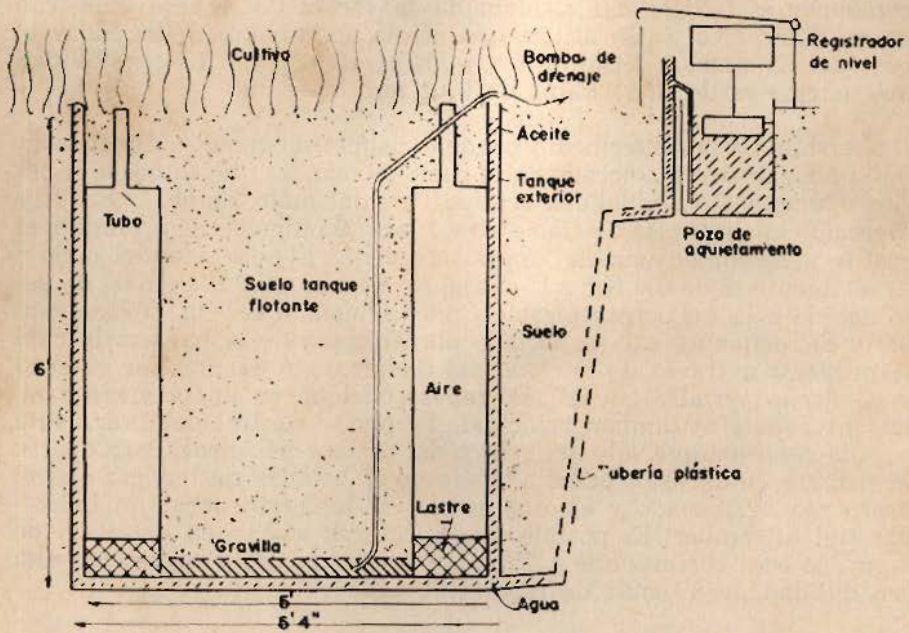


Fig 5 - DIAGRAMA DEL LISIMETRO FLOTANTE

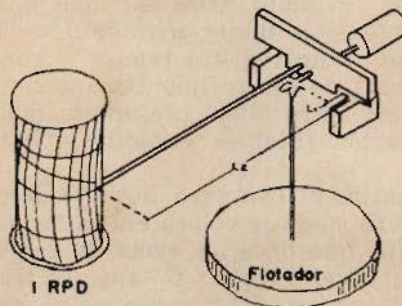


FIG.6 - REGISTRADOR 10:1, la longitud de los brazos L_2 y L_1 son tales que $L_2/L_1 = 10(A_s + A_w)A_s$ (King, et al 1954)

una gravedad específica de 1.9) elimina la necesidad de cámaras de aire y simplifica las características estructurales. Sin embargo King, Mukammal y Tanner (1965) encontraron problemas usando el cloruro de zinc debido a la expansión y contracción de este líquido, con los cambios diurnos de temperatura.

Aslyng y Kritenson (1961) describe los detalles de un lisímetro semi-flotante. La instalación consiste de dos tanques uno dentro del otro y separado por 1 cm. El espacio anular que los separa se llena con agua hasta 35 cms. debajo del borde superior. Esta agua soporta parte del peso del tanque. El tanque interior está fijo al centro del tanque exterior por medio de un brazo en el cual este descansa. El otro extremo del brazo lleva un peso que contrabalancea el resto del peso del tanque. El recipiente interior tiene un diámetro interior de 159.6 cm. La profundidad es de 90 cm. a 105 cm. El área del espacio anular es el 9% del área total del lisímetro. El sistema de registro del cambio en peso del recipiente con el suelo es similar a los ya explicados atrás. El sistema da una precisión de 0.1 mm.

3.— Lisímetros hidráulicos

Estos son colocados sobre una célula de carga hidráulica y los cambios en peso se determinan por los cambios de presión en la célula de carga.

Glover y Forsgate (1962) usaron bolsas flexibles llenadas con agua sobre las cuales descansaban grandes recipientes con suelo. Véase Figura No. 7. Los cambios en altura en la columna de agua indica los cambios en presión en el sistema. Ellos usaron tanques de acero de 8 pies de largo; 4 pies de ancho y 4 pies de profundidad y soportadas por tres bolsas interconectadas de caucho y con agua, cada una de 9 pies de largo y 18 pulgadas de ancho.

Hanks y Shawcroft (1965) describen un lisímetro hidráulico simple para determinar los cambios en peso en un tanque con suelo. La Figura No. 8 muestra los detalles. El peso total del lisímetro es distribuido sobre dos bloques de madera los cuales se asientan en dos bolsas de caucho. La presión del líquido en las bolsas es igual al peso total del recipiente y su contenido, dividido por el área de los dos bloques de madera. Los dos bloques de madera se utilizan para mantener un área constante sobre la cual se distribuye el peso. La presión es medida en la altura del líquido en el tubo activo. El tubo "tonto" es usado para la corrección de temperatura. Para evitar la descalibración del sistema se utilizan bolsas tan planas como sea posible y también soportando los extremos libres de la bolsa en una caja de madera. Para evitar la deformación eventual de estas bolsas que de otra manera se causaría con las variaciones de presión.

Este tipo de lisímetros se acomoda perfectamente a las necesidades actuales sobre investigaciones preliminares sobre consumo de agua que con urgencia se deben adelantar en nuestro medio.

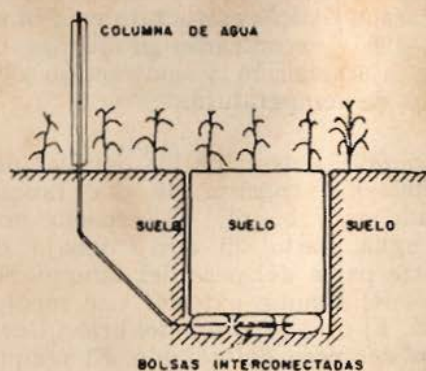


FIG 7 - LISIMETROS HIDRAULICOS DE GLOVER Y FORSGATE (1962)

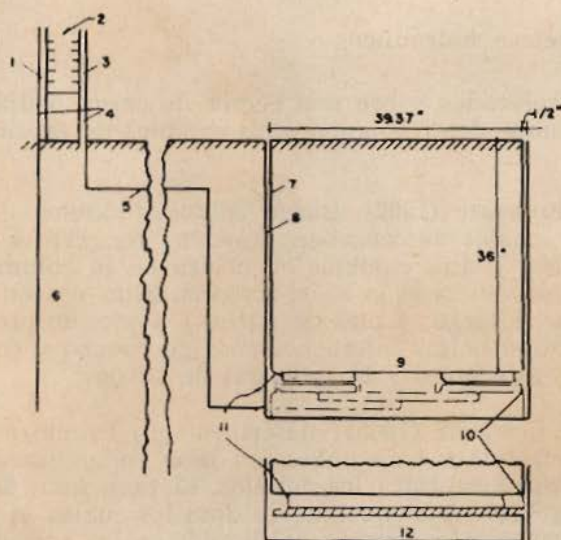


FIG 8 - LISIMETROS HIDRAULICOS DE HANKS Y SHANCROFT (1965)

- 1 y 3 - TUBOS DE VIDRIO
- 2 - ESCALA
- 4 - TUBOS DE COBRE 1/4"
- 5 - TUBO ACTIVO
- 6 - TUBO "TONTO"
- 7 - TANQUE INTERIOR
- 8 - TANQUE EXTERIOR
- 9 - VISTA FRONTAL
- 10 - BOLSAS DE CAUCHO
- 11 - BLOQUES DE MADERA
- 12 - VISTA LATERAL

V.— REFERENCIAS

1. ARTHUR, I. P.— 1955. An evaporimeter. *Aust. J. Agri. Res.* 6:707-712.
2. ASLYNG, H. C. and KRISTENSEN, K. J.— 1961. Water balance recorder. *Amer. Soc. Civil Eng. Drain. Div.* 87: 15-21.
3. DAVIDSON, J. M. and D. R. NIELSEN.— 1966. Soil profile sampling (Abstract). *Evapotranspiration and its role in water resources management. Proc. Amer. Soc. of Agri. Eng. Chicago.* 27 p.
4. DYLLA, A. S. and R. TOVEY.— 1962. Plastic membrane tanks. *Agri. Eng.* 43:584-585.
6. GILBERT, M. J. and C. H. M. van BAVEL.— 1955. A simple field installation for measuring maximum evapotranspiration. *Trans. Amer. Geophys. Union.* 35: 937-942.
7. GLOVER, J. and J. A. FORSGATE.— 1962. Measurements of evapotranspiration from large tanks. *Nature* 195:1330.
8. HANKS, R. J. and R. W. SCHAWCROFT.— 1965. An economical lysimeter for evapotranspiration studies. *Agtron. J.* 57:634-636.
9. HARROLD, L. L.— 1966. Measuring evapotranspiration by lysimetry. *Evapotranspiration and its role in water resources management, Proc. Amer. Soc. Agr. Eng., Chicago,* 28-33 p.
10. JENSEN, M. E.— 1967. Evaluating irrigation efficiency. *J. of the Irrigation and Drainage Division, ASCE vrt.* 94, IR 1. 1967. pp. 83-97.
11. KING, K. M., C. B. TANNER and V. E. SUOMI.— 1954. A floating lysimeter and its evaporation recorder. *Trans. Amer. Geophys. Union* 37:738-742.
12. KING, K. M., E. I. MUKAMMAL and V. TURNER.— 1965. Errors involved in using zinc chloride solution in floating lysimeters. *Water Resour. Res.* 1:207-217.
13. KONHNKE, H., F. R. DREIBELBIS and J. M. DAVIDSON.— 1940. A survey and discussion of lysimeters and a bibliography on their construction and performance. *USDA Misc. Publ.* 372.
14. MCILROY, I. C. and D. E. ANGUS.— 1963. The Aspendale multiple weighed lysimeter installation. *CSIRO, Div. Meteorol. Physics. Tech. Pap. No. 4* Melbourne, Australia.
15. MCMILLAN, W. D. and H. A. PAUL.— 1961. Floating lysimeter. *Agri. Eng.* 42:498-499.
16. MATHER, J. R.— 1955. The measurement of potential evapotranspiration. *Johns Hopkins Univ. Lab. of Climatolgy, Number 1.*

17. PELTON, W. L.— 1961. The use of lysimetric methos to measure evapotranspiration. Second Canadian Hydrology Sympisoum. Toronto, 106-134 p.
18. PRUITT, W. O. and D. E. ANGUS.— 1970. Large weigching lysimeters for measuring evapotranspiration. Trans. Amor. Soc. Agr. Egn. 3:13-18.
19. RITCHIE, J. T. and E. BURNETT.— 1968. A precision weighing lysimeter for row crop water use studies. Agron. J. 60: 545-549.
20. SLATYER, R. O. and I. C. McIlroy.— 1961. Practical micrometereology. CSIRO Plant Ind. Div., Camberra (UNESCO) 328 p.
21. TANNER, C. B.— 1967. Measurement of evapotranspiration. In: Hagan, R. M. (edit) Irrigation of agricultural land. Agronomy Monograph No. 11, 534-574 p.
22. THORNTHWITE, C. W. et al.— 1946. Report of the committee on evaporation and transpiration, 1945-1946. Trans. Amer. Geophys. Union. 27: 721-723.
23. VAN BEVEL, C. H. M.— 1961. Lysimetric measurements of evapotranspiration rates in the Easter United States. Agron. 25: 138-141.