

EL EVAPOTRANSPIROMETRO DE THORNTIWAITE ¹

POR JUAN JACINTO BURGOS ²

LA EVAPORACIÓN Y LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

La precipitación es el elemento meteórico que desde más antiguo se valora con exactitud satisfactoria, y los registros que de ella se tienen, permiten conocer su distribución en el espacio y en el tiempo, por sobre casi toda la superficie de la tierra.

La evaporación, en cambio, o sea el retorno del agua a la atmósfera en forma de vapor, es, aun hoy, la fase del ciclo hidrometeorológico más desconocida y difícil de valorar.

Muchos problemas de la climatología geográfica y, en especial, de la agrometeorología seguirán sin una solución adecuada, hasta que no se disponga de una medida convenientemente exacta y extendida de la evaporación. Así, la efectividad de la precipitación y el complejo fenómeno de la sequía sólo recibirán un tratamiento racional, cuando se disponga de una medida exacta y comparable de este elemento meteorológico que, aunque no perceptible por los sentidos, es tan real como la precipitación.

El paso del agua a la atmósfera, del estado líquido al estado de vapor, ocurre en la naturaleza desde las superficies de agua expuestas a ella libremente o desde el suelo, ya sea como evaporación directa de su superficie o por medio de la transpiración de las plantas que sustenta. En esta última forma, las plantas facilitan el traspaso a la atmósfera del agua que contiene el suelo en la zona de sus raíces.

¹ Trabajo presentado al Primer Congreso Sudamericano de Investigadores en Materias Agronómicas, en el Instituto Fitotécnico y Semillero Nacional «La Estanzuela» de la República Oriental del Uruguay el 13 de noviembre de 1949.

² Profesor adjunto asistente de la Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas y Jefe de la División de Agrometeorología del Servicio Meteorológico Nacional.

La intensidad de la evaporación, desde las superficies libres de agua, depende de un conjunto de factores entre los que se destacan: la temperatura de la superficie del agua; el contenido y la calidad de las sales que tiene en disolución; la magnitud del gradiente vertical negativo de humedad, de la masa de aire que está en contacto con la superficie del agua (disminución de la concentración del vapor de agua con la altura); y la temperatura y estado de turbulencia de la masa de aire referida.

La evapotranspiración, como llama Thornthwaite (1946) a la suma de la evaporación directa del suelo y la transpiración de las plantas, está regulada como la anteriormente referida, por la temperatura, la salinidad del suelo, el contenido de vapor de agua de la masa de aire que está en contacto con su superficie y su turbulencia; pero en este caso, se halla además supeditada al contenido del agua del suelo. Es así como, a igualdad de las condiciones externas determinantes de la evapotranspiración, ésta será mayor o menor, según que el contenido de agua del suelo sea mayor o menor.

Cabe pues distinguir en este caso, como lo ha propuesto el autor citado (1946-1948), la evapotranspiración real y la potencial. La primera es la cantidad de vapor de agua que evapora el suelo y transpiran las plantas realmente, en un intervalo de tiempo dado, y la segunda, la que se registraría en ese mismo intervalo si el suelo estuviese saturado de humedad.

De tal modo, en las regiones áridas o desérticas, donde la evapotranspiración real es nula por falta de humedad en el suelo, la potencial es elevada; mientras que en las regiones húmedas, cuanto mayor es la humedad disponible, tanto más su evapotranspiración real tiende a igualar la potencial.

LOS INSTRUMENTOS PARA MEDIR LA EVAPORACIÓN Y LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

La importancia de la medición de este elemento fué notada por los primeros climatólogos y agroclimatólogos, que se empeñaron por sistematizar la ciencia de la atmósfera en sí, y la de la vinculación de ésta con la vida de las plantas. De allí que, desde entonces hasta la fecha, hayan sido muy numerosos los intentos de crear instrumental adecuado para su medida directa, o de proporcionar sistemas teóricos para su valoración indirecta.

El instrumental de medición de la evaporación y de la evapotranspiración puede agruparse en dos categorías. En la primera se incluyen todos aquellos instrumentos en los que se expone a la evaporación una masa de agua, ya sea libremente, como en el tanque de evaporación norteamericano, o protegida de la radiación, como en el evaporímetro de balanza de Wild.

Corresponde incluir también en este grupo, aquellos instrumentos en los cuales la evaporación del agua se produce a través de una delgada capa de material poroso, una de cuyas caras está en contacto directo con el agua. Este tipo de evaporímetros se desarrolló para evitar el error de ventilación de los que exponen el agua directamente, como consecuencia de la intercepción creciente del flujo de aire por los bordes del recipiente, al descender el nivel del agua con la evaporación. La eliminación de este error de los evaporímetros de superficie libre de agua originó también la creación de un tipo de ellos que, mediante el suministro de agua regulado por el consumo, el nivel del recipiente evaporante permanece invariable.

Además del evaporímetro de Wild y del tanque de evaporación norteamericano, ya citados, corresponde incluir en este grupo, por lo tanto, el evaporímetro de cilindro de porcelana de Mistcherlich; los de esfera de porcelana de Von dem Borne y de Livingsston; el de Piche, que ha sido muy usado en varios servicios meteorológicos; el de Eredia y otros.

Los datos suministrados por estos instrumentos tienden a dar una magnitud, sólo aproximada, de la evaporación de las superficies libres de agua dulce en la naturaleza, y, con menos exactitud aún, de la evapotranspiración potencial. La principal causa de error de estos instrumentos proviene de la singularidad de la marcha de la temperatura en la masa de agua expuesta a la evaporación, ya que ésta varía según la situación geográfica, la exposición (directa o en abrigo meteorológico), el tipo y la inercia térmica de la estructura del instrumento, la ventilación y, por otra parte, con el área de la superficie de agua expuesta a la evaporación. Muchos autores se han ocupado de analizar la índole y magnitud del error de estos evaporímetros; de ellos citaremos a Schmidt (1933 y O. M. I. n.º 14, 1933, pág. 12), quien comprobó, mediante observaciones termoeléctricas tomadas directamente en el agua de los evaporímetros, que diferencias de 2°C en la temperatura del agua, pueden significar diferencias superiores al 100 % en la evaporación registrada.

De estos instrumentos, el tipo más utilizado y generalizado en

nuestro país, es el tanque de evaporación norteamericano, cuyos valores pueden corregirse según la temperatura; pero creemos que, aun así, sus datos resultan muy exagerados y poco comparables, si se los quiere referir como valores de la evapotranspiración potencial. Hemos obtenido datos muy dispares, aun en su comparación relativa, al calcular la evapotranspiración potencial de algunas localidades que poseen promedios corregidos de la evaporación del tanque referido, según el detalle siguiente:

| Localidad | Evapotranspiración potencial anual calculada | Evaporación según el registro con el tanque norteamericano |
|----------------------|--|--|
| Bariloche..... | 594 mm | 1168 mm |
| Barrow..... | 735 | 1205 |
| Cipolletti..... | 743 | 1095 |
| Capital Federal..... | 814 | 949 |
| Pilar..... | 829 | 1553 |
| General Pico..... | 830 | 1570 |
| Colonia Yerua..... | 945 | 1278 |

En el segundo grupo de instrumentos, se incluyen aquellos que sirven para estimar exclusivamente la evapotranspiración real y potencial.

El agua se evapora desde una masa de tierra, con plantas cultivadas o vegetación, en los instrumentos para medir la evapotranspiración real. También en estos instrumentos quizás las primeras tentativas se remonten al siglo pasado y comienzos del presente y ya en el Servicio Agrometeorológico de Rusia a comienzos del presente se había generalizado el uso del evaporímetro (evapotranspirómetro) de Rykatcheff (O. M. I. Zürich, 1926, n° 256, pág. 23). Este instrumento consistía de una caja de latón de doble pared, que contenía una masa de suelo y plantas cultivadas (cereales) y que, mediante pesadas sucesivas y el control de la precipitación, se podía valorar el agua perdida por la evaporación del suelo y la transpiración de las plantas, es decir, que con él se pretendía medir la evapotranspiración real.

Algunos constructores de instrumentos desarrollaron un tipo registrador, cuyo conjunto evaporante es un pequeño recipiente con tierra y plantas y cuyas variaciones de peso indican variaciones del contenido de humedad del suelo y, por lo tanto, las pérdidas ocasionadas por la evapotranspiración real.

Estos evapotranspirómetros no se han generalizado como instrumentos de observación corriente, a pesar de que en varios países de Europa y América, principalmente, se han construido diversos pro-

totipos de los mismos. Sus datos resultan dudosos por las condiciones artificiales de su disposición y manejo, y su tamaño reducido.

Los lisímetros son, hasta el presente, los dispositivos mejor logrados para medir la evapotranspiración real. En esencia, son bloques de suelo de aproximadamente 1 m de profundidad por un largo y ancho variables, que convenientemente aislados del resto del suelo, permiten deducir la evapotranspiración real por medio de las variaciones de su peso, o del cálculo del agua escurrida e infiltrada. Estas instalaciones no han permitido ser extendidas en red, por su costo relativamente elevado y el cuidado que requiere su manejo, y aunque sólo algunos institutos de investigación agrícola las poseen, se pueden considerar satisfactorios los valores con ellas deducidos.

EL EVAPOTRANSPIRÓMETRO DE THORNTHWAITTE

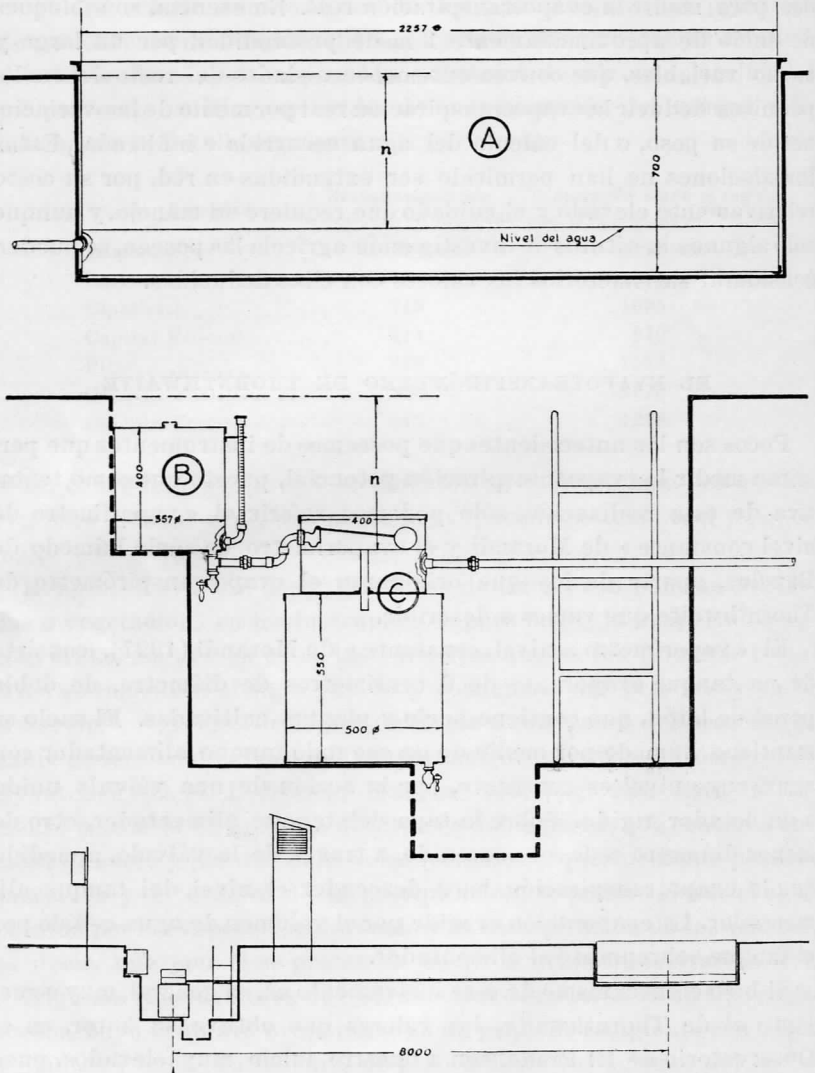
Pocos son los antecedentes que poseemos de instrumentos que permiten medir la evapotranspiración potencial, puesto que como tentativa de esta realización, sólo podemos referir el « vaporímetro de nivel constante » de Morandi y el evaporímetro de suelo húmedo de Ramdas, aparte de los que originaron el evapotranspirómetro de Thornthwaite que vamos a describir.

El « vaporímetro a nivel constante » de Morandi (1927), consiste de un tanque evaporante de 6 centímetros de diámetro, de doble pared de latón, que contiene suelo y plantas cultivadas. El suelo se mantiene húmedo por medio de un segundo tanque alimentador con agua, cuyo nivel es constante, por la acción de una válvula unida a un flotador rígido. Sobre la tapa del tanque alimentador, otro de menor diámetro cede su contenido, a través de la válvula, a medida que la evapotranspiración hace descender el nivel del tanque alimentador. La evaporación se mide por el volumen de agua cedido por el tanque sobrepuesto al alimentador.

Si bien el mecanismo de este instrumento es, en general, muy semejante al de Thornthwaite, los valores que obtuvo su autor, en el Observatorio de El Prado, son a nuestro juicio muy elevados, pues superan ampliamente los de los mismos evaporímetros de agua, como puede deducirse de los datos siguientes (Morandi, 1927):

| | |
|---|------------|
| Evaporímetro de Piche..... | 1.172.5 mm |
| Vaporímetro Morandi de superficie líquida..... | 1.670.0 |
| Vaporímetro Morandi de superficie con cultivos..... | 2.142.0 |

La causa de estas diferencias las atribuimos, en parte, a la pequeñez de la superficie evaporante y a la sobresaturación de la superficie del suelo.



Evapotranspirómetro de Thornthwaite

El evaporímetro de suelo húmedo de Ramdas (1947) consiste en una columna de suelo cuya parte inferior está convenientemente sumergida en agua, que lo mantiene húmedo por la capilaridad. Dia-

riamente se repone el agua consumida por la evaporación, la cual constituye una medida de la evapotranspiración potencial. Creemos que, en este instrumento, la variación del nivel de agua que origina la evaporación, puede constituir una causa de error en sus datos.

Los antecedentes que sirvieron a Thornthwaite para proponer su evapotranspirómetro fueron los trabajos realizados por los técnicos en riego Young y Blaney (1942), en el sur de California. Estos autores se propusieron conocer la cantidad de agua consumida por las plantas cultivadas, en suelos subirrigados, con la napa freática a distintas profundidades. Lee realizó trabajos similares en Independencia (California) y Debler (Thornthwaite, 1946 y 1948), en Los Griegos en Nueva Méjico.

La primera instalación del evapotranspirómetro de Thornthwaite se realizó en Chapingo, Méjico, en 1946 (Contreras Arias, 1948) sobre un diseño de su autor, simplificando el equipo de los autores citados anteriormente, hasta lo compatible con un funcionamiento satisfactorio.

Posteriormente, el laboratorio de Climatología de la Universidad John Hopkins instaló uno en Seabrook. N. Jersey, en 1947 (Lab. of Climat. The J. Hopkins University, Report n° 4 y n° 5) y al año siguiente un equipo de 6 unidades con diferentes cultivos. En Canadá, la Ontario Research Foundation instaló, en Toronto, un equipo de cuatro unidades en 1947 y actualmente se ha proyectado una red de varias estaciones en todo ese país. Otros países se han interesado también por este instrumento y han proyectado su instalación, como Israel y Trinidad.

En la Argentina, están en construcción 10 de estos equipos actualmente, que serán instalados en la red de estaciones agrometeorológicas del Servicio Meteorológico Nacional.

El equipo diseñado en este caso es prácticamente el mismo proyectado por Thornthwaite, con algunas ligeras modificaciones de detalle, que no implican una modificación de su funcionamiento.

El plano del instrumento que se presenta en esta nota, contiene las especificaciones técnicas que se han juzgado convenientes, con el objeto de facilitar su construcción a cualquier servicio que se encontrara interesado en él ¹.

Su conjunto consta de tres secciones principales: las de evapotranspiración, de alimentación y de regulación del nivel freático. La pri-

¹ Agradezco al ingeniero agrónomo Modesto C. Santos la colaboración prestada en el diseño del instrumento.

mera de ellas, A, es un tanque cilíndrico de 4 m² de sección transversal y 70 cm de altura. Se instala enterrado en el suelo, pero sus bordes, sobresalidos 5 cm de la superficie del mismo. A 10 cm de altura de su fondo tiene una abertura que, por medio de un caño galvanizado de 1" de diámetro interior y 6,70 m de longitud, lo conecta al tanque regulador del nivel freático. Esta abertura tiene una malla de alambre, que impide el paso de los materiales del suelo del tanque de evaporación al que controla el nivel freático.

La sección B, de alimentación, consta de un tanque cilíndrico de 35,7 cm de diámetro por 40 cm de altura. Un visor de nivel exterior de vidrio graduado permite conocer el nivel del agua del tanque y su descenso en intervalos de tiempo dados. Las graduaciones se han calibrado de modo que correspondan a milímetros de agua evapotranspirada, en una superficie de 4 m² de suelo.

En el fondo de este tanque se encuentra la abertura que, por medio de un caño acodado, lo comunica al tanque regulador del nivel freático. Se ha previsto una llave para desagotar el tanque alimentador en casos necesarios.

En la parte superior, hay una pequeña abertura cerrada con una tapa de ajuste ligero, que permite llenar el tanque con agua periódicamente.

La sección C, que controla el nivel freático del tanque evaporante, está ubicada entre las dos descriptas anteriormente. Consta de un tanque cilíndrico de 40 cm de diámetro y 25 cm de altura, perpendicular a cuya base, y en su centro, se ha ubicado un caño de desagüe que vierte cualquier exceso de agua que supere su altura, en un recipiente de escurrimiento. En la parte lateral superior entra el caño que proviene del tanque alimentador, en cuyo extremo, una válvula accionada por un flotador, cierra su abertura cuando la superficie de agua está rasante con la extremidad libre del caño de desagüe. En la parte lateral inferior, y opuesta a la de entrada de agua, una abertura permite el paso del agua al tanque evaporante por el caño correspondiente. Este tanque lleva una tapa de ajuste ligero. De este modo se consigue, por un sistema de vasos comunicantes, que el nivel freático del tanque evaporante permanezca constante a 50 cm de profundidad.

Cualquier exceso de agua que provenga, ya sea de un mal funcionamiento de la válvula de entrada, o de la lluvia recogida por el tanque evaporante, escurrirá al recipiente previsto para el caso, y su cantidad deberá tenerse en cuenta al efectuar las observaciones.

La instalación de este instrumento requiere efectuar dos excavaciones, una para el tanque evaporante y otra para el de alimentación y el de control freático. Como es un instrumento que no puede ser contrastado con un instrumento patrón, se aconseja disponer de varias unidades por estación para obtener un valor promedio con sus observaciones.

En este caso, conviene prever una sola excavación para las secciones de control freático y de alimentación de todas las unidades.

El tanque evaporante debe rellenarse con grava hasta 12 cm, a una altura superior a la de la entrada del agua, y sobre ella, la tierra hasta la altura del suelo del lugar. Sobre el suelo así preparado debe sembrarse una gramínea perenne, como el «pasto salado» (*Distichlis spicata* (L.) Greene), aunque para experiencias especiales puede modificarse esta cubierta herbácea con plantas cultivadas o aun dejar la superficie sin vegetación. La operación del relleno con tierra deberá hacerse tratando de mantener la misma estratificación que ésta tenía en el suelo natural.

Obvio será señalar que el lugar a elegir para una instalación de esta naturaleza debe ser despejado de obstáculos que impidan la libre circulación del viento y la recepción directa de la radiación solar. Para su instalación típica, el césped formado en el tanque evaporante y sus alrededores debe mantenerse a una altura moderada que no supere los 20 cm.

Se considera indispensable, como complemento de esta instalación, disponer de un pluviómetro en el mismo lugar y es aconsejable una estación termométrica.

El funcionamiento de este instrumento es por demás simple, la napa freática que se mantiene en forma constante a 50 cm de profundidad permite que el suelo, sobre ella apoyado, reciba constantemente humedad por capilaridad y mantenga las capas superiores húmedas, muy próximas a su humedad equivalente o capacidad de campo.

Para determinar la evapotranspiración potencial E durante el intervalo de tiempo fijado, será necesario hacer la lectura del agua consumida C , por medio del visor del tanque de alimentación; medir la precipitación ocurrida P , si la hubiese; y el agua de derrame D , en el tanque de desagote, si éste la contuviera. La fórmula siguiente nos dará, así, el valor de la evapotranspiración potencial:

$$E = C + P - D$$

Todos estos valores deben expresarse en milímetros.

BIBLIOGRAFIA

- CONTRERAS ARIAS, ALFONSO. 1948. *La medida de la evapotranspiración como base para la solución de problemas agrícolas importantes.* — *Revista Chapingo*, n° 21, Mayo 1948. Chapingo. Méjico.
- LABORATORY OF CLIMATOLOGY. THE JOHNS HOPKINS UNIVERSITY. 1948. *Micro-meteorology of the surface layer of the atmosphere.* — *Interim Report*, n° 4. Seabrook, New Jersey; *Ibidem*, n° 5.
- MORANDI, LUIS. 1927. *Apuntes para un curso de Meteorología*, Montevideo, Impr. Nacional. 1927, 317 pp., con ilustr.
- RAMDAS, L. A. 1947. *Soil moisture and evaporation investigations.* — *Paper contributed to the seventeenth annual meeting of the Research Committee of the Central Board of Irrigation*, July 1947, 11, pp. 3, figs., 7 Tabl. (Poona).
- SCHMIDT, E. 1933. *Untersuchungen an Verdunstungsmessern.* *Meteorologische Zeitschrift*. Bd. 50 (8) : 288-293 Wien.
- SECRETARIAT DE L'ORGANISATION METEOROLOGIQUE INTERNATIONALE. 1933. *Commission de Météorologie Agricole, Procès verbaux des séances de Munich, 19-31 setiembre 1932.* Ed. Keminken Zoon N. V. Utrecht.
- STATENS METEOROLOGISK-HYDROGRAFISKA ANSTALT. 1927. *Organisation Meteorologique Internationale. Commission de Météorologie Agricole. Procès verbaux de la 2eme réunion*, Zürich 1926. Ed. P. A. Norstedt and Söner. Stockholm.
- TORNTHWAITE, C. WARREN. 1948. *An Approach toward a rational classification of climate.* Reprinted from : *The Geographical Review*, XXXVIII (1) ; 55-94, 13 figs., 4 Tabl.
- 1946. *El agua en la Agricultura.* — *Irrigación en México*, 27 (2) ; 19-43, 15 fig.
- YOUNG, A. A. y BLANEY, H. F. 1942. *Use of water by native vegetation.* — *California Dep. of Public Works, Division of Resources*, Bull n° 50, 1942.

Resumen. — El autor hace una reseña sobre la importancia del conocimiento de la evaporación y de la evapotranspiración en los problemas de la climatología física, geográfica y agrícola.

Analiza los distintos tipos de instrumentos proyectados para medir ambos elementos del ciclo hidrometeorológico con su crítica de errores correspondientes.

Describe el evapotranspirómetro de Thornthwaite, en el modelo adoptado para la red de estaciones agrometeorológicas del Servicio Meteorológico Nacional, con los detalles de su instalación y manejo.

Acompaña un plano de construcción con especificaciones técnicas para facilitar su adopción por otros Servicios.

Summary. — The author makes a review about the importance of the knowledge of the evaporation and evapotranspiration in problems of the physical, geographical and agricultural climatology.

He analysis the different types of instruments projected to measure both elements of the hydrometeorological cycle with its criticism of corresponding errors.

He describes the Thornthwaite's evapotranspirometer according to the model adopted for the *network of Agrometeorological Stations of the National Meteorological Service*, with details of its installation and handling.

A design with technical specifications is shown to make easy its adoption for other Services.