

Universidad de Chile  
Departamento de Ingeniería Civil  
Proyecto MECESUP UCH 0303  
Modernización e Integración Transversal de la Enseñanza de  
Pregrado en Ciencias de la Tierra

Área Temática: Hidrología  
Módulo: Balance Hídrico en Régimen Impermanente.  
Determinación de la Evaporación en una  
Tormenta Real.  
Desarrollado por: Mauricio Cartes / Ximena Vargas  
E-mail: [mcartes@ing.uchile.cl](mailto:mcartes@ing.uchile.cl) / [xvargas@ing.uchile.cl](mailto:xvargas@ing.uchile.cl)

Versión Semestre Otoño 2007

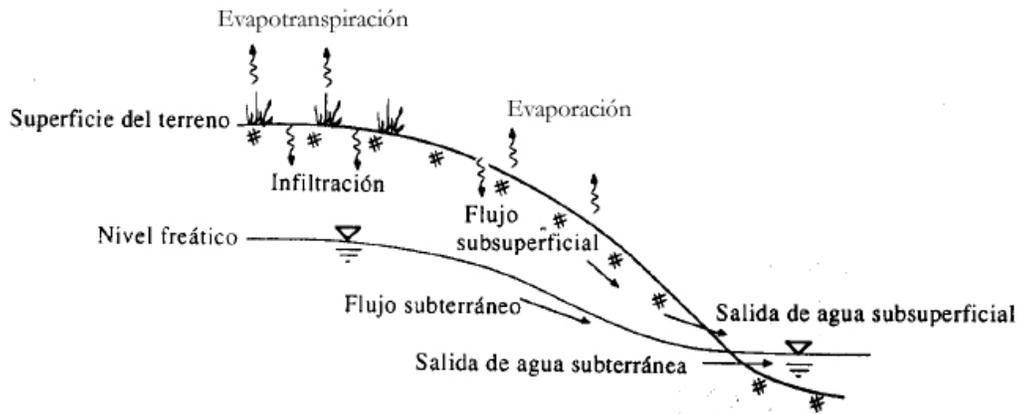
# Índice

<b><u>1</u></b>	<b><u>ANTECEDENTES</u></b>	<b><u>2</u></b>
1.1	Evaporación y Transpiración	2
1.2	Métodos para Determinar la Evaporación	3
<b><u>2</u></b>	<b><u>EXPERIENCIA PRÁCTICA</u></b>	<b><u>9</u></b>
2.1	Objetivos de la Experiencia	9
2.2	Materiales	9
2.3	Metodología para Determinar los Diferentes Volúmenes de Agua	10
<b><u>3</u></b>	<b><u>GUIA DE TRABAJO</u></b>	<b><u>11</u></b>
<b><u>4</u></b>	<b><u>BIBLIOGRAFÍA</u></b>	<b><u>12</u></b>

# 1 Antecedentes

El agua superficial es la que se almacena o se encuentra fluyendo sobre la superficie de la tierra. El sistema de agua superficial interactúa continuamente con los sistemas de agua atmosférica y subsuperficial, lo cual se traduce en una dificultosa tarea a la hora de realizar su determinación puesto que los procesos varían en el tiempo y en el espacio.

En una tormenta, una proporción importante de la precipitación contribuye al almacenamiento sub-superficial, el cual se produce por la infiltración del agua en el suelo. La proporción restante de la precipitación que no se almacena superficialmente ni se infiltra genera la escorrentía directa. Esta dinámica se desarrolla a una escala de tiempo definida por la duración de la precipitación, es decir, desde algunos minutos hasta días. Sin embargo, hay otros procesos que se desarrollan en paralelo a una escala mucho mayor de tiempo como son la evapotranspiración y flujos subsuperficiales.



**Fig. 1.1: Zonas del agua subsuperficial y procesos que se desarrollan en ellas.**

## 1.1 Evaporación y Transpiración

### 1.1.1 Evaporación

La evaporación se define como "el proceso físico por el cual un sólido o líquido pasa a estar en fase gaseosa". La evaporación del agua a la atmósfera ocurre a partir de superficies de agua libre como océanos, lagos y ríos, de zonas pantanosas, del suelo, y de la vegetación húmeda. La cantidad de evaporación depende fundamentalmente de dos factores: disponibilidad de energía (radiación solar), y capacidad de la atmósfera de recibir humedad (poder evaporante de la atmósfera).

Los principales factores que influyen en la evaporación son los siguientes:

- Radiación solar.
- Temperatura del aire.
- Humedad atmosférica.
- Viento.
- Superficie de la masa de agua.
- Salinidad.

### **1.1.2 Transpiración**

La mayor parte del agua evaporada por las plantas es agua que ha pasado a través de la planta, absorbida por las raíces, pasando por los tejidos vasculares y saliendo por las hojas, a través de los estomas, aunque a veces también ocurre a través de la cutícula. Esta evaporación de agua a través de las plantas es la denominada transpiración. El agua absorbida por las raíces cumple las siguientes funciones: incorporación a su estructura, transporte de alimentos y eliminación de sales.

La transpiración está controlada por variables que dependen de algunos aspectos dinámicos de la actividad de la planta como estado de crecimiento y especie vegetal, factores meteorológicos y propiedades del suelo.

### **1.1.3 Evapotranspiración**

La evaporación directa a partir el suelo (Es) y la transpiración (T) tienen lugar de forma simultánea en la naturaleza, y no es fácil distinguir cuánto vapor de agua es producido por cada uno de los dos procesos. Por ello, se usa el término Evapotranspiración (ET) que engloba el proceso de transferencia de agua a la atmósfera tanto por acción de las plantas como por evaporación directa a partir del suelo.

## **1.2 Métodos para Determinar la Evaporación**

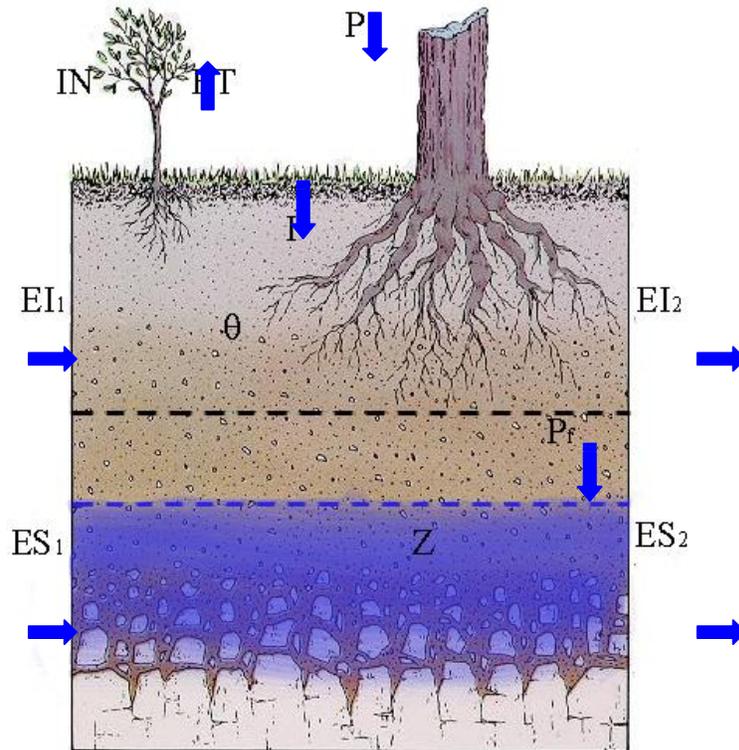
Si se considera que la componente vegetal en un determinado suelo es nula, la medida de ET sólo estará compuesta por la Es del suelo. Los métodos para determinar esta componente del balance hídrico son:

- Balance de Masa (Método Indirecto)
- Balance de Energía
- Método Aerodinámico
- Método de Penman (1948)
- Método del Tanque de Evaporación

A continuación se describirá el método del balance de energía y el método combinado. En la bibliografía de esta guía aparecen referencias para entender el Método Aerodinámico.

### 1.2.1 Balance de Masa

Supongamos que desde el punto de vista hidrológico el sistema suelo-agua-planta se puede esquematizar como se indica en la figura 1.2.



**Fig. 1.2:** Esquema del subsistema suelo - agua - planta

En que para un cierto período de tiempo  $\Delta t$ :

- P : precipitación
- ET : evapotranspiración
- EI : escorrentía superficial inmediata
- I : infiltración
- $\theta$  : humedad del suelo
- $P_f$  : percolación profunda
- ES : escorrentía subterránea
- IN : interceptación
- Z : almacenamiento subterráneo

Aplicando la ecuación de continuidad básica, se puede establecer el siguiente balance hidrológico para este sistema durante un período  $\Delta t$ .

$$P + EI_1 + ES_1 = IN + ET + EI_2 + ES_2 + D\theta + DZ \quad (1.1)$$

Donde  $\Delta\theta$  y  $\Delta Z$  son los cambios en la humedad del suelo y las variaciones del almacenamiento subterráneo, respectivamente, propiedades que tienen relación directa con la tensión de succión del suelo.

Conocidas todas las demás variables, la evaporación (E) o evapotranspiración (ET) se puede obtener de forma indirecta del despeje de la ecuación 1.1.

### 1.2.2 Balance de Energía

Para entender la teoría de estos métodos se definirán algunos conceptos básicos de meteorología.

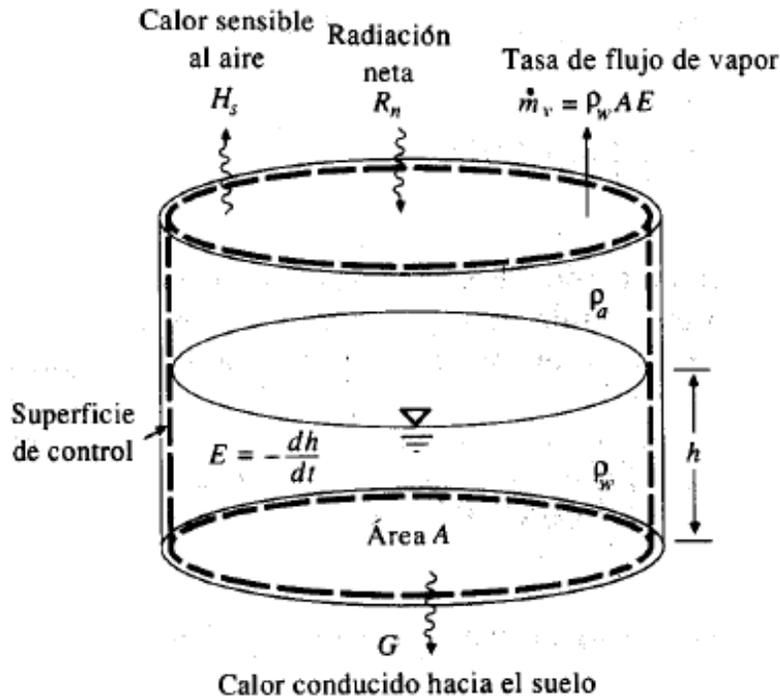


Fig. 1.3: Volumen de control en un tanque de evaporación definido para el cálculo de la evaporación (Fuente: Chow et al. 1994).

El esquema simplificado de las distintas componentes que intervienen en el balance de calor, para un volumen de suelo, se muestra en la Figura 1.3. De este modo, si se considera como flujos positivos a los que entregan calor al medio líquido, se tiene:

$$R_n - (H_s + Q_L + G) = S = r_w \cdot c_p \cdot h \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.2)$$

Donde:

$R_n$ : radiación neta sobre la superficie.  
 $H_S$ : flujo de calor sensible desde la superficie.  
 $Q_L$ : flujo de calor latente desde la superficie.  
 $G$ : flujo de calor hacia el suelo.  
 $S$ : almacenamiento o pérdida de calor.  
 $h$ : espesor del suelo.  
 $\rho_w$ : densidad.  
 $c_p$ : calor específico del agua a presión constante.  
 $T$ : temperatura del suelo.

Luego el des-balance entre flujos de calor de entrada ( $R_n$ ) y flujos de salida ( $H_S + Q_L + G$ ) produce un cambio en la temperatura promedio del volumen de suelo.

La ecuación 1.1 puede aplicarse a una capa muy delgada,  $h \rightarrow 0$ , con lo cual obtenemos la ecuación de balance para una superficie:

$$R_n = H_S + Q_L + G \quad (1.3)$$

El flujo de  $Q_L$  puede entenderse como la energía necesaria para generar el cambio de fase del agua (evaporación), y se puede expresar mediante la siguiente fórmula:

$$Q_L = r_w \cdot l_v \cdot E \quad (1.4)$$

Suponiendo que  $H_S$  y  $G$  son despreciables, la ecuación 1.3 permite determinar la tasa de vaporización producto de la  $R_n$ :

$$E_n = \frac{R_n}{r_w \cdot l_v} [\text{mm/día}] \quad (1.5)$$

Donde  $R_n$  es la radiación neta en  $[\text{W/m}^2]$ ,  $l_v = 2,501 \cdot 10^6 - 2370T$   $[\text{J/kg}]$  es el calor latente de vaporización,  $T$  es la temperatura del aire en  $[\text{°C}]$  y  $\rho_w$  es la densidad del agua en  $[\text{kg/m}^3]$ .

### 1.2.3 Método de Penman (1948)

Penman (1948) fue el primero en desarrollar un método combinado que considera tanto las fuentes de energía debidas a la radiación como el transporte turbulento de vapor de agua a partir de una superficie.

$$E = \frac{\Delta E_n + g E_a}{\Delta + g} [\text{mm/día}] \quad (1.6)$$

Donde:

E: tasa de evaporación [mm/día]

$E_n$ : tasa de evaporación producto de la radiación neta [mm/día]

$E_a$ : tasa de evaporación aerodinámica [mm/día]

$\Delta$ : gradiente de presión de saturación del vapor a una temperatura del aire  $T_a$  [Pa/°C]

$$\Delta = \frac{e_s - e_o}{T_s - T_a}$$

$\gamma$ : constante psicométrica.

$$\gamma = 66,8 \text{ [Pa/°C]}$$

Para determinar  $E_a$  se propone la siguiente expresión:

$$E_a = (0,013 + 0,00016v_2)e_o \frac{100 - HR}{100} \text{ [mm/día]} \quad (1.7)$$

Donde  $v_2$  es la velocidad del viento medida a 2m de altura sobre el suelo;  $e_o$  es la presión de vapor de saturación y HR es la humedad relativa.

La ecuación 1.6 puede ser expresada como:

$$E = \frac{a \left( \frac{R_n}{r_w \cdot l_v} \right) + \left[ (0,013 + 0,00016v_2)e_o \frac{(100 - HR)}{100} \right]}{a + 1} \text{ [mm/día]} \quad (1.8)$$

Donde  $\alpha = \Delta/\gamma$  es una función de la temperatura del aire. Valores de  $\alpha$  se muestran en la tabla 1.1.

Tabla 1.1: Valores de la razón de Penman ( $\alpha$ ) para diferentes temperaturas.

Temperatura del aire $T_a$ [°C]	$\alpha = \Delta/\gamma$
0	0,68
5	0,93
10	1,25
15	1,66
20	2,19
25	2,86
30	3,69
35	4,73
40	6,00

Fuente: V. Ponce,1994.

## 1.2.4 Tanque de Evaporación

El tanque de evaporación, también llamado evaporímetro de bandeja permite estimar los efectos combinados de radiación solar, viento, temperatura y humedad sobre la evaporación de una superficie de agua libre. El método del tanque de evaporación permite relacionar la evaporación del agua del tanque con la evapotranspiración del cultivo de referencia ( $E_{To}$ ).

Generalmente, la evaporación en un tanque suele ser mayor que la que se produce en grandes superficies de lagos o embalses, por lo que, para obtener la evaporación real en una cuenca, se debe multiplicar la evaporación medida en el tanque por un factor que varía en función de las características del tanque, pero que suele tomarse en torno a 0,7.

$$E = k_p E_p \text{ [mm/día]} \quad (1.9)$$

Donde  $E_p$  es la evaporación en un tanque en [mm/día] y  $k_p$  es el factor de tanque ( $0 \leq k_p \leq 1$ ).



Fig. 1.4: Tanque de Evaporación

## 2 Experiencia Práctica

### 2.1 Objetivos de la Experiencia

- Analizar de forma simple y aplicada la dinámica del balance hídrico en régimen impermanente, de manera de **entender la distribución** de las aguas en un volumen de suelo.
- Cuantificar los volúmenes de agua antes, durante y después de una tormenta (si es posible) de las variables que intervienen en el balance hídrico y que puedan ser medidas o estimadas. Para ello se utilizará una estructura experimental ubicada en las inmediaciones del Departamento de Ingeniería Civil
- Determinar el volumen de agua producto de la evaporación.
- Evaluar los diferentes volúmenes de agua en el tiempo.

### 2.2 Materiales

Los materiales que se usarán en esta experiencia son los siguientes:

- Tensiómetro de 30cm
- Tensiómetro de 60cm
- Tensiómetro de 90cm
- Estructura experimental (lisímetro)
- Probeta
- Estación Meteorológica automática de flujos radiativos del laboratorio de meteorología del DGF (EFR)

### 2.3 Metodología para determinar los diferentes volúmenes de agua.

Para determinar la evolución temporal de las distintas variables involucradas en el balance hídrico durante una tormenta es necesario realizar mediciones antes, durante y finalizada la tormenta (48 hrs.) después que ocurra este fenómeno climatológico, en lo posible a nivel horario.

Para generar una serie continua en el tiempo, los integrantes del curso deberán realizar al menos 4 mediciones, quedando las restantes en manos del auxiliar del curso.

El día de las mediciones estará sujeto al pronóstico meteorológico y al acuerdo entre los integrantes del curso según disponibilidad de horarios.

Para determinar la evolución temporal del agua almacenada en el suelo mediante lectura de tensiómetros se utilizará la metodología descrita en el Módulo de Balance Hídrico en un Lisímetro de Drenaje.

Para determinar la evaporación, se empleará el método de Penman explicado en la guía.

### 3 Guía de Trabajo

Durante la experiencia se estimará la evaporación instantánea mediante el método de Penman.

Se medirán las diferentes lecturas de los tensiómetros ubicados en el lisímetro y, los diferentes volúmenes de agua almacenados en los recipientes correspondientes a la escorrentía superficial y percolación profunda. La precipitación, RN,  $v_2$ , HR, T se obtendrán mediante los registros de la estación meteorológica del DGF.

Determinar la evaporación mediante los registros de las variables meteorológicas

Una vez realizadas las mediciones, como trabajo post-experiencia se deben analizar los volúmenes de agua restantes del balance hídrico en el tiempo incluyendo la condición inicial (antes de la tormenta), durante y luego de finalizada la tormenta.

A partir de las series generadas, comparar la evaporación obtenida de forma directa (método combinado) e indirecta (balance hídrico).

Finalmente se debe elaborar un informe explicativo de la experiencia, señalando claramente los diferentes volúmenes de agua involucrados en el balance, comentando a metodología empleada. y posibles aplicaciones de esta.

## 4 Bibliografía

1. Chow, V.T.; Maidment, D.R.; Mays, L.W. (1994) *Hidrología Aplicada*. McGraw-Hill, Bogotá.
2. Nania, Leonardo S. (2002-03) Apuntes de Clase: La cuenca y los Procesos Hidrológicos.
3. Ponce, V.M. (1994) *Engineering Hydrology: Principle and Practices*. Prentice Hall.  
(Disponible en: <http://hitos.sdsu.edu/textbook.html>)