

UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
FACULTAD DE PLANEACIÓN
CIENCIAS AMBIENTALES

EVAPORACIÓN Y TRANSPIRACIÓN
CIENCIAS DEL AGUA

Fecha de elaboración: marzo de 2015

POR:

LUIS CONRADO TOLEDO VEGA

GUIÓN EXPLICATIVO

El presente material didáctico constituye un apoyo para la presentación de los elementos teóricos y conceptuales de los temas relacionados a los aspectos importantes para el cálculo de la evaporación, evapotranspiración y uso consuntivo del agua, contribuirá a la capacidad de comprensión de los métodos para la cuantificación del agua que se transfiere a la atmósfera por la energía solar y en su caso se aplicará por los estudiantes en los proyectos que se desarrollen en su zona de estudio.

Parte de los contenidos del material aquí presentado fue desarrollado en el periodo pasado, en este mismo año se presentó como material didáctico pero fue rechazado por el Sistema para Evaluar la Calidad de Medios Educativos. Las razones por las que no fue aceptado fueron de forma, Para este año, se atendieron las observaciones hechas por el SECME, se actualizaron y ampliaron los contenidos y se utilizó como apoyo para la presentación de la unidad V de Ciencias del Agua.

GUIÓN EXPLICATIVO

El material fue desarrollado como un recurso didáctico visual que facilitará la comprensión de los elementos relacionados a la evaporación como parte del ciclo hidrológico.

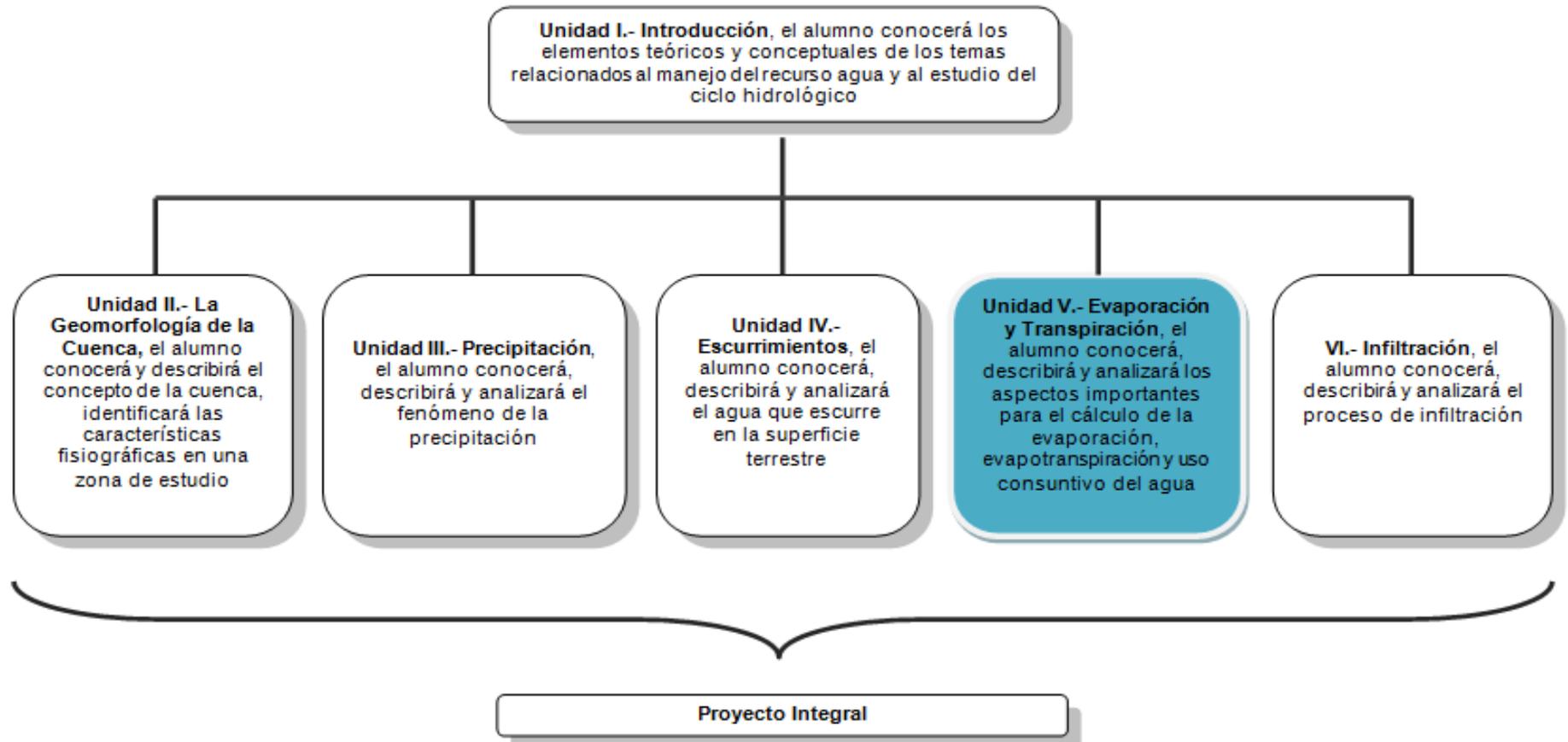
La evaporación juega un papel muy importante en el estudio del ciclo hidrológico en las ciencias ambientales, es donde se pierde la mayor parte del agua disponible de la superficie terrestre. Por tal razón es importante para un manejo integral del recurso conocer la cantidad de agua que se evapora. Aquí se presentan los conceptos de: evaporación, transpiración evapotranspiración, uso consuntivo, se describe el fenómeno de la evaporación y se presenta la metodología aplicable para el cálculo de la evaporación así como un ejemplo práctico.

Los temas presentados tienen también como objeto identificar, y analizar la importancia y dinámica del fenómeno de evaporación en cuencas como base para el diseño de los proyectos de control y aprovechamiento de los recursos hidráulicos. Se presentan en forma clara, sencilla y concisa, se deja al alumno el desarrollo de los conceptos con mayor profundidad y la identificación de los elementos en su proyecto integral a desarrollar en una zona de estudio

GUIÓN EXPLICATIVO

SECUENCIA DIDÁCTICA

Este material proyectable corresponde a la unidad de competencia V del programa de la Unidad de Conocimiento “*Ciencias del Agua*” para el programa educativo de la licenciatura en Ciencias Ambientales que se imparte en la Facultad de Planeación Urbana y Regional.



EVAPORACIÓN

Es importante conocer la cantidad de agua que se pierde por evaporación en grandes depósitos y la cantidad de agua que es necesario dotar a distritos de riego para determinar las dimensiones de los sistemas de abastecimiento para riego.



EVAPORACIÓN



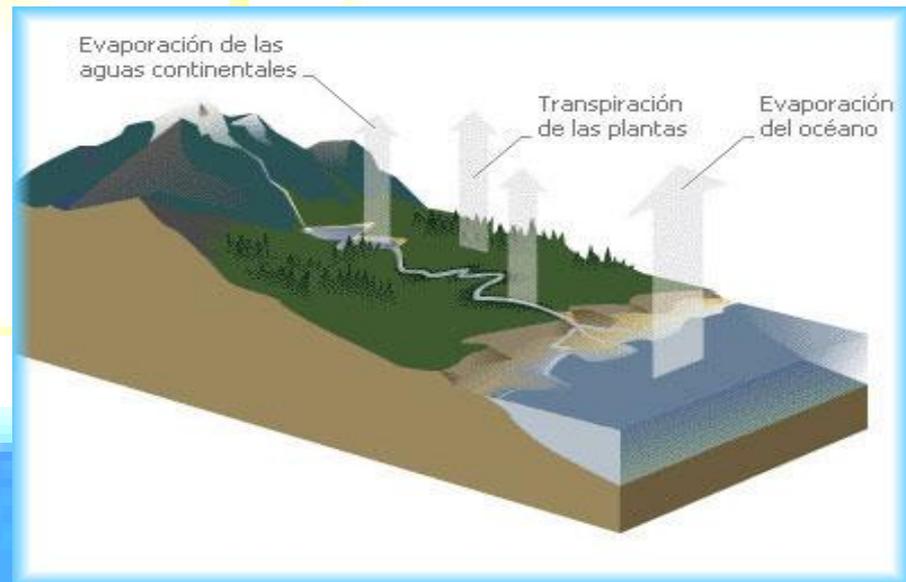
<http://medionaturalysocial.blogspot.mx/2010/05/nueva-entrada-2.html>, 2014

La evaporación es un proceso mucho muy importante en bases continentales, ya que aproximadamente $\frac{3}{4}$ partes del agua que se precipita, regresa a la atmósfera, ya sea por evaporación o evapotranspiración.

EVAPORACIÓN

Es el proceso por el cual el agua pasa del estado líquido en que se encuentra en los almacenamientos, conducciones y en el suelo, en las capas cercanas a su superficie, a estado gaseoso y se transfiere a la atmósfera.

Para ingeniería hidrológica, es el flujo neto de partículas de agua a la atmósfera.



<http://proindustriales.blogspot.mx/2013/05/proceso-deevaporacion-el-proceso-de.html>, 2014

TRANSPIRACIÓN

Es el agua que se despiden en forma de vapor de las hojas de las plantas.

Una vez dentro de las raíces, el agua es transferida por toda la planta. En las hojas, el aire entra a su epidermis a través de ciertas aberturas llamadas estomas, los cloroplastos dentro de la hoja usan el bióxido de carbono del aire y una parte del agua disponible para generar los carbohidratos necesarios para el crecimiento de la planta (fotosíntesis). Conforme el aire entra a la hoja, escapa agua a través de las estomas abiertas y a este proceso se le denomina “transpiración”.



<http://www.pbs.org/opb/conquistadors/esp/anol/amazonia/adventure1/b2.htm>, 2014

EVAPOTRANSPIRACIÓN

Es la combinación de evaporación y transpiración.

La evaporación y la transpiración reciben el nombre conjunto de evapotranspiración.

La evapotranspiración es esencialmente igual a la evaporación, además de que la superficie de la cual se escapan las moléculas de agua no es solo una superficie de agua, sino también de las hojas de plantas.



http://cidta.usal.es/cursos/agua/modulos/Conceptos/uni_01/u1c2s1.htm, 2014

EVAPOTRANSPIRACIÓN

La cantidad de vapor de agua que transpira una planta, varía día a día con los factores ambientales que actúan sobre las condiciones fisiológicas del vegetal y determinan la rapidez con que el vapor del agua se desprende de la planta, siendo los principales:

EVAPOTRANSPIRACIÓN

Factores Meteorológicos:

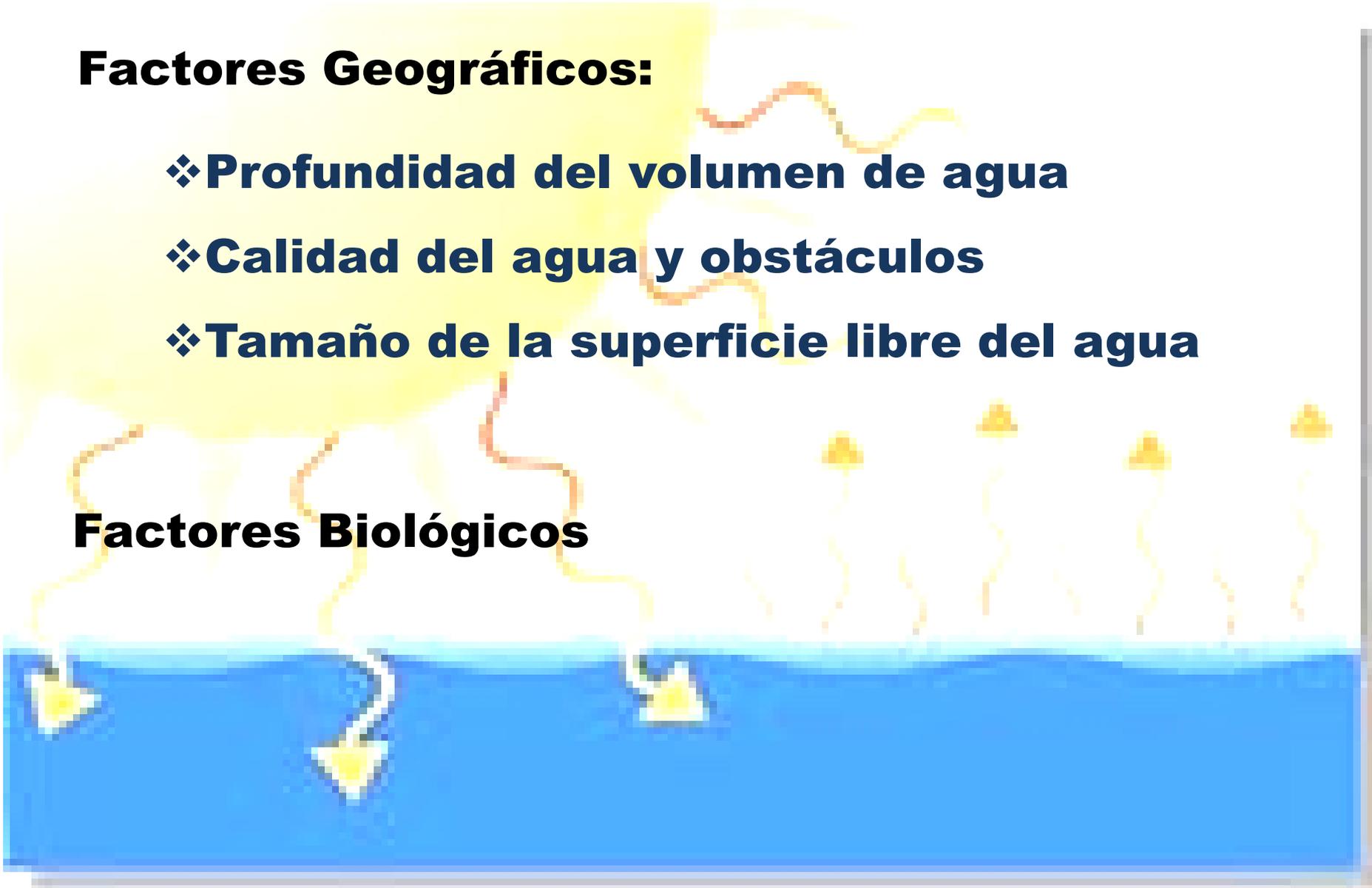
- ❖ **Déficit de saturación de la atmósfera**
 - ❖ **Radiación solar**
 - ❖ **Humedad relativa**
 - ❖ **Temperatura**
 - ❖ **Viento**
 - ❖ **Presión atmosférica**
- 

EVAPOTRANSPIRACIÓN

Factores Geográficos:

- ❖ **Profundidad del volumen de agua**
- ❖ **Calidad del agua y obstáculos**
- ❖ **Tamaño de la superficie libre del agua**

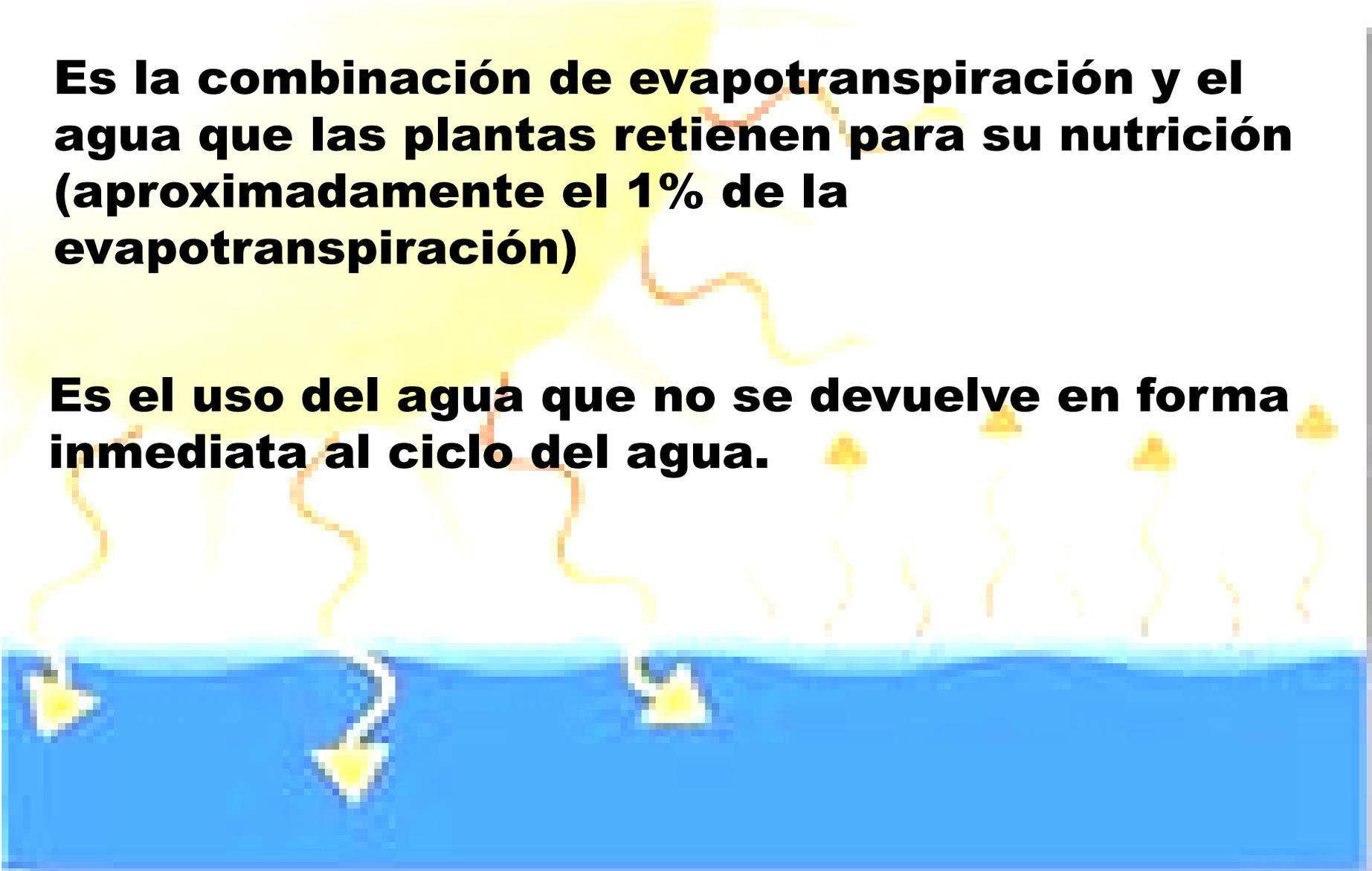
Factores Biológicos



USO CONSUNTIVO

Es la combinación de evapotranspiración y el agua que las plantas retienen para su nutrición (aproximadamente el 1% de la evapotranspiración)

Es el uso del agua que no se devuelve en forma inmediata al ciclo del agua.



USO CONSUNTIVO

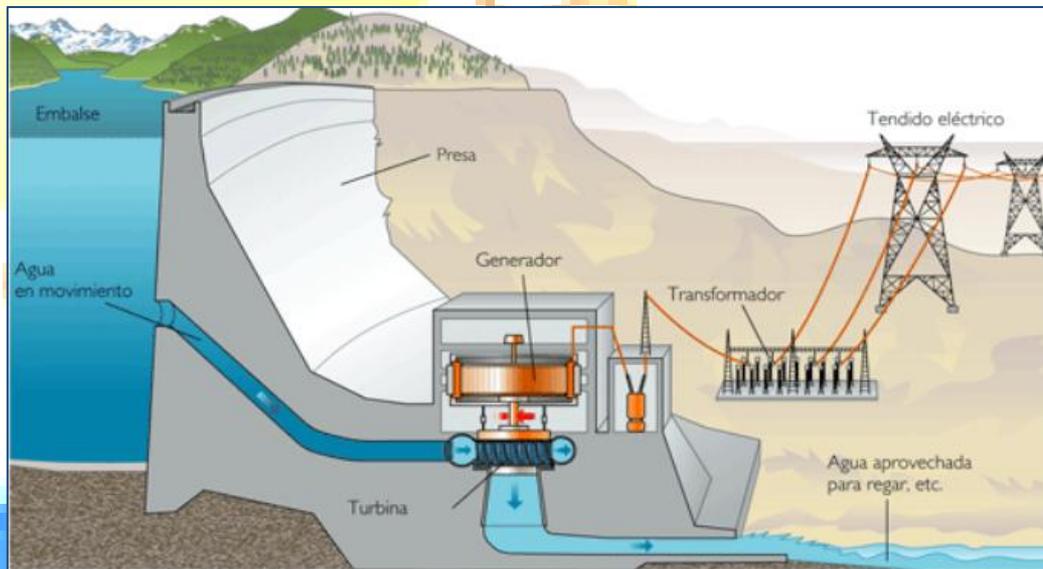
Por ejemplo, el riego es un uso consuntivo



<http://jardinplantas.com/el-riego-por-aspersion/>, 2014

USO CONSUNTIVO

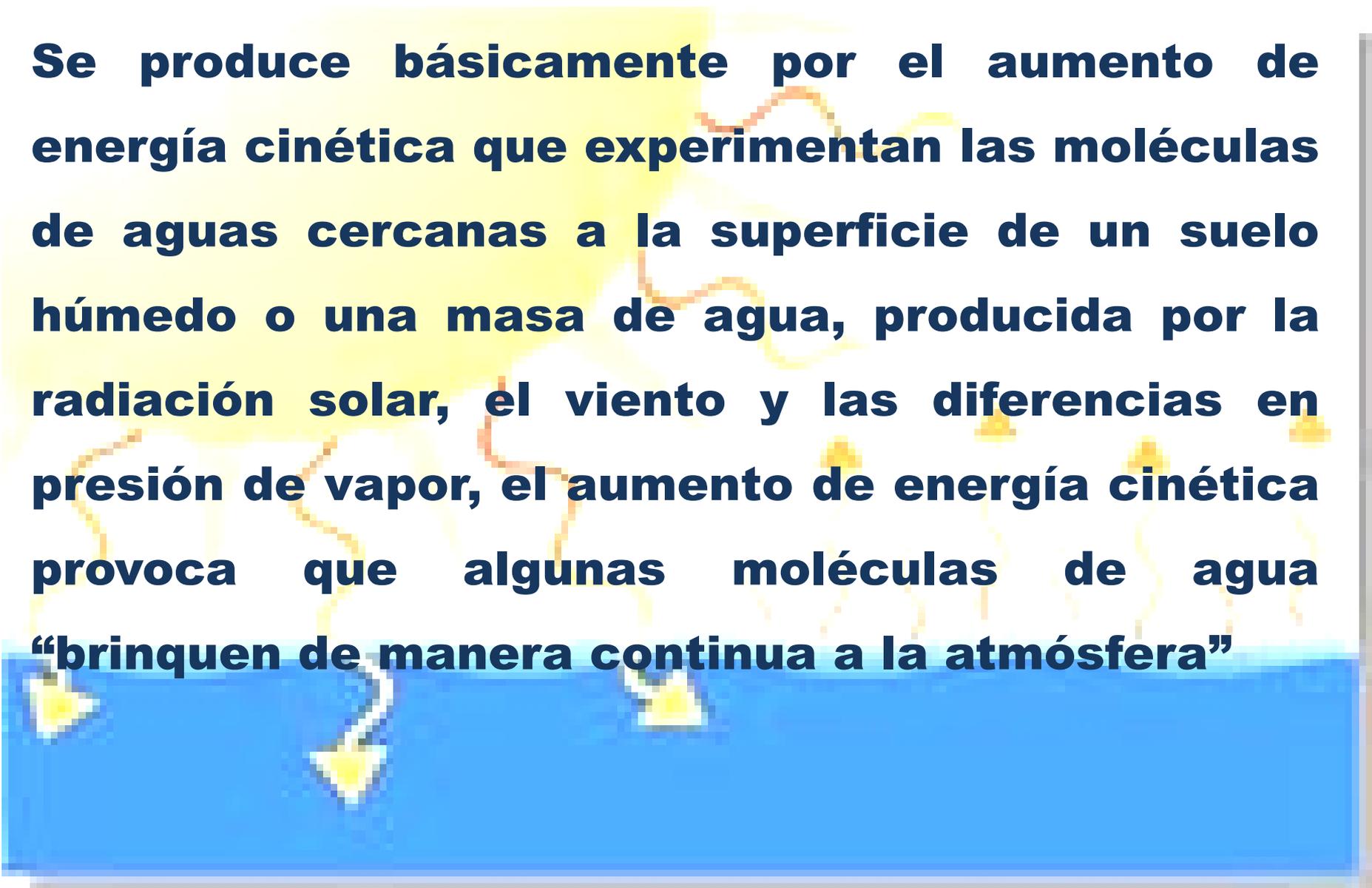
Mientras que la generación de energía eléctrica mediante el turbinado del agua de un río, si la descarga es en el mismo río no es un uso consuntivo.



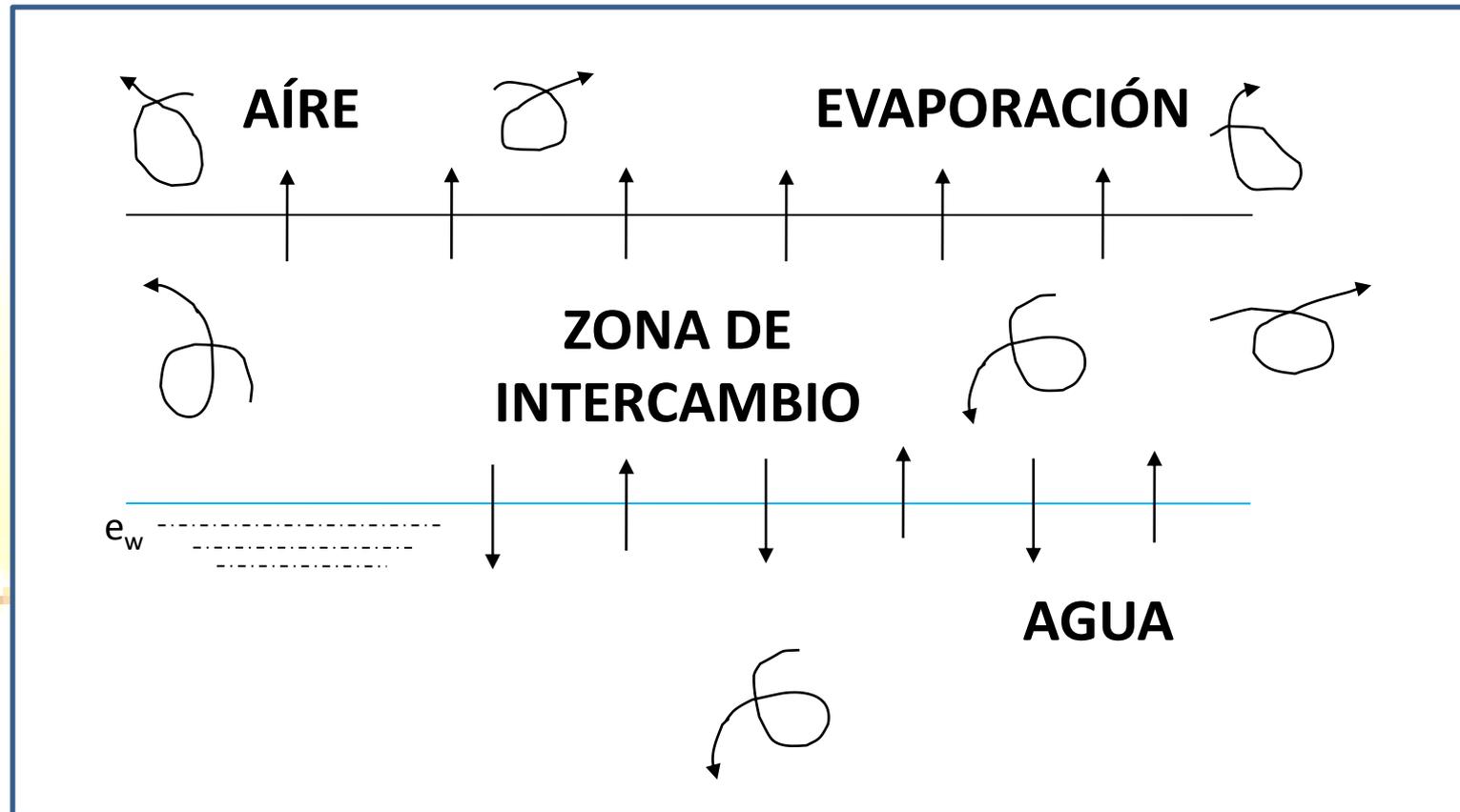
<http://hidroimpacto.blogspot.mx/>, 2014

FENÓMENO DE EVAPORACIÓN

Se produce básicamente por el aumento de energía cinética que experimentan las moléculas de aguas cercanas a la superficie de un suelo húmedo o una masa de agua, producida por la radiación solar, el viento y las diferencias en presión de vapor, el aumento de energía cinética provoca que algunas moléculas de agua “brinquen de manera continua a la atmósfera”



FENÓMENO DE EVAPORACIÓN



El intercambio de moléculas se forma en una pequeña zona situada junto a la superficie del agua, la evaporación es la cantidad de agua que logra salir de la zona de intercambio

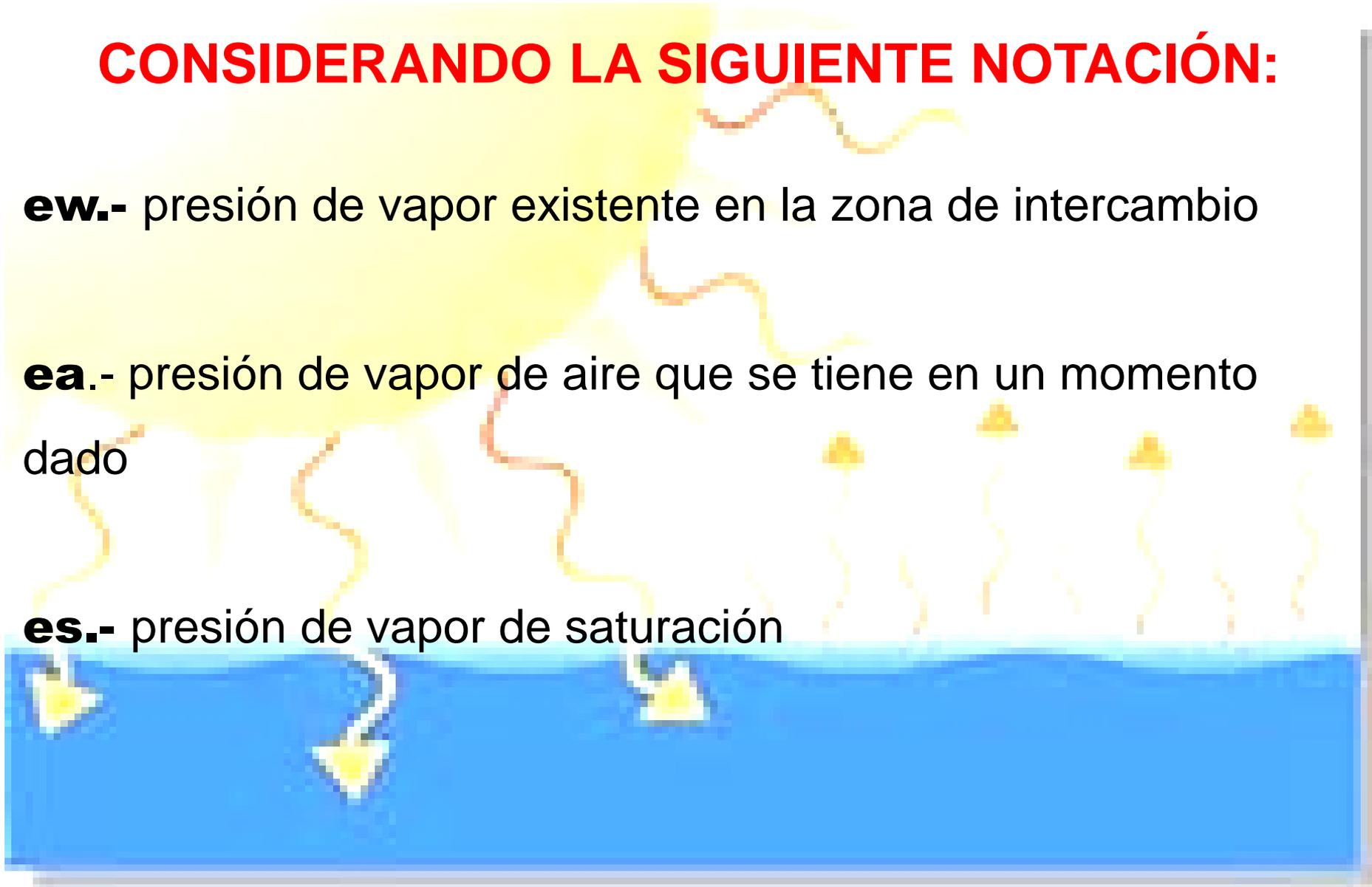
FENÓMENO DE EVAPORACIÓN

CONSIDERANDO LA SIGUIENTE NOTACIÓN:

ew.- presión de vapor existente en la zona de intercambio

ea.- presión de vapor de aire que se tiene en un momento dado

es.- presión de vapor de saturación



FENÓMENO DE EVAPORACIÓN

es > **ew** se produce evaporación, mientras que **ea** < **ew**

Cuando la presión de vapor de aire alcanza el valor de **ew** deja de haber paso de moléculas de la zona de intercambio a la atmósfera y por tanto cesa la evaporación. Esto ocurre antes de que el aire se sature.

es < **ew** En este caso la evaporación cesa cuando **ea** alcanza el valor de **es** a partir de ese momento comienza a invertirse el proceso y se produce condensación cuando

ea > **es**

FENÓMENO DE EVAPORACIÓN

Si se considera una superficie plana de agua con una entrada neta de energía calorífica, el cuerpo de agua incrementará la energía liberada de las moléculas de agua hasta el punto en que puedan escapar a través de la interfase líquida-vapor.

Esto a su vez, produce un decremento en energía cinética del resto de las moléculas, lo cual explica por qué el agua remanente se enfría.



FENÓMENO DE EVAPORACIÓN

Por término medio, las moléculas no tienen bastante energía para escaparse del líquido, porque de lo contrario el líquido se convertiría en vapor rápidamente. Cuando las moléculas chocan, se transfieren la energía de una a otra en grados variantes según el modo en que chocan.

Para que las moléculas de un líquido se evaporen, deben estar localizadas cerca de la superficie, moverse en la dirección apropiada y tener la energía cinética suficiente como para vencer las fuerzas intermoleculares de la fase líquida.

El diagrama muestra un fondo con un cielo amarillo y un océano azul. Una línea roja ondulada representa un rayo de luz solar que ilumina la superficie del agua. En la parte inferior, se ven burbujas de vapor escapándose de la superficie del líquido.

FENÓMENO DE EVAPORACIÓN

Sólo una pequeña proporción de las moléculas cumplen con estos criterios, por lo que la tasa de evaporación es limitada. Ya que la energía cinética de una molécula es proporcional a su temperatura, la evaporación se produce más rápido conforme la temperatura es más alta.

Como las moléculas que se mueven más rápido escapan, las moléculas restantes tienen una energía cinética media inferior, y por tanto la temperatura del líquido disminuye.



FENÓMENO DE EVAPORACIÓN

La evaporación varía por una parte con la luminosidad, con el viento, la humedad relativa y la temperatura, así como también con el grado de humedad presente.

La influencia de los factores atmosféricos o características climáticas propias de la región son importantes, ya que mientras mayor sean las horas-luz, mayor será la evaporación; igualmente se comporta el viento que al ser más intenso y seco, consume mayor cantidad de agua.

La evaporación será mayor mientras mayor sea la humedad relativa y menor el número de plantas.

ESTIMACIÓN Y CÁLCULO

Métodos para determinar la evapotranspiración:

Los métodos pueden clasificarse en **métodos directos e indirectos**.

Los primeros proporcionan directamente el consumo total del agua requerida, utilizando para ello aparatos e instrumentos para su determinación.

Los segundos en forma directa y bajo la utilización de fórmulas empíricas, obtienen los consumos de agua a través de todo el ciclo vegetativo de la planta.

ESTIMACIÓN Y CÁLCULO

MÉTODOS DIRECTOS

Miden directamente los consumos por evaporación y requieren para su determinación la instalación de aparatos, el cuidado de ellos y seguir la metodología específica en cada paso.

Son aplicables para zonas donde se tiene una agricultura establecida, ya que proporcionan valores mucho más apegados a la realidad y sirven a la vez para ajustar los parámetros de los métodos empíricos.

Los métodos más utilizados son: el **del lisímetro**, del **evapotranspirómetro de Thornthwaite**, **los atmómetros** y el **método gravimétrico**.

ESTIMACIÓN Y CÁLCULO

MEDICIÓN DE LA EVAPORACIÓN

Se mide por medio de evaporímetros



http://www.iginstrumentos.com.ar/spanish/hidrometria_evaporimetro.htm, 2014

ESTIMACIÓN Y CÁLCULO

MEDICIÓN DE LA EVAPORACIÓN

La altura de la precipitación se mide con una regla graduada, dado que la evaporación es mayor en depósitos pequeños que en los grandes, los datos deben corregirse



Hay que restarle la altura de precipitación.

Factor de corrección
varía entre 0.6 y 0.8
0.7 es correcto

ESTIMACIÓN Y CÁLCULO

Método del lisímetro

Determina la evapotranspiración potencial y consiste en un recipiente de lámina galvanizada formado por un tanque cilíndrico de más o menos 6 m de diámetro por 95 cm de alto, en el que se coloca el suelo y el cultivo en estudio.

El consumo de agua por evapotranspiración se determina pesando diariamente el conjunto del suelo, plantas, agua y aparato, y por diferencia de pesadas se obtiene la humedad consumida. La reposición de agua se efectúa por medio de tanques de alimentación en forma automática.

ESTIMACIÓN Y CÁLCULO

Método del lisímetro

Puede mencionarse como *ventaja* la facilidad de las mediciones y de la aplicación del agua; pero a su vez estos aparatos aunque fáciles de manejar, son más caros.

Entre las *desventajas* se encuentran sus altos costos, que pueden alterar las condiciones normales del suelo afectando la medición, provocan un desarrollo anormal de las raíces que se concentran hacia el tubo de aplicación del agua, por haber más humedad en el fondo o base del recipiente y no se pueden aplicar a plantas que tengan un sistema radicular mayor que las dimensiones del tanque que contiene el suelo.

ESTIMACIÓN Y CÁLCULO

Evapotranspirómetro de Thornthwaite

Consta de las siguientes partes:

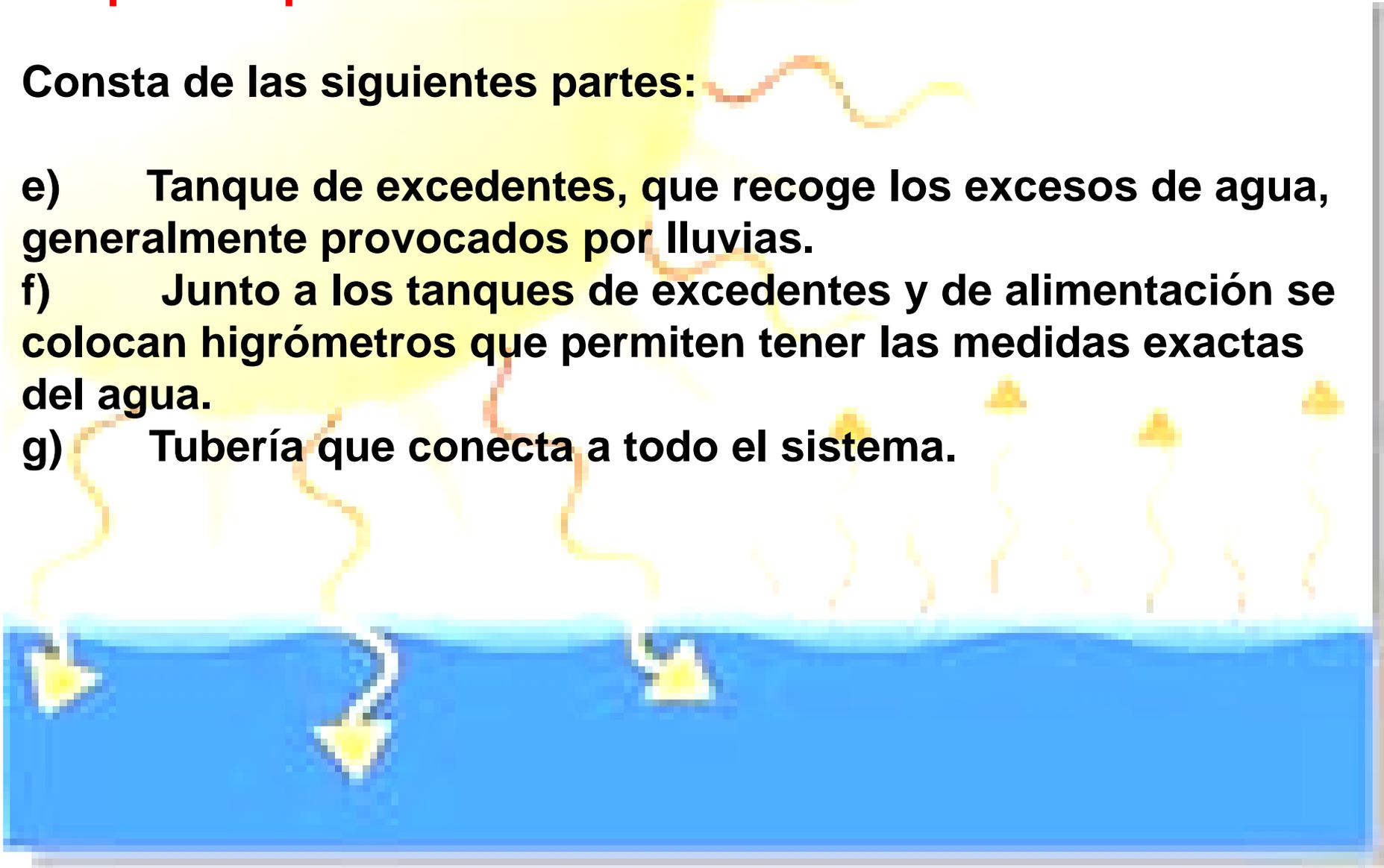
- a) Tanque evapotranspirador de fierro galvanizado, con área rectangular de 4 m² y 90 cm de profundidad. Este tanque va hundido hasta el nivel del suelo. Se llena de tierra y se siembran las plantas. En el fondo tiene un lecho de grava que ayuda a eliminar el exceso de agua.
- b) Tubería subterránea ramificada y perforada para conducir el agua al suelo.
- c) Tanque alimentador en donde se mide y agrega diariamente el agua consumida
- d) Tanque regulador en donde se mide y agrega diariamente el agua consumida.

ESTIMACIÓN Y CÁLCULO

Evapotranspirómetro de Thornthwaite

Consta de las siguientes partes:

- e) Tanque de excedentes, que recoge los excesos de agua, generalmente provocados por lluvias.
- f) Junto a los tanques de excedentes y de alimentación se colocan higrómetros que permiten tener las medidas exactas del agua.
- g) Tubería que conecta a todo el sistema.

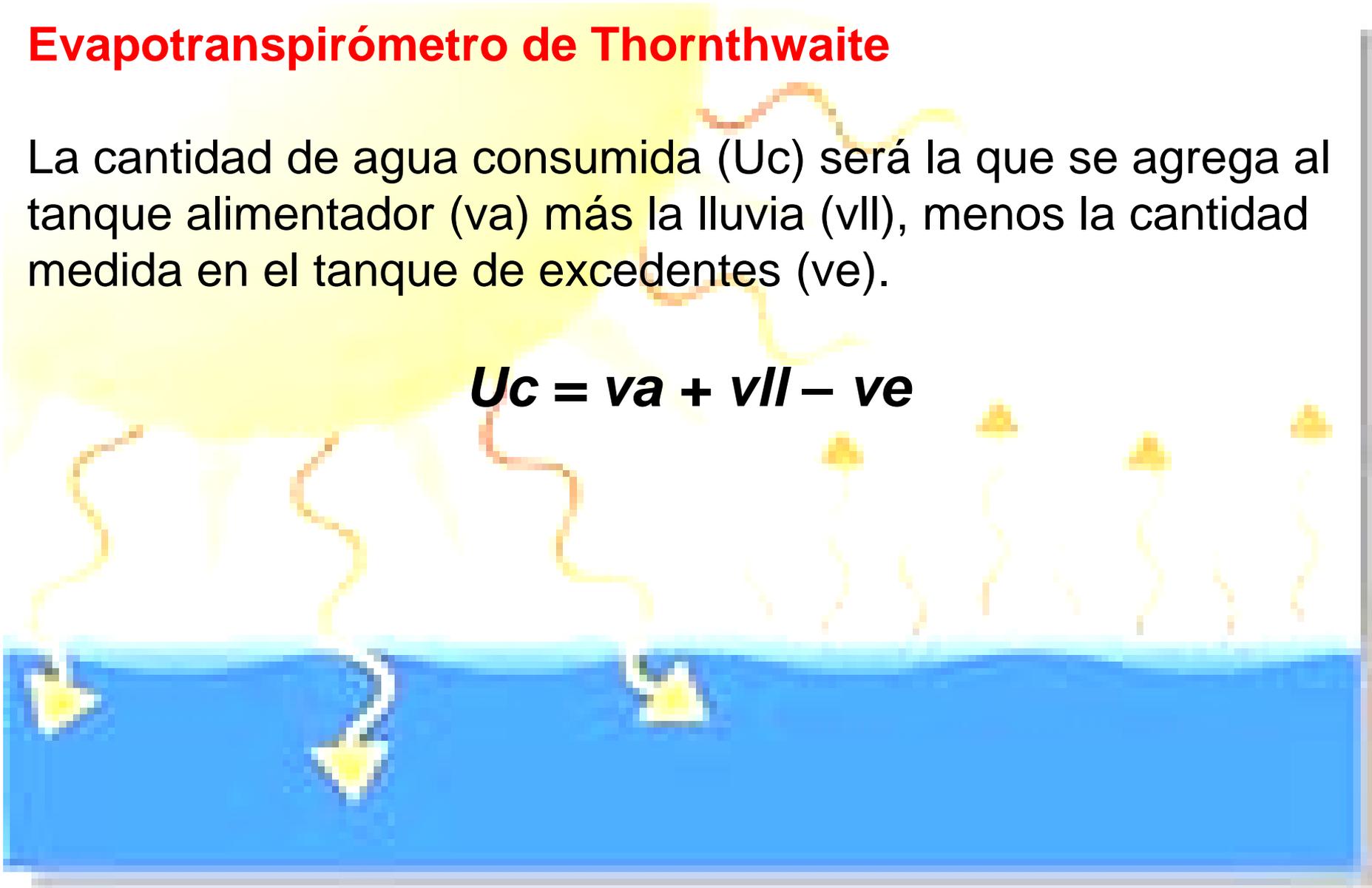


ESTIMACIÓN Y CÁLCULO

Evapotranspirómetro de Thornthwaite

La cantidad de agua consumida (U_c) será la que se agrega al tanque alimentador (v_a) más la lluvia (v_{ll}), menos la cantidad medida en el tanque de excedentes (v_e).

$$U_c = v_a + v_{ll} - v_e$$



ESTIMACIÓN Y CÁLCULO

Evapotranspirómetro de Thornthwaite

Para el buen funcionamiento del aparato se recomienda que los tanques alimentador, regulador y de excedentes, estén bajo una caseta, para disminuir los efectos de evaporación, además alrededor del tanque evapotranspirador, deberá estar sembrado el cultivo que está en estudio.

Las dificultades que presenta la operación del equipo, el hecho de no poder aplicarse a mas de un solo cultivo, hacen que su utilización sea altamente costosa.

ESTIMACIÓN Y CÁLCULO

Atmómetro de Livingstone

Está formado por una esfera de cerámica porosa, que tiene un vástago barnizado del mismo material que se introduce dentro de un recipiente graduado que contiene agua; la esfera se encuentra pintada de blanco o de negro.

Al recibir energía de la atmósfera, se produce una evaporación en la superficie de la esfera que se traduce en una succión en el depósito graduado, el cual mide la cantidad de agua evaporada.

Se ha visto que existe mayor correlación entre la evapotranspiración y las lecturas de los atmómetros si se utilizan dos, uno negro y otro blanco. El valor se obtiene con la diferencia de lecturas.

ESTIMACIÓN Y CÁLCULO

Método gravimétrico

Se basa en la determinación en los diferentes valores de humedad registrados en una serie de pesadas que se efectúan a través del ciclo vegetativo, en muestras de suelo, obtenidas a una profundidad igual a la que tienen las raíces de las plantas del cultivo considerado.

En función de estas diferencias y de las características del suelo, se obtienen las láminas de agua consumidas por evaporación, en un periodo de tiempo determinado.

La suma total de las láminas consumidas en los intervalos entre riegos, es igual a la **“lámina total consumida”** o **“uso consuntivo”** del cultivo estudiado

ESTIMACIÓN Y CÁLCULO

MÉTODOS INDIRECTOS O EMPÍRICOS

La mayor parte de ellos son demasiado teóricos ya que han sido deducidos bajo condiciones definidas entre regiones y su aplicación precisa de una serie de datos que generalmente no se tienen a la disposición.

El método de Thornthwaite calcula la evapotranspiración potencial mediante los datos existentes de las temperaturas medias mensuales, el de Turc utiliza la precipitación y temperatura medias de una cuenca, y los de Blaney y Criddle y Grassi y Christensen hacen uso de la radiación solar.

ESTIMACIÓN Y CÁLCULO

FORMULAS EMPÍRICAS

La evaporación es proporcional al gradiente de presión de vapor entre la zona de intercambio y la atmósfera, esto se conoce como la **LEY DE DALTON** y se expresa en la forma:

$$E = k(e_w - e_a)$$

Donde:

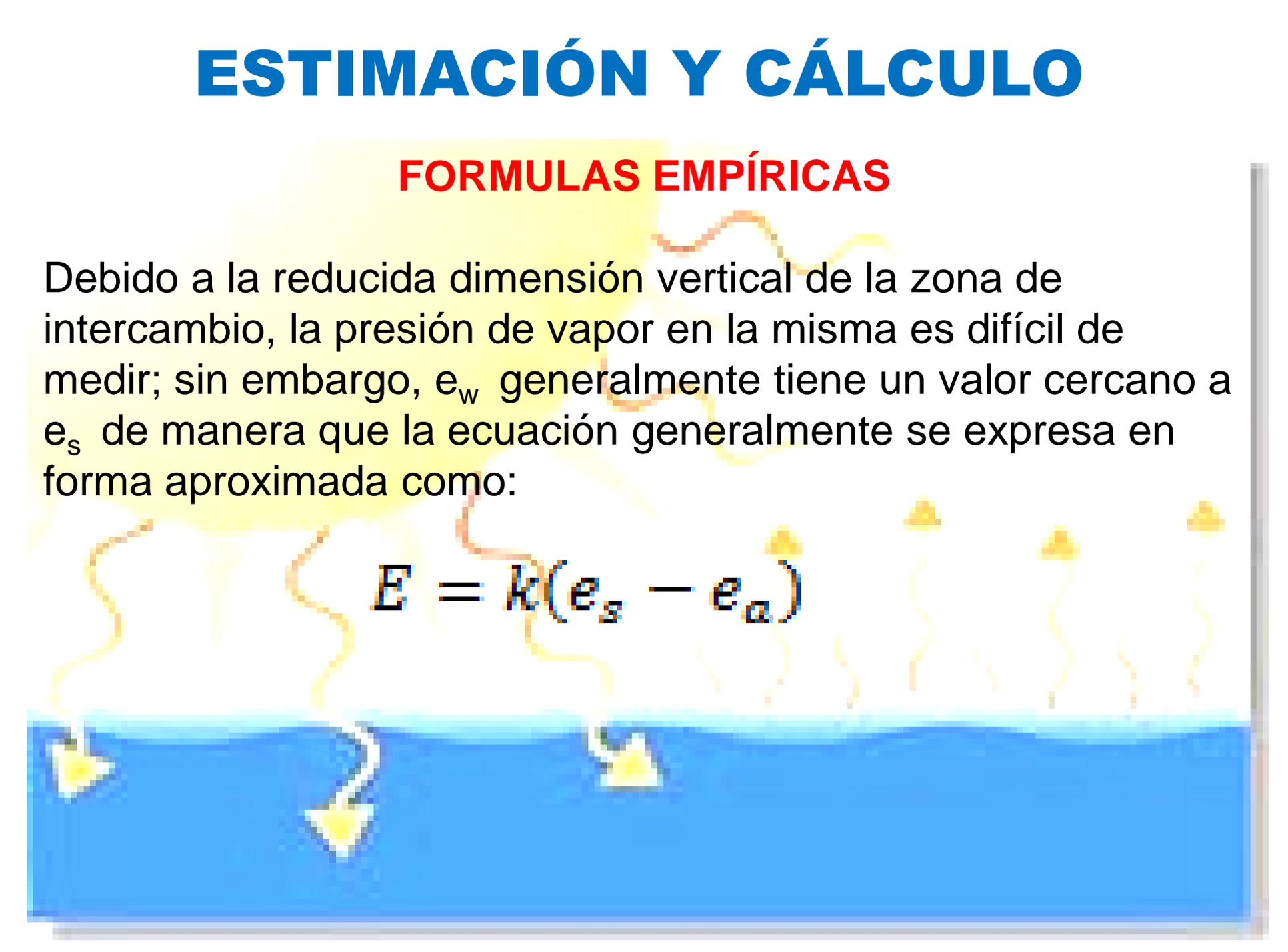
k .- es la constante de proporcionalidad

E .- es la evaporación

ESTIMACIÓN Y CÁLCULO

FORMULAS EMPÍRICAS

Debido a la reducida dimensión vertical de la zona de intercambio, la presión de vapor en la misma es difícil de medir; sin embargo, e_w generalmente tiene un valor cercano a e_s de manera que la ecuación generalmente se expresa en forma aproximada como:

$$E = k(e_s - e_a)$$


ESTIMACIÓN Y CÁLCULO

FORMULAS DE MEYER

Basada en la LEY de DALTON

$$E_m = C (e_s - e_a) \left[1 + \frac{V_m}{16.09} \right]$$

Donde:

E_m Evaporación mensual en cm

e_a Presión de vapor media mensual en pulgadas de mercurio

E_s Presión de vapor de saturación media mensual en pulgadas de

V_m mercurio

C Velocidad media mensual del viento, medida a 10 m de la superficie, en Km/hr

e_a Coeficiente empírico, 38 para depósitos pequeños y evaporímetros

e_s Se determinan con base en la temperatura y la humedad relativas medias mensuales

ESTIMACIÓN Y CÁLCULO

BALANCE DE AGUA

Método indirecto para calcular la evaporación, se basa en la ecuación de continuidad para una gran almacenamiento.

$$E = I - O - \Delta V$$

Donde:

E = Volumen de evaporación en el intervalo de tiempo Δt

I = Volumen de entradas al vaso en el Δt (precipitación directa y escurrimiento)

O = Volumen de salidas del vaso en el Δt (infiltración y escurrimiento, en el caso de presas salidas por el vertedor y obras de toma)

ΔV = cambio en el volumen almacenado en el Δt

Esta ecuación se usa para fines estadísticos, pero para que los resultados sean confiables **I**, **O**, **ΔV** deben de estar medidos con precisión.

ESTIMACIÓN Y CÁLCULO

MÉTODO DE THORNTHWAITE

La fórmula se basa en la temperatura y en la latitud determinando que esta última constituye un buen índice de la energía en un lugar específico.

Sirve para estimar la evapotranspiración potencial y tiene la ventaja de que la fórmula usa datos climatológicos accesibles. Se obtienen buenos resultados en zonas húmedas con vegetación abundante. Los resultados son estimativos, que pueden usarse solo como estudios preliminares o de gran visión, calcula el uso consuntivo mensual como una función de las temperaturas medias mensuales. Su expresión general es:

$$Et_j = 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^a$$

ESTIMACIÓN Y CÁLCULO

MÉTODO DE THORNTHWAITE

Donde:

E_t = evaporación potencial no ajustada para meses de 30 días de 12 horas luz (mm)

T = temperatura media mensual ($^{\circ}\text{C}$)

I = suma de (i) para todos los meses del año o semana anual de calor

i = eficiencia de la temperatura

I = índice anual de calor (o temperatura). Es la suma de las eficiencias mensuales de Temperatura.

$$i_j = \left(\frac{T_j}{5} \right)^{1.514}$$

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j$$

ESTIMACIÓN Y CÁLCULO

MÉTODO DE THORNTHWAITE

a = constante que depende del lugar y que es función del índice de eficiencia anual de temperatura, cuyo valor es:

$$a = 0.49239 + 1792.1E-5 I - 771.1E-7 I^2 + 675.1E-9 I^3$$

Kc = Coeficiente de duración del sol y número de días del mes.

La evapotranspiración potencial no ajustada se corrige por la duración real del día en horas y los días del mes y se obtiene la evapotranspiración potencial ajustada.

ESTIMACIÓN Y CÁLCULO

MÉTODO DE THORNTHWAITE

Las críticas que pueden hacerse a este método son:

1. La temperatura no es buena indicadora de la energía disponible para la evapotranspiración.
2. La temperatura del aire respecto a la temperatura de radiación puede ser diferente.
3. La evaporación puede cesar cuando la temperatura promedio desciende de cero grados centígrados, lo cual es falso.
4. El viento puede ser un factor importante en algunas áreas requiriéndose en ocasiones para ello, un factor de corrección.
5. La fórmula no toma en cuenta el efecto de calentamiento o enfriamiento del aire por advección.

Se obtienen resultados aceptables en zonas húmedas con vegetación abundante, pero los errores aumentan en zonas áridas o semiáridas.

EJEMPLO

CALCULO DE LA EVAPORACIÓN MENSUAL POR EL MÉTODO DE C. W. THORNTWAITE.

UBICACIÓN

Es en la presa de Guadalupe del municipio de Cuautitlán en el Estado de México. La zona de estudio se encuentra aproximadamente a $19^{\circ} 40'$ de latitud en el hemisferio norte, por lo que la supondremos a 20° para efecto de determinar el coeficiente (kc) que toma en cuenta la duración real del mes y el número máximo de horas de sol.

EJEMPLO

DATOS DEL PROYECTO (Temperaturas Medias Mensuales):

**TEMPERATURA MEDIA MENSUAL
ESTACIÓN PRESA GUADALUPE
(CNA15-021)**

MES	T (°C)
ENE	12.7
FEB	13.9
MAR	16.1
ABR	17.9
MAY	18.4
JUN	18.4
JUL	17.6
AGO	17.7
SEP	17.0
OCT	15.7
NOV	14.4
DIC	12.8

EJEMPLO

CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN (EVA) Y DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN CORREGIDA (EVAA)

MES	TEMPERATURA MEDIA MENSUAL (°C)	ÍNDICE MENSUAL DE CALOR (i)	EVAPOTRANSPIRACIÓN (EVA)	COEFICIENTE KC	EVAA (mm)
ENERO	12.7	4.10	41.19	0.95	39.13
FEBRERO	13.9	4.70	47.63	0.90	42.87
MARZO	16.1	5.87	60.34	1.03	62.15
ABRIL	17.9	6.90	71.57	1.05	75.15
MAYO	18.4	7.19	74.82	1.13	84.54
JUNIO	18.4	7.19	74.82	1.11	83.05
JULIO	17.6	6.72	69.65	1.14	79.40
AGOSTO	17.7	6.78	70.29	1.11	78.02
SEPTIEMBRE	17	6.38	65.87	1.02	67.18
OCTUBRE	15.7	5.65	57.95	1.00	57.95
NOVIEMBRE	14.4	4.96	50.42	0.93	46.89
DICIEMBRE	12.8	4.15	41.71	0.91	37.96
$I = i_j$		Σ 70.59			
a = COEFICIENTE		1.61			

EJEMPLO

Donde:

$$i_j = \left(\frac{T_j}{5} \right)^{1.514} \quad EVA_j = 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^a$$

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j = 70.59$$

$$a = 0.49239 + 1792.1E-5 I - 771.1E-7 I^2 + 675.1E-9 I^3$$

que para $I = 70.59$

$$a = 1.61$$

K_c = Coeficiente de duración del sol y número de días del mes.

EVAA = Evapotranspiración potencial mensual ajustada, en mm

REFERENCIAS:

Aparicio Mijares Francisco Javier. 2007. Fundamentos de Hidrología de superficie. Ed. Limusa. México, GB 661 .A33 2007

Campos Aranda, Daniel Francisco. 1999. Procesos del ciclo hidrológico. Ed. U.A.S.L.P. San Luis Potosí, GB 688 A 73

Chow Ven Te. 2000. Hidrología Aplicada. Ed. McGraw Hill. México, GB 661 .5 C55

CURSO: Manejo integrado de cuencas, CICEM

Apuntes de la unidad de aprendizaje Ciencias del Agua

Algunas imagenes fueron tomadas de internet



**MUCHAS GRACIAS
POR SU ATENCIÓN**