

ASIGNATURA	Tecnología de Invernaderos (5º Curso, IA)
Profesores	María M. González-Real y A. Baille (mayla.gonreal@upct.es, alain.baille@upct.es) Universidad Politécnica de Cartagena. ETSIA Área de Ingeniería Agroforestal
Aplicaciones Parte II	Las variables del clima y su medida

Índice del contenido

1- Ejercicios resueltos: Nociones básicas para la utilización del diagrama del aire húmedo

2- Ejercicios resueltos: Nociones básicas de unidades de radiación solar

3- Ejercicios a resolver

1- Ejercicios resueltos: Nociones básicas para la utilización del diagrama del aire húmedo

1.1- Humedad absoluta y humedad relativa

1.1.1- Ejercicio 1: Humedad absoluta (q_a , g kg^{-1}) y a saturación ($q^*_s(T)$, g kg^{-1})

¿Cuál es el contenido de vapor de agua a saturación, $q^*_s(T)$, de un aire a la temperatura de 10°C ? Con el diagrama del aire húmedo (o de Mollier), utilizando la curva correspondiente a $\text{HR} = 100\%$ (Figura 1), se obtiene $q^*_s(T) = 7,5 \text{ g kg}^{-1}$.

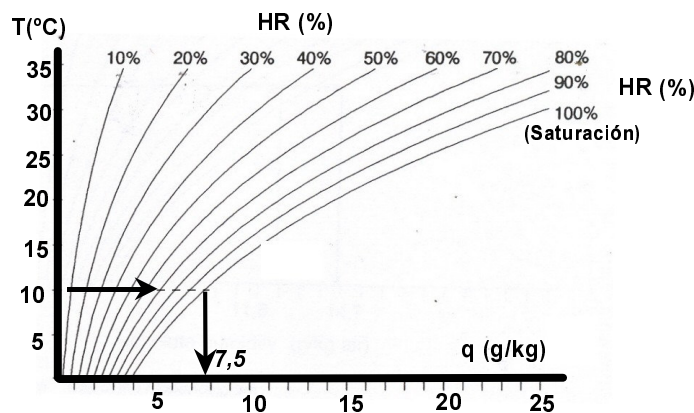


Figura 1

1.1.2- Ejercicio 2: Humedad relativa (HR, %)

Sea un volumen de aire a 25°C que contiene 15 g kg^{-1} de vapor de agua. ¿Cuál es su humedad relativa?

HR se deduce gráficamente, a partir del diagrama del aire húmedo, utilizando las isolíneas de humedad relativa e interpolando. Según el diagrama (ver Figura 2), se obtiene $\text{HR} = 75\%$.

También se puede calcular HR con la fórmula $\text{HR} = (q_a/q^*_s(T))100$. La humedad absoluta a saturación es $q^*_s(25^\circ\text{C}) = 20 \text{ g kg}^{-1}$, siendo $\text{HR} = (q_a/q^*_s(T))100 = (15/20)100 = 75\%$.

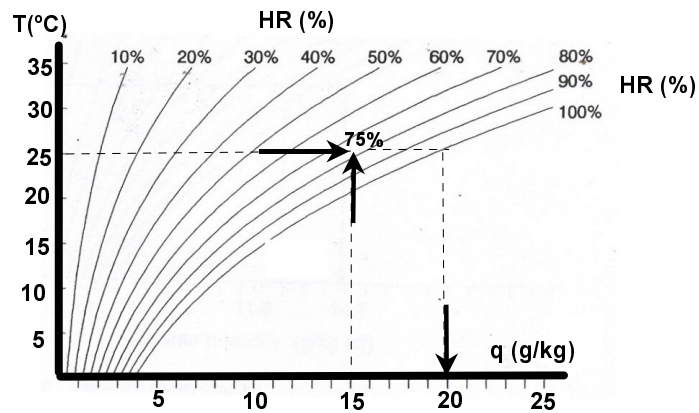


Figura 2

1.1.3- Ejercicio 3: Influencia de la transpiración del cultivo

A un instante dado la temperatura del aire de un invernadero es $T_a = 25\text{ °C}$ y su humedad absoluta $q_a = 15\text{ g kg}^{-1}$. La transpiración del cultivo induce una reducción de temperatura del aire de $2,5\text{ °C}$ y un aumento de su humedad absoluta de 2 g kg^{-1} . Calcular cuál será la humedad relativa, HR (%), resultante.

La temperatura del aire será $T_a = 22,5\text{ °C}$ y la humedad absoluta $q_a = (15+2) = 17\text{ g kg}^{-1}$. La humedad absoluta a saturación se deduce del diagrama de Mollier, $q^*_s(22,5\text{ °C}) = 17,2\text{ g kg}^{-1}$, (Figura 3) siendo la humedad relativa, $HR = (17,0/17,2)100 = 99\%$.

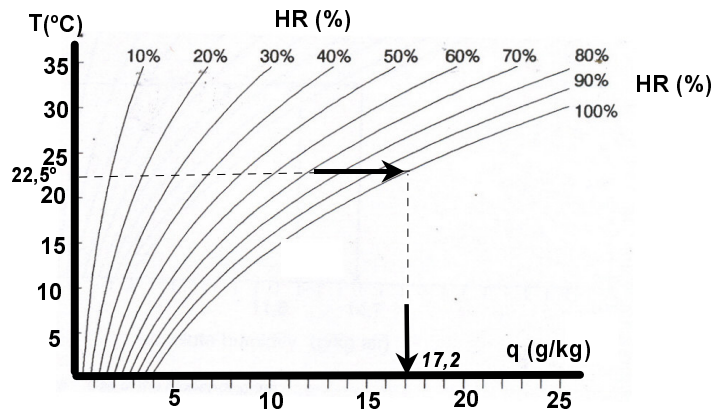


Figura 3

1.1.4- Ejercicio 4: Humedad relativa y calefacción

En un invernadero, la humedad relativa es $HR = 90\%$ y la temperatura del aire es $T_a = 20\text{ °C}$. Se quiere disminuir la humedad relativa hasta $HR = 80\%$. ¿Cuál será el aumento de temperatura que hay que aplicar al aire, por medio del sistema de calefacción, para obtener este valor de humedad relativa?.

Del diagrama de Mollier (Figura 4) se deduce que, para alcanzar $HR = 80\%$, hay que aumentar la temperatura del aire de 2 °C .

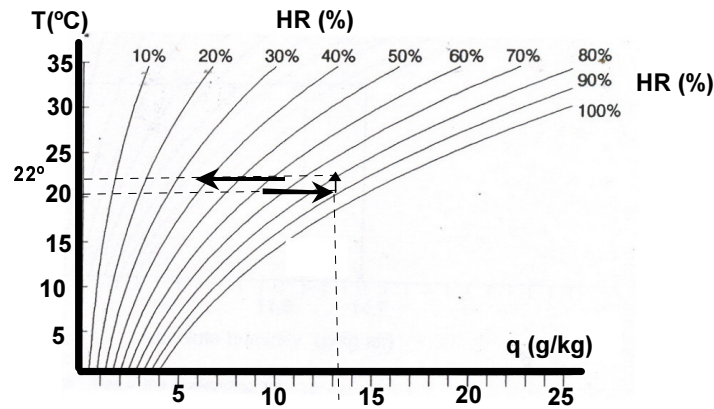


Figura 4

Notar que, en este ejemplo, la cantidad de vapor de agua (humedad absoluta, $q_a = 13,5 \text{ g kg}^{-1}$) permanece constante, es decir, el sistema de calefacción no añade vapor de agua al aire (caso de un sistema de calefacción por tubos aéreos o por aerotermos). En el caso de un sistema de calefacción a combustión directa, se añade una cierta cantidad de vapor de agua al aire del invernadero ($\approx 1,6 \text{ kg}$ de vapor de agua por m^3 de gas) lo que implica que, cuando el sistema de calefacción aumenta la temperatura de $2 \text{ }^\circ\text{C}$, el valor de q_a será superior $13,5 \text{ g kg}^{-1}$ y, por consiguiente, la humedad relativa también será superior a 80% .

1.1.5- Ejercicio 5: Influencia de la ventilación

En un invernadero, la temperatura del aire es $T_a = 22 \text{ }^\circ\text{C}$ y la humedad relativa es $HR = 90\%$. (i) Determinar q_a y $q^*_s(T)$. (ii) La apertura de la ventilación disminuye la temperatura de $1 \text{ }^\circ\text{C}$, y la humedad absoluta de 1 g kg^{-1} . Determinar los nuevos valores de HR y de $q^*_s(T)$.

Utilizando el diagrama de Mollier:

$$(i) T_a = 22^\circ\text{C} \quad q^*_s(22) = 16,5 \text{ g kg}^{-1} \quad q_a = q^*_s(T) \times HR/100 = 16,5 \times 0,90 = 14,8 \text{ g kg}^{-1}$$

$$(ii) T_a = 21^\circ\text{C} \quad q^*_s(21) = 15,7 \text{ g kg}^{-1} \quad q_a = (14,8 - 1) = 13,8 \text{ g kg}^{-1}$$

Por lo tanto, $HR = (13,8/15,7)100 = 88\%$

1.2- Déficit de vapor de agua

1.2.1- Ejercicio 6

En un invernadero, la temperatura de aire es $T_a = 25^\circ\text{C}$ y la humedad relativa es $HR = 70\%$. Calcular el déficit de vapor de agua (o déficit de saturación), Δq (g kg^{-1}). Utilizando el diagrama de Mollier (Figura 5):

$$\text{Para } T_a = 25^\circ\text{C y } HR = 70\%, \quad q_a = 14 \text{ g kg}^{-1}$$

$$\text{Para } T_a = 25^\circ\text{C}, \quad q^*_s(25) = 20 \text{ g kg}^{-1}$$

$$\text{El déficit de vapor de agua es } \Delta q = (20 - 14) = 6 \text{ g kg}^{-1}$$

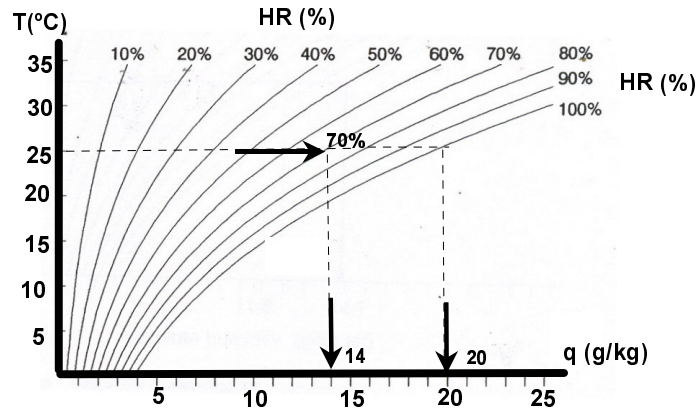


Figura 5

1.2.2- Ejercicio 7

En un invernadero cultivado con lechuga, la temperatura del aire es $T_a = 12\text{ °C}$ y la humedad relativa es $HR_a = 80\%$. En un invernadero cultivado con tomate, $T_a = 18\text{ °C}$ y la humedad relativa es $HR_a = 80\%$. Calcular el déficit de saturación del aire, D_a en g kg^{-1} , en los dos invernaderos.

Invernadero cultivado con lechuga:

$$T_a = 12\text{ °C y } HR_a = 80\%, q_a = 7,0\text{ g kg}^{-1} \quad q^*_s(12) = 8,7\text{ g kg}^{-1} \quad D_a = 1,7\text{ g kg}^{-1}$$

Invernadero cultivado con tomate:

$$T_a = 18\text{ °C y } HR = 80\%, q_a = 10,3\text{ g kg}^{-1} \quad q^*_s(18) = 13\text{ g kg}^{-1} \quad D_a = 2,7\text{ g kg}^{-1}$$

1.2.3- Ejercicio 8

El ordenador de clima mantiene una humedad relativa de 75%, constante durante todo el día. A la salida del sol, la temperatura de aire es de 17 °C. Por la tarde, la temperatura alcanza 28 °C. Calcular el déficit de saturación en los dos casos.

$$\text{Mañana: } T_a = 17\text{ °C y } HR = 75\%, q_a = 9,1\text{ g kg}^{-1} \quad q^*_s(T) = 12,2\text{ g kg}^{-1} \quad D_a = 3,1\text{ g kg}^{-1}$$

$$\text{Tomate: } T_a = 28\text{ °C y } HR = 75\%, q_a = 17,9\text{ g kg}^{-1} \quad q^*_s(T) = 23,8\text{ g kg}^{-1} \quad D_a = 5,9\text{ g kg}^{-1}$$

1.3- Temperatura de punto de rocío

1.3.1- Ejercicio 9

En un invernadero, la temperatura del aire es $T_a = 25\text{ °C}$ y la humedad relativa es $HR_a = 70\%$. Calcular la temperatura de punto de rocío, T_r (°C).

Para $T_a = 25\text{ °C}$ y $HR_a = 70\%$,

$$T_r = 19,1\text{ °C (Figura 6)}$$

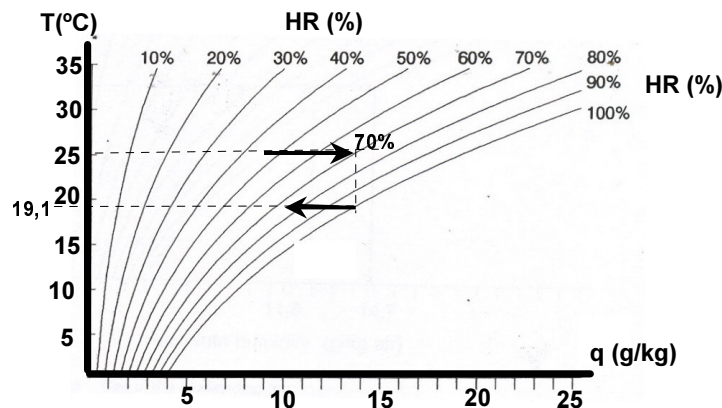


Figura 6

1.3.2- Ejercicio 10

Un invernadero tiene un techo cubierto con simple pared, mientras que las paredes laterales están cubiertas con una doble pared. La temperatura interior es del aire es $T_a = 20^\circ\text{C}$ y la humedad relativa es $HR_a = 75\%$. (i) Determinar la temperatura de punto de rocío. (ii) Sabiendo que la temperatura de la simple pared es de 12°C y la de la doble pared de 17°C , determinar en qué pared, o paredes, se puede producir condensación.

(i) Se determina la temperatura de punto de rocío con el diagrama de Mollier:

$$- T_a = 20^\circ\text{C} \text{ y } HR = 75\% \quad T_r = 15,5^\circ\text{C}$$

(ii) La condensación se producirá en la simple pared, puesto que su temperatura (12°C) es inferior a T_r . No habrá condensación en la doble pared ($T_r < 17^\circ\text{C}$)-

1.4- Presión parcial de vapor de agua

Ejercicio 11

La temperatura de aire es $T_a = 20^\circ\text{C}$ y la humedad relativa es $HR_a = 70\%$. Determinar la presión de vapor de agua actual, e_a (kPa): (i) con el diagrama de Mollier y (ii) a partir de la fórmula de Alt.

(i) Con el diagrama de Mollier (Figura 7), se obtiene $e_a = 1,6$ kPa. La tensión de vapor a saturación se determina para $HR_a = 100\%$, siendo $e^*_s(20) = 2,3$ kPa..

(ii) Utilizando la fórmula de Alt, se obtiene la tensión de vapor a saturación en función de la temperatura del aire (a convertir en radianes si se utiliza Excel, es decir, dividiendo T_a por 57,3):

$$e_a^*(T) = 0,6107 \left[1 + \sqrt{2} \sin\left(\frac{20}{3}\right) \right]^{8,827}$$

En este caso, $e^*_a = 2,34$ kPa, y la tensión actual es $e_a = e^*_a \times HR/100 = 2,34 \times 0,70 = 1,63$ kPa.

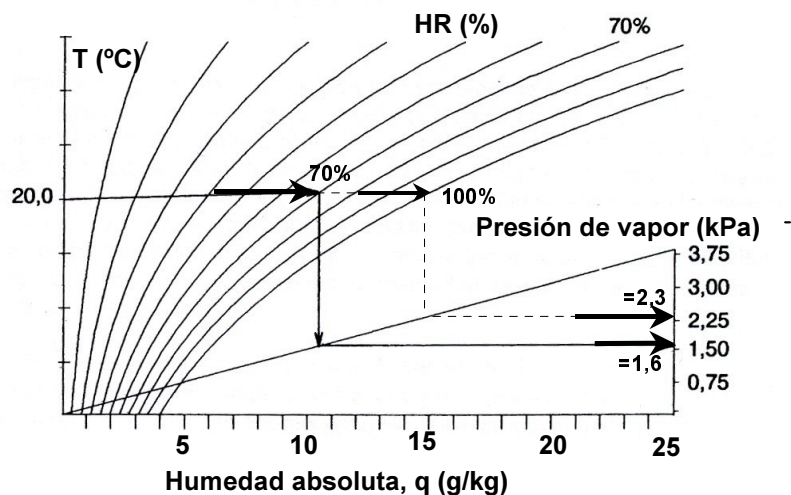


Figura 7

1.5- Temperatura de bulbo húmedo

Ejercicio 12

Calcular la temperatura de bulbo húmedo T_h ($^\circ\text{C}$) de un aire con una temperatura seca $T_a = 20^\circ\text{C}$ y con:

- (i) Una humedad relativa $HR_a = 80\%$
- (ii) Un contenido en agua de $q_a = 8 \text{ g kg}^{-1}$.

Utilizando el diagrama de Mollier (líneas oblicuas discontinuas (Figura 8), se obtiene

- (i) $T_h = 17,9^\circ\text{C}$
- (ii) $T_h = 14,2^\circ\text{C}$

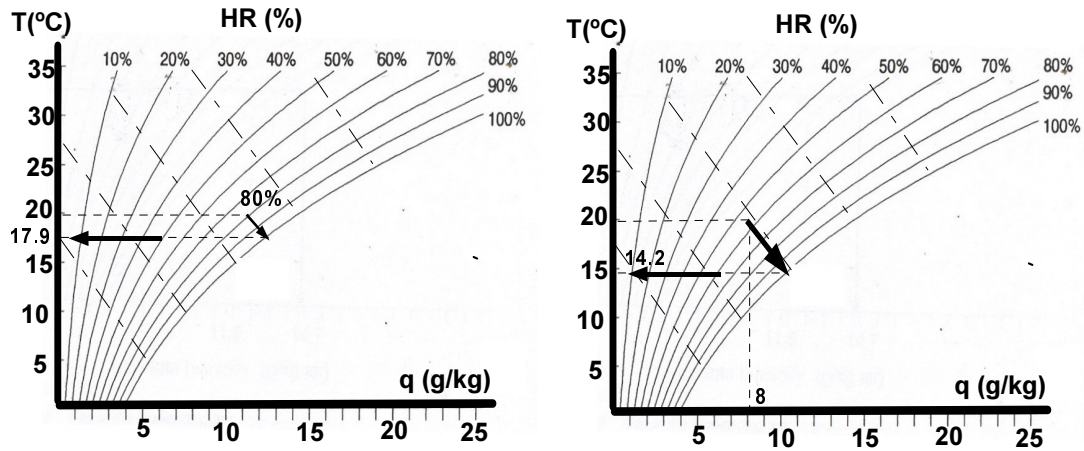


Figura 8

1.6- Calor latente y calor sensible

1.6.1- Ejercicio 13

Calcular el contenido energético total (E , entalpía total en kJ kg^{-1}) de una masa de aire húmedo, con una temperatura de 30°C , que contiene 1 kg de aire seco y una humedad absoluta de 10 g kg^{-1} :

- (i) Utilizando las fórmulas que se dan en el la Unidad 2.
- (ii) Utilizando el diagrama de Mollier.

(i) - Calor sensible del aire seco = $30^\circ\text{C} \times 1,01 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	$= 30,3 \text{ kJ kg}^{-1}$
- Calor sensible del vapor de agua = $30^\circ\text{C} \times 0,010 \text{ kg kg}^{-1} \times 1,81 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	$= 0,54 \text{ kJ kg}^{-1}$
- Calor latente del vapor de agua = $0,010 \text{ kg kg}^{-1} \times 2500 \text{ kJ kg}^{-1}$	$= 25,0 \text{ kJ kg}^{-1}$
Total	$= 55,84 \text{ kJ kg}^{-1}$

O sea, $E = 55,84 \text{ kJ kg}^{-1}$

(ii) En el diagrama de Mollier (Figura 9), utilizando las líneas oblicuas continuas, se obtiene el valor $E = 56 \text{ kJ kg}^{-1}$.

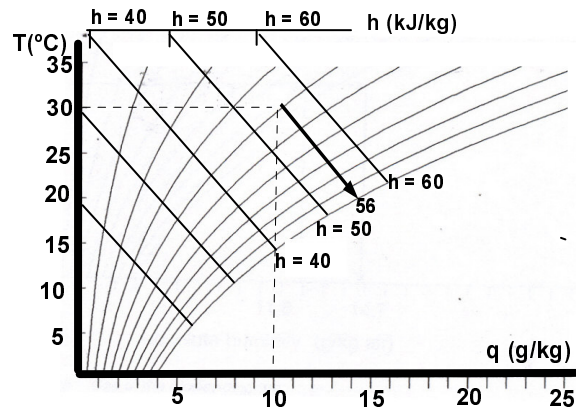


Figura 9

1.6.2- Ejercicio 14

El calor latente contenido en 1 kg de aire es igual a 50 kJ ¿Cuál es la humedad absoluta del aire? El calor latente de vaporización es $\lambda = 2,5 \text{ MJ kg}^{-1}$.

La cantidad de vapor de agua es $Q_v = 50 \text{ kJ}/2500 \text{ kJ kg}^{-1} = 0,020 \text{ kg} \equiv 20 \text{ g}$. Por lo tanto, la humedad absoluta de un kg de aire será $q_a = 20 \text{ g kg}^{-1}$.

2- Ejercicios resueltos: Nociones básicas de unidades de radiación**2.1- Conversión entre unidades fotométricas y radiométricas****2.1.1- Ejercicio 1**

Una lámpara incandescente emite esencialmente en el amarillo, y un poco en el rojo. Se mide la radiación con un luxómetro, obteniendo un valor de 3000 lux. ¿Cuál es aproximadamente su equivalencia en radiación fotosintéticamente activa (PAR, W m^{-2})?

Utilizando la conversión $1 \text{ W m}^{-2} \text{ (PAR)} = 200 \text{ lux}$, se obtiene un valor de PAR de:

$$\text{PAR} = 3000/200 = 15 \text{ W m}^{-2}.$$

2.1.2- Ejercicio 2

En el exterior se mide, con una pila de Moll, una radiación global solar de 840 W m^{-2} . Deducir el valor de la radiación PAR (en W m^{-2} y en $\mu\text{mol}_{\text{fotón}} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

Si se considera que el PAR es aproximadamente el 50% de la radiación global solar, la radiación PAR será:

$$\text{PAR} = 840/2 = 420 \text{ W m}^{-2}$$

Considerando que 1 W m^{-2} de PAR equivale a $4,56 \mu\text{mol}_{\text{fotón}} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

$$\text{PAR} = (420)(4,56) = 1915,2 \mu\text{mol}_{\text{fotón}} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

2.1.3- Ejercicio 3

A partir de una pila de Moll y de un integrador horario, se ha medido durante una hora un valor medio de radiación solar de 400 W m^{-2} . (i) ¿Cuál es la cantidad de energía recibida durante esta hora por una superficie horizontal de 1 m^2 ? (ii) ¿Si toda esta energía se utilizase en evaporación de agua, cuál sería la cantidad evaporada por m^2 ?

El calor latente de vaporización del agua es $\lambda = 2,5 \text{ MJ kg}^{-1}$.

(i) La energía recibida es:

$$(400 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1}) \times (3600 \text{ s h}^{-1}) \equiv 1,44 \text{ MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1} \equiv 144 \text{ J cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$$

(ii) El equivalente en cantidad de agua evaporada es:

$$E = 1,44 \text{ MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1} / 2,5 \text{ MJ kg}^{-1} = 0,576 \text{ kg (agua) m}^{-2} \text{ h}^{-1} \equiv 0,576 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1} \equiv 0,58 \text{ mm h}^{-1}$$

2.2- Ordenes de magnitud**2.2.1- Ejercicio 4**

En un invernadero situado en la zona de Cartagena, la transmisión de la radiación global es de 0,50 en invierno y de 0,60 en verano. En el exterior, la integral de la radiación media diaria en el mes de enero es de $12 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, y en el mes de julio de $30 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$. Suponiendo que 60 % de la energía solar que entra en el invernadero se transforma en calor latente, determinar la cantidad de agua evaporada en ambos periodos del año. El calor latente de vaporización del agua es $\lambda = 2,5 \text{ MJ kg}^{-1}$.

Enero: La carga solar que recibe el invernadero es: $12 \times 0,5 = 6 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$

$$\text{La evaporación} = 0,6 \times 6 / 2,5 = 1,44 \text{ L m}^{-2} \text{ día}^{-1} = 1,44 \text{ mm día}^{-1}$$

Julio: La carga solar que recibe el invernadero es: $30 \times 0,6 = 18 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$

La evaporación = $0,6 \times 18/2,5 = 4,32 \text{ L m}^{-2} \text{ día}^{-1} = 4,32 \text{ mm día}^{-1}$

2.2.2- Ejercicio 5

A partir del ejemplo anterior se deduce que, en enero, la fracción de calor sensible que sirve a aumentar la temperatura del invernadero es $4,56 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ (= 6,0-1,44), mientras que en junio alcanza $13,68 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ (= 18-4,32). La amplitud diaria de temperatura del aire durante el mes de enero es del orden de 10 °C , y durante el mes de julio del orden de 15 a 20 °C . ¿Cuál es el orden de magnitud de la cantidad de energía sensible almacenada en el aire de un invernadero con una altura media de 4 m ? Comentar los resultados.

Para una altura de 4 m , 1 m^2 de suelo corresponde a un volumen de 4 m^3 . Es decir, corresponde a un peso de aire de 5 kg m^{-2} ($4 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \times 1,25 \text{ kg m}^{-3}$). Siendo el calor específico del aire igual a $1 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ °C}^{-1}$, un aumento de la temperatura de 1 °C de una masa de aire de 5 kg m^{-2} requiere una energía de 5 kJ m^{-2} . Por lo tanto, la cantidad de energía almacenada en el aire durante el día es:

- En enero, con el supuesto de una amplitud de temperatura de $10 \text{ °C} = 10 \times 5 \times 1 = 50 \text{ kJ m}^{-2}$, es decir, una fracción de la energía sensible entrante igual a $50/4560 \approx 1,1 \%$.

- En julio, con un supuesto de una amplitud de temperatura de $20 \text{ °C} = 20 \times 5 \times 1 = 100 \text{ kJ m}^{-2}$, es decir una fracción de la energía sensible entrante igual a $100/13680 \approx 0,73\%$.

Comentarios

A partir de esta estimación, está claro, que:

- El volumen del aire del invernadero no juega un papel relevante en el almacenamiento de energía sensible y en la inercia térmica del invernadero.

- Existen procesos de intercambios de calor sensible entre el aire del invernadero y su entorno (vegetación, paredes, aire exterior a través de las fugas y de la ventilación). Sin estos procesos de conducción, convección y advección (Unidad 3, Unidad 5-III, Lectura Complementaria U6), la temperatura del aire alcanzaría valores muy elevados. Controlar la temperatura de un invernadero requiere, de hecho, controlar los flujos de intercambio entre el aire y los otros elementos, a través de sistemas de climatización.

2.2.3- Ejercicio 6

Considerando las condiciones previamente mencionadas para el mes de enero (Ejemplo 2), un sistema de control de clima mantiene una humedad relativa constante ($HR_a = 75\%$) durante las 24 horas del día, una temperatura de 15 °C , en periodo nocturno, y de 25 °C durante el día. Calcular el aumento de cantidad de vapor de agua cuando se pasa de las condiciones de noche a las condiciones de día, y su equivalente energético. Comentar los resultados.

De noche: $T_a = 15 \text{ °C}$, $HR_a = 75\%$ $q_a = 8 \text{ g kg}^{-1}$

De día: $T_a = 25 \text{ °C}$, $HR_a = 75\%$ $q_a = 15 \text{ g kg}^{-1}$

Se parte de una relación volumen de aire respecto a la superficie de suelo de $4 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$. Es decir, de un peso de aire de 5 kg m^{-2} ($4 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \times 1,25 \text{ kg m}^{-3}$). El almacenamiento de vapor de agua, en un día es igual a $(15-8) \text{ g kg}^{-1} \times 5 \text{ kg m}^{-2} = 35 \text{ g m}^{-2}$. El equivalente energético corresponde a $0,035 \text{ kg m}^{-2} \text{ día}^{-1} \times 2500 \text{ kJ kg}^{-1} = 87,5 \text{ kJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, lo que da un orden de magnitud similar al que se ha obtenido con el almacenamiento de energía sensible en el ejemplo precedente (Ejemplo 2).

Comentarios

De esta estimación, se deduce que:

- El almacenamiento de vapor de agua en el aire del invernadero ($=87,5 \text{ kJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) representa solamente una fracción muy pequeña de la cantidad de calor latente utilizada en el

proceso de evaporación que alcanza, en enero, $3,6 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ($= 0,6 \times 6$), siendo este proceso la principal fuente de enfriamiento del aire del invernadero.

- La mayor parte del agua evaporada en el invernadero se pierde (i) hacia el exterior, por medio de la ventilación y de las fugas y (ii) por condensación en los puntos fríos del invernadero.

- El proceso de ventilación es el sumidero más importante de vapor de agua, lo que explica la importancia de esta función de climatización en el control de la humedad bajo invernadero.

- Los intercambios por ventilación y por fugas, y la condensación, deben de formularse de forma precisa a través del balance de masa del invernadero (Unidad 8).

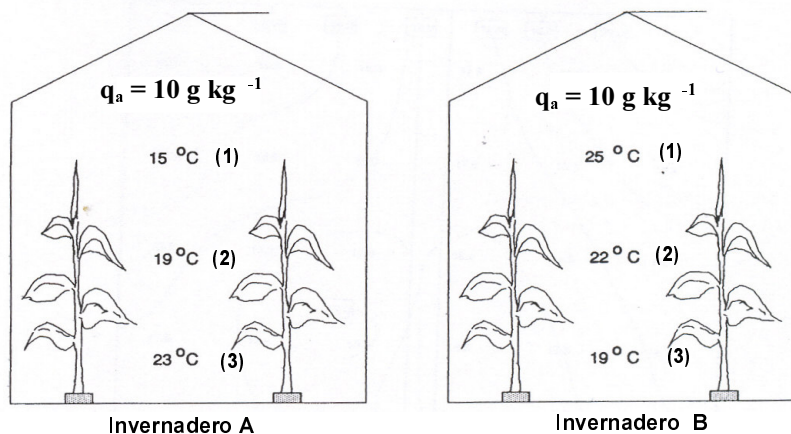
Por lo tanto, es especialmente útil disponer de una descripción matemática (modelos) del conjunto de procesos de intercambio sensible (convección, ventilación y conducción) y latente (transpiración del dosel vegetal, evaporación del suelo, condensación) con el objeto de establecer los balances de energía y de masa del invernadero y poder predecir las variables del clima interior.

3- Ejercicios a resolver

3.1- Ejercicio 1

Enunciado

La figura que se adjunta muestra dos invernaderos (A y B) con diferentes gradientes verticales de temperatura del aire (zonas: 1, 2 y 3). La humedad absoluta, q_a , es la misma en todo el invernadero e igual, en los invernaderos A y B, a 10 g kg^{-1} .



Se pide:

- 1.1- Determinar la humedad relativa (HR_a , %) y el déficit de saturación del aire (D_a , kPa) en las tres zonas, (1), (2) y (3), indicadas en la Figura.
- 1.2- Explicar en qué zona del invernadero A y del B (la (1), la (2) o la (3)) la transpiración de la plantas será más elevada.
- 1.3- Dar una explicación razonada de las situaciones en las que se pueden obtener estos perfiles de temperatura.
- 1.4- Explicar en qué zona del invernadero A y del invernadero B ubicaría los sensores de medida de temperatura y humedad del aire.

3.2- Ejercicio 2

Enunciado

Sea un invernadero con sistema NFT (Nutrient Film Technique), donde el agua de riego circula en canaletas y está en contacto directo con el aire. La temperatura del agua es $T_{ag} = 10\text{ °C}$. La temperatura del aire es $T_a = 20\text{ °C}$ y su humedad relativa $HR_a = 80\%$. Se pide:

- 2.1- Determinar el punto de rocío del aire, T_r (°C).
- 2.2- Determinar la presión de vapor del aire en contacto con la superficie del agua y la presión de vapor del aire del invernadero.
- 2.3- Dar una explicación razonada de la influencia que ejerce el sistema NFT sobre la humedad del aire del invernadero.

3.3- Ejercicio 3

Enunciado

A partir de las conclusiones que se obtienen en el Ejercicio 2, el agricultor decide calentar la solución nutritiva a la temperatura del aire, es decir a $T_{ag} = 20\text{ °C}$. Recalcular la presión de vapor del aire en la superficie del agua, y deducir cuál es el efecto del sistema NFT sobre la humedad del aire en este caso

3.4- Ejercicio 4

Enunciado

En un invernadero, la temperatura del aire en la parte inferior del dosel vegetal es $T_a = 15\text{ °C}$, su humedad relativa es $HR_a = 90\%$. La temperatura de los frutos es $T_f = 12\text{ °C}$.

Se pide dar una explicación coherente de lo que va a ocurrir con las condiciones de temperatura y de humedad que se dan en el enunciado.

3.5- Ejercicio 5

Enunciado

A un instante dado, el aire del invernadero con una temperatura $T_1 = 23\text{ °C}$ y una humedad relativa $HR_1 = 70\%$ se hace pasar por un deshumidificador del que sale a $T_2 = 15\text{ °C}$.

Se pide, utilizando el diagrama del aire húmedo (en las preguntas 5.1 a 5.3):

- 5.1- Calcular las características del aire húmedo en su estado inicial (1) y final (2):
 - Humedad absoluta real (q , g kg^{-1}) y tensión de vapor real (e , kPa)
 - Humedad absoluta a saturación ($q^*_s(T)$, g kg^{-1}) y tensión de vapor saturante, ($e^*_s(T)$, kPa)
 - Entalpía (E , kJ kg^{-1})
 - Déficit de saturación (kPa)
 - Humedad relativa (HR, %, para el estado (2))
- 5.2- Calcular el flujo de vapor de agua ($\Delta\phi$, en g s^{-1}) que se extrae del invernadero cuando se hace pasar por el deshumidificador un caudal de aire $G_{ma} = 5\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$.
- 5.3- Calcular la entalpía extraída (E , kJ kg^{-1}):
 - 3a) Calor sensible
 - 3b) Calor latente

3c) Total

5.4- Comparar los resultados que se obtienen en (3a), (3b), (3c) con los calculados a partir la relación siguiente:

$$E = (C_{pa} + C_{pg} q) T + \lambda q$$

donde: E= entalpía total (kJ kg^{-1}), λ = calor latente de vaporización del agua (2500 KJ kg^{-1}); T en $^{\circ}\text{C}$; q = humedad absoluta en (kg kg^{-1}). C_{pa} = calor específico del aire a 0°C ($1,01 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) y C_{pg} = calor específico del agua a 0°C ($1,81 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)

4.6- Ejercicio 6

Enunciado

En un invernadero se ha instalado un sistema de enfriamiento por evaporación (paneles evaporantes) a través del cual se hace pasar el aire exterior. El aire exterior al atravesar el panel aumenta su humedad relativa y se enfría, guardando su contenido energético. Se desea determinar las características del aire a la salida del panel (estado 2) para condiciones extremas del aire exterior (estado 1) en periodo de verano: temperatura, $T_1 = 40^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa $HR_1 = 25\%$. Se pide calcular:

6.1- La temperatura mínima a la que se puede enfriar el aire exterior después de atravesar el panel de evaporación si el rendimiento del panel fuese $r = 100\%$

6.2- La temperatura mínima, T_2 , a la que se puede enfriar el aire después de atravesar el panel de evaporación, suponiendo que el rendimiento es $r = 75\%$

6.3- Las siguientes variables de estado del aire después de atravesar el panel:

- Temperatura seca del aire: T_2 ($^{\circ}\text{C}$)
- Temperatura húmeda del aire, T_h ($^{\circ}\text{C}$)
- Humedad relativa, HR_2 (%)
- Humedad absoluta, q_2 (g kg^{-1})
- Déficit de saturación del aire, D_2 (g kg^{-1})

6.4- La tasa de evaporación del panel (ϕ_{vp} , g s^{-1}) cuando el caudal de aire que se hace pasar al través del panel es $G_{ma} = 30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

