

## UNIDAD 7. AGROMETEOROLOGIA Y VEGETALES. APUNTES EN BORRADOR, PERO BUENOS.

### Las plantas y su ambiente.

Cuando se analiza el comportamiento de animales y humanos, se encuentra que ciertos ambientes son inapropiados para la vida. Un animal puede escoger su ambiente para adecuarse mejor a su energía, pero las plantas no son capaces de moverse en los alrededores para encontrar un ambiente adecuado, sin embargo existe considerable evidencia de que la selección y adaptación resulta en morfologías de hojas, estructuras de cubiertas, etc, lo que da a las plantas nativas de un ambiente, una ventaja competitiva para esa ubicación o lugar. Las plantas desérticas por ejemplo, tienden a tener hojas bastante estrechas, mientras que las plantas de ambientes más húmedos pueden ser mucho más grandes. Podríamos preguntarnos que limitaciones ambientales hay para el tamaño y otras características de la hoja, relacionadas con el intercambio de energía, o si hay una forma óptima de hoja para un ambiente particular de la hoja. Diversos factores influirán en la forma óptima de la hoja para un ambiente determinado como economía estructural, estructura de la cubierta y predación. Nos centraremos en los efectos del ambiente físico sobre la fotosíntesis y la transpiración, con la idea de indicar que características de la hoja podrían ser más adecuadas para un ambiente determinado.

Dos factores deben ser favorables para que una hoja permanezca viva. El promedio de la fotosíntesis neta ser positivo y debe permanecer a temperaturas no letales. Si la fotosíntesis neta es negativa por un periodo, la hoja se cae porque no hay ningún mecanismo para llevar azúcares hacia las hojas maduras. La fotosíntesis neta está determinada por factores ambientales y por el balance de agua de la hoja.

### Radiación solar y fotosíntesis.

La vida en la tierra depende fundamentalmente de la energía solar, la cual es atrapada mediante el proceso fotosintético, que es responsable de la producción de toda la materia orgánica que conocemos. La materia orgánica comprende los alimentos que consumimos diariamente tanto nosotros como los animales, los combustibles fósiles (petróleo, gas, gasolina, carbón); así como la leña, madera, pulpa para papel, inclusive la materia prima para la fabricación de fibras sintéticas, plásticos, poliéster, etc.

La cantidad de carbono fijado por la fotosíntesis es espectacular, como lo demuestran las cifras de la producción anual de materia orgánica seca, estimada en  $1.5 \times 10^{11}$  toneladas, con aproximadamente 60% formada en la tierra, el resto en océanos y aguas continentales. Los organismos que en el curso de la evolución aprendieron a usar la energía solar y a transformarla en energía química son los llamados *autótrofos*, que están representados por bacterias y organismos del Reino Vegetal (figura 7.1). Los *heterótrofos*, contrastan con los autótrofos, son los organismos vivos que no pueden sintetizar su propio alimento, y tiene por tanto que alimentarse de otros seres vivos o de productos orgánicos ya elaborados. Los animales, los hongos y la mayoría de las bacterias son organismos heterótrofos.

La radiación luminosa llega a la tierra en forma de “pequeños paquetes”, conocidos como cuantos o fotones. Los seres fotosintéticos captan la luz mediante diversos pigmentos fotosensibles, entre los que destacan por su abundancia las clorofilas y carotenos. Al absorber los pigmentos la luz, electrones de sus moléculas adquieren niveles energéticos superiores, cuando vuelven a su nivel inicial liberan la energía que sirve para activar una reacción química: una molécula de pigmento se *oxida* al perder un electrón que es recogido por otra sustancia, que se *reduce*. Así la clorofila puede transformar la energía luminosa en energía química.

ORGANISMOS		
	Fotoautótrofos	Heterótrofos
Fuente de Energía:	Luz del Sol	Alimentos: carbohidratos, proteínas, grasas
Fuente de Carbono:	CO <sub>2</sub>	Alimentos
Organismos:	Plantas Algas Cianobacterias Bacterias fotosintéticas	Animales, Protozoos, Hongos, Bacterias heterótrofas Partes no fotosintéticas de las plantas

Figura 7.1 Organismos autótrofos y heterótrofos.

Para que la energía de la luz pueda ser usada por los seres vivos, primero ha de ser absorbida. Una sustancia que absorbe la luz se denomina *pigmento*. Algunos pigmentos absorben la luz en todas las longitudes de onda y por lo tanto tienen un color negro. Otros sólo absorben ciertas longitudes de onda y reflejan o transmiten las longitudes de onda que no absorben, como se observa en el esquema de la figura 7.2. Por ejemplo, la clorofila, el pigmento que hace que las hojas sean verdes, absorbe la luz en el espectro violeta y azul y también en el rojo. Puesto que transmite y refleja la luz verde, su aspecto es verde.

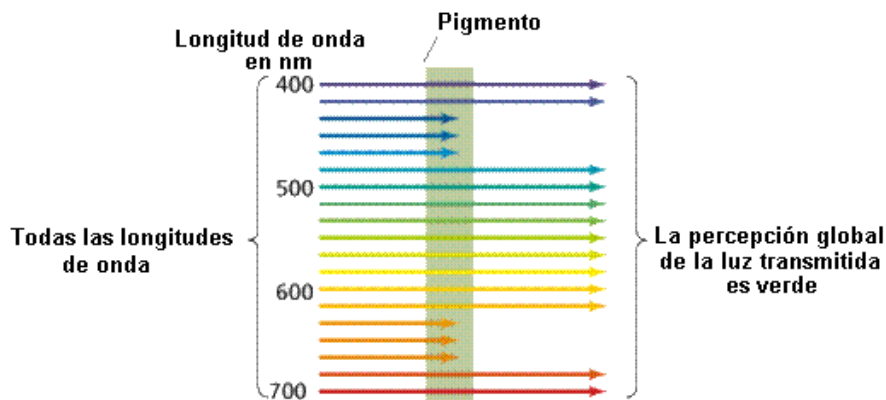


Figura 7.2. Absorción de radiación solar por un pigmento.

Existen varias clases de *clorofila*, que varían ligeramente en su estructura molecular. La mayor parte de las células fotosintéticas tienen también un segundo tipo de clorofila, que en las plantas y algas verdes es la *clorofila b*, y cantidades de otro grupo de pigmentos llamados *carotenoides* (figura 7.3). Los carotenoides, hidrocarburos polímeros del isopreno, pueden ser de dos tipos: los *carotenos* (amarillos) y las *xantofilas* (naranjas). Hay también un tercer tipo de pigmento, las *ficobilinas* (figura 7.3), de las que también hay dos tipos principales: la *ficocianina* (azul) y la *ficoeritrina* (roja) que se presentan también en algunos organismos fotosintéticos. En una hoja, estos colores quedan enmascarados por la clorofila, más abundante. Sin embargo, en algunos tejidos, como el tomate maduro, los colores del carotenoide pueden dominar cosa que también pasa en otoño con las hojas de caducifolios cuando dejan de fabricar clorofila. La clorofila *b*, los carotenoides y las ficobilinas son capaces de absorber la luz a diferentes longitudes de onda de la clorofila *a*. Al parecer, pueden hacer pasar la energía a la clorofila *a*, con lo que se incrementa la cantidad de luz disponible para la fotosíntesis.

Tipos de Pigmentos Fotosintéticos	
CLOROFILAS: <b>clor. a, b, c, d y e</b>	
CAROTENOIDES: <b>Carotenos y Xantofilas</b>	
FICOBILINAS: <b>Ficocianina y Ficoeritrina</b>	
Pigmentos Fotosintéticos	Zona del espectro donde absorben
CLOROFILAS:	ROJO y AZUL VIOLETA
CAROTENOIDES:	ROJO y AZUL
FICOBILINAS:	NARANJA, VERDE y AZUL
BACTERIOCLOROFILAS:	ROJO LEJANO e INFRARROJO

Figura 7.3. Tipos de pigmentos fotosintéticos.

Las membranas especializadas, donde se encuentran embebidas la clorofila y otros pigmentos, se llaman tilacoides. Normalmente, presentan un aspecto de sacos o vesículas aplanadas. En los eucariotas, los tilacoides forman parte de la estructura interna de orgánulos especializados, los cloroplastos (figura 7.4). Una célula de hoja contiene característicamente entre 40 y 50 cloroplastos, y no es extraño encontrar unos 500.000 cloroplastos por milímetro cuadrado de superficie foliar.

En las plantas, los cloroplastos se encuentran presentes en todas las células clorénquimáticas del mesófilo y de la periferia de los tallos herbáceos. El cloroplasto está delimitado por *dos membranas* (la interna y la externa) y contiene una matriz interna o *estroma* (figura 7.4). El estroma se encuentra atravesado por todo el sistema tilacoidal de membranas (o *lamelas*) que delimitan otro compartimiento, el *lumen* o *espacio intratilacoidal*. Los agrupamientos de tilacoides apilados forman los *grana* (pilas de lamelas granales), mientras que el resto de tilacoides forman las *lamelas estromales*. Todos los tilacoides de un cloroplasto son siempre paralelos entre sí. Así pues, a medida que los cloroplastos se orientan hacia la luz, los millones de moléculas de pigmento pueden orientarse simultáneamente para optimizar la recepción, como si fueran pequeñas antenas electromagnéticas

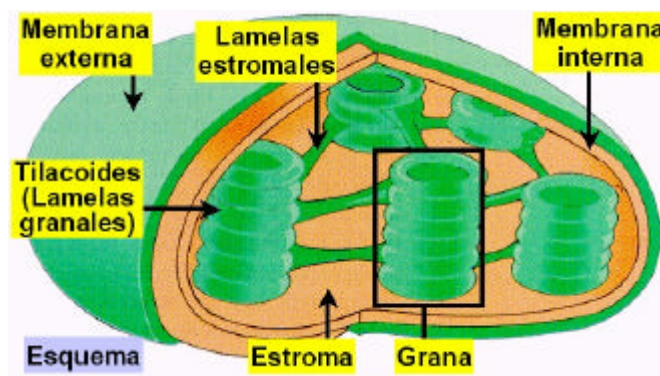
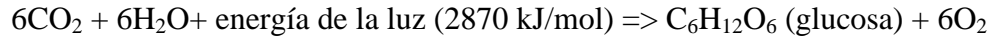


Figura 7.4. Esquema de un cloroplasto donde se pueden apreciar sus componentes principales.

### Fotosíntesis.

La fotosíntesis es uno de los procesos metabólicos de los que se valen las células para obtener energía. Es un proceso complejo, mediante el cual los seres vivos poseedores de clorofila y otros pigmentos, captan energía luminosa procedente del sol y la transforman en energía química y en compuestos reductores, y con ellos transforman el agua y el CO<sub>2</sub> en compuestos orgánicos reducidos (glucosa y otros), liberando oxígeno. La ecuación clásica de la fotosíntesis es:



La energía captada en la fotosíntesis y el poder reductor adquirido en el proceso, hacen posible la reducción y la asimilación de los bioelementos necesarios, como nitrógeno y azufre, además de carbono, para formar materia viva. En la fotosíntesis, gracias a la energía aportada por la luz solar, se unen el dióxido de carbono y el agua para formar azúcares. Como producto de desecho, se arroja oxígeno a la atmósfera (figura 7.5).

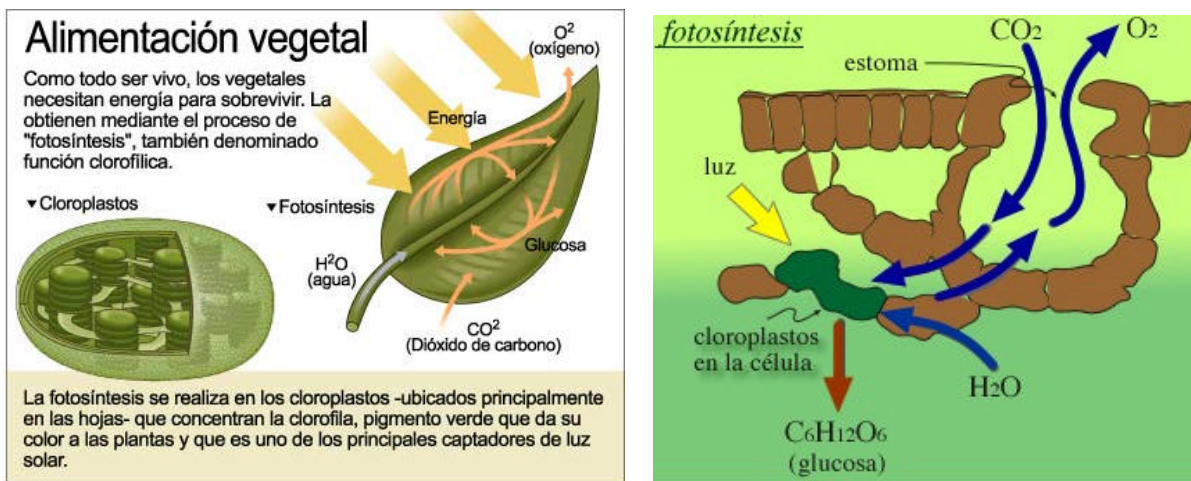


Figura 7.5. Proceso de fotosíntesis.

Cada molécula de  $\text{CO}_2$  del aire queda convertida en un átomo de carbono orgánico (Corg), que pasa a formar parte de un azúcar, y en una molécula residual de oxígeno ( $\text{O}_2$ ), que pasa al reservorio de la atmósfera. Por eso, de una forma aún más esquemática, la reacción fotosintética puede escribirse así:



**Importancia biológica de la fotosíntesis.**

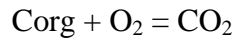
La fotosíntesis es seguramente el proceso bioquímico más importante de la biosfera por varios motivos:

1. La síntesis de materia orgánica a partir de la inorgánica se realiza fundamentalmente mediante la fotosíntesis; luego irá pasando de unos seres vivos a otros mediante las cadenas tróficas, para ser transformada en materia propia por los diferentes seres vivos.
2. Produce la transformación de la energía luminosa en energía química, necesaria y utilizada por los seres vivos
3. En la fotosíntesis se libera oxígeno, que será utilizado en la respiración aerobia como oxidante.
4. La fotosíntesis fue causante del cambio producido en la atmósfera primitiva, que era anaerobia y reductora.
5. De la fotosíntesis depende también la energía almacenada en combustibles fósiles como carbón, petróleo y gas natural.
6. El equilibrio necesario entre seres autótrofos y heterótrofos no sería posible sin la fotosíntesis.

Se puede concluir que la diversidad de la vida existente en la Tierra depende principalmente de la fotosíntesis.

**Respiración u oxidación.**

La fotosíntesis tiene su contrapartida en la respiración metabólica de la mayoría de las bacterias, de las plantas y de los animales. La respiración consiste químicamente en la oxidación del carbono orgánico, reacción en la cual se desprende calor:



Concretamente la reacción completa de oxidación de un mol de glucosa es:



En la respiración, se queman azúcares en las mitocondrias celulares, aportando la energía necesaria para las funciones vitales. En esa combustión se consume oxígeno atmosférico y se arrojan, como productos de desecho, dióxido de carbono y agua (figura 7.6).

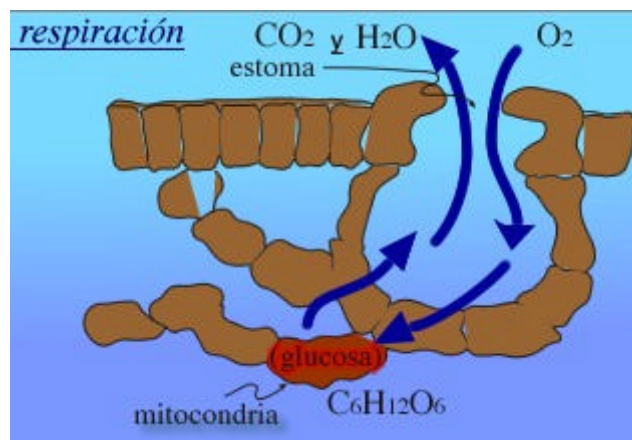


Figura 7.5. Proceso de respiración vegetal.

De esta manera, la mayor parte del Corg creado en la fotosíntesis se consume rápidamente y se oxida volviendo a formar CO<sub>2</sub> atmosférico, ya sea en la respiración metabólica de los mismos organismos fotosintéticos autótrofos que lo crearon (bacterias, algas, plantas), o bien en la respiración de los animales heterótrofos que se alimentan de ellos, el animal humano, entre otros. Por ejemplo, diariamente, el metabolismo de una persona que siga la dieta media de 2.800 kcal/día produce 1.140 gramos de CO<sub>2</sub>.

**Balance.**

Si estas dos reacciones bioquímicas opuestas, fotosíntesis y respiración, se hubiesen producido siempre con la misma intensidad, no habría en este ciclo ni pérdidas ni ganancias de CO<sub>2</sub> atmosférico. Ni tampoco nunca se habría acumulado oxígeno en la atmósfera. El carbono contenido en la materia orgánica, creada en la fotosíntesis vegetal y transmitida por la cadena alimentaria a la vida animal, sería devuelto a la atmósfera en forma de CO<sub>2</sub>, tras la oxidación ocasionada en la respiración metabólica y en la descomposición de la materia muerta.

Pero no todo el carbono orgánico formado en la fotosíntesis es consumido, pues una cierta cantidad, contenido en los restos de materia muerta sin descomponer, suele quedar enterrado en las rocas sedimentarias, sin posibilidad, al menos en el corto plazo, de ser oxidado y convertido de nuevo en CO<sub>2</sub>. Y

a largo plazo (mil millones de años...) se estima que debido a este balance negativo la biosfera se quedará sin el CO<sub>2</sub> necesario para que la fotosíntesis y la vida vegetal continúe.

En una planta más del 90 % de su peso seco está constituido por las diferentes sustancias y moléculas orgánicas que forman sus estructuras celulares o que regulan su metabolismo. Las cadenas carbonadas iniciales que se emplean por todas las células las proporciona la fotosíntesis, como se muestra en el esquema de la figura 7.7, izquierda. La vida en la Tierra continúa dependiendo de la fotosíntesis. Los organismos fotosintéticos capturan la energía de la luz y, en una serie de reacciones muy compleja, la utilizan para fabricar los glúcidos, y liberar el oxígeno, a partir del dióxido de carbono y del agua, como se observa en la figura 7.7 derecha.

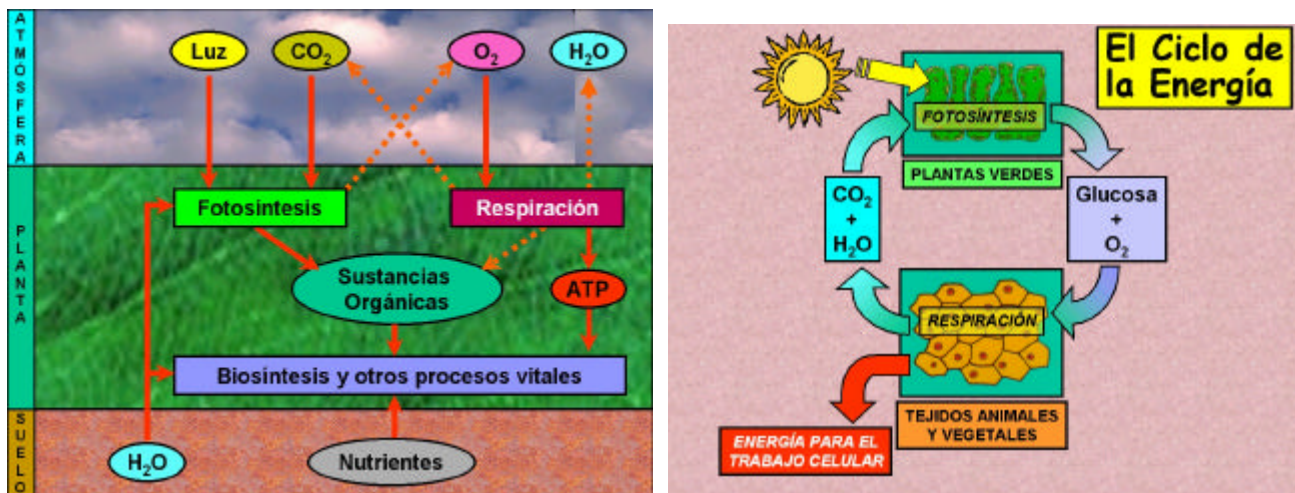


Figura 7.7

Se han propuestos varios modelos que relacionan la fotosíntesis con las variables ambientales. Posteriormente se describirá un modelo simple para hojas que no respiran. La fotosíntesis involucra dos velocidades de procesos: la difusión de CO<sub>2</sub> desde la atmósfera hacia el cloroplasto y la fijación bioquímica del CO<sub>2</sub>. Cada uno de estos procesos tienen muchos pasos complejos, que no se considerarán. Bajo ciertas condiciones, por ejemplo con niveles altos de luz, se podría esperar que los procesos bioquímicos que están usando CO<sub>2</sub> sean tan rápidos como este puede difundir a los cloroplastos. Bajo otras condiciones, poca luz o baja temperatura, la difusión podría ser suficientemente rápida como para abastecer de CO<sub>2</sub> mas rápido que lo que puede ser empleado por el cloroplasto. Con condiciones intermedias, la fotosíntesis podría estar parcialmente limitada por ambos procesos.

### Evaporación.

La humedad ambiental nos concierne por dos razones: 1) las reacciones bioquímicas para mantener la vida en sistemas biológicos ocurren en el agua. Los organismos están muy pocas veces en equilibrio hídrico con su medio ambiente. Mantener un adecuado balance interno de agua es de gran importancia para el funcionamiento y la supervivencia de los organismos, por lo que es necesario entender las leyes que gobiernan las tasas de transferencia de humedad entre los organismos y su medio ambiente. 2) La humedad ambiental es importante en el transporte de energía. Si hay un cambio de fase asociado con el transporte de agua, se pueden transferir grandes cantidades de energía hacia o desde la superficie. La evaporación de 1cm<sup>3</sup> de agua, necesita cerca de 2.5 kJ de energía, aproximadamente la energía que el Sol entrega a 1cm<sup>2</sup> de superficie durante un día entero despejado de verano. Si el vapor de agua se con-

densara en una superficie y se congelara, cerca de 2.8 kJ de calor por gramo de agua seria liberado por la condensación y el congelamiento. La adición de calor latente de condensación al aire, una vez que el aire es enfriado hasta la temperatura de rocío, puede algunas veces evitar que la temperatura del aire descienda por debajo de la temperatura de rocío. La prevención de heladas en frutales a menudo están basadas en este principio.

Para encontrar la cantidad de calor latente perdido o la cantidad de agua perdida, se debe calcular el flujo de vapor de agua, dado por la ley de difusión de Fick

$$E = -D \frac{dC}{dz}$$

donde E es la transferencia de masa de vapor por unidad de área, en kg/m<sup>2</sup>s, D se llama coeficiente de difusión, en m<sup>2</sup>/s, que para el vapor de agua depende de la temperatura, C es la concentración de vapor de agua en kg/m<sup>3</sup>.

Si un envase de agua esta descubierto en un espacio cerrado, el agua se evaporará al espacio desde la superficie de agua líquida. A medida que el agua se evapora, la concentración de moléculas de agua en la fase gaseosa aumentará. Pasado un tiempo, se establecerá un equilibrio cuando el número de moléculas que escapan desde el agua líquida sea igual al número de moléculas recapturadas por el líquido. Si aumentara la temperatura del agua, la energía cinética aleatoria de las moléculas aumentaría y se produciría mas evaporación. En equilibrio, la densidad de vapor o concentración sería mas alta sobre el agua mas templada. Esta densidad de vapor en equilibrio que se establece entre el agua líquida y el vapor de agua en un sistema cerrado se llama densidad de vapor de saturación a la temperatura particular del sistema. Esta es la concentración más alta de vapor de agua que puede existir en equilibrio con una superficie de agua líquida a una temperatura dada. La densidad de vapor de saturación se muestra en la figura 4.\* como función de la temperatura, esta relación es independiente de otros gases presentes en el espacio sobre el agua. El contenido de vapor de agua del aire, se puede expresar también en términos de la presión parcial ejercida por el vapor de agua o *presión de vapor*.

**Presión de vapor, e.**

Es la presión que ejerce el contenido de vapor del gas en las paredes de un envase o recinto cerrado. La presión de vapor se relaciona con la densidad de vapor por medio de la ley de los gases ideales. De la ecuación de estado de un gas ideal, suponiendo que el vapor de agua se comporta aproximadamente como tal, si está lejos de la condensación, se obtiene:

$$PV = nRT = \frac{m}{(PM)} RT \Rightarrow P = \left( \frac{m}{V} \right) \frac{RT}{(PM)} \Rightarrow$$

$$P = r \frac{R}{(PM)} T$$

Aplicada al vapor de agua, se obtiene:

$$e = r_v \frac{R}{(PM)_v} T$$

con  $(PM)_v$  el peso molecular del vapor de agua, de valor  $(PM)_v = 18 \text{ gr/mol}$  y  $r_v$  es la densidad de vapor de agua o humedad absoluta. El valor de la constante universal de los gases es  $R = 8.371 \text{ J/mol K}$ ; definiendo la constante específica para el vapor de agua  $R_v$  como  $R_v = R/(PM)_v$ , reemplazando los valores se obtiene:

$$R_v = \frac{8.371 (J/molK)}{0.018 \text{ kg/mol}} = 461.5 \frac{J}{kgK}$$

De esta forma, la presión de vapor se puede escribir como

$$e = R_v r_v T = 461.5 r_v T$$

Existen tablas que permiten calcular la presión de vapor de saturación  $e_s$ , pero también se pueden usar ecuaciones empíricas, como la ecuación de Magnus, para calcular  $e_s$ , en kPa, en función de la temperatura absoluta T, en K:

$$\ln e_s = 52.576 - \frac{6790.5}{T} - 5 \ln T$$

o la ecuación de Clausius-Clapeyron, donde  $e$  se mide en hPa y T en K:

$$\log e_s = 9.4051 - \frac{2354}{T}$$

Todos los procesos de evaporación y transpiración, tanto de plantas como de animales, quedan sujetos a la temperatura, humedad relativa y presión de vapor, como factores ambientales que los afectan.

Ahora, la ecuación de estado de un gas ideal aplicada al aire seco es:

$$P_a = r_a \frac{R}{(PM)_a} T = R_a r_a T$$

donde  $r_a = 1.25 \text{ kg/m}^3$  la densidad del aire seco y  $R_a$  es la constante específica para el aire seco, considerando que el peso molecular del aire seco es  $(PM)_a = 29 \text{ gr/mol}$ , el valor de  $R_a$  es:

$$R_a = \frac{8.371 (J/molK)}{0.029 \text{ kg/mol}} = 287 \frac{J}{kgK}$$

Pero la presión total del aire húmedo es la suma de la presión del aire seco y del vapor de agua, y como la densidad es proporcional a la presión, entonces la densidad total del aire húmedo es la suma de la densidad del aire seco y del vapor de agua:

$$P = P_a + e, \quad \mathbf{r} = \mathbf{r}_a + \mathbf{r}_v$$

Considerando la última ecuación y reemplazando de la ecuación de estado:

$$\mathbf{r} = \frac{P_a(PM)_a}{RT} + \frac{e(PM)_v}{RT}$$

reemplazando  $P_a$  y ordenando, se obtiene la densidad del aire húmedo:

$$\mathbf{r} = \frac{P(PM)_a}{RT} \left( 1 - 0.379 \frac{e}{P} \right)$$

Esta ecuación indica que la densidad del aire húmedo es menor que la del aire seco a la misma presión y temperatura, por lo tanto el aire húmedo se eleva en la atmósfera, condensándose para formar las nubes y posteriormente la precipitación.

**Densidad de vapor en la naturaleza.**

Generalmente las tasas de evaporación y transpiración son mas altas en el día que en la noche, por lo tanto la densidad de vapor son más altas cerca del suelo y durante el día, pero a menudo estas variaciones son menores que 1 – 2 gr/m<sup>3</sup>. Un comportamiento típico diurno y espacial de la densidad de vapor en días de verano se muestra en la figura 7.8. Durante el día, la densidad de vapor es alta cerca de superficie y disminuye con la altura. De noche la densidad de vapor puede aumentar con la altura, indicando caída de rocío. Cerca de la superficie de la tierra hasta algunos metros de altura, la densidad de vapor es una función logarítmica de la altura. Una ecuación para calcularla se deducirá un poco mas adelante.

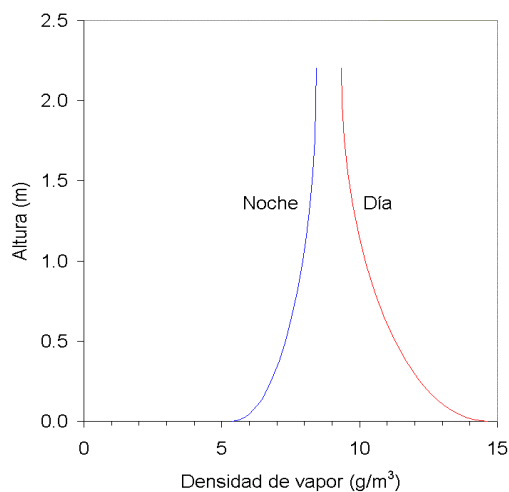


Figura 7.8 Perfiles hipotéticos, pero típicos, de densidad de vapor de agua sobre suelo con cultivo en días y noches despejadas.

En ausencia de cambios de masas de aire, la densidad de vapor a menudo permanece relativamente constante en períodos largos de tiempo (días a semanas) porque esta refleja la cantidad de agua absoluta en el aire. La humedad relativa sin embargo, cambia drásticamente entre el día y la noche, con el tiempo y con la altura, ya que esta depende de la densidad de vapor y de la temperatura. Como el flujo de vapor de agua depende de los gradientes de densidades de vapor y no de la humedad, es mejor medir el contenido de agua en la atmósfera en términos de la densidad de vapor.

Muy cerca de las superficies evaporantes, la humedad relativa puede ser cercana a 100%. Cualquiera que haya caminado a través de un cultivo alto, como maíz en un día caluroso, puede verificar eso. La humedad alta es particularmente importante para el crecimiento de algunos organismos que producen enfermedades y para la supervivencia de algunos huevos de insectos y larvas. Para el control de enfermedades y el ataque de insectos en plantas y animales, algunas veces es efectivo reducir la humedad en el microambiente a niveles no tolerados por las plagas y las enfermedades (70% o menos).

**Difusión de vapor.**

La humedad es importante para los seres vivos porque participa en dos procesos: 1) en las reacciones bioquímicas para mantener la vida en los sistemas biológicos, y 2) en el transporte de la energía. Cuando dos compartimientos A y B se encuentran unidos a través de una barrera, se puede producir el paso de vapor siempre que exista una diferencia de presión de vapor, como se ilustra en la figura 7.9. El proceso de evaporación del agua en el recinto A eleva la presión de vapor y por lo tanto la diferencia de presión de vapor entre A y B. Si la barrera es a prueba de vapor (impermeable), la diferencia entre las presiones parciales se mantendrá y no habrá difusión. Si por el contrario es permeable, parte del vapor de agua desde A pasará al compartimiento B hasta que las presiones parciales sean iguales. Así, el proceso de difusión depende exclusivamente de la relación entre las presiones de vapor y la resistencia de la barrera.

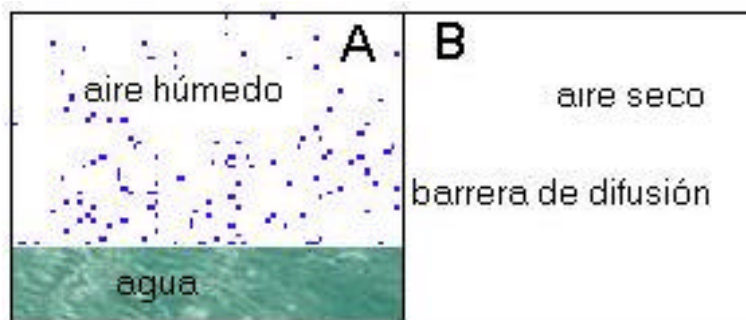


Figura 7.9

En presencia de un gradiente de concentración, por ejemplo de vapor de agua, la agitación molecular es responsable de la transferencia de masa de vapor o difusión. El número de moléculas de vapor de agua aumenta con la altura  $z$  y el intercambio de moléculas entre las capas de aire adyacentes produce un movimiento de vapor hacia la superficie absorbente. Esta transferencia de masa por unidad de área  $E$  es proporcional al gradiente de concentración  $dC/dz$ . Para encontrar la cantidad de calor latente perdido o la cantidad de agua perdida, es necesario calcular el flujo de vapor de agua. La transferencia de vapor de agua en la atmósfera está dada por la ley de difusión de Fick:

$$E = -D \frac{dC}{dz}$$

donde E es la transferencia de masa de vapor por unidad de área, en kg/m<sup>2</sup>s, D se llama coeficiente de difusión, en m<sup>2</sup>/s, que para el vapor de agua depende de la temperatura, C es la concentración de vapor de agua en kg/m<sup>3</sup>. Una forma de calcular el coeficiente de difusión D para una temperatura dada es con la ecuación empírica:

$$D = D_o \left( \frac{T}{T_o} \right)^n \left( \frac{P}{P_o} \right)$$

donde D<sub>o</sub> es la difusividad a 0° C y P<sub>o</sub> = 1 atm, n una constante que depende de la naturaleza del gas que varia entre 1.75 y 2. Para sistemas abiertos P = P<sub>o</sub> y la ecuación se reduce a:

$$D = D_o \left( \frac{T}{T_o} \right)^n$$

Para el vapor de agua a 0° C y una atmósfera de presión, D<sub>o</sub> = 0.212 cm<sup>2</sup>/s y n = 1.75. Por ejemplo, si se desea conocer el coeficiente de difusión para el vapor de agua a 10° C, se obtiene:

$$D = 0.212 \frac{cm^2}{s} \left( \frac{273+10}{273+0} \right)^{1.75} = 0.266 \frac{cm^2}{s}$$

La ley de Fick para el vapor de agua se puede escribir de la siguiente forma:

$$E = -D \frac{C(z) - C(z_o)}{z - z_o}$$

Como la concentración C es equivalente a la densidad, se puede considerar que C(z<sub>o</sub>) = r<sub>vs</sub> es la densidad del vapor de agua en la superficie evaporante y C(z) = r<sub>va</sub> es la densidad del vapor de agua en el aire ambiente, que se pueden medir en gr/m<sup>3</sup>, la ecuación de difusión del vapor se escribe como:

$$E = -D \frac{r_{va} - r_{vs}}{z - z_o}$$

La densidad del vapor r<sub>vs</sub> se puede calcular usando la ecuación de presión de vapor de saturación e<sub>s</sub>

$$e_s = 461.5 r_{vs} T$$

o si se usan las ecuaciones logarítmicas para calcular e<sub>s</sub>, r<sub>vs</sub> se puede calcular usando la definición de la humedad relativa U = r<sub>va</sub>/r<sub>vs</sub>. Para calcular r<sub>va</sub> se puede usar la siguiente expresión:

$$r_{va} = r_{vs} - g(T - T_w)$$

donde  $r_{vs}$  es la densidad de vapor a la temperatura del bulbo húmedo  $T_w$  y  $g$  se llama constante psicrométrica, de valor:

$$g = \frac{r c}{L_v}$$

Para el aire  $rc = 1200 \text{ J/m}^3\text{K}$ ,  $L_v = 2450 \text{ J/kg}$ , dando para  $g$  el valor:

$$g = \frac{1200}{2450} = 0.49 \frac{\text{gr}}{\text{m}^3\text{K}}$$

La densidad total de vapor de agua es  $r_{vs} = r_{va} + r_{vs}$ .

El perfil de vapor de agua cerca del suelo se puede expresar en forma similar a los perfiles de viento y de temperatura del aire:

$$r_v = r_{vo} - \frac{E}{ku^*} \ln\left(\frac{z + z_v - d}{z_v}\right)$$

donde  $r_v$  es la densidad de vapor de agua, en  $\text{kg/m}^3$ ,  $r_{vo}$  es el valor medio de la densidad de vapor de agua en la superficie de intercambio de vapor,  $E$  es la densidad del flujo de vapor de agua en  $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$  y  $z_v$  es el parámetro de rugosidad del vapor de agua, que se puede calcular como:

$$z_v = 0.2 z_M$$

que funciona muy bien en la mayoría de las superficies vegetales, pero no en las superficies muy lisas.