

# El agua en la atmósfera

Amparo Martínez Arroyo



Aunque la cantidad de agua contenida en la atmósfera constituye una mínima parte de la existente en nuestro planeta, su importancia es vital: participa en procesos de regulación de temperatura, en el ciclo del agua, en fenómenos climáticos e, incluso, en desastres naturales.

**E**l agua contenida en la atmósfera de nuestro planeta (en forma de vapor, nubes y pequeños cristales de hielo) representa alrededor de 0.0009 por ciento de toda el agua del planeta. ¿Por qué ocuparnos de estudiarla entonces?

Empecemos señalando que esa proporción tan pequeña de agua está en el centro de los procesos que determinan el clima, el ciclo hidrológico, la química atmosférica y el desarrollo de la vida.

La forma principal del agua atmosférica es el vapor de agua; cuando nos referimos a la cantidad de este contenido en el aire lo llamamos “humedad”. Aunque no sea tan visible como las formas líquidas o sólidas (nubes, neblinas, lluvia, nieve, gránizo), el vapor de agua está siempre presente en la atmósfera, incluso en los desiertos.

Entender cómo se comporta el agua en la atmósfera, de qué depende su cantidad, cuándo y en dónde va a precipitarse, si lo hará en forma de lluvia, nieve o helada, si habrá poca o si habrá demasiada, han sido necesidades e interrogantes del hombre desde tiempos primitivos ...y lo siguen siendo. A lo largo del tiempo, algo hemos avanzado en su estudio, aunque también en introducir más complicaciones, como la contaminación del aire y los cambios del uso de suelos y de las superficies de captación del agua, por sólo mencionar algunas.

Para analizar el papel que juega la presencia de agua en la atmósfera –y cómo lo juega– es conveniente considerar brevemente el flujo de la energía en el sistema

Tierra, así como darle un repaso a las características de la atmósfera y del ciclo hidrológico global.

El Sol es la principal fuente de energía de nuestro planeta. La Tierra absorbe energía solar y emite energía propia; si absorbe más energía de la que irradia, se calienta, y si es al contrario se enfría.

El Sol emite radiación electromagnética que va desde las longitudes de onda muy cortas, como los rayos X, la luz ultravioleta y la radiación visible, hasta la infrarroja y longitudes de onda más largas, como las ondas de radio. La cantidad de radiación solar que llega a la superficie exterior de nuestro planeta está básicamente determinada por nuestra distancia al Sol y es relativamente constante.

### El papel de la atmósfera

La capacidad que tienen las diferentes superficies para reflejar una determinada fracción de la energía solar que reciben se conoce como *albedo*. Del total de radiación solar que llega a la Tierra anualmente, una tercera parte es reflejada inmediatamente al espacio por la superficie del planeta, las nubes, la nieve y los hielos, por lo que se puede decir que la Tierra tiene un albedo promedio de 30 por ciento (o 0.3). Las regiones polares son las áreas con más reflexión en la superficie terrestre.

En la atmósfera, que es la capa de gases que recubre la superficie de nuestro planeta, las moléculas de ozono (forma de oxí-

geno formada por tres átomos), de vapor de agua, una parte de las nubes y en menor medida algunos otros gases y partículas tienen la propiedad de absorber una fracción de la radiación solar que incide (19 por ciento), evitando que llegue a la superficie terrestre. Esta absorción se da principalmente en longitudes de onda corta (ultravioleta) o muy larga. Sin embargo, hay otras longitudes de onda, como las correspondientes a la luz visible y parte de la infrarroja, a las que la atmósfera es prácticamente transparente, por lo que constituyen la mayor parte del restante 51 por ciento de radiación solar que finalmente llega a continentes y océanos. La energía solar no llega uniformemente a toda la superficie del planeta, y es mayor la energía recibida en las regiones tropicales y subtropicales.

La superficie terrestre, luego de absorber esta entrada de energía, la reemite a su vez en forma de radiación de onda larga o infrarroja. Gracias a la capacidad de absorción, principalmente del vapor de agua pero también de otros gases, se da el llamado *efecto invernadero*, en el cual gran parte de esa energía saliente es capturada por la atmósfera y regresada a la

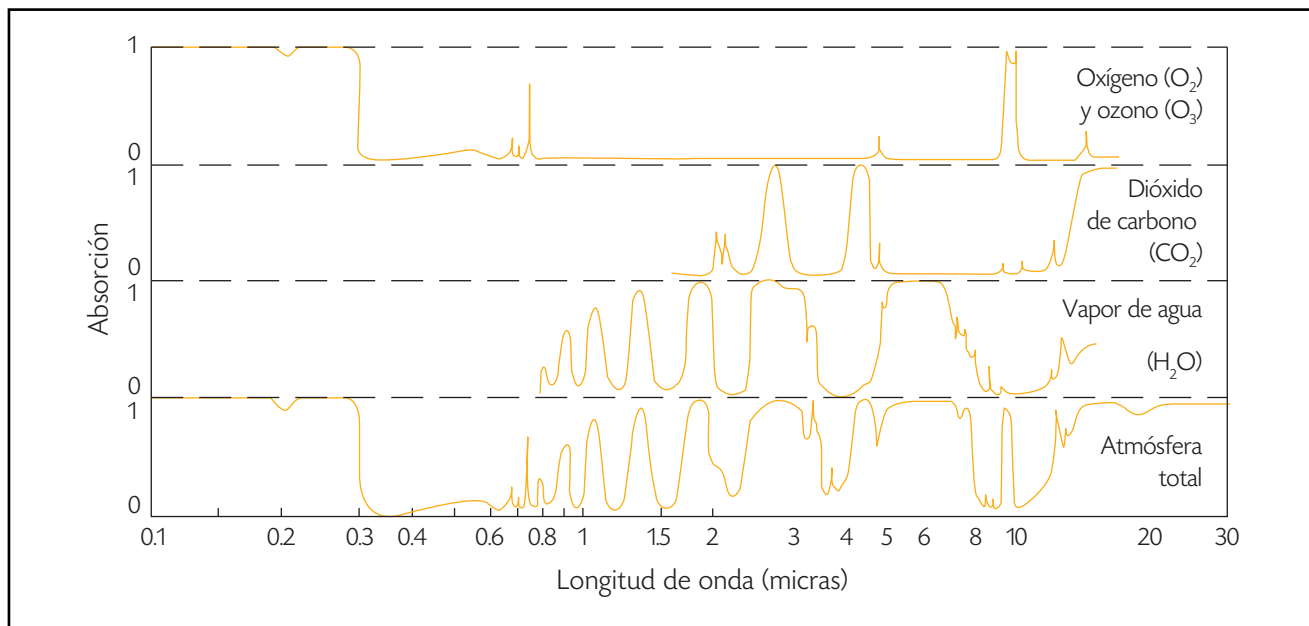


Figura 1. Espectro de absorción de distintas longitudes de onda por los principales gases de efecto invernadero.

superficie terrestre, proceso que modula la pérdida de calor y resulta en una temperatura global promedio en el planeta de alrededor de 15 grados centígrados.

Esta temperatura hace posible, entre otras cosas, que el agua se encuentre presente en sus tres fases, lo que permite el almacenamiento, transporte y redistribución de la energía y da lugar al sistema climático característico de este planeta. El balance entre energía entrante y saliente se complementa con radiación terrestre con longitudes de onda que no son absorbidas por la atmósfera, por lo que escapan al espacio; a esta región del espectro electromagnético se le llama *ventana atmosférica*.

En los miles de millones de años que tiene nuestro planeta, han sido muchos los procesos y las circunstancias que han determinado las características y la composición de su cobertura gaseosa. Entre ellos están su distancia al Sol

y la generación de un campo magnético que la protege del viento solar; la fuerza de gravedad, que le permitió constituir una atmósfera al retener a la mayor parte de los elementos y compuestos atmosféricos; la generación biológica de oxígeno, que permitió la existencia de una capa de ozono que filtra la radiación ultravioleta; una atmósfera químicamente oxidante, en lugar de reductora, y finalmente la presencia en pequeñas concentraciones de compuestos que permiten la entrada de la radiación solar pero atrapan la emitida por la superficie terrestre (gases de efecto invernadero), permitiéndole conservar una temperatura promedio que favorece los procesos biológicos.

El agua en la atmósfera cumple un doble papel respecto a la radiación. Como vapor de agua, es el gas natural de efecto invernadero más importante, tanto por su volumen como por su amplia capacidad de absorción. Las nubes, por su parte, impiden la entrada de una fracción importante de radiación solar, evitando un mayor calentamiento, a la vez que retienen y regresan hacia la superficie la radiación terrestre. Por ese efecto, en sitios donde la humedad y las nubes son escasas, como en los desiertos, los días son muy calurosos y las noches muy frías.

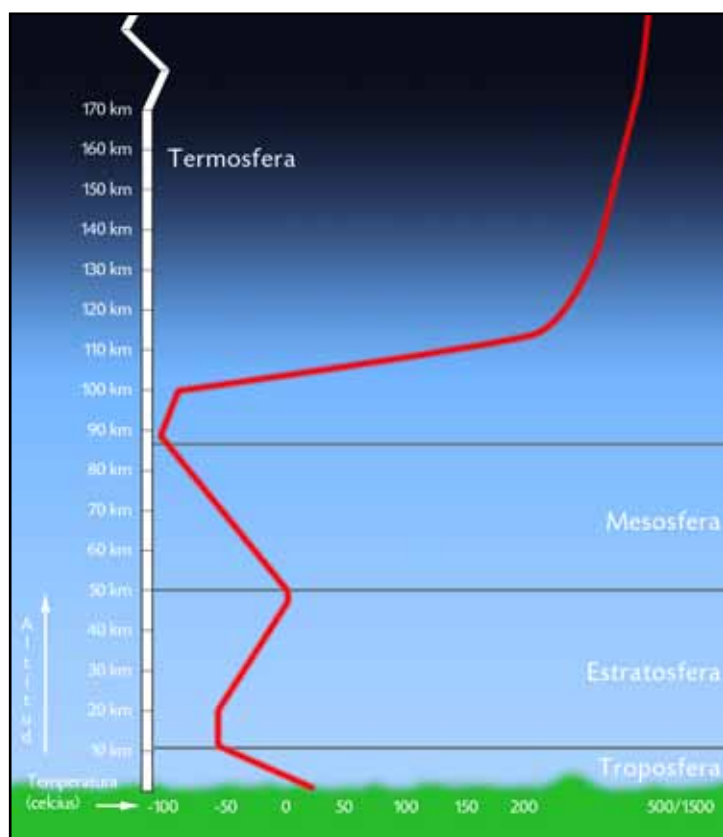


Figura 2. Estructura de la atmósfera: altura y temperatura de las diferentes capas.

### El agua en las capas de la atmósfera

La atmósfera de la Tierra está constituida por capas de diferentes características, clasificadas de acuerdo con su perfil térmico.

Sólo en las tres más cercanas a la superficie terrestre se ha detectado presencia constante de agua. En la *mesosfera* (aproximadamente de 50 a 90 kilómetros), la capa más fría de la atmósfera (alrededor de  $-85$  grados centígrados) y considerada prácticamente seca, se encuentran nubes formadas por cristales de hielo. A estas nubes se les llama *mesosféricas polares* o *noctilucentes*, y sólo son observables por la noche desde posiciones cercanas a los polos.

La *estratosfera* (aproximadamente de 15 a 50 kilómetros), con una temperatura que alcanza los 20 grados centígrados debido al calentamiento que produce la absorción de radiación ultravioleta por parte de la llamada *capa de ozono*, contiene menos de 1 por ciento de agua. Existe un programa de mediciones que da seguimiento a su concentración, y que ha detectado variaciones en años recientes.

La *troposfera* es la parte inferior de la atmósfera (de 0 hasta aproximadamente 12 kilómetros), en donde se desarrollan el clima y la vida. Contiene tres cuartas partes de la masa de la atmósfera y alrededor de 99 por ciento del agua atmosférica; su profundidad varía con la latitud y la estación del año. La energía solar no calienta sensiblemente a esta capa, por lo que su calentamiento se debe a la radiación que viene de la superficie terrestre. Su temperatura, por tanto, disminuye con la altura (aproximadamente 6.5 grados centígrados cada kilómetro), lo cual da origen a una estructura térmica que provoca movimientos verticales (convectivos) de corrientes de aire que favorecen la mezcla atmosférica, transportan el agua y pueden extenderse hasta el inicio de la estratosfera.

### Composición atmosférica

La concentración del vapor de agua en la atmósfera es muy variable espacial y temporalmente, pero su proporción promedio en un volumen mezclado de aire es del orden de 1 por ciento, por lo que puede considerarse el tercer gas más abundante en la atmósfera. El aire "seco" está compuesto de nitrógeno (78.08 por ciento), oxígeno (20.88 por ciento) y argón (0.93 por ciento). Alrededor de 0.1 por ciento de la proporción del volumen mezclado total corresponde a los otros gases de efecto invernadero (dióxido de carbono, metano, óxido nitroso y ozono). La atmósfera también contiene aerosoles (pequeñas partículas sólidas y líquidas en aire) que interactúan con la radiación solar y terrestre, de acuerdo con su ubicación espacial, composición química y concentración. Además, el agua está presente en fase líquida y sólida. La mitad del agua atmosférica se concentra en los dos primeros kilómetros. En adelante, al analizar el agua en la atmósfera el término se referirá únicamente a la que está presente en la troposfera.

### El ciclo del agua

Prácticamente todos los elementos y compuestos químicos se reciclan en nuestro planeta mediante una serie de procesos físicos, químicos y biológicos. Se llama *ciclos biogeoquí-*

*micos* al paso de ciertos elementos o compuestos (como el agua) por los cuatro grandes compartimentos o reservorios del sistema Tierra (atmósfera, hidrosfera, litosfera y biosfera).

Nuestro clima, en última instancia, es resultado de un equilibrio constantemente reajustado entre el agua, la atmósfera, la energía solar y la terrestre. El ciclo del agua es central en este equilibrio y representa el movimiento más grande de una sustancia química en la superficie de la Tierra. Sus mecanismos básicos son bien conocidos, sobre todo los que se llevan a cabo en océanos y continentes; sin embargo, hay aún muchos detalles que son todavía motivo de mucha investigación en la fase de vapor de agua y nubes. Los principales procesos involucrados en el movimiento del agua entre los distintos depósitos son evaporación,

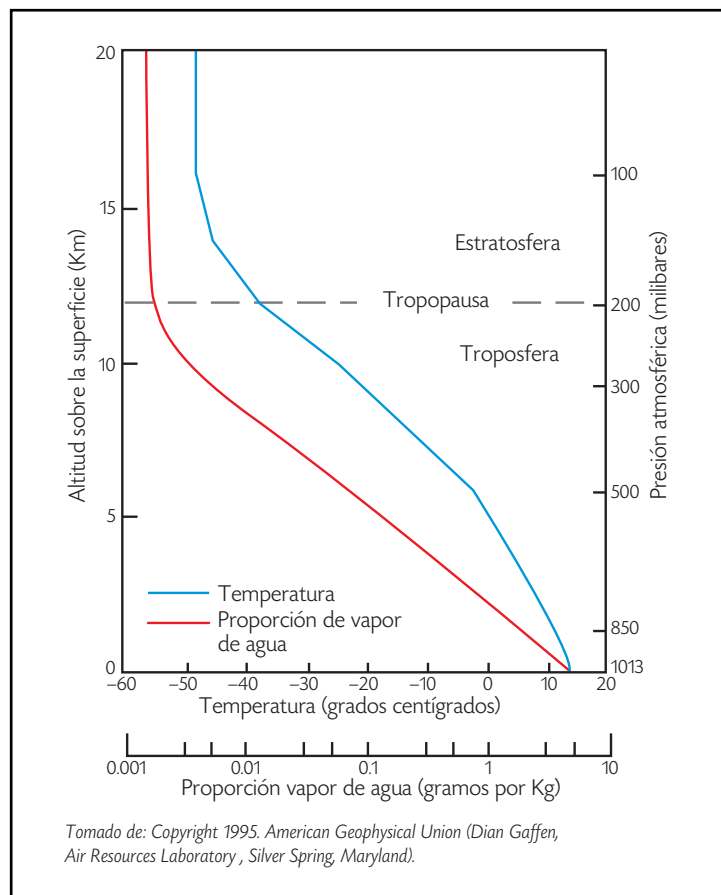


Figura 3. Distribución latitudinal de vapor de agua y temperatura. Perfil vertical.

condensación, transporte, precipitación, escorrentía (escurrimiento de agua por la superficie del terreno), infiltración y transpiración.

La mitad de la energía solar recibida anualmente en la superficie terrestre se utiliza para evaporar agua de los continentes y océanos. La *evaporación* ocurre cuando las moléculas en un líquido adquieren suficiente energía cinética (de movimiento) para escapar de la fase líquida y pasar a la fase gaseosa, superando la tensión superficial y la cohesión en la superficie del agua líquida. La ruptura de los enlaces de hidrógeno que mantienen unidas a las moléculas de agua en fase líquida requiere energía, por lo que el proceso se realiza más rápidamente mientras mayor sea la temperatura. A bajas temperaturas la evaporación es más lenta. Básicamente es el mismo proceso para la *transpiración*, sólo que ésta ocurre en la superficie del suelo y en organismos.

Cuando el vapor que entra en la atmósfera alcanza el punto de saturación del aire (es decir, cuando éste contiene todo el vapor de agua que le es posible contener a esa temperatura), las moléculas excedentes se condensan formando gotas o cristales de hielo. La *evaporación* y la *condensación* son procesos continuos que generan y redistribuyen calor, transportándolo y transformándose todo el tiempo entre vapor, líquido y cristales de hielo, dependiendo de la temperatura y presión del aire.

Mientras mayor sea la temperatura del aire, podrá contener más vapor de agua. De ahí que el concepto de *humedad relativa* sirva para indicar, en porcentaje, la cantidad de vapor de agua que contiene una porción de aire, en relación con la que puede contener dada su temperatura. Una humedad relativa de 100 por ciento indica que esa porción de aire no puede contener más vapor. Si la temperatura del aire baja, disminuye la cantidad de vapor que puede contener y todo el exceso se condensará. Si la temperatura del aire saturado aumenta, aumentará su capacidad de contener vapor de agua y disminuirá la humedad relativa.

Estos conceptos son útiles para entender por qué los movimientos verticales (convección) y horizontales (advección) del aire ocasionan procesos de evaporación o condensación, según sea el cambio de temperatura no sólo de la superficie hacia la atmósfera, sino en la atmósfera misma.

En el mar la evaporación es mayor que la precipitación, mientras que en los continentes llueve más de lo que se evapora. Esto quiere decir que hay una transferencia neta de agua del mar a los continentes, lo cual se compensa parcialmente con el aporte que ríos, escorrentías y aguas subterráneas hacen, tarde o temprano, al mar.

En algunas nubes las pequeñas gotas entran en un proceso de colisión e incrementan su volumen miles de veces, hasta que son demasiado pesadas para seguir en el aire. La parte atmosférica del ciclo concluye con su precipitación en forma de lluvia, nieve o granizo.

Puesto que la atmósfera es un reservorio de agua pequeño en comparación con océanos y continentes, la transferencia a otros reservorios debe ser rápida. Se calcula que el tiempo de renovación de toda el agua atmosférica es de alrededor de nueve días. Si esto se compara con los 10 años de vida atmosférica del metano y los más de 50 años del dióxido de carbono, se entiende que el corto tiempo de residencia del agua no conduzca a un mezclado más homogéneo, lo que hace aún más desigual su distribución global.

Los tiempos de residencia del agua en océanos, glaciares, aguas subterráneas, ríos, lagos, rocas, suelos y organismos van de semanas a cientos y miles de años. Este almacenamiento temporal modula la velocidad del ciclo hidrológico global.

La relevancia de cada proceso varía regionalmente. Por ejemplo, casi 70 por ciento de la evaporación terrestre tiene lugar en las latitudes tropicales. En selvas tropicales húmedas la mitad del total de la precipitación anual retorna al aire por transpiración de la vegetación, una cuarta parte por evaporación de cuerpos de agua y el resto se regresa al mar.

### El vapor de agua en la atmósfera

Muchas actividades en la superficie terrestre, incluyendo el grado de bienestar de las personas y los ecosistemas, además de muchas actividades productivas, dependen de la cantidad de humedad en la atmósfera. Por eso los científicos atmosféricos han desarrollado instrumentos tanto materiales como teóricos para medir, analizar, describir y predecir la cantidad y distribución del agua en la atmósfera.

La importancia del agua atmosférica no radica sólo en su volumen, sino principalmente en su dinámica. Tomemos el ejemplo de la llamada *agua precipitable*; si todo el vapor de agua en la atmósfera se condensara al mismo tiempo y cayera, su volumen cubriría la Tierra con una capa de 25 milímetros de profundidad, en promedio. Dado que el vapor de agua no está distribuido homogéneamente en la atmósfera, podemos considerar que en el ecuador la profundidad de la capa sería de unos 50 milímetros, mientras en los polos sería de alrededor de 2.5 milímetros. Sin embargo, la precipitación anual promedio en el planeta es de un metro (1 000 milímetros), lo que significa que el agua precipitable debe reciclarse unas 40 veces ( $1\,000/25 = 40$ ) a lo largo del año.

El agua que se transporta en la atmósfera está muy ligada a la circulación atmosférica y a los patrones de temperatura. Su distribución no es uniforme a nivel vertical ni horizontal. Frente a las zonas húmedas y lluviosas presentes en latitudes ecuatoriales y latitudes medias, tenemos las zonas de desiertos, con altas temperaturas y humedades relativas menores a 20 por ciento, ubicadas en latitudes subtropicales.

En el plano temporal, la distribución del vapor de agua presenta variaciones a escalas desde milisegundos a décadas. Las fluctuaciones más rápidas son debidas a la turbulencia cerca de la superficie, relacionada con los vientos y la evaporación. Las nubes trasladadas por vientos son otra forma de redistribución de vapor. Hay patrones estacionales, así como brisas de mar a tierra y de tierra a mar que ocurren a lo largo del día en zonas costeras. Hay eventos que, con una periodicidad mayor (por ejemplo el llamado Oscilación del Sur El Niño, que se presenta aproximadamente cada 4 a 7 años) en los que el movimiento de masas de agua de alta temperatura en el Pacífico sur, entre muchos otros efectos, altera el acoplamiento océano-atmósfera en términos de zonas de evaporación

y precipitación, y modifica temporalmente los patrones de humedad y lluvias en diversas zonas del planeta.

Por otra parte, el agua en la atmósfera no sólo involucra procesos físicos. Hay infinidad de interacciones del agua atmosférica cuyo estudio tiene más niveles de complejidad y requiere la participación de otras disciplinas.

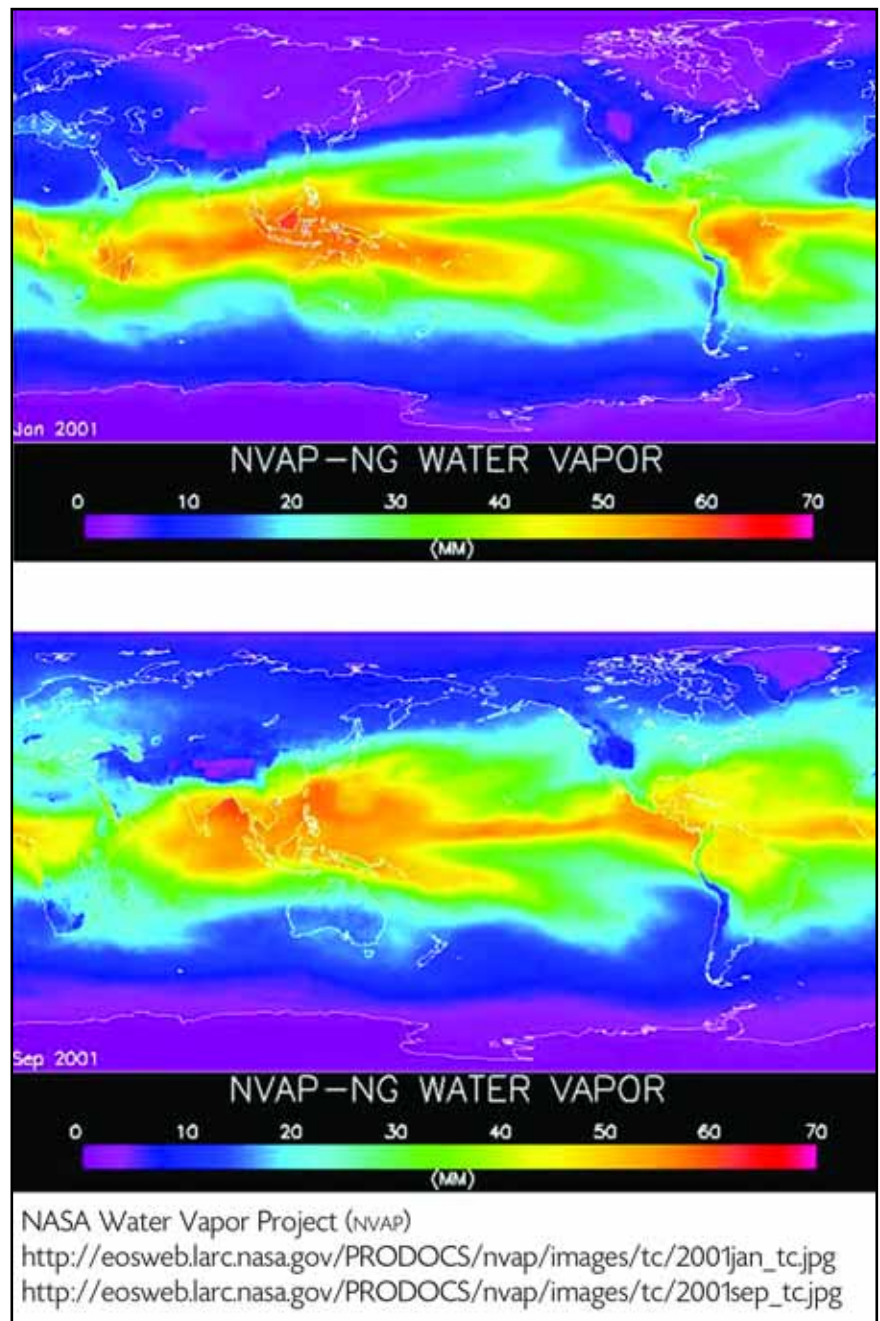


Figura 4. Distribución latitudinal de vapor de agua y temperatura. Perfil vertical.

### Formación y distribución de nubes

Las nubes se forman al enfriarse el aire con vapor de agua hasta el punto de condensación (o punto de rocío).

Para formar nubes no sólo se requieren gotas de agua, sino que éstas cuenten con un sustrato o superficie donde condensarse. A las pequeñas partículas en el aire que cumplen esta función se les llama núcleos de condensación de nubes. Las nubes que se forman en temperaturas del aire bajo cero grados centígrados forman cristales de hielo de diferentes formas, que van creciendo también sobre núcleos de condensación.

Las gotas de agua en las nubes tienen diámetros que van desde unos cuantos micrómetros (milésimas de milímetro) a más de 100 micrómetros (o sea, una décima de milímetro). Aquí también hay una cierta diferenciación espacial: las nubes continentales están hechas de muchas gotas pequeñas, mientras

las marinas tienen menos gotas, pero más grandes. Un litro de aire puede tener entre 25 mil y un millón de gotas, más para que caigan como lluvia las gotas necesitan alcanzar un tamaño de alrededor de un milímetro.

Algunas nubes generan lluvia, otras no. Las nubes bajas o estratos sólo producen llovizna o niebla, mientras que sólo las nubes tropicales verticales generan granizo. Las nubes altas difícilmente forman precipitación. De hecho, la mayoría de las nubes no se precipita, sino que pasa por varios ciclos de evaporación-condensación. Las nubes alcanzan mayor altura cerca del Ecuador, y se desarrollan a menor altura cerca de los polos.

De acuerdo con la altura a la que se encuentra su base, las nubes se pueden clasificar como altas, medias y bajas. Constituyen una categoría aparte las gigantescas nubes desarrolladas verticalmente desde la superficie de los mares cálidos, que llegan a tener 15 kilómetros de altura, millones de toneladas de agua y se pueden formar en menos de una hora.

### Agua atmosférica y contaminación

El proceso de destilación natural que se logra con la evaporación (el agua se evapora dejando atrás sales y otros compuestos acompañantes) se enturbia debido a la contaminación del agua atmosférica. Esta contaminación no sólo afecta los sitios en donde se emite, sino que tiene la potencialidad de ser transportada, mezclarse con otros contaminantes y alterar el agua de lluvia en varias “generaciones” de nubes, hasta finalmente ser precipitada a la superficie.

En el interior de una nube, gotas de agua (o cristales de hielo), gases y partículas (núcleos de condensación de nubes) llevan a cabo de manera continua numerosas reacciones químicas. La parte soluble de las partículas entra a las gotas y participa en sus reacciones. La composición de los núcleos de condensación depende de si su origen es natural (proveniente de desiertos, erupciones volcánicas, el mar, organismos vivos) o producto de actividades humanas. Las partículas menos solubles, como polvo y polen, pueden quedarse en el aire sin reaccionar hasta que son arrastradas por lluvia o transportadas a otros sitios. Algunos gases también logran penetrar a las gotas, cambiando las características del agua de lluvia. Es el caso de la *lluvia ácida*, que impacta negativamente los sitios en que se precipita, contaminando lagos y otros ecosistemas y dañando construcciones. Los gases que participan en estas reacciones son producto de la actividad humana, comúnmente ácido sulfúrico y ácido nítrico.



Figura 5. Instrumentos sencillos para medir humedad en la atmósfera (psicrómetro e higrómetro de cabello).

La contaminación tiene también efectos climáticos, ya que el exceso de aerosoles antropogénicos (producidos por el hombre), que actúan como núcleos de condensación, está llevando a un aumento en la cantidad de gotas formadas, lo cual resulta en un incremento del albedo de la nube, pero también en la formación de gotas más pequeñas, lo que disminuye la posibilidad de lluvia y aumenta el tiempo de vida de la nube.

### Interacciones biológicas

Siempre se ha admitido fácilmente la influencia de los factores físicos y químicos del ambiente sobre los organismos vivos, pero no ha sido fácil lograr que lo contrario sea también reconocido. Por ello dedicaremos unos renglones a comentar dos aspectos del papel que juegan los microorganismos y otras partículas biológicas en procesos relacionados con la formación de nubes, la precipitación y la calidad del agua de lluvia.

El congelamiento del agua en las nubes es un paso crítico en muchas regiones del planeta, necesario para propiciar la precipitación. Durante años, científicos de la atmósfera y microbiólogos sospecharon que algunos microorganismos que se encuentran en abundancia en partes altas de la troposfera participaban como núcleos de condensación de hielo. Principalmente se consideró a ciertas bacterias que producen una proteína en su membrana externa, que es un compuesto activo natural que cataliza en forma muy eficiente el proceso de congelamiento del agua.

Muchas de las bacterias son emitidas a la atmósfera por procesos de aerosolización relacionados con prácticas agrícolas o cambios en el uso del suelo, pero hace falta mucho trabajo interdisciplinario para entender mejor los mecanismos involucrados en todo el proceso. Por otra parte, dado que la atmósfera es un ambiente de transporte para numerosos organismos con un tamaño o flotabilidad adecuados, es frecuente que algunos de ellos se vean incorporados al transporte vertical de masas de aire y se incorporen a procesos microfísicos en las nubes. De hecho, la probabilidad de supervivencia de muchos microorganismos se incrementa en un ambiente hidratado.

La posibilidad de transporte y distribución de bacterias que causan enfermedades a través de su incorporación como núcleos de condensación y posterior precipitación ha sido motivo de diversos estudios. En algunos se ha comprobado la presencia de ciertos tipos de bacterias patógenas en el agua de lluvia; pero no se tiene una estimación clara sobre la magnitud y alcance de estos transportes.

Como otro ejemplo de interacción biológica, en este caso positiva, está la emisión, por parte de comunidades del fitoplancton marino, de un gas (sulfato de dimetilo) que es la principal fuente biogénica de núcleos de condensación de nubes en la atmósfera marina. La producción de núcleos de condensación de nubes naturales en zonas marinas de alta evaporación se ha visto como un posible mecanismo anticalentamiento, pues al incrementar la cobertura nubosa, y con ello disminuir la entrada de radiación solar, quizá contribuya a frenar el aumento de temperatura en el planeta. Sin embargo, hasta ahora el proceso más bien parece funcionar como un ciclo que se retroalimenta: al generarse más núcleos de

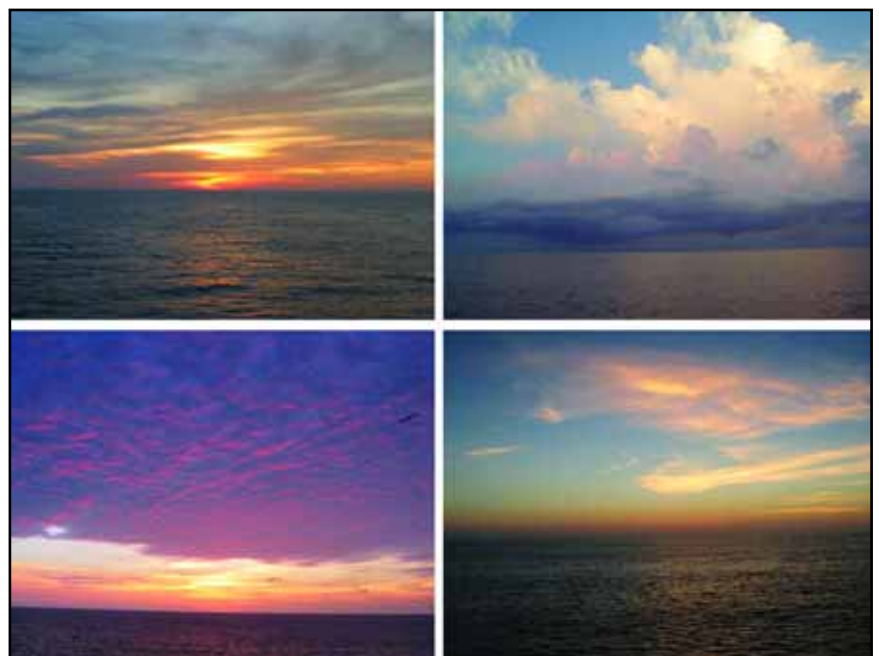


Figura 5. Diferentes tipos de nubes en el Pacífico mexicano. Las dos primeras son típicas de zonas tropicales.



condensación de nubes, se forman más nubes; éstas disminuyen la cantidad de luz, y al disminuirla se afecta la actividad fotosintética del fitoplancton, por lo que éste disminuye, así como los núcleos de condensación de nubes, y posteriormente las nubes, reiniciándose todo el proceso.

### **Cambio climático y agua atmosférica**

Como hemos visto, el agua en la atmósfera tiene un papel muy activo climáticamente: en la entrada y salida de energía, la redistribución del calor en la atmósfera y el movimiento del agua entre regiones distantes.

Toda modificación espacial o temporal del contenido de agua en la atmósfera tiene como consecuencia un cambio en las condiciones de la superficie terrestre. Sequías e inundaciones, huracanes y tornados tienen relación con la cantidad de agua en la atmósfera y su comportamiento. Por ello se sigue con atención cualquier señal que pueda indicar cambios de largo plazo. El análisis de datos globales de los últimos 30 años muestra un incremento de agua precipitable en todo el mundo excepto en una porción de Canadá, donde disminuyó. Estos cambios se asocian a elevación y disminución de temperaturas, respectivamente, durante el mismo periodo. No es extraño encontrar que aumentos de temperatura resulten en aumentos de evaporación; sin embargo, no están claras todas las implicaciones que eso puede tener combinando situaciones como la de una mayor formación de nubes con gotas más pequeñas que no se precipitan. Los cambios en los patrones de lluvias en diferentes regiones, evidentemente, tendrían consecuencias para la economía y la vida de muchas personas. La esperanza de todos los científicos y profesionistas relacionados con el agua es poder entender todos los procesos del compuesto en la atmósfera e influir en ellos, de manera que este elemento indispensable para nuestro planeta

siga siendo aliado y sustento de la vida y contribuya cada vez más al bienestar de la humanidad.

### **Bibliografía**

- American Geophysical Union Special Report (1995), *Water vapor in the climate system*, Washington, DC, AGU, 20 009, 15.
- Franc, G. D. y P. J. DeMott, (1998) "Cloud activation characteristics of airborne *Erwinia carotovora* cells", en *Journal of Applied Meteorology*, vol. 37, núm. 10, pp. 1293-1300.
- Gay, C. (2003), "La atmósfera", en *Biblioteca Juvenil Ilustrada*, México, Santillana.
- Houghton, J. T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden y D. Xiaosu (editores) (2001), *Climate change 2001: the scientific basis, contribution of working group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, Cambridge, Cambridge University Press, p. 944.

### **Páginas de internet sobre el tema**

- Animaciones: [http://www.cira.colostate.edu/Climate/webloop/nvap\\_webloop.html](http://www.cira.colostate.edu/Climate/webloop/nvap_webloop.html)
- Imágenes cristales de hielo en nubes: [www.snowcrystals.com](http://www.snowcrystals.com)
- Global energy and water cycle experiment. Global vapor water project (2006) <http://www.gewex.org/gvap.html>

**Amparo Martínez Arroyo** es bióloga y maestra en ciencias biológicas por la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Realizó su doctorado en el Departamento de Ecología de la Universidad de Barcelona, y una estancia de investigación en el Instituto de Ciencias del Mar de la misma ciudad. Es especialista en ecosistemas acuáticos e investigadora en el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, donde dirige el grupo de aerosoles atmosféricos en el Departamento de Ciencias Ambientales. Su línea de investigación son los procesos de interacción atmósfera-biosfera-hidrosfera y su relación con la variabilidad y el cambio climático. Ha desarrollado diversos proyectos de investigación, particularmente relacionados con la fotosíntesis acuática en ecosistemas marinos y continentales, con producción y captura biogénica de gases en el sistema océano-atmósfera, con el papel ambiental de cuerpos de agua en zonas urbanas y con los patrones de distribución de contaminantes microbiológicos en zonas costeras y playas. [marroyo@servidor.unam.mx](mailto:marroyo@servidor.unam.mx)