

CIENCIAS NATURALES

# EL CICLO DEL AGUA



**Introducción.** El ciclo sin fin del agua | Balance de agua global | Evaporación, la atmósfera se humedece | Condensación: "el vapor hace agua" | Transporte: el viaje del vapor de agua | Precipitaciones: todo lo que sube, baja | Variabilidad del ciclo hidrológico: cuando el ciclo se altera | El fenómeno de El Niño | Predicción de El Niño y sus impactos | La crisis mundial del agua

**Autoras:** Dra. Carolina Vera (UBA-CONICET) y Dra. Inés Camilloni (UBA-CONICET) | **Coordinación Autoral:** Dr. Alberto Kornblihtt (UBA y CONICET)

## INTRODUCCIÓN. EL CICLO SIN FIN DEL AGUA

El agua existe en la Tierra en estado sólido (hielo), líquido o gaseoso (vapor de agua). Su distribución es bastante variada, ya que muchas regiones tienen en abundancia mientras que en otras su disponibilidad es escasa. En la Tierra, el agua está en continuo movimiento en sus diferentes estados. De hecho, los océanos, los ríos, las nubes y la lluvia, que contienen agua, están en frecuente proceso de cambio (el agua de superficie se evapora, el agua de las nubes precipita, la lluvia se infiltra en el suelo, etc.). Sin embargo, la cantidad total de agua no cambia. La Tierra es esencialmente un "sistema cerrado".

Esto significa que el planeta, como un todo, ni gana ni pierde materia, tampoco agua. Aunque algo de materia, como los meteoritos del espacio exterior, pueden entrar en la Tierra, muy poco de las sustancias de la Tierra, como el agua, escapan al espacio exterior. De hecho, la misma agua que se formó hace millones de años en este planeta todavía está aquí.

De toda el agua del planeta, sólo el 3 % es agua dulce, y el 2,997 % es de muy difícil acceso, ya que es subterránea o se encuentra en los casquetes polares y en los glaciares, lo que

no facilita su utilización. Es decir que sólo el 0,003 % del volumen total de agua del planeta es accesible para el consumo de los seres humanos.

Gracias al ciclo del agua o ciclo hidrológico, este líquido vital continuamente se mueve de un lugar a otro y de un estado a otro. Un conocimiento profundo de los elementos de este ciclo es esencial, tanto para entender el impacto de las actividades humanas como para planificar el uso racional y eficiente del agua disponible. En las páginas siguientes conoceremos en detalle cada uno de los elementos del ciclo del agua.

### AGUA DISPONIBLE

#### Agua de la Tierra

INUTILIZABLE POR HUMANOS  
(por ser salada o de difícil acceso)

99,997%



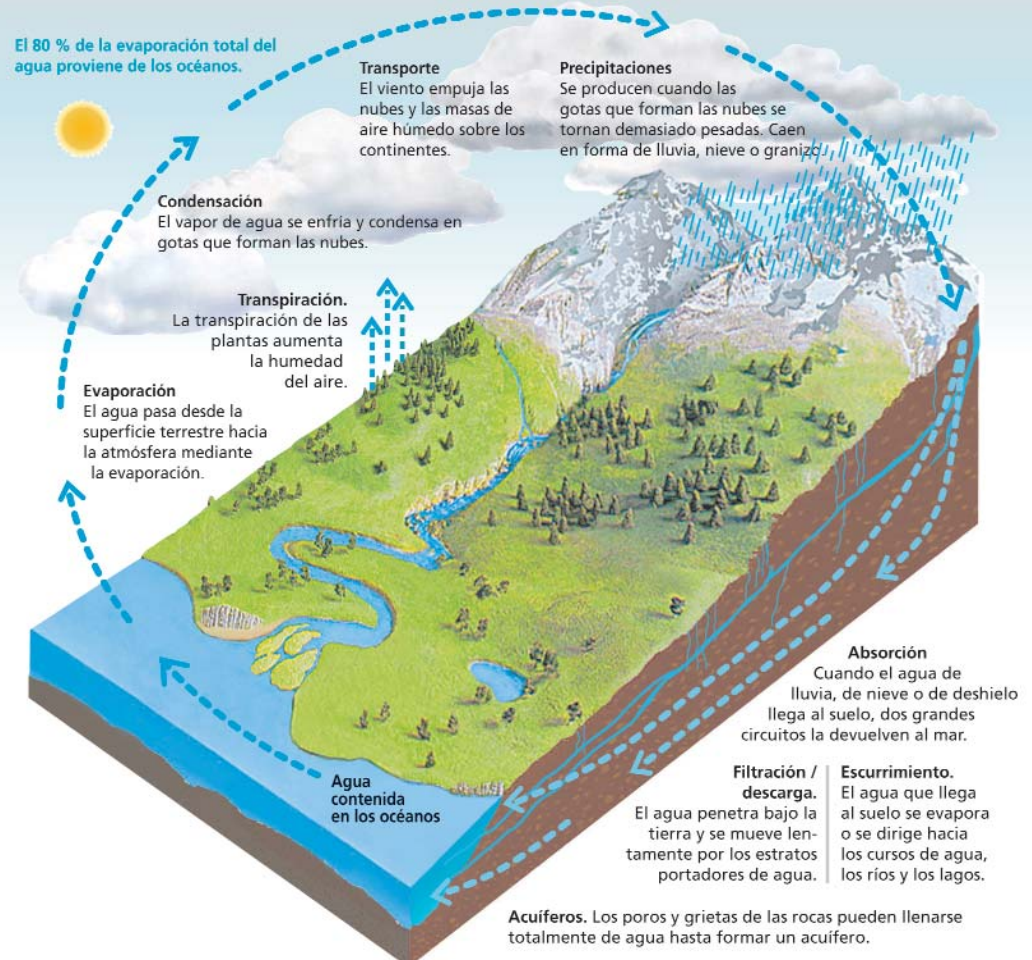
Ubicación del agua que utiliza el hombre

SUELO 93%  
LAGOS 5%  
RÍOS 2%



### EL CICLO DEL AGUA

El agua de la Tierra está en continuo proceso de cambio. Se la encuentra en la atmósfera, en la superficie terrestre y en el suelo, en sus diferentes estados. La cantidad total de agua no cambia, ya que la Tierra es esencialmente un sistema cerrado.



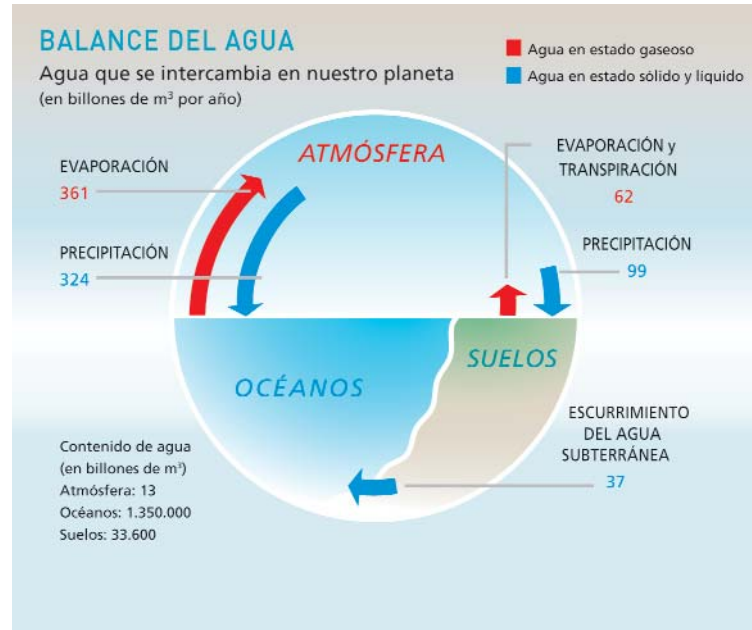
## BALANCE DE AGUA GLOBAL

En la imagen se muestran los volúmenes de agua contenidos en el suelo, los océanos y la atmósfera. Las flechas indican el intercambio anual de agua entre los distintos reservorios. Si calculamos el intercambio neto de agua entre cada uno de los reservorios con los restantes, veremos que es nulo, lo que confirma el hecho de que en la Tierra no existen fuentes ni sumideros de agua. Los océanos contienen el 97,5 % del agua del planeta; las regiones continentales, el 2,4 %, mientras que la atmósfera contiene menos del 0,001 %, lo que puede parecer sorprendente debido a que el agua juega un rol importante en el acontecer de los fenómenos meteorológicos. Las precipitaciones anuales son más de 30 veces la cantidad total de agua presente en la atmósfera, lo que muestra la rapidez con que se recicla el agua entre la superficie terrestre y la atmósfera.

Para hacerse una idea de la cantidad de agua contenida en los reservorios basta imaginar que si las precipitaciones anuales sobre la superficie terrestre cayeran sólo sobre la provincia de Buenos Aires, todo el territorio estaría bajo 195 metros de agua y las sierras de Tandil y de la Ventana se verían como islas.

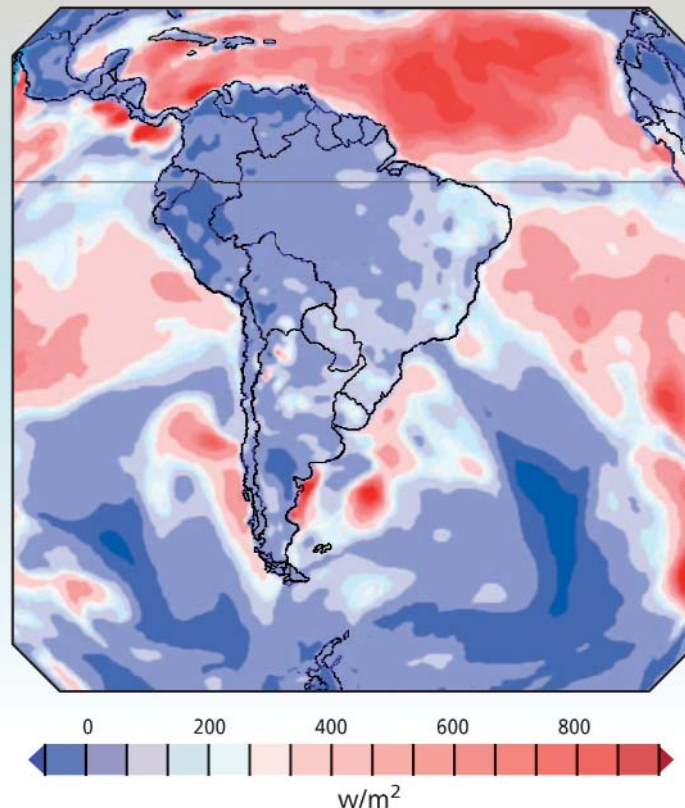
### EVAPORACIÓN: LA ATMÓSFERA SE HUMEDECE

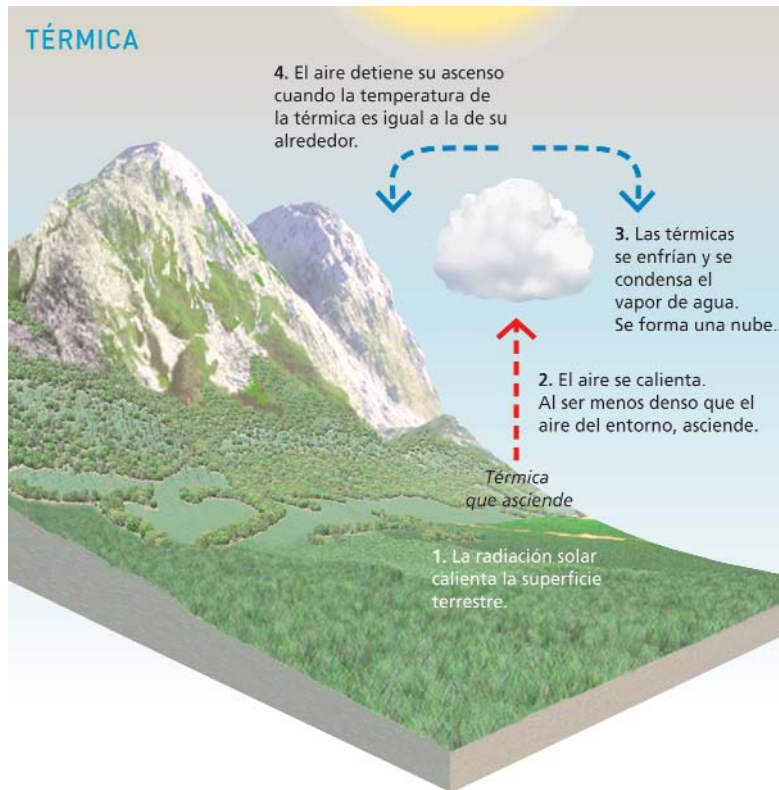
Desde la superficie de la Tierra se transfiere el agua hacia la atmósfera mediante la evaporación, proceso por el cual el agua superficial cambia del estado líquido al gaseoso. Aproximadamente el 80 % del agua evaporada total proviene de los océanos, mientras que el 20 % restante lo hace del agua de las regiones continentales y de la transpiración de la vegetación. Los vientos transportan el agua evaporada



### EVAPORACIÓN

Cantidad representativa del agua evaporándose por segundo y por m<sup>2</sup> en la región aledaña de América del Sur el 22 de enero de 2003.





## CONDENSACIÓN: "EL VAPOR HACE AGUA"

La condensación es el cambio del agua de su estado gaseoso (vapor de agua) a su estado líquido. Este fenómeno generalmente ocurre en la atmósfera cuando el aire caliente asciende, se enfría y disminuye su capacidad de almacenar vapor de agua. Como resultado, el vapor de agua en exceso condensa y forma las gotas de nube.

Los movimientos de ascenso que generan nubes pueden ser producidos por convección en aire inestable, convergencia asociada con ciclones, actividad frontal y elevación del aire por la presencia de montañas.

En meteorología se denomina convección a los movimientos del aire, principalmente en dirección vertical. A medida que la superficie se calienta por acción del Sol, las diferentes superficies absorben distintas cantidades de energía, y la convección puede ocurrir cuando la superficie se calienta muy rápidamente.

Cuando la superficie aumenta su temperatura, calienta el aire en la porción inferior de la atmósfera, y ese aire gradualmente se torna menos denso que el del entorno y comienza a ascender.

Las térmicas son burbujas de aire relativamente más cálidas que su ambiente y que ascienden desde la superficie. Una demostración simple de condensación por la convección puede realizarse colocando una olla con agua sobre una hornalla de la cocina. La superficie del agua en ebullición representa el calentamiento de la superficie terrestre por el Sol, mientras que el aire que se halla por encima representa la atmósfera. El agua superficial en la olla (superficie terrestre) se evapora y el aire húmedo en contacto, más caliente y menos denso, asciende (térmica) dentro del aire más seco y frío por encima de la olla (atmósfera media). Esto causa el enfriamiento de la térmica y la condensación del vapor de agua que acarrea, formando una pequeña nube que es visible por

alrededor del globo y alteran la humedad del aire en cada lugar. Por ejemplo, los vientos húmedos tropicales provenientes del Atlántico y de la región amazónica que fluyen hacia el sur pueden provocar un típico día de verano, caluroso y húmedo en el centro de la Argentina.

La mayor parte del agua evaporada permanece en estado gaseoso en la atmósfera, fuera de las nubes. La evaporación es más intensa con temperaturas más cálidas. Esto se observa en el gráfico de la página anterior, donde se aprecia que la evaporación más intensa ocurre sobre los océanos y cerca del ecuador.

La transpiración es la evaporación de agua desde las hojas y los tallos de las plantas hacia la atmósfera. A través de sus raíces, las plantas absorben agua subterránea. Por ejemplo, las plantas de maíz tienen raíces que pueden alcanzar hasta 2,5 m de profundidad, mientras que en el desierto algunas plantas tienen raíces que penetran hasta 20 m en el suelo.

El agua es transportada desde las raíces hacia las partes aéreas de las plantas a través de tejidos especializados. Este transporte compensa la pérdida de agua por evaporación a través de los pequeños poros, llamados estomas, que se encuentran en la superficie de las hojas. La transpiración representa aproximadamente el 10 % de toda el agua evaporada que sube a la atmósfera.

La humedad es la cantidad de agua en estado gaseoso presente en el aire. Para cada temperatura hay una cantidad máxima de agua que puede estar en forma de vapor y esta cantidad aumenta con la temperatura. Si intentáramos agregar más vapor, de agua al aire, el vapor se condensaría formando agua líquida. La humedad relativa es la comparación entre la humedad existente y la máxima que podría haber a esa temperatura. Cuando el aire está tan húmedo que no puede aceptar más vapor de agua se dice que está saturado y que la humedad relativa es del 100 %.

encima de la olla de agua caliente de manera equivalente a lo que ocurre en la atmósfera real. En la fotografía tomada desde el trasbordador espacial se pueden observar los topos de nubes convectivas sobre la ciudad de San Pablo (Brasil), que ciertamente tienen la apariencia de las celdas que uno percibe en el interior de una olla donde hierve agua.

Los ciclones o centros de baja presión pueden causar que el aire ascienda. En los ciclones extratropicales, la fricción que ejerce la superficie terrestre sobre la baja atmósfera hace que el viento se desacelere y fluya hacia el centro del ciclón. Como consecuencia, allí se produce una mayor concentración de aire que necesariamente tiene que ascender, ya que no puede ir hacia abajo por la presencia de la superficie terrestre.

En la fotografía se puede ver la nubosidad asociada con un ciclón sobre el océano Pacífico Sur. Las nubes están orientadas de tal forma que permiten claramente identificar tanto la circulación del aire asociada con el ciclón, en el sentido de las agujas del reloj, característico de los ciclones del hemisferio sur, como la convergencia del aire hacia el centro del ciclón.

Los frentes son zonas limítrofes entre diferentes masas de aire. Una masa de aire es un volumen grande de aire de similar temperatura y humedad. Por ejemplo, pueden ser masas de aire cálido y húmedo provenientes de zonas tropicales o bien masas de aire frío y seco que llegan desde las zonas polares. Los frentes se definen en función de las masas involucradas y de la forma en que ellas se desplazan.

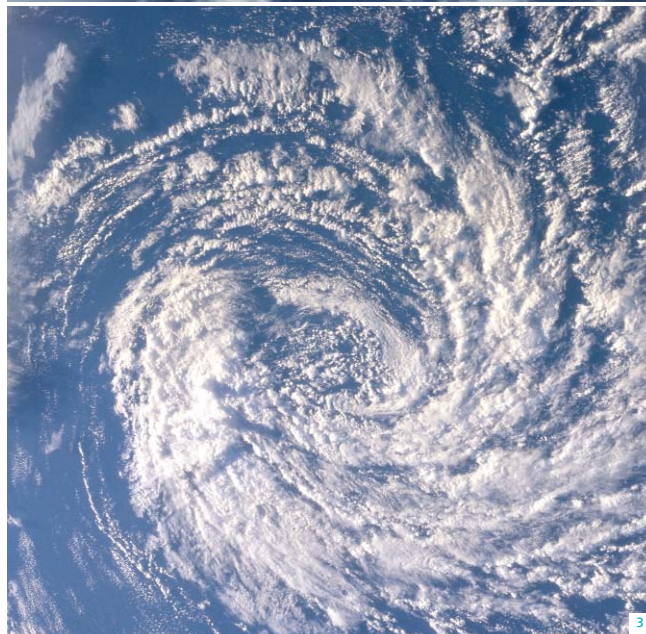
En el caso de los frentes fríos, el avance de la masa de aire más fresco y denso eleva la masa de aire húmedo y cálido que se halla por delante. A medida que el aire asciende se enfría y condensa su humedad para producir nubes y precipitaciones. Debido a la pronunciada inclinación que caracteriza los frentes fríos, el movimiento de ascenso es vigoroso y puede dar a lugar a chaparrones aislados y tormentas eléctricas.



1



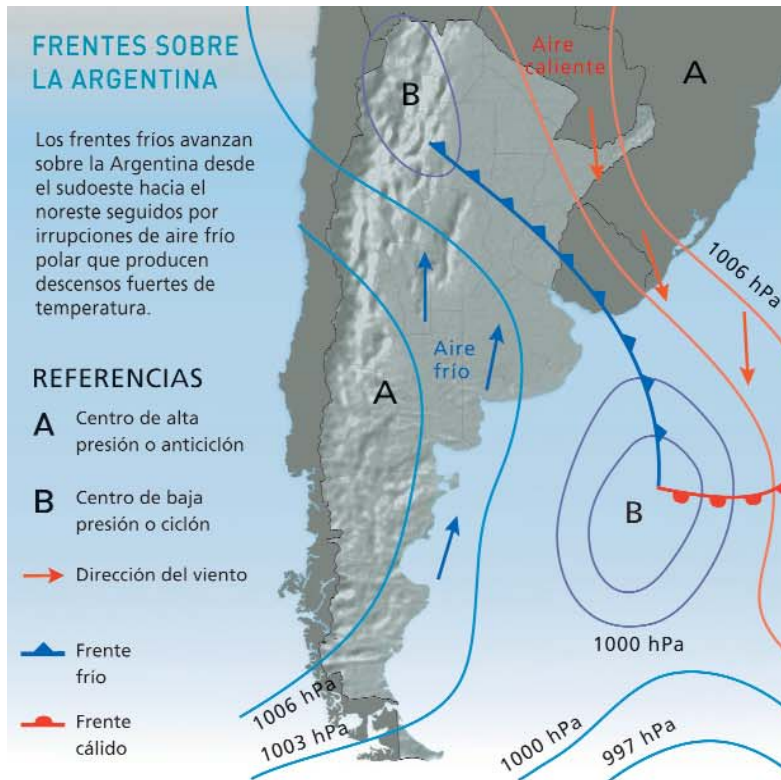
2



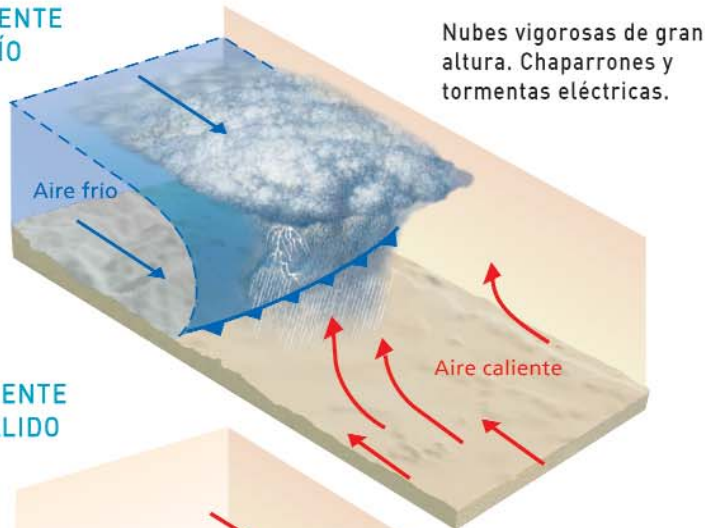
3

1 y 2. Nubes convectivas sobre la ciudad de San Pablo, Brasil.

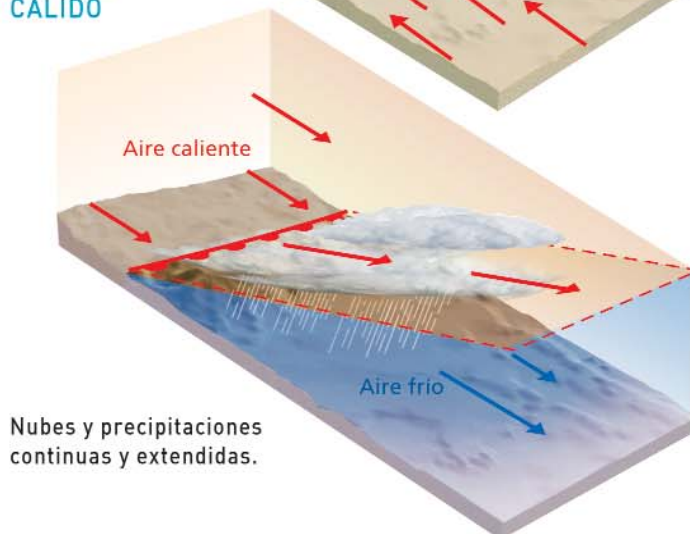
3. Nubes formadas por la actividad de un centro de baja presión en el océano Pacífico Sur.



### FRENTE FRÍO



### FRENTE CÁLIDO



En el caso de un frente caliente, la masa de aire de mayor temperatura que avanza, por ser menos densa, asciende por encima de la masa de aire más fría que se encuentra por delante. El aire caliente se enfría y condensa su humedad para producir nubes y precipitaciones. El frente caliente tiene menos inclinación y generalmente se mueve más despacio que el frente frío, por lo que el movimiento de ascenso es mucho más gradual y provoca precipitaciones más continuas y extendidas que las asociadas con frentes fríos.

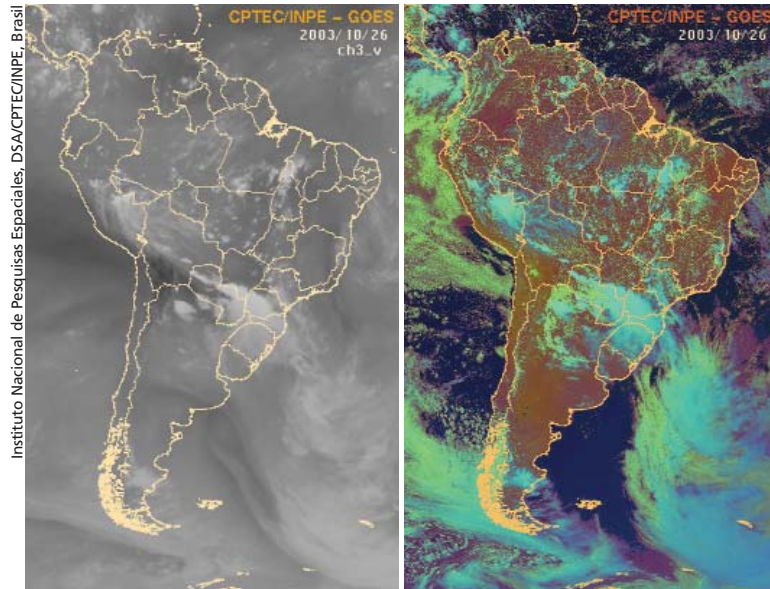
El aire también puede ser elevado por la superficie terrestre. Cuando el aire encuentra una cadena montañosa, por ejemplo, es forzado a ascender por encima de las montañas y, si la elevación es suficientemente alta, el vapor de agua condensa y produce nubes orográficas. En la Argentina, los vientos en altura que prevalecen son de oeste a este, por lo que las nubes orográficas tienden a formarse del lado oeste de las montañas y a veces sobre las cimas, si no son muy altas, como en los Andes patagónicos. En la región de Mendoza y San Juan, en cambio, se produce un efecto diferente: los vientos del oeste cargados de humedad se ven forzados a ascender por la ladera chilena (occidental). Debido a la gran altura de las montañas en esa región, llegan a la cima prácticamente secos y descienden por la ladera oriental, del lado argentino, y su temperatura es anormalmente caliente. Este fenómeno típico del invierno es conocido en nuestro país como "viento Zonda", que puede elevar las temperaturas más de 20 °C.

Otro ejemplo de condensación y precipitación orográfica es la que se produce en la región de las Sierras Subandinas en Tucumán, donde el aire húmedo proveniente del Atlántico asciende sobre las laderas orientales y produce nubosidad y abundantes precipitaciones, las que a su vez favorecen el desarrollo de una densa vegetación. Las laderas occidentales no se ven favorecidas por tales procesos de condensación, por lo que su vegetación es la característica de climas más áridos.

## TRANSPORTE: EL VIAJE DEL VAPOR DE AGUA

En el ciclo hidrológico, se denomina transporte al movimiento del vapor de agua en la atmósfera, específicamente desde los océanos hacia el interior de las regiones continentales. Parte del transporte del aire húmedo es visible como nubes, formadas por cristales de hielo y/o microgotas de agua. Las nubes son desplazadas de un lugar a otro por las corrientes de aire en chorro, por la circulación del aire superficial –como las brisas de mar o de tierra– o por otros mecanismos. Sin embargo, una nube típica de 1 km de altura sólo contiene suficiente agua como para producir 1 mm de lluvia, lo que sería insuficiente para explicar las precipitaciones observadas. En realidad, la mayor parte del agua no se transporta en forma líquida sino en forma de vapor de agua. El vapor de agua representa el tercer gas más abundante en la atmósfera. Si bien es invisible para nosotros, no lo es para los sensores remotos, que son capaces de recolectar datos sobre el contenido de humedad en la atmósfera. A partir de estos datos satelitales, se construyen "imágenes de vapor de agua" que permiten visualizar el transporte de masas de aire húmedo en la atmósfera que rodea el planeta.

En las imágenes satelitales de medición de vapor de agua, las áreas brillantes indican las mayores cantidades de humedad y están frecuentemente asociadas con las nubes. Las áreas más oscuras indican menor humedad o aire relativamente seco. Sin embargo, el aire húmedo no siempre contiene nubes y, por lo tanto, no son el único indicador de la humedad en la atmósfera. La "imagen de satélite visible" sería equivalente a una "foto" de la nubosidad presente, tomada desde el espacio en un instante dado (*arriba a la derecha*). En esta imagen satelital se observa una región de abundante nubosidad asociada con tormentas



Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, DSA/CPTEC/INPE, Brasil

sobre Paraguay, mientras que domina el cielo claro sobre la Pampa y la provincia de Buenos Aires. Si se comparan ambas imágenes para el mismo momento se verá que las áreas de blanco más intenso en la imagen de vapor de agua se corresponden casi exactamente con las nubes señaladas en la imagen visible. Sin embargo, la imagen del vapor indica concentraciones relativamente altas de humedad en el centro de la Argentina, mientras que esta misma región aparece sin nubes en la imagen visible. Este es un ejemplo de agua transportada en la atmósfera en forma de vapor, pero que no está necesariamente asociada con la formación de nubes. El área del centro de la Argentina no es tan brillante en la imagen del vapor como el área sobre Paraguay debido a que las nubes contienen más vapor. También se puede observar que no hay zonas negras en la primera imagen, lo que indica la existencia de al menos pequeñas cantidades de vapor en todas las áreas.

La corriente en chorro (en inglés, *jet stream*) es aire que se mueve muy rápidamente en los niveles altos de la atmósfera. Esta rápida corriente tiene

miles de kilómetros de largo, algunos cientos de ancho y solo unos pocos de espesor. Las corrientes en chorro se encuentran en general entre 10 y 15 km por encima de la superficie terrestre.

Otra manera en que se realiza el transporte del vapor de agua en la atmósfera es por medio del fenómeno de brisas. Es común notar en la playa, durante las primeras horas de la tarde, un viento fresco que sopla desde el mar. Este viento se conoce como "brisa de mar" que ocurre en respuesta a las diferencias de temperatura entre el cuerpo de agua y la tierra adyacente.

La brisa de mar ocurre con mayor frecuencia en días soleados, durante la primavera y el verano, cuando la temperatura del suelo es más alta que la del agua. Durante noches claras y calmas, se puede producir el fenómeno opuesto cuando el viento fluye de la tierra hacia la costa, lo que es conocido como "brisa de tierra".

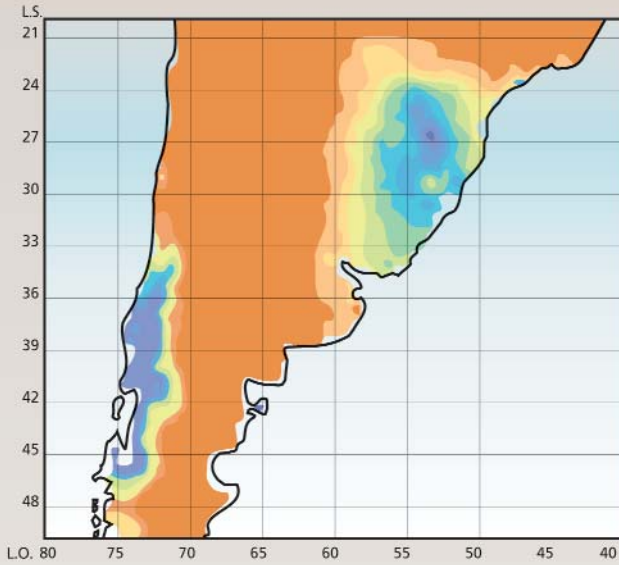
### PRECIPITACIONES: TODO LO QUE SUBE, BAJA

Las precipitaciones son el mecanismo primario de transporte de agua desde la

Imágenes satelitales de Sudamérica. La primera muestra la medición del vapor de agua. La segunda, en cambio, muestra la nubosidad sobre el continente (imagen de satélite visible).

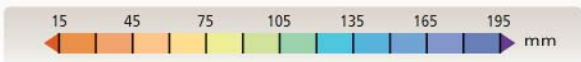
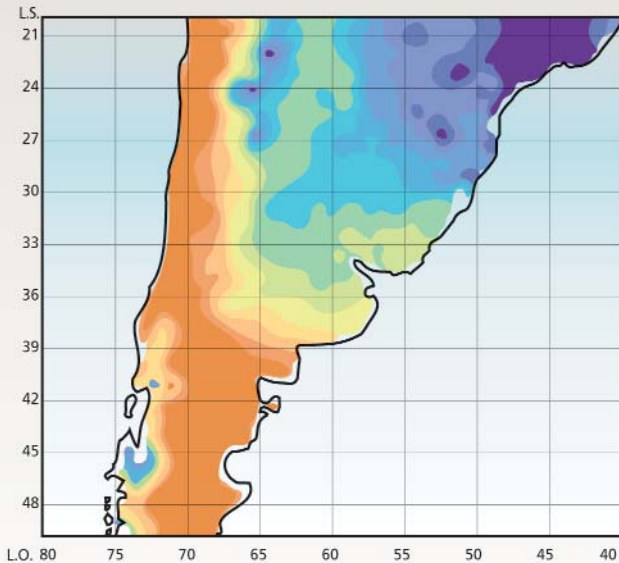
## PRECIPITACIONES EN INVIERNO

Entre junio y agosto al sur del continente.



## PRECIPITACIONES EN VERANO

Entre diciembre y febrero al sur del continente.



atmósfera hasta la superficie terrestre. Cuando las gotas de nubes, que se formaron por condensación del vapor de agua presente en la atmósfera mediante alguno de los procesos antes mencionados, crecen y se tornan demasiado pesadas para permanecer en la nube, precipitan o caen a la superficie.

Las gotas que conforman las nubes generalmente se forman cuando el vapor de agua condensa alrededor de partículas muy pequeñas de polvo, humo, sulfatos y sal, denominadas "núcleos de condensación". Sobre las regiones continentales hay en general alrededor de 1000 núcleos de condensación por  $\text{cm}^3$ .

La lluvia puede producirse también a partir de cristales de hielo que se integran para formar copos de nieve. A medida que la nieve cae y atraviesa aire más caliente, los copos se derriten y precipitan como gotas de lluvia. Existen varias formas de precipitación, aunque la forma más común en la Argentina es la lluvia. Otras formas son el granizo, la nieve, el agua nieve, entre otros.

La lluvia se mide en milímetros: un milímetro de precipitación representa la caída de 1 litro de agua en un área de  $1 \text{ m}^2$ . Para medir la cantidad de agua caída en forma de lluvia se utiliza el pluviómetro. Las cantidades de lluvia pueden variar tanto espacial como temporalmente. Las imágenes muestran las precipitaciones medias que recibe el sur de nuestro continente durante el verano y el invierno. Mientras sobre la costa atlántica se reciben precipitaciones tanto en invierno como en verano, la porción central y noroeste de la Argentina, por ejemplo, recibe la mayor cantidad de lluvia durante el verano.

## AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS: EL AGUA SIGUE BAJANDO

Cuando el agua de lluvia o nieve llega a la superficie, una parte penetra hasta los niveles subterráneos para sumarse al agua subterránea y otra se escurre conformando el agua superficial. El

escurrimiento es el movimiento del agua sobre los suelos principalmente hacia los cursos de agua (ríos, lagos) y finalmente hacia los océanos. El escurrimiento forma las aguas superficiales y consiste en las precipitaciones que no evaporaron, ni transpiraron ni penetraron en el suelo para convertirse en agua subterránea. Aun los cursos de agua más pequeños están conectados a grandes ríos que llevan millones de litros de agua hacia los océanos a lo largo de todo el mundo.

El agua de lluvia se infiltra en el suelo hasta encontrar material rocoso saturado de agua. Se llama capa freática al cuerpo de agua alojado en un cuerpo de roca o sedimento y que se encuentra en conexión con la atmósfera a través de los poros y las fisuras del material sedimentario o rocoso. El agua subterránea se mueve hacia lo profundo del suelo y en general hacia abajo (por la gravedad) muy lentamente; en ocasiones puede manar en manantiales, ríos, lagos y océanos.

En la página siguiente puede verse un diagrama simplificado que muestra cómo el suelo se satura por debajo de la capa freática. El suelo, por encima de esa capa (*área rosada*), puede almacenar agua hasta un cierto nivel, pero nunca se satura. El barro y las rocas en esta zona no saturada contienen aire y algo de agua, y albergan las raíces de la vegetación. La zona saturada por debajo del nivel freático tiene agua que llena los pequeños espacios (poros) entre las partículas de rocas y grietas. En la medida en que la cantidad de agua subterránea aumenta o disminuye, el nivel freático sube o baja. Cuando el área debajo del suelo está saturada, se produce una inundación, porque toda la precipitación subsiguiente se ve forzada a permanecer sobre la superficie.

A los suelos que pueden almacenar agua se los llama porosos. Diferentes tipos de suelos almacenan distintas cantidades de agua y la absorben a tasas variadas. La permeabilidad es una medida de la velocidad con la que



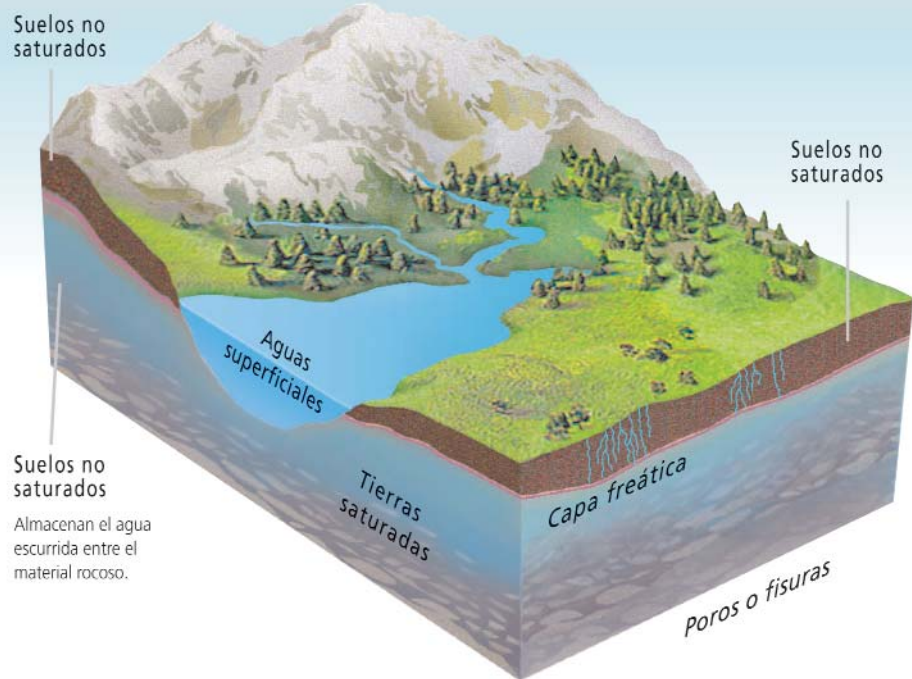
el agua penetra en el suelo. Es muy importante que la permeabilidad del suelo sea monitoreada debidamente. Cuanto menor sea la permeabilidad, mayor será el potencial de inundaciones, ya que una cantidad creciente de agua permanecerá sobre la superficie.

En ciertas profundidades del suelo, los poros y las grietas en las rocas pueden llenarse totalmente de agua (dulce o salada), conformando un acuífero. Los acuíferos son formaciones geológicas capaces de almacenar suficiente cantidad de agua dulce como para constituir un recurso disponible para las actividades humanas.

El agua subterránea puede volver a la superficie a través de estos acuíferos, aflorando en lagos, ríos y océanos. En algunas circunstancias, el agua subterránea puede aflorar a través de manantiales o pozos artesianos. El flujo de agua subterránea es mucho más lento que el "escurrimiento", con velocidades que se miden en centímetros por día, metros por año o aun centímetros por año.

## CAPAS SUPERFICIALES DEL SUELO

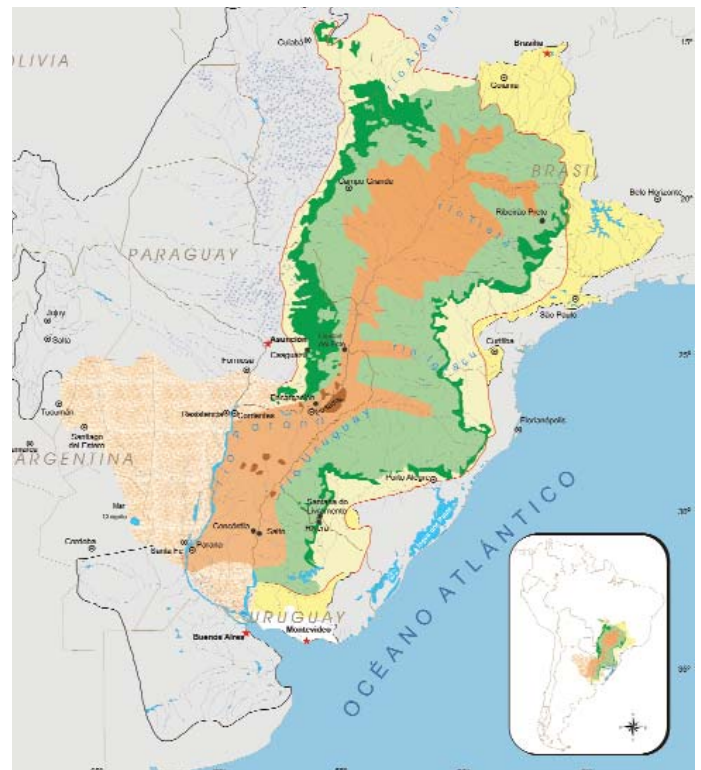
El agua de las precipitaciones penetra en los suelos y se aloja en sus diferentes capas, lo que determina los distintos niveles de saturación.



## EL SISTEMA ACUÍFERO GUARANÍ

El denominado Sistema Acuífero Guaraní es uno de los reservorios de agua subterránea más grandes del mundo, y se encuentra bajo parte de Brasil, Argentina, Paraguay y Uruguay, en el subsuelo de un área de alrededor de 1.190.000 km<sup>2</sup> (superficie mayor que las de España, Francia y Portugal juntas). De acuerdo con lo que actualmente se conoce, salvo en la Argentina —donde se encuentra a profundidades por debajo de los 900 m— en los demás países está a profundidades muy variables (entre 50 y 1.500 m). En general, cuando se realiza una perforación hasta el acuífero, el agua se eleva naturalmente y en muchos casos emerge sobre el nivel del suelo

con temperaturas que van desde los 33 °C hasta los 65 °C. El volumen total de agua almacenado en el acuífero es inmenso: 37.000 km<sup>3</sup> (cada kilómetro cúbico contiene 1 billón de litros). El país que más lo explota es Brasil, ya que con él abastece entre 300 y 500 ciudades; Uruguay tiene 135 pozos de abastecimiento público de agua, algunos de los cuales se destinan a la explotación termal; en Paraguay hay unos 200 pozos destinados principalmente al consumo humano. En la Argentina hay en explotación cinco perforaciones termales de agua dulce y una de agua salada, ubicadas en el sector oriental de la provincia de Entre Ríos.



## VARIABILIDAD DEL CICLO HIDROLÓGICO: CUANDO EL CICLO SE ALTERA

Los procesos del ciclo hidrológico que más variabilidad presentan son aquellos que se producen en la atmósfera. La variabilidad atmosférica abarca fenómenos que duran minutos (como los torbellinos de viento), horas (tornados, tormentas eléctricas), días (frentes y ciclones) y aun fenómenos de más larga duración de meses, años, que pueden dar lugar a inundaciones y sequías o a condiciones prolongadas anormalmente cálidas o frías.

En general, los fenómenos atmosféricos de larga duración están asociados con cambios en la circulación atmosférica que abarca áreas bastante más extensas que la región particularmente afectada. En algunas ocasiones, ciertos

tipos de circulaciones atmosféricas ocurren de forma simultánea en vastas regiones del planeta, aparentemente no relacionadas, y que provocan condiciones meteorológicas anormales en todo el planeta. Por ejemplo, de vez en cuando, las prósperas poblaciones de peces que generalmente se encuentran lejos de la costa oeste del Perú mueren y sus cuerpos llegan hasta las playas. Este fenómeno va acompañado de inusuales condiciones climáticas alrededor del globo, como excesos o déficit de precipitaciones. Tal desarreglo climático es provocado por un calentamiento anormal de las aguas superficiales del Pacífico tropical, conocido como fenómeno de El Niño, fenómeno natural de la variabilidad atmosférica.

su capa superficial (termoclina) lo que se caracteriza por tener una fuerte variación de la temperatura.

Los procesos de evaporación/condensación que ocurren en el Pacífico ecuatorial durante un fenómeno de El Niño transfieren enormes cantidades de energía del océano a la atmósfera por medio de los procesos de evaporación y condensación. Las observaciones atmosféricas indican que existe un calentamiento general de la atmósfera global unos pocos meses después de un fuerte evento de El Niño. Esa energía adicional presente en la atmósfera durante este fenómeno altera la circulación atmosférica a escala planetaria y provoca cambios en los patrones de precipitaciones y temperatura en regiones alejadas de la zona en que se produce El Niño. El sudeste de América del Sur una de las regiones en donde el impacto de El Niño sobre las precipitaciones es mayor.

Los fenómenos de El Niño se producen en promedio cada cuatro años y generalmente se inician durante nuestro otoño y duran alrededor de un año. Los dos episodios más intensos se produjeron entre 1982 y 1983, y entre 1997 y 1998. El que se produjo entre abril de 1982 y julio de 1983 es considerado el más intenso del último siglo y produjo sequías devastadoras en Australia, en el nordeste de Brasil y en el sur de África, e inundaciones en regiones normalmente áridas de Chile y Perú, así como en el sudeste de Brasil y nordeste de la Argentina. Se estima que este fenómeno causó 2.000 muertes y pérdidas económicas a nivel mundial que alcanzaron los 13.000 millones de dólares. En particular, las inundaciones ocurridas en el nordeste de la Argentina se debieron a que el río Paraná, en Corrientes, alcanzó durante junio de 1983 el mayor caudal del último siglo a causa de las precipitaciones extraor-

### CUENCA DEL PLATA

La Cuenca del Plata cubre alrededor de 3,6 millones de km<sup>2</sup>; en términos geográficos, es la quinta cuenca más grande del mundo y la segunda en Sudamérica después de la amazónica. Las principales subcuencas son las de los ríos Paraná, Paraguay y Uruguay. Aproximadamente el 30 % de su área se encuentra dentro del territorio de la Argentina, 7 % en Bolivia, 46 % en Brasil, 13 % en Paraguay y 4 % en Uruguay. Los límites del Sistema Acuífero Guaraní se encuentran totalmente incluidos dentro de la extensión de esta cuenca, lo que evidencia la interacción entre ambos sistemas.

El promedio anual de descarga de la Cuenca del Plata en el océano Atlántico es de 21.000 m<sup>3</sup>/s, de los cuales el

75 % corresponde a la descarga a los ríos Paraná y Paraguay. Del total de precipitaciones que la cuenca recibe, alrededor del 30 % escurre superficialmente, mientras que el 70 % restante se evapora e infiltra.

En la región viven más de 100 millones de personas y su producción se aproxima al 70 % del Producto Bruto Nacional (PBN) de los cinco países que la integran, lo que da una idea de la importancia de esta cuenca en términos socioeconómicos. La agricultura y la ganadería son recursos cruciales de la región, los ríos son vías de transporte naturales y las represas hidroeléctricas instaladas en diferentes puntos de la cuenca generan la mayor parte de la energía eléctrica de la región.

Fuente: Instituto Nacional del Agua

### EL FENÓMENO DE EL NIÑO

En condiciones normales, los vientos superficiales del este en las zonas ecuatoriales (vientos alisios) conducen las aguas superficiales del Pacífico ecuatorial hacia el oeste, favoreciendo la ocurrencia de tormentas intensas en esa región. En compensación, los vientos alisios provocan que aguas relativamente frías surjan en la costa de Sudamérica sobre el Pacífico ecuatorial. Durante el fenómeno de El Niño, los vientos alisios se debilitan y como consecuencia, las masas de agua caliente y las zonas de máxima precipitación se desplazan hacia el centro del Pacífico ecuatorial, lo que provoca que aguas anormalmente más calientes se extiendan hasta la costa de Sudamérica. Por el contrario, cuando se produce una intensificación de los vientos alisios y, por consiguiente, un enfriamiento anómalo de las aguas del Pacífico ecuatorial, se desarrolla el fenómeno opuesto conocido como La Niña. Se observa en las figuras que los cambios en el océano no se circunscriben a su superficie, sino que afectan

dinarias caídas sobre la cuenca entre marzo y abril de ese año. El fenómeno que se produjo entre abril de 1997 y abril de 1998 fue también extraordinariamente intenso con consecuencias catastróficas en varias regiones del mundo. En nuestro país, los impactos hidrológicos provocaron inundaciones en el sur de Córdoba y Santa Fe, en la provincia de Buenos Aires y en el litoral mesopotámico, que causaron la evacuación de alrededor de 120.000 personas. Una situación diferente se registró entre abril de 1988 y abril de 1989 cuando tuvo lugar un fenómeno de La Niña extremadamente intenso. En este caso, los impactos en la Argentina estuvieron vinculados con una marcada sequía en gran parte del territorio por lo que los ríos presentaron caudales muy bajos y la generación de energía en las represas hidroeléctricas se vio seriamente afectada.

### PREDICCIÓN DE EL NIÑO Y SUS IMPACTOS

Las variaciones en el sistema océano-atmósfera se monitorean constantemente con un sistema de medición muy poderoso, que incluye observaciones satelitales, estaciones meteorológicas,

barcos, aviones, etc. En especial, la instalación de un conjunto de boyas y correntómetros a lo largo del Pacífico tropical mejoró el conocimiento del estado de la atmósfera y el océano en esa región clave para El Niño.

En la actualidad, el conocimiento más detallado del clima ha permitido el desarrollo de programas computacionales para realizar su predicción. Tales modelos se alimentan del monitoreo global de la atmósfera y del océano, y proporcionan información sobre su evolución en los siguientes meses o años. En el caso del fenómeno de El Niño hay dos tipos de predicción involucrados. Uno se refiere a la predicción de las condiciones del océano y la atmósfera sobre el Pacífico que permiten determinar el inicio de un nuevo fenómeno de El Niño o de La Niña. El otro tipo de predicción está destinado a pronosticar el impacto en el clima global ante el desarrollo determinado de El Niño. Si bien la fiabilidad de ambos pronósticos todavía está lejos de ser perfecta —en particular, la predicción del desarrollo del fenómeno El Niño resulta de mejor calidad—, los dos proporcionan valiosas indicaciones respecto de las condiciones climáticas de gran impacto en las actividades humanas.



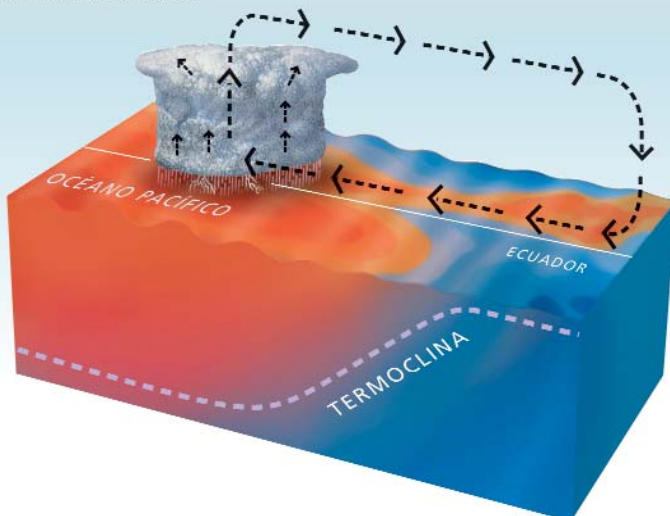
Boya para la medición meteorológica y oceanográfica en el Pacífico ecuatorial.

Cortesía del Dr. Michel J. Mc Phanden (TAO Project Office) y L. Stratton (NOAA)

## CONDICIONES DEL OCEANO PACIFICO TROPICAL

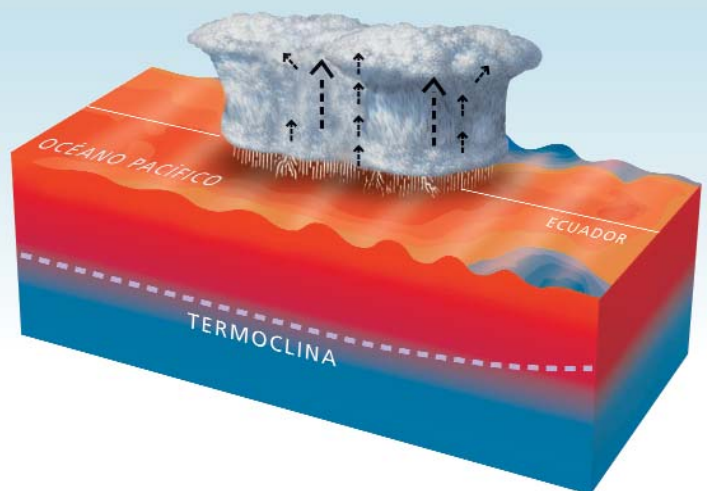
### DURANTE VERANOS NORMALES

Los vientos superficiales del este apilan las aguas cálidas del Pacífico ecuatorial en el oeste ocasionando tormentas en esa región y provocando surgencias de agua fría en la costa sudamericana.



### DURANTE EL FENOMENO DE EL NIÑO

Los vientos del este se debilitan y las aguas cálidas se extienden sobre el Pacífico central, intensificando allí las tormentas y elevando la temperatura del agua en la costa sudamericana.



## ENTREVISTA A LA DRA. DORA GONIADSKI

Directora de Sistemas de Información y Alerta Hidrológico del Instituto Nacional del Agua.

### ¿Qué es el Instituto Nacional del Agua?

Es un organismo descentralizado de la Subsecretaría de Recursos Hídricos, dentro del área de la Secretaría de Obras Públicas de la Nación. A través de sus diversos centros especializados y regionales desarrolla actividades que abarcan campos de estudio tales como crecidas, inundaciones y aluviones, riego y drenaje, sistemas de alerta hidrológico, hidráulica de grandes obras, hidráulica fluvial, marítima e industrial, hidráulica computacional, modelación física e instrumentación, calidad de agua y contaminación, tratamiento de agua y efluentes, calidad de cursos y cuerpos receptores, hidrología superficial y subterránea, hidrología urbana, bases de datos de recursos hídricos y ambientales, erosión y sedimentación, economía, planificación y administración del agua y el ambiente, evaluaciones de impacto ambiental, monitoreo y control de la contaminación.

### ¿Qué servicios brinda?

El INA tiene el objeto de satisfacer los requerimientos de estudio, investigación, desarrollo y prestación de servicios especializados en el campo del aprovechamiento, control y preservación del agua y del ambiente. En particular, brinda asesoramiento y presta servicios sobre temas de su especialidad a los sectores público y privado, y promueve la capacitación y la difusión del conocimiento en su área temática.

Las cinco líneas temáticas prioritarias de su plan estratégico son las siguientes:

- Contribuir con la prevención y mitigación de desastres hídricos.
- Contribuir con el tratamiento integrado de problemas hídricos urbanos y ocupación territorial no planificada.
- Desarrollar tecnología y contribuir con el diseño, la optimización y la verificación de obras de infraestructura hídrica.
- Evaluar la calidad de los recursos hídricos y los riesgos asociados con la contaminación.
- Desarrollar estudios de sistemas hídricos para el aprovechamiento sustentable del recurso.

### ¿Qué es el Sistema de Alerta Hidrológico de la Cuenca del Plata?

Es un sistema de información que se opera en tiempo real para monitorear el estado de los ríos de la cuenca. Los objetivos del sistema son prever con la mayor antelación posible eventos de inundación o bajantes pronunciadas, producir regularmente pronósticos hidrológicos en puntos de interés, aportar elementos de juicio para la toma de decisiones en situaciones de emergencia hidrológica y apoyar las actividades relacionadas con el mejor aprovechamiento de los recursos hídricos en la cuenca.

### ¿Cuál es la situación de las diferentes ciudades de la Argentina en la Cuenca del Plata frente a las inundaciones?

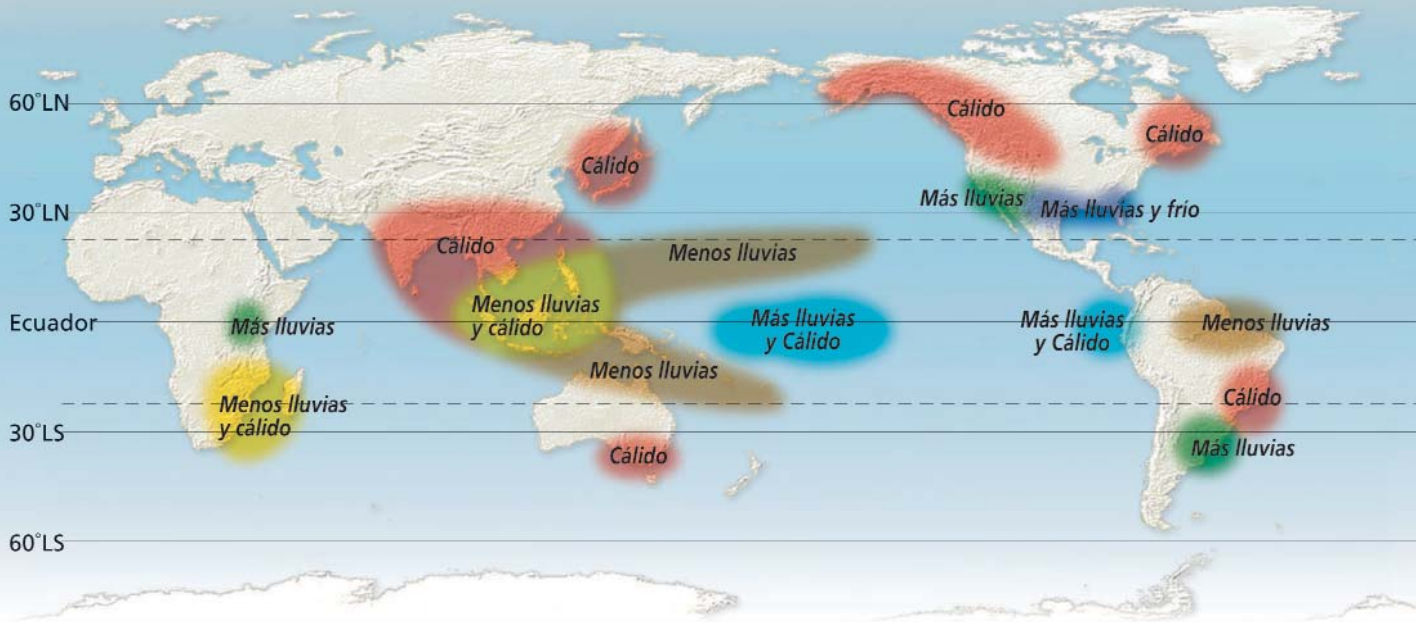
Desde 1992 a la fecha hubo préstamos del Banco Mundial para la construcción de defensas provisionarias primero y definitivas luego para las ciudades más afectadas por las crecidas de los ríos Paraná, Paraguay y Uruguay. Pero estas defensas no contemplan la posibilidad de inundaciones por afluentes que descargan en los ríos principales, como el caso del Salado santafecino, para lo que no se dispone de información hidrometeorológica adecuada.

### ¿Qué es el Proyecto Sistema Acuífero Guaraní?

Es un proyecto que apoya la protección ambiental y el desarrollo sustentable del Sistema Acuífero Guaraní. Es el resultado de la intensa cooperación entre Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay para manejar uno de los acuíferos más grandes del mundo. Su implementación permitirá desarrollar un marco normativo para la gestión y preservación del sistema. El marco incluirá convenios sobre medidas para controlar la extracción de agua, conformar una base de datos común y aplicar mecanismos que prevengan la contaminación de las aguas subterráneas, una de las mayores amenazas para el uso futuro de los recursos hídricos.

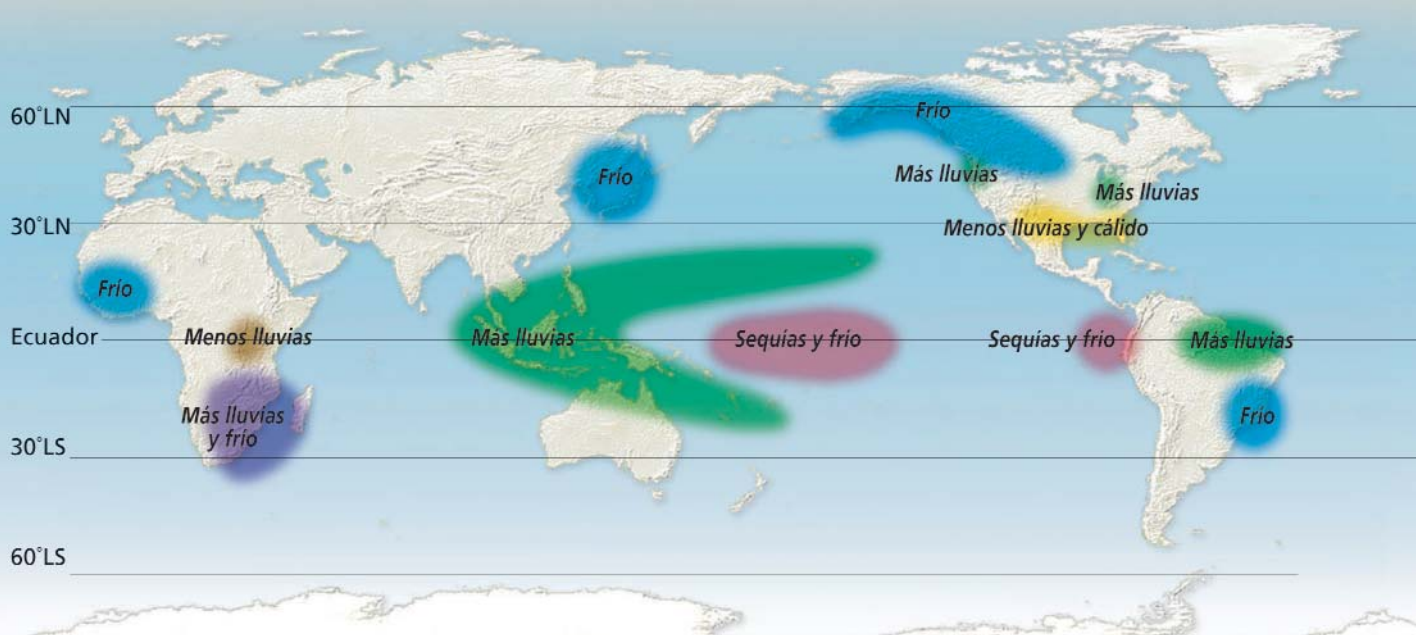
### IMPACTO GLOBAL DE EL NIÑO

El exceso de tormentas en el centro del océano Pacífico ecuatorial provoca trastornos en el patrón pluvial y térmico de los diferentes sectores del planeta, resaltados en el mapa.

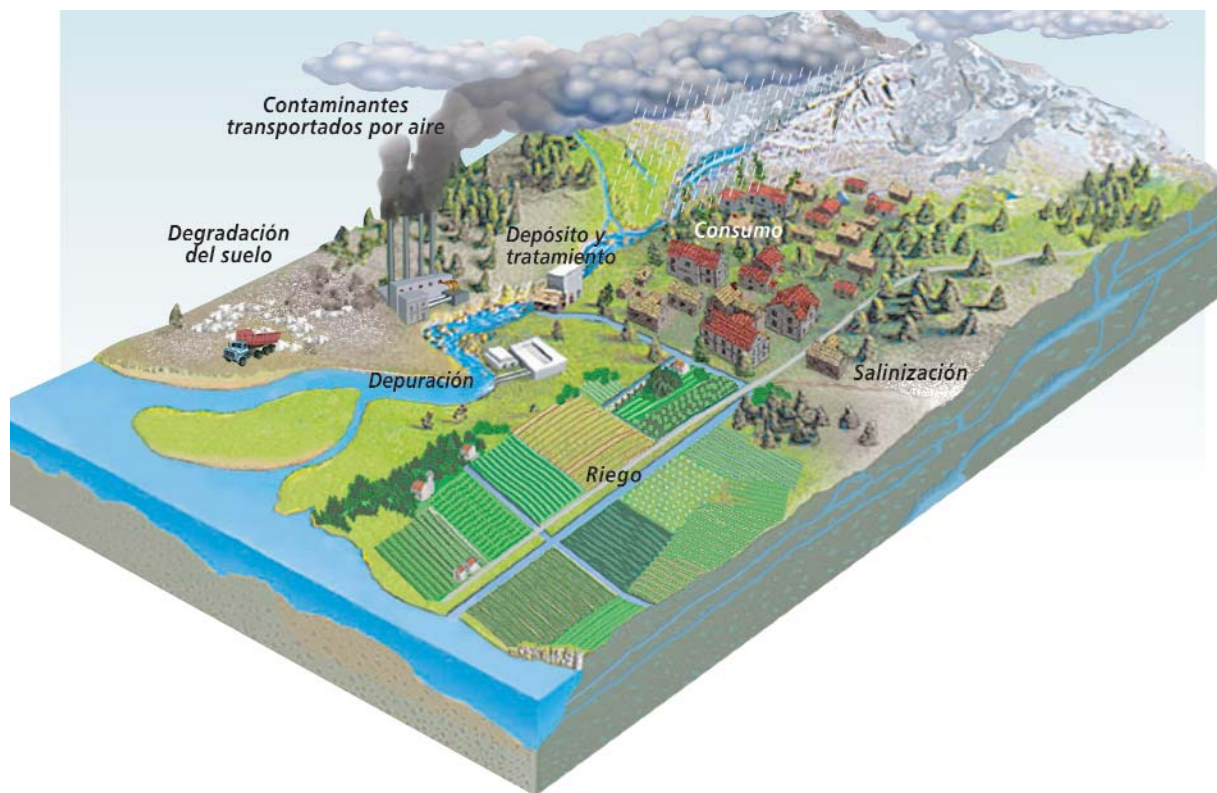


### IMPACTO GLOBAL DE LA NIÑA

Las regiones del planeta donde se producen alteraciones climáticas son las mismas, pero en el extremo opuesto al fenómeno de El Niño.



## LA CRISIS MUNDIAL DEL AGUA



**E**l conocimiento planteado en este fascículo es sólo la punta de un iceberg. Las distintas sociedades intentan adaptar o modificar en lo posible algunas de las etapas del ciclo hidrológico para hacerlo más útil a sus necesidades. Los inventos para acelerar las lluvias, la desalinización del agua de mar para hacerla potable o la construcción de presas y embalses para controlar el flujo de los ríos son ejemplos de la injerencia humana en el ciclo natural del agua. Durante el pasado reciente, el de-

sarrollo intenso de la actividad industrial y agrícola, el incremento de la población, la colonización de nuevos territorios y, entre otros factores, la modificación de la cobertura natural en las cuencas hidrográficas, motivada por los cambios en los usos del suelo y la deforestación, han supuesto una presión significativa sobre los recursos hídricos. De hecho, en las cuencas de los países económicamente más desarrollados prácticamente no existe cauce alguno cuyas aguas fluyan en régimen natural —es

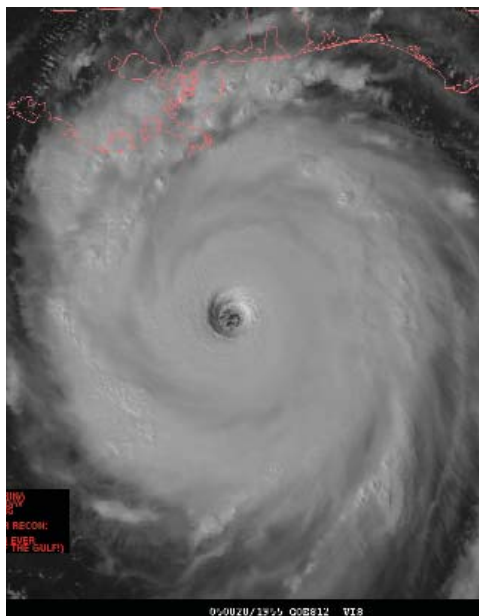
decir, sin que haya experimentado intervenciones humanas en su cuenca que afecten los caudales fluyentes, tales como obras de regulación, derivaciones, etc.—. A título informativo, la UNESCO estima que en la actualidad las demandas hídricas requieren el 54 % de los recursos superficiales y que, de seguir las cosas como hasta ahora, para 2050, es probable que al menos una de cada cuatro personas viva en países afectados por la escasez crónica o recurrente de agua dulce.

El estado de pobreza de un amplio porcentaje de la población mundial es a la vez un síntoma y una causa de la crisis del agua. Actualmente, 1.100 millones de personas en el mundo carecen de instalaciones necesarias para abastecerse de agua y 2.400 millones no tienen acceso a sistemas de saneamiento. Para invertir estas tendencias negativas, según un informe de la UNESCO, la comunidad internacional ha definido ciertos objetivos sobre el agua que han de alcanzarse de aquí a 2015. Entre las prioridades se encuentran el acceso al suministro y a la sanidad del agua: estas necesidades humanas básicas son requisitos previos para avanzar hacia un consumo sostenible de los recursos hídricos y controlar los impactos negativos de los seres humanos sobre el medio ambiente.

Una mejor gestión permitirá hacer frente a la creciente escasez de agua per cápita en muchas partes del mundo en desarrollo.

Resolver la crisis del agua es, sin embargo, sólo uno de los diversos desafíos con los que la humanidad se enfrenta en este tercer milenio y ha de considerarse en este contexto. La crisis del agua debe situarse en una perspectiva más amplia de solución de problemas y de resolución de conflictos. Tal como lo ha indicado en 2002 la Comisión sobre el Desarrollo Sostenible de la ONU: "Erradicar la pobreza, cambiar los patrones de producción y consumo insostenibles y proteger y administrar los recursos naturales del desarrollo social y económico constituyen los objetivos primordiales y la exigencia esencial de un desarrollo sostenible". Alcanzar estos objetivos tiene un enorme costo que probablemente será uno de los desafíos más importantes que la comunidad internacional tendrá que afrontar durante los próximos quince años.

## TORMENTAS Y DESASTRES: KATRINA Y CATARINA



Las tormentas severas pueden producir serios impactos socioeconómicos, y es importante desarrollar mecanismos que permitan minimizarlos. La convivencia con estos procesos naturales no encuentra muchas veces en la sociedad una planificación adecuada para enfrentarlos en situaciones de emergencia. El desafío asociado para afrontar estos fenómenos involucra el desarrollo de sistemas de predicción, de acciones de planificación necesarias para mitigar los impactos y un buen manejo de los posibles conflictos resultantes de la ocurrencia de estos fenómenos.

Como ejemplo de ocurrencia e impacto de tales tormentas severas en el mundo, se destacan los fenómenos conocidos como ciclones tropicales. Un ciclón tropical es un centro de baja presión con nubes y tormentas asociadas, que se desarrolla sobre océanos tropicales o subtropicales y que tienen una circulación organizada. Según su ubicación alrededor del mundo, los ciclones tropicales intensos, que son los que exhiben vientos mayores a 119 km/h, tienen diferentes nombres. Mientras que en los océanos Atlántico y Pacífico este se llaman *huracanes*, en el Pacífico oeste se los denomina *tifones*.

Independientemente de cómo se los llame, ciertas condiciones ambientales favorecen la formación de

estas tormentas severas: el agua del océano debe tener temperaturas mayores a 27 °C en los primeros 46 m de profundidad; el aire debe estar relativamente húmedo en los niveles medios de la tropósfera (alrededor de 5000 m); un sistema de baja presión debe preexistir y los vientos deben tener poco cambio de intensidad y dirección a lo largo de la vertical. Los huracanes se clasifican según su intensidad utilizando la escala de Saffir-Simpson, que va desde la categoría 1, con intensidades entre 119 y 153 km/h, hasta la categoría 5, con vientos mayores a los 250 km/h.

A fines de agosto de 2005, el huracán Katrina fue uno de los más intensos que impactaron en la costa de los Estados Unidos en los últimos 100 años. Si bien Katrina tuvo su máxima intensidad sobre el golfo de México con categoría 5, su intensidad sobre tierra fue tal que los vientos alcanzaron valores de 100 km/h, con una presión en el centro de 920 hPa. Katrina causó devastación en las ciudades y regiones de los Estados Unidos ubicadas sobre la costa del golfo de México. La pérdida de vidas y propiedades fue especialmente grave en la zona de Nueva Orleans debido a la rotura de diques que separaban la ciudad de los lagos circundantes. Al menos el 80 % de la ciudad estuvo bajo el agua, lo que resultó en el desplazamiento de más de 250.000 personas, más de 1300 muertes y pérdidas económicas por más de 100 millones de dólares.

Fenómenos como huracanes y tifones no se pueden formar en océanos como el Atlántico Sur, debido a que la temperatura de sus aguas no es lo suficientemente caliente. Sin embargo, el desarrollo de un ciclón en el sur de Brasil, conocido como Catarina a finales de marzo de 2004, tuvo tal intensidad que fue considerado por algunos meteorólogos como un huracán. Catarina tuvo picos de vientos sostenidos de 160 km/h sobre el Atlántico Sur que corresponderían a un huracán de categoría 2, exhibiendo incluso un "ojo" o centro libre de nubes. Con esa intensidad, Catarina entró en tierra, afectando los estados de Rio Grande do Sul y Santa Catarina en Brasil. Catarina dañó alrededor de 40.000 hogares, con pérdidas económicas estimadas en 350 millones de dólares.

## EPISTEMOLOGÍA

### Agustín Adúriz-Bravo

A lo largo de este texto se presentan modelos científicos sobre el ciclo del agua. Interesa reflexionar acerca de la comunicación de esos modelos, que se realiza por medio del lenguaje especializado utilizando diversas herramientas retóricas. Por ejemplo, el texto propone a los lectores un experimento mental: se les pide que imaginen que las precipitaciones que existen a lo largo de un año sobre toda la Tierra cayeran de una vez sobre la provincia de Buenos Aires, para poder entender así el volumen de agua impli-

cado. El *experimento mental* es una herramienta usada con el fin de que el lector se construya una imagen del fenómeno.

Otra herramienta retórica, usada cuando se menciona la imagen de la olla con agua hirviendo, es la *analogía*. La analogía es una comparación entre dos situaciones que permite iluminar el significado de una desconocida (en este caso, la convección en la atmósfera) mediante otra conocida (la ebullición del agua). En la analogía se ponen en correspondencia rasgos de ambas situaciones por su parecido estructural y funcional.

Una tercera herramienta que se presenta en el texto es la *representación*, como en el caso

de la "imagen de vapor de agua" hecha a partir de los datos satelitales. Una representación maneja convenciones que han de conocerse para poder entenderla, por ejemplo, que los colores oscuros representan zonas de menor humedad.

En paralelo con el análisis de la comunicación de los modelos, es necesario reflexionar sobre el proceso de creación de la ciencia. Una cuestión importante es la posibilidad de predecir situaciones utilizando modelos numéricos, desarrollados con ayuda de la informática, que permite procesar una enorme cantidad de datos con rapidez. El modelo numérico trata la información

proveniente de observaciones y experimentos para prever posibles desenlaces de los fenómenos, como en el ejemplo de El Niño y sus consecuencias globales.

La última sección del texto plantea otra idea para pensar las ciencias: la de intervención sobre el mundo. La ciencia transforma la realidad: tanto la forma en que pensamos y hablamos sobre los fenómenos como las actuaciones que podemos realizar sobre ellos están guiadas por los modelos científicos. La intervención sobre el mundo obedece a una finalidad, como cuando los científicos se plantean la necesidad de encontrar soluciones al problema del agua potable.

### Bibliografía

- Ahrens, D.: *Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate and the Environment*, Brooks Cole, 2002.
- Barry, R. y R. Chorley: *Atmosphere, Weather and Climate*, Londres, Routledge, 1998.
- Camilloni, I. y C. Vera: *El aire y el agua en nuestro planeta*, Buenos Aires, EUDEBA, 2006.
- Kump, L., J. Kasting y R. Crane: *The Earth System*, New Jersey, Prentice-Hall, 1999.
- ONU/WWAP (Naciones Unidas/Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos): *Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo: Agua para todos, agua para la vida*. París, Nueva York y Oxford, UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura) y Berghahn Books, 2003.
- Voitureiez, B. y G. Jacques: *El Niño. Realidad y ficción*, París, UNESCO, 2003.

### Páginas web

- [http://www.pmel.noaa.gov/tao/el\\_nino/spanish.html](http://www.pmel.noaa.gov/tao/el_nino/spanish.html)  
[http://www.unesco.org/water/index\\_es.shtml](http://www.unesco.org/water/index_es.shtml)

- <http://www.atmo.fcen.uba.ar>  
<http://www.cima.fcen.uba.ar>  
<http://www.meteofa.mil.ar>  
<http://www.medioambiente.gov.ar>  
<http://www.wmo.ch/index-sp.html>  
<http://lwf.ncdc.noaa.gov/oa/climate/research/2005/katrina.html>  
[http://www.srh.noaa.gov/lix/Katrina\\_overview.html](http://www.srh.noaa.gov/lix/Katrina_overview.html)  
[http://ciencia.nasa.gov/headlines/y2004/02apr\\_hurricane.htm](http://ciencia.nasa.gov/headlines/y2004/02apr_hurricane.htm)

### Agradecimientos

El equipo de Publicaciones de la Dirección Nacional de Gestión Curricular y Formación Docente agradece a las siguientes instituciones y personas por permitirnos reproducir material fotográfico y colaborar en la documentación de imágenes: Earth Sciences and Image Analysis Laboratory, NASA Johnson Space Center (EE.UU.); NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center, Boulder (EE.UU.); NOAA Photo Library; OAR/ ERL/ National Serve Storms Laboratory (EE.UU.); Naval Research Laboratory, Clementine Mission (EE.UU.); TOMS science team & and the Scientific Visualization Studio, NASA GSFC (EE.UU.) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciales DSA/ CPTec/ INPE (Brasil) y Walter S. Kiefer.



**Ministro de Educación, Ciencia y Tecnología**, Lic. Daniel Filmus  
**Secretario de Educación**, Lic. Juan Carlos Tedesco  
**Subsecretaria de Equidad y Calidad**, Lic. Alejandra Birgin  
**Directora Nacional de Gestión Curricular y Formación Docente**,  
 Lic. Laura Pitman

**Coordinadora del Área de Ciencias Naturales**, Lic. Nora Bahamonde  
**Coordinadora del Área de Desarrollo Profesional**, Lic. Silvia Storino  
**Coordinadora del Programa de Capacitación Explora**, Lic. Viviana Celso  
**Coordinadora de Publicaciones**,  
 Lic. Raquel Franco

**Coordinación y documentación**,  
 Lic. Rafael Blanco  
**Edición**, Lic. Gonzalo Blanco  
**Diseño y diagramación**,  
 DG María Eugenia Más  
**Corrección**, Norma A. Sosa Pereyra  
  
[www.me.gov.ar](http://www.me.gov.ar)