

COLABORACIONES EN CIENCIAS DE LA NATURALEZA

Serie: Problemas del Medio Ambiente. Parte 3:

CRÓNICAS DEL AGUA

Whiskey is for drinking; water is for fighting over

Atribuida a Mark Twain

CONSEJO A MODO DE PRÓLOGO

Cuenta una leyenda africana que un día, hace muchos años, un elefante dijo al dios de la lluvia: - Debe usted estar muy satisfecho, porque se las arregló para cubrir toda la tierra de verde; ¿pero qué pasaría si arranco toda la hierba, todos los árboles y los arbustos? No quedará nada verde. ¿Qué haría usted en ese caso? El dios de la lluvia le contestó: - Si dejara de enviar la lluvia, no crecerían más plantas y no tendrías nada para comer. ¿Qué sucedería entonces? Pero el elefante quería desafiarlo y comenzó a arrancar todos los árboles, los arbustos y la hierba con su trompa, para destruir todo lo verde de la tierra. Así pues, el dios de la lluvia, ofendido, hizo que cesara la lluvia y los desiertos se extendieron por todas partes. El elefante se moría de sed; intentó cavar por donde pasaban los ríos, pero no pudo encontrar una gota de agua. Al final alabó al dios de la lluvia: - Señor, me he portado mal. Fui arrogante y me arrepiento. Por favor, olvídelo y deje que vuelva la lluvia. Pero el dios de la lluvia continuaba en silencio. Pasaban los días y cada día era más seco que el anterior. Al final, el dios de la lluvia se ablandó y formó un pequeño charco cerca de donde vivía el elefante. El elefante dejó a la tortuga encargada de proteger el charco con estas palabras: - Tortuga, si alguien viene aquí a beber, les dirás que éste es mi charco personal y que nadie puede beber de aquí. La tortuga repetía estas palabras a todos los animales y, por temor, ninguno se acercó. Pero cuando llegó el león, no le impresionaron las palabras de la tortuga. La miró, le dijo que se fuera y bebió agua hasta calmar su sed. Cuando el elefante volvió quedaba muy poca agua en el charco. De pronto todos los animales oyeron la voz del dios de la lluvia que les decía: - No hagan como el elefante. No destruyan lo que puedan necesitar en el futuro. Pero, sobre todo, no sean arrogantes y no intenten apropiarse de todo; permitan que los necesitados compartan su fortuna.

NOTAS PRELIMINARES

La riqueza, la salud y la seguridad de todas las sociedades han descansado (y descansan) en la garantía de un aprovisionamiento suficiente de agua dulce en el sitio apropiado en el momento apropiado. Esto, aún siendo una condición necesaria para tal fin, no es suficiente, pues estas aspiraciones de las sociedades dependen de otros muchos factores aparte de un adecuado suministro de agua. Sin embargo, el fracaso en la obtención de este suministro lleva aparejado un deterioro que, en muchos casos, ha llevado al colapso de una sociedad. Este requisito indispensable para la supervivencia de las sociedades humanas ha planteado a lo largo de la historia desafíos técnicos y políticos cuya resolución no ha dejado de ir acompañada, en muchos casos, de sustanciales alteraciones del entorno.

El agua dulce del planeta apenas totaliza un volumen de unos 35.000.000 km³; el resto, hasta los aproximadamente 1.400 millones de km³ de agua que compone la hidrosfera, constituye agua salada de mares y océanos [1]. Aunque 35 millones de kilómetros cúbicos de agua dulce es una cifra impresionante (equivale a unos 5.300 km³ por habitante), en realidad sólo una muy pequeña parte de esta cantidad, los aproximadamente 90.000 km³ en forma de lagos y ríos del planeta, ha sido la fuente primordial de agua a lo largo de la historia. Un promedio de 110.000 km³ de agua cae en forma de precipitación sobre las tierras emergidas del planeta. Un tercio de esta cantidad (denominada agua azul) alimenta los ríos y los acuíferos, de la cual sólo unos 12.000 km³ son realmente aprovechables. Los otros dos tercios restantes (agua verde) retornan por evapotranspiración a la atmósfera. Los cambios en el uso del suelo (colonización agrícola, deforestación, urbanización, desecamiento de zonas húmedas, etc.) y del agua (fragmentación de cuencas hidrográficas, sobreexplotación de acuíferos, pérdidas por evaporación de agua embalsada), están alterando sustancialmente la disponibilidad de ambos tipos de agua. Como resultado, las reservas de agua dulce declinan, superando la explotación, en lugares como el Medio Oeste americano, la llanura Indo-Gangéctica o el Norte de China, la capacidad de renovación de las reservas [2].

Existe una creciente concienciación sobre el agua dulce como un recurso limitado y en peligro [3]. Cobran, en este sentido, cada más relevancia los conceptos de función y servicio de ecosistemas. Especialmente pertinente, en el contexto presente, es el segundo (en inglés ecosystem service), que debemos entender como el conjunto de procesos a través del cual nues-

tro entorno natural produce recursos que, en la mayoría de los casos, damos por sentado sin mayor reflexión. Agua limpia para uso doméstico, la industria y la agricultura, áreas para la pesca, navegación o el ocio, energía hidroeléctrica, son algunos de los servicios en el contexto que nos interesa aquí. Un corolario inmediato es el riesgo en que ponemos estos servicios con la alteración sistemática de los ecosistemas productores. Los estudios sobre el estado global de este recurso han alertado sobre la necesidad de considerar nuevas formas de abordar conceptos como la cantidad y la calidad del agua dulce [4]. En particular, se hace cada vez más patente que una aproximación correcta debe pasar inevitablemente por una integración de todos los aspectos del problema: ecológicos, de ingeniería, sociales y económicos [3], si bien quedan todavía muchos progresos por hacer en la comprensión de la gestión racional y sostenible del agua dulce.

El tema del agua incorpora tal abanico de ámbitos de estudio, que la simple enumeración de éstos necesitaría más páginas de las asignadas al presente artículo. Se impone una elección en las líneas que siguen, y se ha hecho acudiendo a un simple sobrevuelo del problema de la degradación de dos principales fuentes de abastecimiento: los ríos y las aguas subterráneas. La necesidad de ser breve y no consumirse en ofrecer un frío listado de cifras, lleva a escoger un estilo periodístico. Se presentan los problemas a través de ejemplos ilustrativos, eludiendo exposiciones sistemáticas y profundidad de tratamiento, pero con visión integradora, y con la intención de llamar la atención del lector sobre la cuestión a examen.

HISTORIA SOBRE EL NILO

Egipto, resaltaba hace más de 2.400 años Herodoto, es un regalo del Nilo [5]. Cualquiera que haya tenido la ocasión de visitar aquel país habrá podido constatar lo cierta que es la descripción del historiador y viajero griego. Sobre el mapa, apenas una fina línea verde que biseca la inhóspita meseta de sedimentos cenozoicos que cubre el extremo nororiental de África (véase la Figura 1). En territorio egipcio su valle ocupa, incluido el Delta y la depresión de El-Fayum, un territorio de algo más de 37.000 km² (inferior a Extremadura), en los que se concentran 80 millones de habitantes. En esa estrecha franja, de 1.400 km de largo y de apenas unos pocos de ancho, se ha dado un cúmulo único de circunstancias favorables que han generado riqueza ininterrumpidamente durante los últimos 5.000 años.

Hasta mediados del siglo XIX, la inundación a finales del verano del valle, generada por las lluvias monzónicas del este africano, aportaba agua y nutrientes (el famoso limo) para la cosecha de invierno, esencialmente trigo y cebada. La crecida era breve y el agua llegaba en el buen momento, pasados los meses de mayor calor veraniego, eludiendo con ello una evaporación rápida y excesiva que favorecería la acumulación de sales en el suelo; sales, por otra parte, eliminadas año tras año por la propia crecida. A pesar de de los problemas derivados de la irregularidad en el nivel de la crecida, la forma en que los egipcios han configurado su entorno durante prácticamente 5.000 años ha demostrado ser plenamente sostenible.

Este régimen empezó a cambiar durante la primera mitad del siglo XIX, cuando Mohamed Ali, Jefe de Egipto, decidió extender el cultivo en el Delta del algodón – cuya recolección se realiza en verano, coincidiendo con la crecida – y, en consecuencia, emprender las primeras grandes obras de regulación del flujo del río [6]. A principios del siglo XX los ingleses, ya dueños de Egipto, decidieron dar un paso más para domesticar el Nilo construyendo en Asuán una presa que retuviera las aguas de la crecida y proporcionara riego durante todo el año. Pronto se reveló insuficiente y se completó con una colosal



Figura 1. Fotografía satélite en la que se distingue perfectamente el estrecho valle del Nilo y su delta, en un fondo constituido por los denominados Desiertos Oriental y Occidental.

Fuente: NASA.

presa (As Sadd El Alí o Alta Presa) que embalsa teóricamente [7] 170 km³ de agua del río en un lago artificial de 600 km de longitud (claramente visible en la figura 1), sumando al beneficio de una regulación del río que permite hasta tres cosechas al año la recuperación de nuevas tierras cultivables al desierto y la producción de un 30% de la electricidad del país. El Nilo había sido contenido y ahuyentados los riesgos de episodios catastróficos. Sin embargo, los costes medioambientales pronto se harían sentir. La Alta Presa de Asuán, que por motivos políticos se construyó en el lugar más inapropiado desde un punto de vista hidrológico: pierde por evaporación un 15% del agua embalsada, aumentado la salinidad del agua, y retiene el limo cargado de nutrientes, que la crecida distribuía por los campos. Egipto padece ahora las consecuencias de la irrigación artificial: subida del nivel freático, anegamiento y salinización de tierras y monumentos. Las aguas estancadas han favorecido la proliferación de vectores de enfermedades infecciosas y de especies vegetales invasivas [8]. El ya frágil Delta está seriamente amenazado por una eventual subida del nivel del mar a causa del calentamiento global (Figura 2). La ausencia de limo ya no compensa la erosión del Delta al que el mar ha ganado ya varios kilómetros de costa ni la de las riberas del río, degradadas en muchos sitios. Ha obligado también a la utilización intensiva de fertilizantes y pesticidas [9] que contaminan gravemente el agua y provocan una eutrofización claramente visible en imágenes de satélite (Figura 3) y cuya fabricación absorbe una buena porción de la electricidad producida por la Alta Presa. Ésta última ha creado expectativas en recurso ilimitado, fomentando la aspiración de poder solventar la demanda de una población literalmente desbordada [10]. Quiméricos proyectos de colonización del desierto se han sucedido uno tras otro, sin por ello resolver el problema de una población que no para de crecer y que no tiene más alternativa que la de hacinarse en los miserables y contaminados suburbios de El Cairo – que ya roza los 30 millones de habitantes – y de otras ciudades, enterrando el fértil valle bajo el ladrillo y el asfalto y esquilmando un recurso cada más escaso [11]. La carestía de agua ya se hace sentir en algunos lugares, mientras que la propia Alta Presa quedará tarde o temprano inutilizable por los sedimentos acumulados.

La regulación del Nilo ha respondido a motivaciones políticas, como las de satisfacer las necesidades de cultivos comerciales –caso del algodón–, o las de una población creciente. Sin embargo, los interrogantes futuros que plantean sus implicaciones son inquietantes. Según el World Resources Institute,

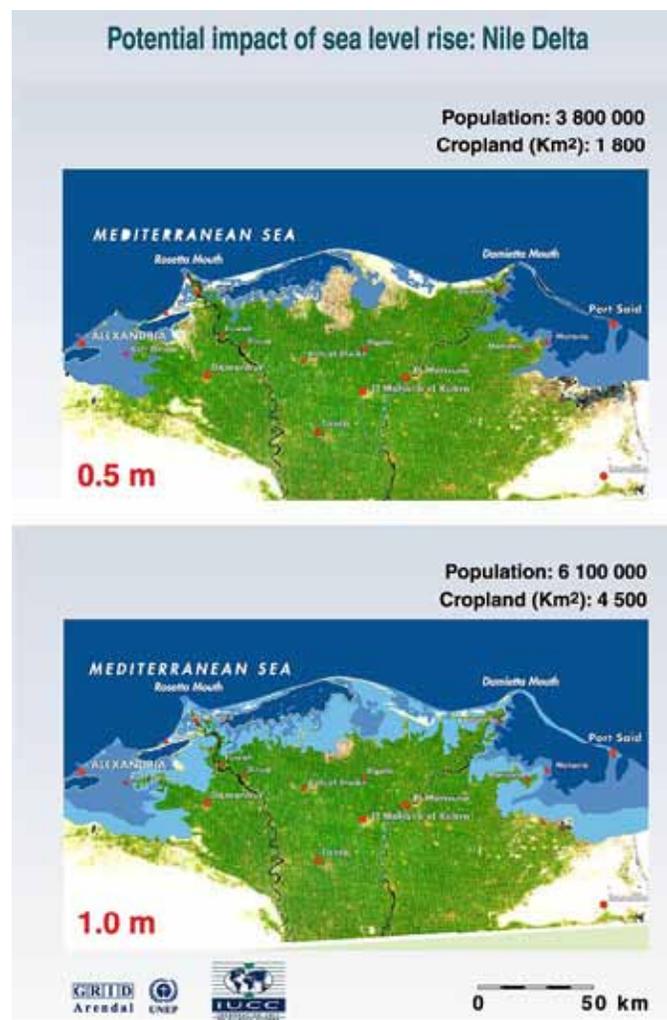


Figura 2. Alcance de la transgresión marina en el Delta del Nilo con eventuales subidas del nivel del mar de 0,5 m (superior) y 1,0 m (inferior), respectivamente.

Fuente: UNEP – United Nations Environmental Program.
Desarrollado por GRID-Arendal.

Egipto es el país del Mundo con menos recursos hídricos generados internamente (Figura 4), con sólo 26 litros/habitante-año con los datos del año 2000. Los aproximadamente 1.000 m³/habitante-año de consumo dependen, en pequeña medida, de la desalinización de agua de mar y, sobre todo, de recursos procedentes de otros países a través del Nilo. Las implicaciones geopolíticas de esta servidumbre son de extrema importancia para su futuro. Basta observar en el mapa de la Figura 5 la alta densidad de población en los países de la cuenca, todos ellos con economías dependientes de la agricultura, y las proyecciones para los cuatro principales en la Tabla I, para adivinar las



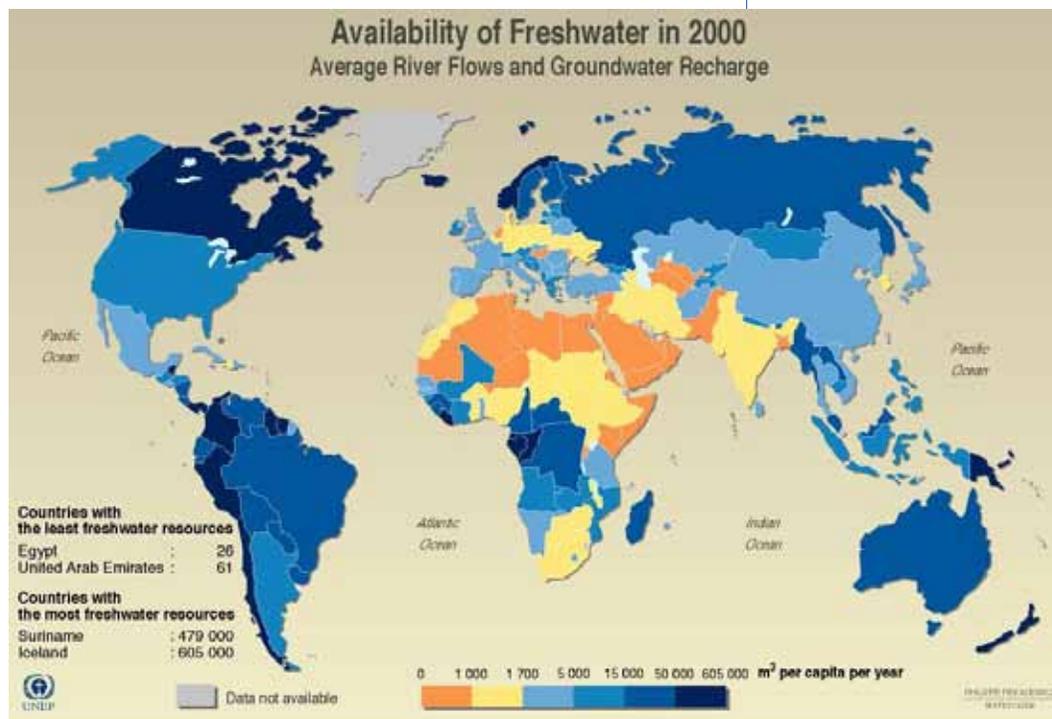
Figura 3. En la fotografía, se distingue claramente, a lo largo de la costa del delta del Nilo, el color verde característico de una alta producción de algas, provocada por el aporte de fertilizantes disueltos en el agua del río. Fuente: NASA

bases de un potencial conflicto sobre el agua [12]. La construcción, por parte de Sudán, de la presa de Meroé, sobre la Cuarta Catarata, que retendrá un 20% de la crecida del Nilo, unida a la

de Kajbar, río abajo, complica notablemente el problema, desvirtuando el acuerdo de 1959 [13]. Entre otros muchos problemas, estas presas han creado un estado de tensión prebélica que puede estallar en cualquier momento.

Hoy en día, 41% de la población mundial vive en cuencas hidrográficas que están en situación de estrés (Figura 6). La alteración de las cuencas hidrográficas es un fenómeno de proporciones insostenibles. Sesenta por ciento de los 227 grandes ríos están fragmentados por presas [14], desviados, canalizados o ven sus aguas transferidas a otras cuencas [15], hasta el punto de que la sobreexplotación hace que ríos como el Amarillo, el Ganges, el Colorado, el Amu Daria y Sir Daria o el Nilo desagüen nada o casi nada en el mar.

Las consecuencias ecológicas, sociológicas y políticas suponen una seria amenaza para el desarrollo y la estabilidad. Casos como la desaparición del Mar de Aral [16] (Figura 7), las amenazas de conflicto transfronterizos en África, Asia Central o el Sudeste Asiático, o los desplazamientos forzados de población ribereña de zonas inundables por embalses, constituyen una clara evidencia de la envergadura del problema. La reducción del caudal y sedimentos de los ríos a causa de la extracción y de las represas, ocasiona aguas abajo una disminución de la productividad agrícola, una salinización de estuarios y deltas y una regresión acelerada de estos últimos [17]. Se estima en más de 100.000 millones de toneladas los sedimentos retenidos por las presas construidas en los últimos 50 años [18]. El corto período de vida útil de una gran parte de estas presas plantea un interrogante más sobre su rentabilidad.



Source: World Resources 2000-2001, People and Ecosystems: The Fraying Web of Life, World Resources Institute (WRI), Washington DC, 2000.

Figura 4. El mapa muestra la disponibilidad anual de agua dulce por habitante, en m³ en el año 2000. Países de alto crecimiento demográfico, como Egipto, Argelia o Pakistán, no llegan siquiera a los 1.000 m³/habitante-año (color naranja), muy por debajo del umbral recomendado por los organismos internacionales (1.700 m³/habitante-año). Aún teniendo mayores recursos que estos, otros, como la India e Irán (color amarillo), tampoco llegan a ese umbral. Fuente: World Resources Institute.

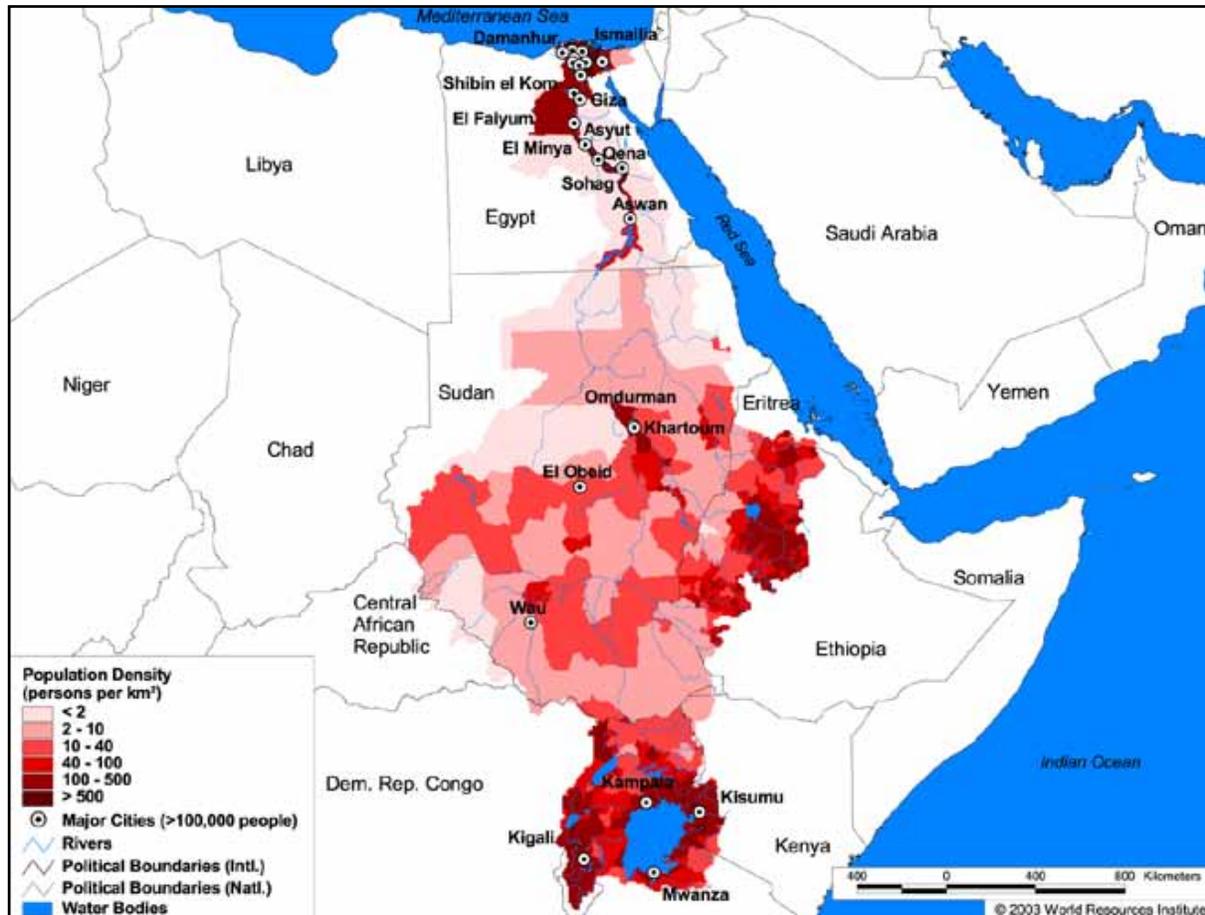


Figura 5. Densidad de población, indicada por tonos de rojo, en la cuenca del Nilo. La mayor densidad (> 500 habitantes/km³) se encuentra en la baja cuenca, entre Asuán y el mar, a lo largo de las riberas del lago Victoria (Kenia, Uganda), en la cuenca del Kagera (Ruanda y Burundi), y en el lago Tana y la cuenca alta del Nilo Azul (Etiopía). Si hasta hace pocos años Egipto venía considerando el río como una propiedad exclusiva, hoy en día se despierta cada vez más el interés de los otros países ribereños por reclamar su cuota de uso de las aguas del Nilo. Sudán y Uganda han empezado a construir presas para satisfacer sus propias demandas de energía y agua. Esto, combinado con la cada vez mayor demanda de Egipto, constituye una fuente potencial de conflictos

Tabla1

Datos demográficos y disponibilidad de agua (presentes y proyección) en el valle del Nilo

País	Tasa de crecimiento población	Población 2007 (millones)	Proyección población 2025 (millones)	Agua disponible per cápita 1990 (m ³)	Proyección agua disponible per cápita 2025 (m ³)
Egipto	1,7%	80,3	109,2	1.123	630
Sudán	2,1%	39,3	56,9	4.792	1.993
Etiopía	2,8%	76,5	114,6	2.207	842
Uganda	3,6%	30,2	56,8	3.759	1.437
Total		226	338		

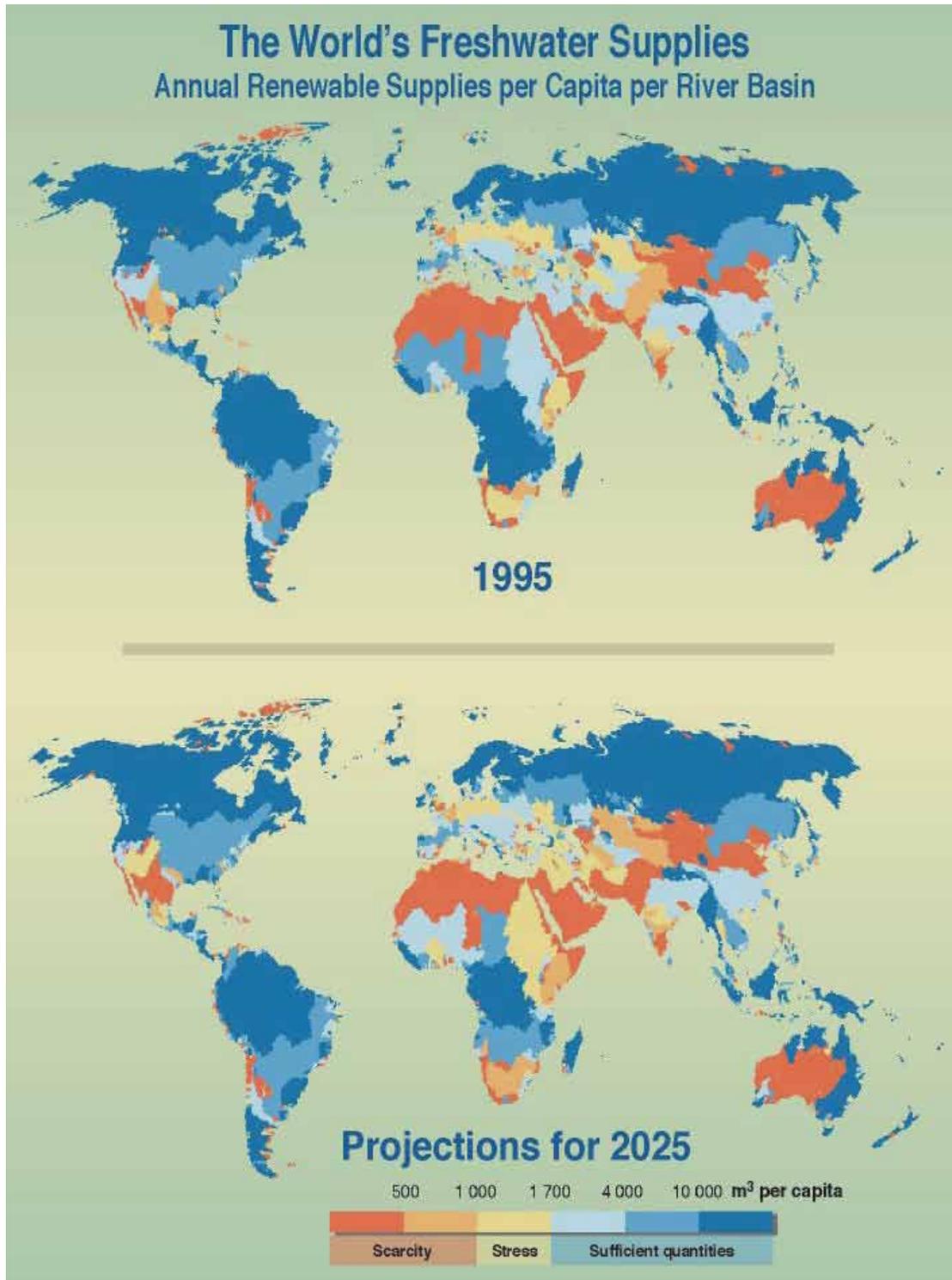
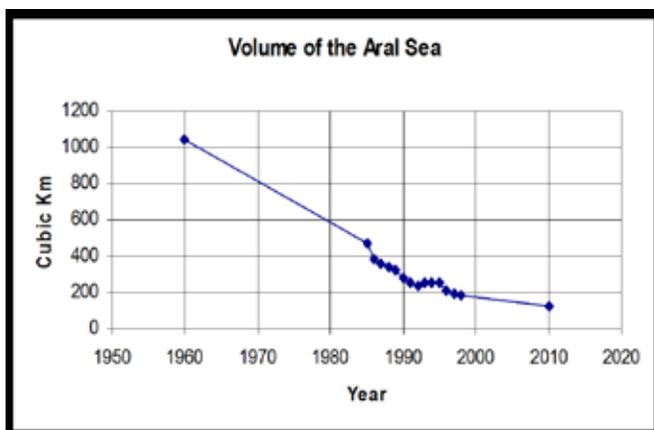
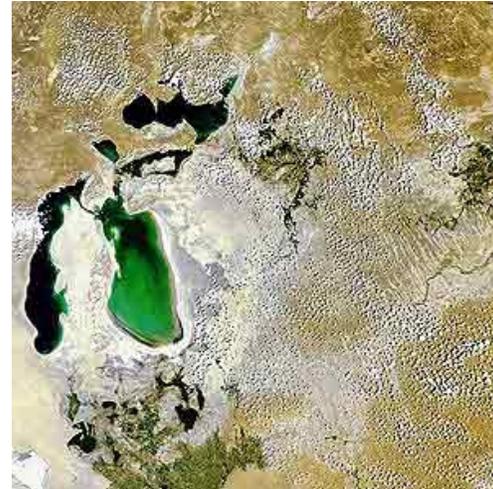
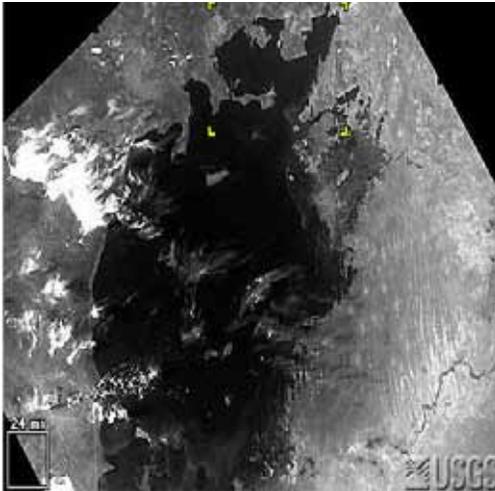


Figura 6. El mapa muestra la disponibilidad de agua dulce por habitante y año y por grandes cuencas hidrográficas. Año 1995 en lámina superior y proyección para el 2025, en lámina inferior. Se encuentran, actualmente, en situación de escasez grave (menos de 500 m³/habitante·año) las grandes áreas desérticas subtropicales de ambos hemisferio, a las que se añade la cuenca del Huang Ho (río Amarillo). Para el 2025 la situación pasará de ser de estrés en la cuenca del Nilo, en áreas del sudoeste norteamericano y en Mesopotamia. Fuente: Water Resources Institute.



EL CONSUMO DE LOS ACUÍFEROS

Kerala es un estado de la India que ocupa una estrecha franja costera al suroeste del subcontinente y famoso por sus bellas playas llenas de palmeras, que hacen de él un lugar de alto atractivo turístico. Una muy conocida multinacional fabricante de refrescos posee en un pequeño pueblo del estado una planta embotelladora de 25 millones de dólares a la que algunos lugareños responsabilizan de la desecación anormal de sus pozos durante las sequías persistentes. Las protestas forzaron al gobierno del estado a retirar la licencia a la embotelladora y ordenaron el cierre de la planta en 2005. Éste no es la única acusación de abuso a la que se enfrenta esta multinacional. Más al norte, en el superpoblado estado de Uttar Pradesh, la empresa no sólo es acusada de secar los pozos [19], sino también de vender refrescos con altos niveles de plomo, cadmio y cromo y de “ofrecer” sus residuos cargados de metales

Figura 7. El Mar de Aral (Asia Central) en 1964 (superior izquierda), en toda su extensión original. La superior derecha muestra lo que quedaba en 2006. Fuente: U.S. Geological Service y NASA. Pérdida en volumen entre los años 1985-99, extrapolado a los años 1960 y 2010 (inferior). La razón de esta desecación hay que buscarla en la extracción de agua de sus afluentes, Sir Daria y Amu Daria, para el regadío de campos de algodón, introducido por las autoridades soviéticas en los años 60 del pasado siglo. El desastre ecológico y humano es de tales proporciones que el caso ha adquirido gran resonancia mediática.

pesados como “fertilizante” a los agricultores. Los análisis de los refrescos de 25 plantas embotelladoras de refrescos revelaron contenidos de cócteles de tres a cinco pesticidas en todas las muestras. Por su parte, la empresa encausada se defendió denunciando una campaña de acoso a sus actividades por parte de “grupos con oscuras motivaciones políticas”, que intentan desacreditarla con argumentos carentes de base científica.

Estas observaciones no pretenden unirse a la campaña de “acoso” de la empresa aludida, sino poner de manifiesto que, al igual que en otros muchos lugares del mundo, la gestión de las aguas subterráneas es uno de los grandes retos de la India del siglo XXI. En los últimos 50 años las aguas subterráneas han significado un gran paso en la seguridad alimentaria de la India, y en la actualidad 70-80% de la agricultura depende de ellas. Asimismo, es una fuente importante de agua para consumo doméstico, sobre todo en zonas rurales, asegurando el 80% de un recurso que, en general, es más limpio y fiable en época de sequía que su contrapartida de superficie – por otro

lado, altamente contaminada [20]. El rápido acceso sin restricciones al agua subterránea ha sido un factor clave para reducir la pobreza [21]. En contrapartida, ha creado una situación de uso indiscriminado por parte de los propietarios de los pozos, tratando cada cual de maximizar la extracción en detrimento de los demás. Según el Central Groundwater Board of India [22] la sobreexplotación ligada a la bonanza está provocando niveles preocupantes de desecamiento, salinización y contaminación [23] de pozos. La Figura 8 señala la situación crítica alcanzada en el sur del Decán, en Rajastán y Punjab, granero de la India, que suma este problema a los derivados de los grandes planes de intensificación del regadío llevados a cabo durante todo el siglo XX [24].

El caso de la India es un botón de muestra de la envergadura del problema a nivel mundial. Aunque la explotación de aguas subterráneas se remonta a la más vieja antigüedad, ha sido el uso masivo de combustibles fósiles y de tecnología de extracción la que ha permitido la extracción de agua de forma industrial. Si bien los acuíferos totalizan el 30% de las reservas de agua dulce del planeta (frente a menos del 1% que supone el conjunto de aguas superficiales), la gran parte de estas reservas es inalcanzable o demasiado costosa de extraer

con la tecnología actual. Aún así, si bien el agua subterránea accesible puede considerarse como abundante y relativamente bien repartida, el principal problema radica en que la extracción masiva – para regadío, esencialmente – se produce en lugares en los cuales escasea el agua superficial y la energía es barata. La contrapartida la constituye el carácter fósil [25] de las reservas en esos lugares, con una tasa de renovación prácticamente nula. Las grandes praderas del Medio-Oeste americano, Arabia Saudí y Libia ofrecen tres ejemplos que reúnen estas condiciones.

El acuífero de Ogallala discurre [26] a través de ocho estados de la Unión, desde Texas hasta Dakota del Sur, cubriendo una superficie de 450.000 km² con un volumen potencial de agua evaluado en unos 3.500 km³ (Figura 9). Aunque Ogallala es un acuífero no confinado, recargado por agua de lluvia y del deshielo de las Rocosas, el clima semiárido minimiza mucho la tasa de renovación y de allí su caracterización como fósil. Más de 150.000 bombas drenan el acuífero, proporcionando 30% del agua de regadío de los EE.UU, y grano y agua para el 40% del ganado norteamericano. Ogallala ha permitido, sin duda, poner al Medio-Oeste americano a salvo de las consecuencias de una sequía prolongada, como la que llevó al Dust Bowl de los años

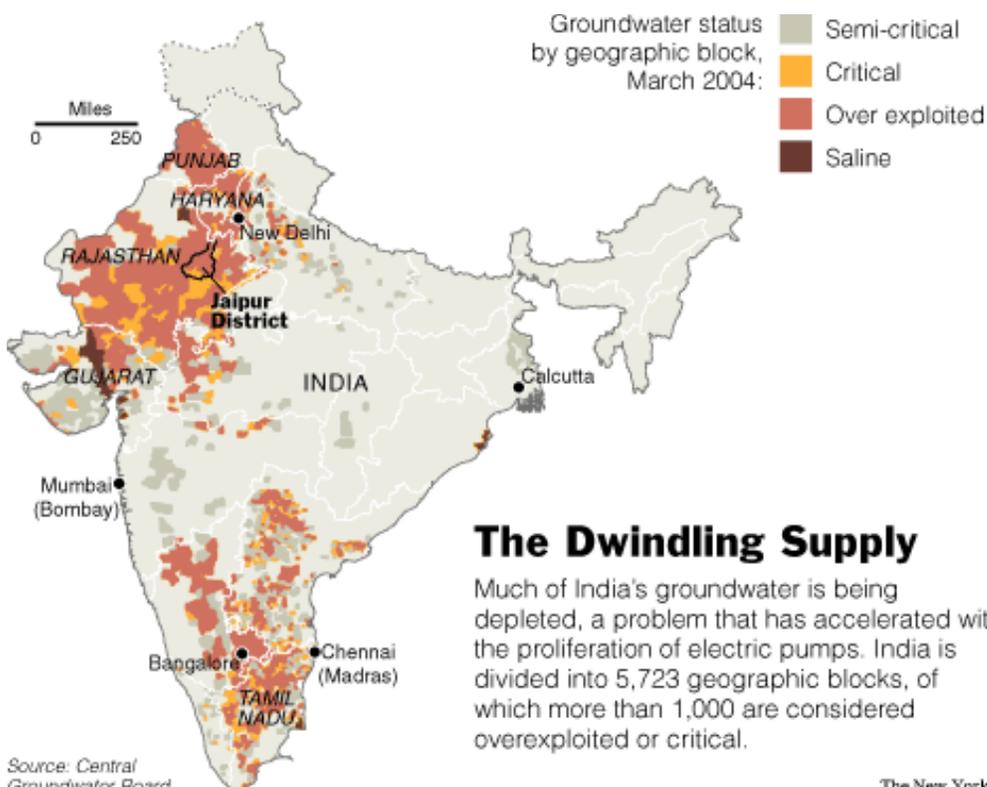


Figura 8. Mapa publicado en la edición del 30 de septiembre de 2006 del New York Times. Muestra las zonas en las que la sobreexplotación de los recursos subterráneos ha llevado a la carestía. La India superficie del país está dividida en 5.732 cuadrículas. En el Punjab, por ejemplo, 79 por ciento de las cuadrículas están en estado crítico o sobreexplotado, mientras que los estados de Haryana y Tamil Nadu exhiben cifras del 59% y 46%, respectivamente. Fuente: New York Times.

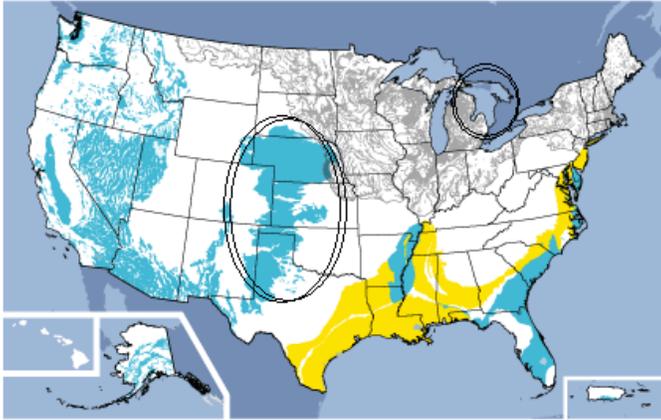


Figura 9. Grandes acuíferos de los EE.UU. El acuífero de Ogallala, en el Medio Oeste norteamericano y al que se refiere el texto, está enmarcado dentro de una elipse.

treinta del pasado siglo, e incluso hacer más de un granjero millonario. Evidentemente, en estas condiciones no es difícil adivinar el destino que, tarde o temprano [27], aguarda al acuífero. Desde que empezó la extracción en los años cuarenta del pasado siglo casi la mitad del acuífero ha desaparecido. Lo que llevo milenios en cargarse puede durar sólo unas pocas decenas de años. En palabras de John Opie, autoridad en el estudio del acuífero: "...pumping the Ogallala is a one-time experiment" [28].

Se conoce como período húmedo africano, o Sahara verde, el período comprendido entre 15.000-5.000 años atrás, durante el cual un aumento de la insolación solar provocó un calentamiento del hemisferio norte y una subida del monzón africano hacia latitudes más altas [29]. El clima de gran parte del actual Sahara se humedeció y transformó el desierto en una sabana [30]. Grandes lagos, como el Megachad y el Megafezzan cubrían África entre los 15°N y los 35°N (Figura 10), con una población de cazadores y pastores [31] de avanzado desarrollo [32]. El Sahara verde es el último de una serie de episodios húmedos durante los cuales las precipitaciones han alimentado un conjunto de inmensos acuíferos, descubiertos por primera vez por ingenieros italianos en busca de petróleo con el que alimentar los sueños de grandeza de Benito Mussolini.

Años más tarde, con la subida al poder en Libia de Muanmar El-Gadafi, los libios decidieron llevar mediante costosas infraestructuras el agua de los acuíferos del sur del país a las poblaciones de la sedienta costa, construyendo lo que se ha venido en llamar The Great Man-made River [33]. La Figura 11 mues-

tra las dimensiones de la obra. En particular, el denominado Arenisca Nubia (Nubian Sandstone o NSAS), que libia comparte con Chad, Egipto, y Sudán (Figura 12), es considerado como el mayor acuífero fósil conocido, con unas reservas estimadas de 150.000 km³ de agua. Para satisfacer aspiraciones de desiertos reverdecidos, Libia y Egipto (Figura 13) están extrayendo una importante de agua del NSAS (estimadas en 2 km³/año); cantidad que se espera doblar en un período de 50 años.

La pregunta es ahora saber si el NSAS podrá soportar la demanda futura y por cuánto tiempo lo hará. Lamentablemente, aunque las reservas estimadas parecen enormes, la respuesta a estas preguntas está lejos de ser clara. Poco se sabe sobre la distribución del agua en el acuífero. En consecuencia, existe el gran interrogante de saber si la tecnología y los costes de extracción podrán satisfacer una demanda sostenida.

Como en el caso de otros muchos acuíferos, hay un gran desconocimiento sobre cómo el NSAS funciona como un sistema. Se conocen todavía menos las relaciones entre los distintos factores de la ecuación del NSAS: agua, crecimiento de la población, uso de tierras marginales, degradación y desertificación, destrucción de ecosistemas y cambio climático. Mientras tanto, algunos signos de sobreexplotación se hacen ya sentir [34]. En el Oasis de Kufra, en el sureste de Libia, la extracción de agua para el Gran Río Artificial ha bajado el nivel freático y provocado el desecamiento de lagos conectados al Oasis. En el de Kharga (Egipto), los niveles de agua han bajado 60 m desde

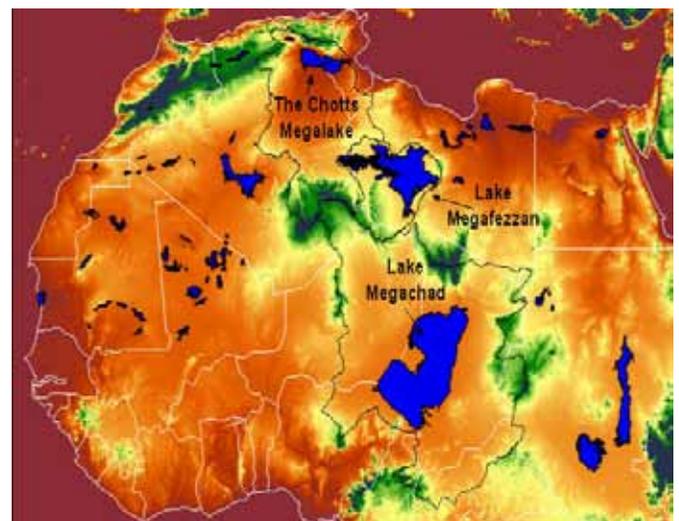


Figura 10. Reconstrucción aproximada de los grandes lagos existentes en el Sahara durante el último período húmedo, o Sahara verde (15.000–5.000 años atrás, aproximadamente). Destacan el Megachad y el Megafezzan.

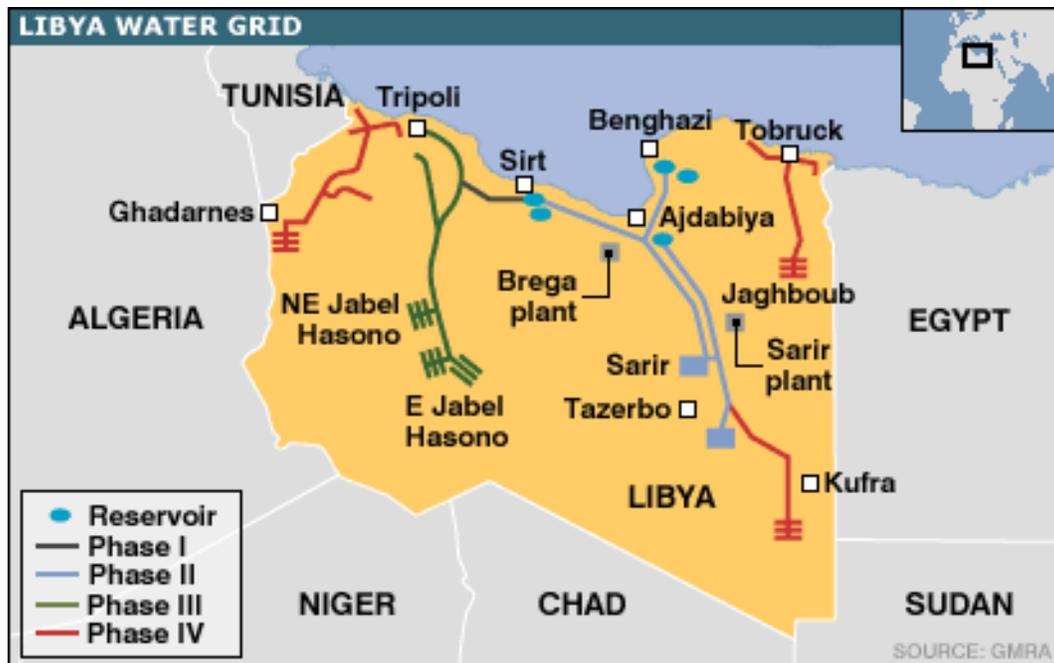


Figura 11. Red de suministro de agua, extraída de los acuíferos saharianos, para las poblaciones de la costa libia, también conocida como la Great Man-made River. Fuente: BBC NEWS.

<http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/4814988.stm>



Figura 12. Extensión del acuífero NSAS (Véase texto). Fuente: UNEP.

1960. En el vecino Chad se han registrado pérdidas de zonas húmedas ligadas al NSAS.

El problema de la contaminación de las aguas subterráneas se suma al de su insostenible extracción. Los pozos envenenados o contaminados, muchas veces intencionadamente, han formado parte de la historia, pero las dimensiones del problema no han sobrepasado límites circunstanciales. Sin embargo, en el año 2003, la Organización Mundial de la Salud alertó sobre la amplitud que cobraba la contaminación por arsénico (elemento altamente tóxico) de los pozos en Bengala y Bangladesh, calificándolo del mayor envenenamiento de la historia, ya que el número de personas directamente amenazadas se estimaba entre los 30 y 80 millones, con un riesgo potencial de extensión a dos tercios de la población del Golfo de Bengala. El problema, sin embargo, no se circunscribe al subcontinente indio. El oeste de los Estados Unidos, Australia, Argentina, Brasil y otros muchos, completan la lista de países afectados por la contaminación de aguas subterráneas por arsénico [35].

Aparentemente, esta contaminación es de origen natural. El arsénico es un elemento presente en rocas y no resulta sorprendente que un proceso de disolución de éstas lo lleve a into-

xicar el agua. La cuestión es saber por qué, en muchos casos, como en Bangladesh, está presente en las altas concentraciones. Un elemento clave es la presencia de bacterias anaerobias, reductoras de metales [36] en los ambientes con máxima movilización de arsénico derivado de sedimentos, lo cual las liga a la liberación de éste. Lo importante, es la causa indirecta de esta contaminación, una vez más ligada a las ocupaciones humanas. El mecanismo involucra un estímulo de la actividad reductora de estas bacterias derivada de un enriquecimiento de los sedimentos con carbón orgánico, ligado, a su vez, a la extracción de agua para irrigación [37].



Figura 13. Sistema de riego por aspersión con pivote central en el Desierto Líbico. La gran evaporación, debida a las altísimas temperaturas de la zona, hace que este procedimiento constituya un auténtico derroche de agua.

EPÍLOGO A MODO DE CONSEJO

Tanto la disponibilidad y uso del agua dulce como la conservación de los recursos acuáticos, son clave para el bienestar de la humanidad. El siglo XX ha presenciado una obra de “fontanería” a escala global que ha permitido mejorar sustancialmente las condiciones de vida de una gran parte de la población mundial. Como contrapunto a estos éxitos en la producción de alimentos y energía, y en la mejora de la higiene, la humanidad se enfrenta a un balance preocupante. Lamentablemente, los recursos –superficiales y subterráneos– y los ecosistemas que los mantienen están siendo hipotecados por el impacto del crecimiento de la población mundial y del consumo irresponsable. La tendencia actual, agravada por las consecuencias

negativas del cambio climático, apunta a una crisis en un plazo relativamente corto, que colocará a gran parte de la población mundial en un estado de estrés hídrico, y a otra parte sustancial en regímenes de escasez absoluta de agua. A pesar de ello, se subestima en nuestra sociedad el problema del agua, entendiendo, especialmente en nuestras sociedades opulentas, que es un recurso enteramente renovable y, por lo tanto, de libre disposición.

El derroche en la agricultura, el principal sector de consumo de agua, con un 70% del total, es un asunto a abordar prioritariamente, especialmente en entornos geográficos susceptibles al estrés hídrico. Es necesario acometer programas de abandono de técnicas de regadío por inundación o aspersión, e impulsar el uso de alternativas menos derrochadoras de agua. Es imprescindible también revisar las políticas de subsidio agrícola indiscriminado, ligadas hoy en día a la producción – lo que estimula el uso ineficiente del agua, su contaminación y la degradación de los ecosistemas – y sustituirlas por actuaciones de financiación de inversión tecnológica en sistemas de riego eficientes, en mejoras de las redes de distribución y el reciclado y reutilización de aguas. Por último, deben revisarse las políticas de extensión de muchos cultivos comerciales o industriales – cash crops – de alto consumo de recursos de todo tipo. Cultivar maíz para biocombustibles, por ejemplo, en las orillas del lago Chad, en África, mientras éste se deseca a una velocidad alarmante, o en el norte de China, un área con alto nivel de estrés hídrico, son estrategias totalmente suicidas [38].

Otras actuaciones más globales que pueden ayudar a mitigar en parte el impacto de la de un recurso ya escaso están ya operativas. La gestión integrada del agua, incluyendo acuíferos y ecosistemas ribereños, es una respuesta clave a la escasez de agua. Los llamados mercados de cuenca hidrográfica constituyen uno de tantos mecanismos para regular la calidad de las aguas. Un ejemplo, lo proporcionan los granjeros del Valle del Cauca, en Colombia, a través del cual las asociaciones de agricultores pagan a los propietarios de tierras aguas arriba para que protejan el entorno de las fuentes de los ríos y así controlar las cargas de sedimentos. Esta iniciativa está ampliamente extendida por África, las Américas y Asia [39], demostrando que agricultura y ecosistemas saludables son perfectamente compatibles. En este sentido, el gran desafío global radica en mejorar la productividad de agua y tierras para la producción de alimentos, preservando los servicios que proporcionan los ecosistemas y mitigando el impacto ambiental. La Cumbre Mundial

sobre Desarrollo Sostenible, que tuvo lugar en Johannesburgo, en 2002, insistió en esa línea, recomendando a todos los países el desarrollo de una gestión integrada de los recursos hídricos, conocida por las siglas IWRM – Integrated Water Resources Management [40]. Es difícil llevar a la práctica esta recomendación, básicamente debido a la falta de experiencia y las barreras existentes, a nivel institucional, político y científico. No obstante, ya son muchos los países que están implementando estrategias para cumplimentar este objetivo.

La degradación de la calidad del agua debido a las actividades humanas daña la salud de la población y la de los ecosistemas. El problema más generalizado es la alta concentración de nutrientes (nitrógeno y fósforo, principalmente), resultantes, en su mayor parte, de las actividades agrícolas, y cuyo efecto inmediato es la eutrofización de ríos, lagos y aguas costeras [41]. Las consecuencias son: la degradación del correspondiente ecosistema, de la calidad de las aguas y su impacto en la salud humana. La agricultura también es la gran responsable de la contaminación de las aguas de uso doméstico por pesticidas, aunque esta no es la única que tenga un origen químico. A las producidas por metales pesados, causantes de un incremento sustancial de las enfermedades crónicas, se ha sumado recientemente la de origen farmacéutico, cuyo origen se encuentra en los vertidos domésticos incontrolados, y que engloban productos potencialmente peligrosos para la salud. Es evidente que esta bomba de relojería latente debe ser desactivada con medidas de tratamiento eficaz de aguas, de restauración y con campañas de culturización y concienciación ciudadana.

Los problemas del agua son muy diversos, al igual que lo han de ser las distintas propuestas que han de confluír en solucionarlos. Existe un denominador común a todas ellas, y es la necesidad de contar, ciertamente, con aproximaciones reguladoras. Sin embargo, frente a la actitud reguladora tradicional –top-down–, carente de flexibilidad y poco adaptable, los nuevos mecanismos que reclaman estos desafíos deben ser altamente participativos y basados en acuerdos voluntarios –bottom-up–. Esta nueva actitud pasa necesariamente por una nueva cultura pública del agua, tanto a nivel individual como de instituciones, nacionales e internacionales.

REFERENCIAS

1. Shiklomanov, I.A. and Rodda, J.C.: *World Water Resources at the Beginning of the 21st Century*. Cambridge University Press, Cambridge, 2003.
2. Según estimaciones del World Resources Institute (WRI), el 41% de la población mundial – unos 2.300 millones de personas – viven en cuencas hidrográficas calificables de estresadas hídricamente, lo que se traduce en un abastecimiento de menos de 1.700 m³ por persona y año.
3. Naiman, R.J., Magnuson, J.J., McKnight, D.M., Stanford, J.A., eds.: *The freshwater imperative: A research agenda*. Island Press, Washington, DC, 1995.
4. Gleick, P.H.: Water in crisis: paths to sustainable water use. *Ecol. Applications*, **8**, 571-579 (1998).
5. Herodoto, pese a ser reconocido como singularmente proclive a la exageración, no lo hace en este caso.
6. Podemos estar agradecidos al anónimo “asesor” que disuadió a Mohamed Ali de utilizar las Pirámides de Giza como cantera para sus represas, tal como era su intención.
7. En la práctica los sedimentos empujan a la baja esta cifra.
8. Los canales con aguas estancadas sirven de sumidero de aguas residuales, sobre todo en el campo. Más de 40 millones de personas no tienen acceso a un tratamiento de estas aguas.
9. El algodón, especialmente, necesita de un uso intensivo de fertilizantes y pesticidas. Los análisis en el Nilo y su acuífero revelan altas concentraciones de nitratos, NO₃⁻ (20–340 mg/L) y fosfatos, PO₄³⁻ (7–34 mg/L), cuando los valores permitidos son 45 mg/L y 0,25–3,50 mg/L, respectivamente (Ezzat *et al.*, 2002. Survey of Nile River Pollution Sources. Water Policy Program Report No. 64).
10. La población aumenta al ritmo de un millón y medio al año.
11. Apenas un 10% del flujo del Nilo llega al mar.
12. El Banco Mundial y otras instituciones internacionales cifran en 1.000m³/hab./año el umbral de supervivencia y bien pronto los dos países más poblados de la cuenca (Egipto y Etiopía) ni siquiera alcanzarán ese mínimo absoluto.
13. En virtud de aquel acuerdo entre Egipto y Sudán, y del que fueron excluidos los otros países ribereños, el primero se reservaba el 82% del agua del Nilo y Sudán el 18%. Los otros países no se sienten vinculados por dicho acuerdo y han declarado su intención de tomar las decisiones que más les beneficien.
14. Hay más de 45.000 grandes presas en 140 países, con una capacidad de embalse de 8.400 km³, dos tercios de ellas en países en desarrollo, sobre todo China. Para hacerse una idea de lo que este volumen embalsado significa puede compararse a la capacidad de 1 km³ que tiene el

- conjunto de embalses que alimentan Madrid. Aún cuando los países desarrollados están poniendo fuera de servicio muchas presas, la construcción de grandes presas crece a gran ritmo en países en desarrollo, a veces en lugares hidrográficamente desaconsejables. Un caso claro es el de la Gran Presa de Asuán, de la que hablaremos más tarde. En EE.UU., por ejemplo, la construcción de grandes presas cesó en 1998 y las demolidas o en proyecto de demolición totalizan unas 500. China, por el contrario, tiene planificadas 46 grandes presas en la sola cuenca del Yangtsé (WWF 2007).
15. Nisson, C., Reidy, C.A., Dynesius, M., Revenga, C.: Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. *Science*, **308**, 305-308 (2005); Ashton, P., ed.: *State-and-Trends of the Environment: 1987-2007* (Chap. 4: Water), United Nations Environmental Program, 2007.
 16. Cualquiera que consulte un atlas geográfico podrá observar al este del Mar Caspio una considerable extensión de agua llamada Mar de Aral, ahora ya inexistente. Era un mar interior de poca profundidad, alimentado por dos ríos de gran importancia histórica: el Oxus y el Iaxarte (Amu Darya y Sir Darya, respectivamente). Los soviéticos decidieron en los años sesenta del pasado siglo convertirse en autosuficientes en algodón, colonizando para ello las estepas que cruzan estos dos ríos, con un ambicioso plan de regadío por aspersión que deja al Mar de Aral sin la fuente de agua que compensa la fuerte evaporación. El resultado es la conversión de 36.000 km² del lecho del mar en el llamado desierto de Aralkum. La pesca ha desaparecido y el polvo y las enfermedades han degradado las condiciones de vida de los ribereños.
 17. Poblaciones deltaicas en el Nilo o Bangla Desh ven seriamente comprometido el futuro de su territorio.
 18. Ashton, P., ed.: *State-and-Trends of the Environment: 1987-2007* (Chap. 4: Water), United Nations Environmental Program, 2007.
 19. La población local debía recorrer varios kilómetros para ir a buscar un agua potable mientras que una noria de camiones cargados de refrescos salía de las embotelladoras.
 20. La suciedad y contaminación del Ganges, por ejemplo, son legendarias. Millones de hindúes limpian en él sus pecados y otras muchas cosas.
 21. Se calcula que hay unos 19 millones de pozos.
 22. Central Groundwater Board of India. *Dynamic Groundwater Resources of India*, 2006. Report. <http://cgwb.gov.in/documents/DGWR2004.pdf>
 23. La contaminación de los acuíferos en la India merecería un informe exclusivo, tal es la amplitud del fenómeno. Las fuentes son muchas y dispersas, aunque no excluye las localizadas, como el caso de la empresa de tintes Suruchi, en Uttar Pradesh, que inyectaba sus residuos en el subsuelo con una tubería de 60 m.
 24. McNeill, J.R. *Something New Under the Sun: An Environmental History of the Twentieth-Century World*. W.W. Norton & Company, New York, 2001.
 25. El adjetivo fósil se aplica en el caso de aguas que han permanecido en el acuífero miles de años.
 26. El acuífero es en realidad un río subterráneo que se desplaza a una velocidad de unos pocos centímetros al día.
 27. "Tarde", si triunfan las medidas conservacionistas; "temprano", la zona sufre sequías prolongadas.
 28. Opie, J. *Ogallala: Water for a Dryland* (2nd edition). University of Nebraska Press, 2000.
 29. deMenocal, P., Ortiz, J., Guilderson, T., Adkins, J., Sarnthein, M., Baker, L., Yarusinsky, M.. Abrupt onset and termination of the African Humid Period: rapid climate responses to gradual insolation forcing. *Quaternary Science Rev.*, **19**, 347-361 (2000); Renssen, H., Brovkin, V., Fichefet, T., Goosse, H.. Simulation of the Holocene climate evolution in Northern Africa: The termination of the African Humid Period. *Quaternary International*, **150**, 95-102 (2006).
 30. Liu, Z., Wang, Y., Gallimore, R., Gasse, F., Johnson, T., deMenocal, P., Adkins, J., Notaro, M., Prentice, I.C., Kutzbach, J., Jacob, R., Behling, P., Wang, L. Ong, E.. Simulating the transient evolution and abrupt change of Northern Africa atmosphere-ocean-terrestrial ecosystem in the Holocene. *Quaternary Science Rev.*, **26**, 1818-1837 (2007).
 31. National Geographic España (septiembre, 2008). Las tribus perdidas del Sahara verde.
 32. Hoelzmann, P., Keding, B., Berke, H., Kröpelin, S., Kruse, H.J.. Environmental change and archaeology: lake evolution and human occupation in the Eastern Sahara during the Holocene. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, **169**, 193-217 (2000).
 33. El Gran Río Artificial. Una vez terminada, tendrá una capacidad de extracción de unos 6 km³/año.

34. IAEA: International Atomic Energy Agency. Nubian Aquifer Project (2008). http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/Nubian/IHS_nubian.html
35. Una buena introducción al tema puede obtenerse en la página web http://www.physics.harvard.edu/~wilson/arsenic/arsenic_project_introduction.html
36. Estas bacterias “respiran” metales en lugar de oxígeno, como nosotros. Dicho con mayor rigor: reducen metales en lugar de oxígeno.
37. Islam, F.S., Gault, A.G., Boothman, C. Polya, D.A., Charnock, J.M., Chatterjee, D., Lloyd, J.R.: Role of metal-reducing bacteria in arsenic release from Bengal delta sediments. *Nature*, **430**, 68-71 (2004).
38. Entre las razones que llevan al gobierno chino a acometer las grandes infraestructuras hidráulicas sobre el Yang Tsé-kiang, como la presa de las Tres Gargantas, está la de extraer agua de su cuenca para llevarla al sediento norte de China. Resulta difícil de entender cómo se fomentan allí cultivos e industrias de gran consumo de agua, hasta el punto de dejar al mítico Huang Ho es el estado de un ridículo hilito de agua en gran parte de su bajo curso, al precio de tener que trastornar completamente la cuenca del Yang Tsé, cuyo flujo no está garantizado en años venideros.
39. Véase <http://www.watershedmarkets.org>
40. Véase <http://www.iwrm.org>

Víctor Fairén Le Lay

Decano, Facultad de Ciencias