

AGUA

CARLOS GARCÍA ACÓN
ÁNGEL SIMÓN GRIMALDOS
PEDRO TORRES
FRANC CORTADA HINDERSIN
IGNACIO GONZÁLEZ-CASTELAO
MONTSERRAT TERMES RIFÉ
JUDIT MONTORIOL GARRIGA
RUBÉN RUIZ ARRIAZU
XAVIER SANCHEZ-VILA
DANIEL FERNÀNDEZ-GARCIA
DESIRÉE MARÍN
CLAUDIA SEGURA CAMPINS
BLANCA DE LA TORRE
SONIA FREIRE TRIGO
MARC GARCÍA-DURÁN HUET
CARLOS MONTERO RUANO
EDUARDO ROJO MARTÍNEZ
ENRIQUE CATALINA CARMONA
PABLO ALCALDE CASTRO
JUAN PABLO PACHECO BEJARANO
IMMA ESTRADA PALACIOS



FUNDACION
ESTEYCO

Para la difusión y el progreso de la Ingeniería y la Arquitectura



FUNDACION
ESTEYCO



En mayo de 1991 se constituyó la Fundación Esteyco
con la finalidad de contribuir al progreso
de la ingeniería y de la arquitectura en nuestro país.
La situación de precariedad e incertidumbre
en que se ha estado desarrollando la ingeniería española independiente
ha exigido hasta ahora actitudes básicamente de supervivencia.
El esfuerzo de un creciente colectivo de profesionales
y de órganos de la Administración
ha ido, sin embargo, consolidando un sector cuyos servicios
son considerados indispensables en una sociedad moderna y eficiente.
Es tiempo de pensar en el futuro,
confiando en que no tardará en hacerse presente.
Fomentemos, para ello, un clima propicio para la creatividad,
en el que se exija y se valore el trabajo bien hecho.
Contribuyamos a una sólida formación de los profesionales de la ingeniería,
conscientes de que las organizaciones valen lo que valen sus miembros
y de que en la ingeniería el valor de las personas
se mide por el nivel de sus conocimientos.
Alentemos mejores y más frecuentes colaboraciones interprofesionales,
eliminando fronteras innecesarias.
Reivindiquemos un espacio cualitativamente destacado
de la ingeniería en la sociedad
e impulsemos la evolución de la imperante cultura del «hacer»
hacia la cultura del «hacer pensando».
Consideremos las ingenierías como una prolongación de la Universidad,
en la que se consolida la formación de los jóvenes titulados
en los años que serán decisivos para su futuro.
Sintámonos involucrados con la universidad y con los centros de investigación.
Aseguremos la estabilidad y la pervivencia de nuestras organizaciones
y establezcamos los medios para que su vitalidad, garantía de futuro,
no se encuentre lastrada.
Valoremos nuestra independencia, no como un arma contra nadie,
sino fundamentalmente como un atributo intelectual
inherente a quienes tienen por oficio pensar,
informar y decidir libremente.

JAVIER RUI-WAMBA MARTIJA
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Presidente de la Fundación ESTEYCO

© 2024 Fundación Esteyco

© 2024 Carlos García Acón, Ángel Simón Grimaldos, Pedro Torres, Franc Cortada Hindersin, Ignacio González-Castelao, Montserrat Termes Rifé, Judit Montoriol Garriga, Rubén Ruiz Arriazu, Xavier Sanchez-Vila, Daniel Fernández-García, Desirée Marín, Claudia Segura Campins, Blanca De La Torre, Sonia Freire Trigo, Marc García-Durán Huet, Carlos Montero Ruano, Eduardo Rojo Martínez, Enrique Catalina Carmona, Pablo Alcalde Castro, Juan Pablo Pacheco Bejarano, Imma Estrada Palacios

Imagen de la cubierta: *Oil painting*, de © Emma May Riley (www.emmamayriley.com)

Coordinación editorial: Andreu Estany y Imma Estrada

Gestión editorial: Laura March

Edición y fotocomposición: Mariló Caballer

ISBN: 978-84-09-66545-7

Depósito legal: M-25143-2024

Impresión: qpprint

Primera edición: noviembre, 2024

Fundación Esteyco

Avenida de Burgos, 12B, Bajo, 28036, Madrid

PROHIBIDA SU VENTA

AGUA

CARLOS GARCÍA ACÓN
ÁNGEL SIMÓN GRIMALDOS
PEDRO TORRES
FRANC CORTADA HINDERSIN
IGNACIO GONZÁLEZ-CASTELAO
MONTSERRAT TERMES RIFÉ
JUDIT MONTORIOL GARRIGA
RUBÉN RUIZ ARRIAZU
XAVIER SANCHEZ-VILA
DANIEL FERNÁNDEZ-GARCIA
DESIRÉE MARÍN
CLAUDIA SEGURA CAMPINS
BLANCA DE LA TORRE
SONIA FREIRE TRIGO
MARC GARCÍA-DURÁN HUET
CARLOS MONTERO RUANO
EDUARDO ROJO MARTÍNEZ
ENRIQUE CATALINA CARMONA
PABLO ALCALDE CASTRO
JUAN PABLO PACHECO BEJARANO
IMMA ESTRADA PALACIOS

	● PRESENTACIÓN	
	Carlos García Acón	1
	● EDITORIAL	
	Ángel Simón Grimaldos	5
UNO	«AGUA...»	
	Pedro Torres	9
DOS	EL AGUA ES VIDA	
	Franc Cortada Hindersin	15
TRES	LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO: AGUA E INGENIERÍA	
	Ignacio González-Castelao Martínez-Peñuela	41
CUATRO	EL AGUA: UN RECURSO VALIOSO MÁS ALLÁ DE SU PRECIO	
	Montserrat Termes Rifé	67
CINCO	EL USO DEL AGUA EN AGRICULTURA: AVANZANDO EN LA MOMODERNIZACIÓN DEL REGADÍO Y LA GESTIÓN EFICIENTE DEL AGUA	
	Judit Montoriol Garriga	87
SEIS	EL NUEVO CICLO DEL AGUA: EFICIENCIA, DESALACIÓN, REGENERACIÓN	
	Rubén Ruiz Arriazu	101
SIETE	LA IMPORTANCIA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA GESTIÓN MODERNA INTEGRADA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS	
	Daniel Fernández-García y Xavier Sanchez-Vila	111
OCHO	LA HUELLA HÍDRICA Y LA GESTIÓN SOSTENIBLE DEL AGUA EN EL TEJIDO EMPRESARIAL	
	Desirée Marín	131
NUEVE	ALGUNAS OBRAS SOBRE LA CONDICIÓN, LAS PROBLEMÁTICAS Y LAS POSIBILIDADES DEL AGUA EN LA COLECCIÓN DEL MACBA	
	Claudia Segura Campins	143

ÍNDICE

DIEZ	ESCUCHAR EL AGUA. MEDITACIONES HÍDRICAS Y OTRAS ACUATOPÍAS Blanca de la Torre	153
ONCE	CIUDADES DE AGUA Sonia Freire Trigo	177
DOCE	JARDINES SUBMARINOS: APRENDER A TERRAFORMAR Marc García-Durán Huet	191
TRECE	LA INNOVACIÓN Y EL SECTOR DEL AGUA Carlos Montero Ruano	233
CATORCE	AGUA Y ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA: CENTRALES HIDROELÉCTRICAS REVERSIBLES. EL CASO DE IBERDROLA Eduardo Rojo Martínez	251
QUINCE	DESCARBONIZACIÓN EN EL SECTOR DEL AGUA: OBLIGACIÓN vs OPORTUNIDAD Enrique Catalina Carmona	269
DIECISÉIS	AGUA: JUSTICIA POR UN TUBO Pablo Alcalde Castro	281
DIECISIETE	TELEPATÍA HÚMEDA Juan Pablo Pacheco Bejarano	303
DIECIOCHO	EPÍLOGO. AGUA Y EMOCIÓN Imma Estrada Palacios	315
	9 ANEXO	322
	9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	328
	6 AUTORES	339





PRESENTACIÓN

Carlos García Acón

Tenemos una profesión hermosa. Y, en ocasiones, severa.

Hermosa, porque tanto los ingenieros como los arquitectos somos capaces de mejorar la vida de las personas, con nuestros diseños y obras.

Severa, porque hay veces que estas obras no son suficientes para preservar y proteger nuestros ecosistemas. En estos días en los que todo el país está en shock tras las terribles inundaciones que han arrasado Valencia, los profesionales estamos obligados a tomar perspectiva y reflexionar sobre la influencia de nuestras obras en la sociedad. Una vez más, el agua, esencial para la vida, se ha convertido en una furia incontrolable de devastación y caos.

Cada vez con mayor frecuencia, desastres naturales relacionados con el agua dejan una profunda huella en sociedades y ecosistemas: inundaciones, tsunamis, huracanes y sequías forman parte de manera preocupante de nuestra cotidianidad a nivel global, y son solo algunas de las manifestaciones de cómo el agua puede transformar paisajes y vidas en un instante.

La iniciativa de este libro nace de una reflexión interna en el Patronato de la Fundación Esteyco en un momento de grave sequía en nuestro país, en el que la falta de agua ponía en riesgo nuestro estado de bienestar. En unos días lo mandaremos a imprenta, unos meses más tarde, viendo como el exceso de agua ha desbordado todos los intentos de controlarla, mostrando la vulnerabilidad humana frente a su fuerza y al cambio climático. Una paradoja que define muy bien al protagonista de nuestro libro.

El agua, elemento fundamental de la vida, es mucho más que un simple recurso; es el hilo conductor que une ecosistemas, culturas y civilizaciones a lo largo de la historia. Desde las antiguas culturas que florecieron a orillas de grandes ríos, hasta las sociedades contemporáneas que se enfrentan hoy a desafíos hídricos sin precedentes, el agua ha sido y es testigo y protagonista de la evolución humana.

Para aprender un poco más sobre el agua y despertar la curiosidad y reflexión del lector, hemos reunido un nutrido elenco de profesionales, además de amigos, que nos han

regalado unos textos que, individualmente, aportan conocimiento y profundidad desde diversos puntos de vista. Y que colectivamente nos dan una visión poliédrica sobre un elemento esencial, que no solo sostiene la vida, sino que también moldea nuestras sociedades y nuestro futuro.

La adaptación al cambio climático, el nuevo ciclo del agua, los acuíferos, los ríos, el mar; la justicia y el derecho sobre el agua; la agricultura, la economía y el tejido empresarial; las ciudades y la energía; hasta hemos dado espacio a una visión humanista del agua desde el arte contemporáneo. Como escribe Ángel Simón en su editorial, «este libro hace una aproximación desde la única forma en la que se puede abordar este tema, que es holística, desde la vertiente ambiental, biológica, técnica, artística, literaria, económica, innovadora y social».

Desde la Fundación Esteyco quiero expresar a los autores nuestro agradecimiento por la calidad de los textos y la calidez en la relación, un lujo y un acto de generosidad de todos ellos al compartir su saber con todos nosotros. Una muestra más de que tenemos un profesión agradecida, colaborativa y hermosa.

¿Qué nos hemos dejado? Seguro que algunos temas y puntos de vista interesantes, al ser el agua un concepto inabarcable.

En algún encuentro gastronómico con los autores se sugirió, por ejemplo, la relación entre el agua y las religiones. El agua aparece en todas ellas como símbolo de purificación y conexión con lo divino. En el cristianismo, a través del bautismo, como acto de iniciación y purificación espiritual. En el hinduismo, a través de las ceremonias de ablución, con el objetivo de limpieza, no solo física sino también espiritual. De hecho, los ríos sagrados, como el Ganges, son considerados también como fuentes de purificación y bienestar. En el islam, el wudu o ablución ritual, es un acto preparatorio antes de la oración, simbolizando la pureza y la conexión con Alá. Para los musulmanes el agua es vista como un don divino, esencial para la vida y la prosperidad. En el budismo, sin ser una religión, el agua es también símbolo de pureza, claridad y calma. Es un dador de vida. En algunas culturas indígenas el agua es venerada como un ser sagrado, una madre que nutre y sustenta. En resumen, en la mayoría de las religiones, filosofías o creencias, el agua se revela no solo como un elemento físico, sino como un símbolo de la espiritualidad humana que une a las personas en su búsqueda de significado y conexión con lo trascendental.

La propiedad del agua es otro tema que hubiéramos querido tratar. El concepto de *dueño* del agua es complejo y varía según contextos culturales, legales y políticos. No hay un propietario único del agua, ya que este recurso es considerado un bien común en muchas sociedades. En algunos países, el agua es gestionada como un recurso público, donde los gobiernos regulan su uso y distribución. En otros lugares, existen derechos privados que permiten a individuos o empresas extraer y utilizar el agua de fuentes específicas. Las leyes sobre el agua varían ampliamente. Hay países en los que el agua superficial y subterránea pertenece al Estado, que otorga permisos y licencias para su uso. Sin embargo, hay otros en los que comunidades locales tienen derechos tradicionales sobre cuerpos

de agua. La creciente demanda de agua, especialmente en áreas afectadas por el cambio climático, ha llevado a tensiones sobre su propiedad y uso, incrementando los conflictos por su control. En lo que va de siglo se han identificado más de mil conflictos por el agua en el mundo, y esta tendencia se está acelerando. Como decía anteriormente, en algunas tradiciones indígenas, el agua es vista como un bien sagrado que pertenece a todos y debe ser protegido y respetado, enfatizando la responsabilidad colectiva sobre su gestión. Pido disculpas de antemano por esta ligera aproximación de alguien no experto al complejo concepto de quién es el *dueño* del agua. Pero este somero análisis me ha invitado a reflexionar sobre la justicia, la sostenibilidad y la necesidad de una gestión equitativa de este recurso vital.

Me ha gustado mucho la aproximación desde el arte que ha coordinado Claudia Segura, con especial agradecimiento a la pieza que nos ha regalado Pedro Torres. Me sugiere otros puntos de vista que seguro tendrían su encaje en un libro poliédrico como este, como serían la relación con la música o la literatura. El agua ha sido una fuente de inspiración a lo largo de la historia, evocando una amplia gama de emociones y sensaciones. Desde el murmullo de un arroyo hasta el rugido del océano, los sonidos del agua han encontrado su lugar en composiciones que reflejan su belleza y poder. Existen infinitas y variadas inspiraciones, desde *La mer* de Charles Trenet a *La mer* de Debussy. O del *The river* de Bruce Springsteen al de Joni Mitchell. En la literatura, desde la antigüedad, poetas y narradores han utilizado el agua como metáfora de la vida, la purificación, el cambio y la muerte. Desde la frescura de una corriente hasta la inmensidad del océano, reflejando tanto el placer como la melancolía que puede evocar. Novelas como *El viejo y el mar* de Ernest Hemingway muestran la relación del hombre con el mar, mientras que *Cien años de soledad*, de Gabriel García Márquez, utiliza el agua como símbolo de la memoria y el destino. Estos relatos subrayan la dualidad del agua: como fuente de vida y, a veces, como agente de destrucción.

No quiero ni debo extenderme más. Dejo la palabra a los autores, verdaderos conocedores del protagonista de este libro. Creo que, si este libro consigue en nuestros lectores el mismo recibimiento que ha tenido en nuestro comité editorial, ya tenemos excusa para una segunda parte. Que lo disfruten.

CARLOS GARCÍA ACÓN
Patrono de la Fundación Esteyco y CEO de Esteyco



capta rectum in Ab. Co. allougha & C.



EDITORIAL

Ángel Simón Grimaldos

«El agua, humor vital de la terrestre máquina, se mueve mediante su calor natural. Es el vehículo de la naturaleza», apuntaba Leonardo Da Vinci, el genio del Renacimiento, que se aproximó al agua con una visión que hoy llamaríamos holística. Ingeniero, arquitecto, geómetra, pintor, inventor, dibujante excepcional, naturalista y filósofo. Diseñó máquinas hidráulicas, estudió los torbellinos en una corriente de agua y la empleó como elemento central del paisaje en algunos de sus cuadros. Ejerciendo su oficio de ingeniero militar, era un tema que le interesó sobremanera, al que se aproximó desde muchas de sus vertientes en sus códices.

El agua como vehículo de la naturaleza, como elemento transversal de vida en el medio ambiente, en las ciudades, en la sociedad, en los sectores económicos, en el presente y el futuro del planeta. Este abordaje holístico también se nos plantea en este libro de la Fundación Esteyco, con numerosos artículos de grandes profesionales que contribuyen a realzar el carácter esencial y omnipresente del agua.

Quiero agradecer a la Fundación que me permita dirigir a tantas personas que leerán este libro con especial interés para encontrar respuestas, a través del agua, a los retos a los que nos enfrentamos. Desde mi perspectiva personal, debo reconocer que me hace especial ilusión contribuir con esta editorial, porque el agua forma parte de mi trayectoria como ingeniero de caminos y mi dedicación durante más de tres décadas. Y me satisface comprobar cómo este libro hace una aproximación desde la única forma desde la que se puede abordar este tema, que es holística, desde la vertiente ambiental, biológica, técnica, artística, literaria, económica, innovadora, social... Y todo ello converge también en una exigencia de situar el agua en el lugar relevante que merece, en el centro de las políticas. Es necesario establecer una gobernanza para impulsar las infraestructuras hídricas y la transformación del ciclo del agua, mediante una colaboración público-privada encaminada a la preservación de los recursos y a afrontar los acuciantes retos climáticos.

«Son las aguas las que hacen ciudad», escribió Plinio el Viejo en su *Historia Naturalis*, mientras sus contemporáneos levantaban acueductos por todos los dominios de Roma.

Hoy también, para las urbes y para los territorios, el agua es un bien imprescindible que no tenemos asegurado, a pesar de que su acceso es un derecho y una necesidad para todo ser humano. Su gestión es también fundamental para la agricultura, la industria, la generación de energía y el impulso de la tecnología.

Con el concurso de la ingeniería y el conjunto de ciencias, debemos acelerar la transformación de los sectores hacia una economía circular para dar una nueva vida al agua. Esta transición ecológica del modelo de gestión del agua mediante la reutilización y regeneración del agua es un campo de actuación que nos permite, por un lado, reducir significativamente el consumo de recursos hídricos que son limitados y, por otro lado, recuperar espacios naturales en nuestro entorno.

Concretar soluciones que impulsen la transformación sostenible es imperativo para garantizar el suministro de agua, siendo España uno de los países europeos con mayor riesgo de sufrir estrés hídrico. Además, debemos disponer de capacidad de adaptación ante los fenómenos meteorológicos cada vez más frecuentes y extremos, trabajando al mismo tiempo para mitigar y reducir nuestra huella hídrica y de carbono.

Si la perspectiva medioambiental es primordial en este sentido, debemos situar también el centro de atención en el impacto positivo en las personas. Recordemos siempre las 4 «p» del agua: participación público-privada para las personas. En otras palabras, debemos fomentar una colaboración que permita un uso del agua más eficiente, innovador, más accesible y más respetuoso con el medio ambiente. Este libro nos muestra que tenemos la tecnología, el conocimiento y la capacidad de innovación necesaria para abordar un asunto tan central como el agua. Ahora faltaría focalizarnos en una necesidad más urgente, la gobernanza de este recurso, donde pueda darse la más amplia colaboración entre las administraciones públicas y la iniciativa privada. El objetivo es que cada agente —el regulador y la empresa— realice su parte con un compromiso firme con todos los grupos de relación.

La ingeniería de caminos aporta una mirada abierta, amplia y multidisciplinar, más allá de lo técnico, porque tiene una responsabilidad con la sociedad. Esta visión amplia también se vislumbra en los diferentes capítulos de este libro: cómo la ingeniería, la innovación y la transferencia de conocimiento contribuyen a la adaptación ante fenómenos climáticos extremos y permiten desarrollar nuevas soluciones ambientales; impulsar un nuevo ciclo del agua mediante la eficiencia, la modernización e inversión en infraestructuras, y la generación de nuevos recursos; la preservación de las aguas subterráneas y los ecosistemas en la gestión integrada de los recursos hídricos; la necesidad de invertir y generar alianzas para garantizar el acceso al agua y su uso sostenible; la importancia geoestratégica de este recurso y la seguridad hídrica; cómo contribuye este elemento a la descarbonización y a la transformación de sectores como el energético y el agrícola; todo ello, explicado con multitud de ejemplos ingenieriles, ambientales, históricos y económicos, entre otros.

La poetisa chilena Gabriela Mistral, en su *Elogio al agua*, manifestaba que «lo menos que el hombre puede hacer por la tierra es la distribución racional de las aguas, conducir el elemento maravilloso, en sabia red de canales. Toda cultura empieza por la tierra». Este libro nos demuestra que nuestra profesión y nuestra vocación van más allá de los canales, ya que «el agua de las ingenierías» que ella nombraba tiene hoy un impacto transversal en todos los sectores.

Tengamos siempre presente el impacto del agua en las personas, como vehículo de la naturaleza, como elemento imprescindible para la vida. Esta obra no solo aporta un conocimiento experto, sino que sirve como referencia para que todos los sectores y profesionales comprendan el valor fundamental del agua y cómo desde la ingeniería mejoramos la vida de las personas.

La magnífica labor de la Fundación Esteyco, con el propósito de contribuir al progreso de la ingeniería y de la arquitectura, se refleja en este libro, muy especialmente por la voluntad de un gran amigo, Javier Rui-Wamba. Su inmenso conocimiento, sus iniciativas y su capacidad por transmitir esta pasión por las ciencias han calado en diversas generaciones y seguirán llegando a futuras promociones. Gracias por este legado y por ser el inspirador de esta obra.

ÁNGEL SIMÓN GRIMALDOS
Consejero Delegado de Criteria Caixa

UNO

«AGUA...»

Pedro Torres

from water flows
transformation
of the fabric
of our skin
our breath
our eyes

forming a
fierce ball
of water
and light
passing through
air, where
invisible
argon atoms
flow from
anywhere

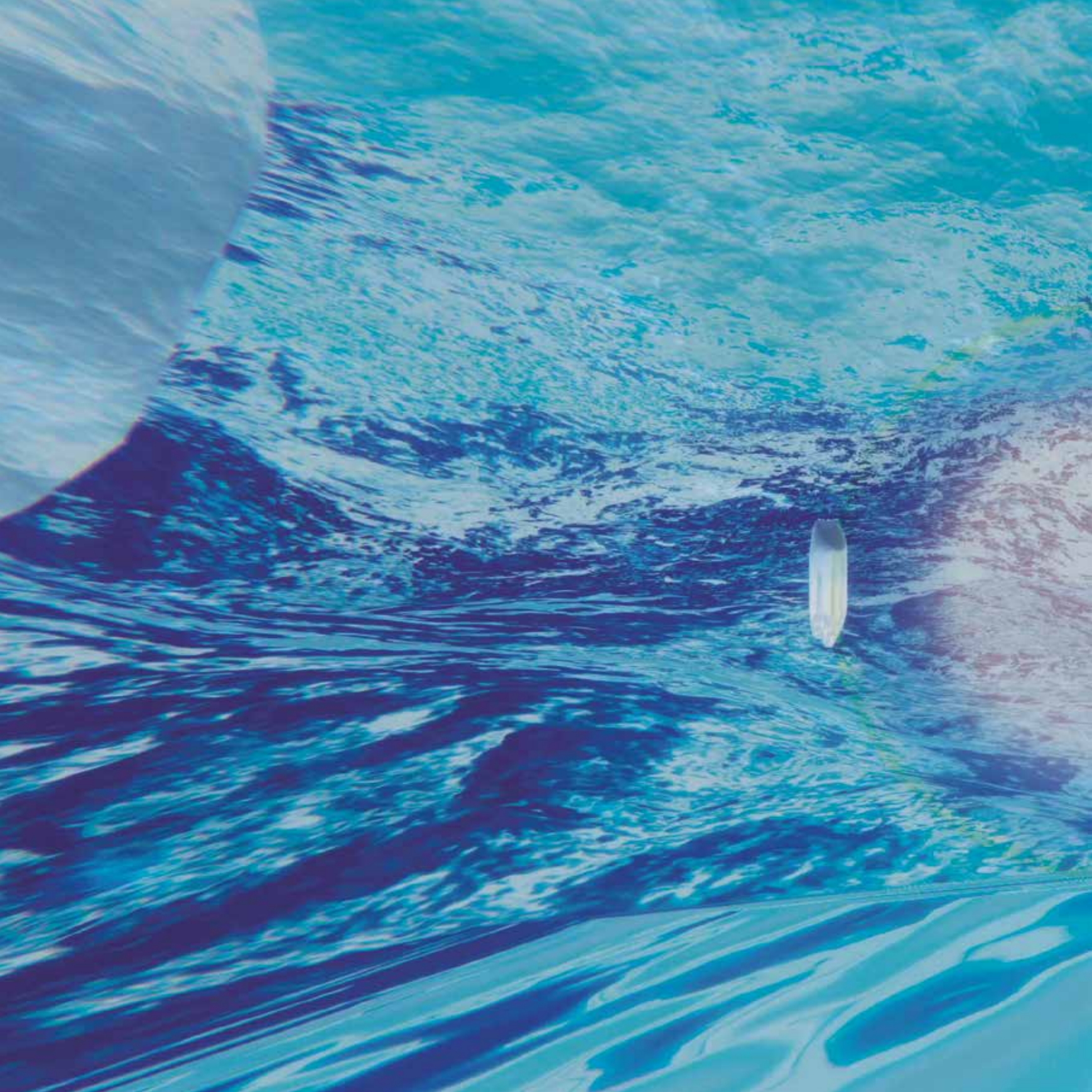
to you and
inside of you
and incite flows
of shared breaths
inflationary bursts
ever-evolving cycles
water and air

thickening as thoughts
lingering in our minds

observing
before us
behind our eyes
the melting paradox
of uncertainty

of where to
grasp reality
of air and water
oceans of
acid breaths
currents of
inverted drops

collapsing
our time
in case
it changes
or not
for us, by us,
for any of us
watching from
behind the glass









DOS

EL AGUA ES VIDA

Franc Cortada Hindersin

Oxfam Intermón, en colaboración con organizaciones locales, proporciona agua potable segura y sostenible a la población de Nepal mediante la construcción y la mejora de sistemas de abastecimiento de agua. Además, garantiza la sostenibilidad al integrar estos sistemas en el Comité de Gestión de Abastecimiento de Agua en zonas rurales. Urmila es presidenta del comité en la localidad de Maitar, con el que se han beneficiado 54 hogares. © Kishor Sharma/Oxfam.



Seinab yendo a la presa a por agua. Recibe ayuda del programa de transferencia de efectivo y distribución de artículos no alimentarios en Badana (Kenia) de Oxfam Intermón. © Loliwe Phiri/Oxfam.



Abdia, participante en el proyecto de agua de Barambale de Oxfam Intermón, en el condado de Isiolo, en Kenia, donde la ONG ha instalado un punto de agua en un depósito de 120 litros junto a la organización local MID-P. © Eyeris Communications/Oxfam.

Es immoral que, en pleno siglo XXI, en la era de los algoritmos, los viajes a Marte o la inteligencia artificial generativa, un gesto tan esencial y cotidiano como abrir un grifo y que salga agua limpia, sea todavía una quimera para más de 2.200 millones de personas en todo el mundo.

INTRODUCCIÓN

- *Una de cada cuatro personas en el mundo no tiene acceso seguro a agua potable.* Cada año, las enfermedades provocadas por el consumo de agua no potable o por la falta de sistemas de saneamiento básicos matan a más personas que todas las formas de violencia juntas, incluida la guerra.

Las desigualdades en su disponibilidad, su acceso y su calidad afectan de manera desproporcionada a quienes viven en el Sur Global, agravando los problemas de salud, agricultura o educación, por nombrar algunos. El agua es fuente de vida y un elemento indispensable para la reducción de la pobreza, la producción de alimentos, la mejora de la salud y el bienestar, la igualdad de género, la generación de energía limpia o la protección de los ecosistemas. Por todo ello, darle la vuelta a esta realidad es uno de los retos globales más urgentes e importantes que tenemos por delante.

- *Disponer de acceso a agua potable y saneamiento es una contienda profundamente desigual.* A lo largo de mis casi 30 años de profesión, he sido testigo directo de cómo millones de personas se enfrentan a dificultades para acceder a fuentes de agua potable, deben pagar precios prohibitivos, hacer horas de cola o andar largas distancias a pie, además de sufrir los efectos que la falta de agua o el consumo de agua contaminada tiene para la salud, su capacidad de prosperar y tener una vida digna.

El año pasado, en regiones como el Cuerno de África, hasta un 90 % de los pozos de algunas zonas de Somalia, el norte de Kenia y el sur de Etiopía, se secaron completamente como resultado de 6 temporadas consecutivas prácticamente sin lluvias. La peor sequía de los últimos 40 años. Durante todo este tiempo, junto con las comunidades, nuestros equipos se han visto obligados a perforar pozos cada vez más profundos, más costosos y que requieren mayor mantenimiento. A veces para encontrarse, después de semanas de trabajo, con acuíferos agotados o con reservas de agua exiguas o insalubres.

- *La crisis climática es una crisis del agua.* Una crisis doblemente injusta, porque el grueso de las emisiones históricas de CO₂ provienen de los países más ricos, pero son principalmente los países empobrecidos quienes sufren más su impacto. Un dato lo resume todo: el 1 % más rico de la población mundial arroja la misma cantidad de emisiones de CO₂ a la atmósfera que los 4.600 millones de personas más pobres de la humanidad.

Un granjero ugandés necesitaría casi 60 años, toda una vida, para contaminar lo mismo que Jezz Bezos o Elon Musk contaminan con un vuelo de menos de 3 horas en su *jet* privado.

Se calcula que algo más de un tercio de la población del mundo vive en regiones donde escasea el agua. Una cifra que, según los expertos, empeorará. Antes de 2050, dos tercios de la población mundial vivirán en condiciones de estrés hídrico, con la desertificación afectando por entonces a los medios de vida y a la subsistencia de cerca de 1.000 millones de personas en un centenar de países. El agua ya es —y será aún más— fuente de especulación, tensión y conflicto.

- *En situaciones de conflictos o de violencia armada, el agua se convierte en un arma de guerra, la más cruel e inhumana.* En Ucrania, desde el inicio del conflicto en 2022, hay documentados —además de la destrucción de la presa de Kakhovka— más de 60 bombardeos en infraestructuras de abastecimiento de agua, con un enorme impacto para la población civil.

No es un caso aislado. Podríamos hablar de los ataques contra infraestructuras en Siria o en Yemen, de la contaminación de pozos con cadáveres en República Centroafricana o de los asaltos y violaciones a mujeres y niñas que se desplazan en busca de agua en el lago Chad. Privar a la población de agua es una de las consecuencias más atroces de los conflictos, multiplicando los problemas al sumar enfermedades y miedo al sufrimiento de personas civiles.

- Pero el problema de acceso al agua va mucho más allá de su escasez o privación de forma intencionada. *También es un problema de acaparamiento, mercantilización y de falta de inversión pública y de acceso inequitativo en cantidad, salubridad, accesibilidad y asequibilidad.* En muchos casos, hay agua, pero se desperdicia, está contaminada, se gestiona de forma poco sostenible o se paga a precios desorbitados.

En una ciudad como Nairobi, las personas más pobres que viven en los barrios marginales al sur de la ciudad no cuentan con servicios de agua corriente, y llegan a pagar hasta 20 veces más por el agua que sus vecinos de barrios más ricos, por un servicio de igual o menor calidad prestado por vendedores o camiones cisterna.

En la provincia chilena de Pertoca, las comunidades locales tienen acceso a únicamente 50 litros por persona y día, debido al uso excesivo de agua por parte de las empresas de aguacates que operan en la zona, con el beneplácito del gobierno, que mira hacia otro lado y regula a su favor.

- *El agua y la riqueza están estrechamente relacionadas.* Las personas más ricas no solo tienen mejor acceso al agua segura y pública, sino que pueden permitirse pagar agua cara de fuentes privadas; mientras que las personas en situación de pobreza, que a menudo no tienen acceso a una fuente de agua suministrada por las autoridades, destinan una proporción considerable de sus ingresos a comprar agua.
- *Para Oxfam Intermón, asegurar un derecho tan básico como el agua es un eje central de nuestro trabajo.* Aprovechamos la tecnología, la ingeniería y la innovación. Vemos el poder transformador que tiene el uso de energía solar para el bombeo de agua en un país como Sudán del Sur, la importancia de las plantas desalinizadoras que funcionan en Gaza, o mantener



Ludimyla recoge agua en un punto de agua en Mykolaiv, en Ucrania, instalado por Oxfam Intermón.
© Kieran Doherty/Oxfam

¹ Entre los años 2015 y 2022, la proporción de la población mundial con acceso a servicios de agua potable gestionados de manera segura aumentó del 69 % al 73 %. Naciones Unidas (2023). Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2023: Edición especial Por un plan de rescate para las personas y el planeta.



Tanque de agua construido por Oxfam Intermón en Al-Dhale (Yemen). La ONG rehabilita infraestructuras de agua y líneas de suministro dañadas por el conflicto junto a la Corporación local de agua y saneamiento, además de instalar plantas desalinizadoras de agua. ©VFX Aden/Oxfam.

el sistema de abastecimiento para 80.000 personas en el campo de refugiados como Zaatari —en Jordania—. Un trabajo con el que, como organización, en 2023 hemos asegurado el acceso a agua potable, saneamiento e higiene a más de 11 millones de personas.

En 2015, y en el marco de la Agenda 2030, los gobernantes de todo el planeta se marcaron un objetivo: hacer realidad el acceso universal y equitativo al agua potable y sistemas de saneamiento adecuados, a un precio asequible para todas las personas, sin excepción. Sin embargo, 7 años después los datos son preocupantes. En estos años apenas hemos conseguido incrementar la cobertura en 4 puntos porcentuales.¹

- *Y la situación, lejos de mejorar, es probable que empeore.* Actualmente, casi la mitad de la población mundial sufre escasez de agua grave al menos durante un mes al año. Una escasez que se prevé que aumente con el incremento de las temperaturas globales, como consecuencia directa del cambio climático. A menos que multipliquemos los esfuerzos actuales y aseguremos una redistribución equitativa de este recurso tan valioso, en 2030 miles de millones de personas seguirán sin tener acceso a estos servicios básicos.

Todavía estamos a tiempo de encauzar la situación si nos lo proponemos. Pero debemos actuar ya. Podemos hacerlo: tenemos la tecnología, los conocimientos y los recursos financieros necesarios, pero los gobiernos deben comprometerse.

Deben priorizar la protección y la salud de los ecosistemas, impulsar una gestión integrada de los recursos hídricos y asegurar la financiación adecuada del sector del abastecimiento de agua, el saneamiento y la higiene, con el fin de salvar vidas hoy y contribuir para lograr un futuro más justo, más humano y sostenible para las generaciones futuras; para proteger nuestro planeta y garantizar que todos tengamos un lugar seguro al que llamar *hogar*.

EL AGUA: UN DERECHO PENDIENTE PARA MILLONES DE PERSONAS

Vista desde el espacio, la Tierra se convierte en un planeta azul. Y, sin embargo, solo el 0,5 % es agua dulce aprovechable y accesible. El agua es un recurso escaso y preciado, indispensable para la vida humana. Un recurso al que no todo el mundo tiene acceso.

El acceso al agua potable es un derecho humano y un elemento indispensable para vivir una vida digna. Sin embargo, desde que en 2015 arranca la Agenda 2030, apenas hemos visto algunos avances tímidos, limitados y claramente insuficientes:

- Alrededor de 4.000 millones de personas en todo el mundo experimentan una grave escasez de agua durante, al menos, un mes del año.
- 2.200 millones de personas no tienen acceso a agua potable en sus hogares. En países como Chad, Níger, Somalia o Etiopía, los niveles de acceso a agua potable y saneamiento son todavía inferiores al 50 %.
- 2.300 millones de personas carecen de acceso a servicios básicos de saneamiento, como inodoros o letrinas. Y cerca del 80 % de las aguas residuales de todo el planeta vuelven al medio ambiente sin haber sido tratadas.
- Aproximadamente la mitad de las camas de hospital del mundo están ocupadas por personas que padecen problemas y enfermedades relacionadas con el agua. Cada día más de 800 niños y niñas menores de cinco años mueren a causa de la diarrea provocada por la ingesta de agua sucia.

Unas cifras que demuestran nuestro fracaso como humanidad

Las mujeres y las niñas se ven afectadas de manera desproporcionada por esta falta de agua, que afecta además a su bienestar, su seguridad y su futuro. El tiempo dedicado a recolectar y almacenar agua, y a otras tareas domésticas relacionadas con el agua y el saneamiento,



Abdia, participante en el proyecto de agua de Barambale en Kenia, lava las manos de su hijo con agua recogida en el punto que Oxfam Intermón ha instalado junto a la organización local MID-P. © Eyeris Communications/Oxfam.



aumenta la carga de trabajo de cuidados y reduce la posibilidad de las mujeres y niñas de acceder a oportunidades de educación, empleo, ocio o participación cívica y política. En algunas zonas rurales, ellas son las responsables de caminar largas distancias y llegar a zonas remotas e inseguras para acceder al agua; unos trayectos donde, además, corren el riesgo de ser agredidas o violadas.

Oxfam Intermón ha instalado parte de los aseos en la zona de Al-Mawasi, a las afueras de la gobernación de Khan Yunis (Franja de Gaza) para el uso de personas afectadas por el conflicto. © Alef Multimedia/Oxfam.



La escasez de agua afecta a más del 40 % de la población mundial y se prevé que este porcentaje aumente. Más de 1.700 millones de personas viven actualmente en cuencas fluviales en las que el consumo de agua supera la recarga. Y se espera que, para 2050, el cambio climático prive a 1.500 millones más de personas del acceso al agua. Los cálculos apuntan que 700 millones de personas en todo el mundo podrían tener que desplazarse debido a la profunda escasez de agua antes de 2030.

Abordar esta problemática de presente y de futuro es clave y urgente. No podemos quedarnos de brazos cruzados: sin agua no es posible el desarrollo y la erradicación de la pobreza. Y queda mucho por hacer para alcanzar la seguridad hídrica y el pleno acceso al agua y al saneamiento en todo el mundo.

LA CRISIS CLIMÁTICA ES UNA CRISIS DEL AGUA

La crisis climática es una crisis del agua. Los patrones de precipitación han cambiado en muchas partes del mundo. La subida del nivel del mar saliniza tierras y acuíferos. Las inundaciones más intensas y frecuentes contaminan las fuentes de agua y destruyen cultivos y hogares, mientras que las sequías más prolongadas y recurrentes secan los manantiales que muchas personas necesitan para sobrevivir.

Apenas empezamos a vislumbrar las consecuencias que tendrá en todo el planeta: cambios en las corrientes marinas, aceleración del deshielo marino y terrestre, rupturas en los patrones de los monzones, desequilibrios graves en los ecosistemas marinos y agotamiento de la capacidad de absorción de CO₂ marina.

Los episodios de sequía crecen en frecuencia y gravedad. Lo hacen de forma silenciosa, sin conseguir la atención de los medios o de los gobiernos, pero sus consecuencias son devastadoras para los ecosistemas, las economías y millones de vidas humanas, las más vulnerables. Está pasando. En el Cuerno de África, varios años de sequía e inundaciones han arrasado con todo. No hay pasto ni cosechas y han muerto millones de cabezas de ganado. Más de 60 millones de personas se enfrentaron el año pasado a una grave inseguridad alimentaria.

Y, sin embargo, la totalidad del continente africano genera apenas el 5 % del total de las emisiones de CO₂.

Pérdida de cultivos y animales, falta de agua potable, hambre y malnutrición, enfermedades y muertes, migraciones forzadas. Millones de personas empujadas a la desesperación. Los peores supuestos ya son una realidad. Oxfam Intermón calcula que, durante las próximas décadas, el hambre crónica aumentará significativamente como consecuencia del cambio climático, unas cifras que se alejan del objetivo «hambre cero» de Naciones Unidas.

Muchas de las comunidades donde trabajamos, ya sea en las islas del Pacífico, Filipinas, el corredor seco centroamericano o la banda del Sahel, se encuentran en la primera línea de un clima cambiante, y vemos cómo el suministro de agua se ve amenazado

Hernestine, sacando agua del grifo suministrado por Oxfam Intermón en la instalación fotovoltaica del campo de desplazados de Mweka, en la República Democrática del Congo. © Arlette Bashizi/Oxfam.



cada vez más. Los países más vulnerables al cambio climático apenas han contribuido al problema, pero son los que sufren las mayores consecuencias.

Nos sobran evidencias para saber que nos enfrentamos a uno de los mayores retos de la humanidad. Tenemos una responsabilidad colectiva para reducir nuestras emisiones drásticamente, si no las consecuencias serán irreversibles.

Pero, ni todas las personas contaminamos igual, ni todas sufriremos en igual grado las dramáticas consecuencias del aumento de la temperatura del planeta. Las economías del G20 generamos 3/4 partes del total de las emisiones y somos las que más debemos reducirlas. Y en la cúspide, los millonarios, ese 1 % de personas que lanza más CO₂ a la atmósfera que el 50 % de la población más pobre del planeta. Con su tren de vida, sus *jets* privados, mansiones, yates e inversiones contaminan un millón de veces más que cualquier otra persona.

Sabemos que la vulnerabilidad a los impactos del cambio climático y las condiciones climáticas extremas relacionados con el agua se intensificarán. Además, los expertos y expertas creen que la falta de agua puede desplazar hasta 700 millones de personas para 2030 y, según denuncia Unicef, para 2040 uno de cada cuatro niños del mundo vivirá en zonas con carencias extremas de agua. El agua ya es, y será aún más, fuente de tensión y de conflicto.

Esto supone una de las mayores amenazas para la humanidad y, si no hacemos nada, provocará un aumento del hambre, las enfermedades y los desplazamientos, especialmente



Un miembro de la comunidad de Nagaramara, en Kenia, compra agua a un precio razonable y asequible en un abrevadero construido por Oxfam Intermón con la organización local MID-P. Este punto de agua se gestiona con personas de la comunidad, como Catherine (dentro de la caseta), la tesorera. Con el dinero de las ventas se mantiene la instalación. © Eyeris Communications/Oxfam.

en aquellos países y comunidades con menor capacidad de reaccionar ante el cambio climático. Una crisis que se ha visto agravada por la inversión insuficiente en sistemas de abastecimiento de agua durante décadas, y una mala gestión de este recurso, además de la erosión del suelo, la contaminación y la sobre explotación de muchos acuíferos.

Estamos perdiendo el planeta muy rápido. Si no protegemos el agua no podremos proteger a la gente y no habrá futuro para el planeta.



Marinel, colaboradora de Oxfam Intermón en la campaña Make Rich Polluters Pay, sosteniendo una pancarta de protesta frente a la sede de Shell en Manilla (Filipinas), como solía hacer durante los actos para reclamar que las empresas fósiles dejen de abusar de los derechos humanos con actividades extractivas y contaminantes. © Stories4Change by Climate Tracker.

Ante la emergencia climática, la juventud de todo el mundo se une y se moviliza

La juventud y la infancia de hoy heredarán un mundo peor. Pero lejos de ser víctimas pasivas, se movilizan y articulan para reclamar a los gobiernos una acción climática contundente. Conforman una red de miles de activistas que atraviesa fronteras, contagiando a padres, madres, profesorado y ciudadanía de a pie. Y aprovechan los canales a su disposición: las calles, los tribunales internacionales o las plataformas digitales.

La mitad de la población mundial tiene menos de 30 años, pero solo el 2,6% de los políticos lo tienen. Frente a ello, los jóvenes se organizan en Nigeria, Colombia, Filipinas, Kenia, Sur Sudán o España. Los movimientos se multiplican: Climate Alliance, Zero Hour, Fridays For Future, Extinction Rebellion o Africa Climate Network.

Son jóvenes, inteligentes, valientes y difíciles de disuadir. Son vocales, exigentes, propositivos. No es un camino fácil. Fuerzan los límites, se arriesgan a ser arrestados, a veces sufren ataques y amenazas personales. Pero están convencidos de que el cambio es posible y saben que se juegan su futuro y el de sus comunidades.

MERCANTILIZACIÓN, CONTAMINACIÓN, ACAPARAMIENTO: EL AGUA COMO MERCANCÍA

En muchos contextos el problema no es de escasez, sino de acceso equitativo a un agua de calidad, en cantidad suficiente y a un precio razonable.

En muchas partes del planeta vemos cómo actores poderosos se hacen con el control de un bien público tanpreciado como el agua, privando o limitando el acceso a las comunidades locales.

El agua deja de ser un derecho y pasa a ser una mercancía con fines comerciales y especulativos, donde gobiernos y autoridades benefician de forma desproporcionada los intereses de grandes corporaciones privadas (compañías mineras, energéticas, embotelladoras o monocultivos intensivos) a costa del acceso al agua de las comunidades.

La pérdida de agua se ve exacerbada por la contaminación del agua. Las actividades industriales provocan vertidos tóxicos, como metales, hidrocarburos, ácidos y otros productos químicos.

En Perú, su historial de minería a cielo abierto y derrames masivos de petróleo ha llevado al gobierno a reconocer que el 30 por ciento de la población peruana está contaminada con metales pesados a diario. Existen zonas, como las comunidades de Cerro de Pasco, que llevan décadas expuestas a grandes concentraciones de cadmio o plomo, con graves consecuencias para la salud, que van desde enfermedades crónicas hasta enfermedades mortales. Una situación similar a la que viven las comunidades indígenas Munduruku de Brasil, donde la contaminación por mercurio derivada de actividades mineras ilegales y la deforestación amenazan su acceso al agua potable.

Luchar contra estas situaciones es una lucha arriesgada. Los defensores y las defensoras de la tierra, líderes comunitarios y activistas ambientalistas sufren persecución, acoso y criminalización constantes. Las personas que lideran movimientos en defensa de sus territorios, sus bosques y sus ríos son acosadas, encarceladas e incluso asesinadas. Se dan casos emblemáticos, como el de Berta Cáceres o el de Bruno Pereira, que se suman a los más de 1.700 activistas ambientales asesinados en la última década (uno cada dos días), con Brasil, Colombia, Filipinas, México y Honduras encabezando la «lista negra».

Los casos se multiplican. El acaparamiento de agua a través de la contaminación por parte de la industria es más dramático en países empobrecidos, donde las empresas multinacionales del norte pueden instalarse a menor costo y con menos regulaciones.

El sector de la agricultura es responsable del 70 % del total de las extracciones de agua dulce del mundo y es, con diferencia, el sector que utiliza mayor cantidad de agua. Por ello, en 2023, desde Oxfam Intermón analizamos las 350 empresas globales más representativas del sector agroalimentario, entre las que se encuentran empresas tan conocidas

como Carrefour o el grupo Avril, que representan, en conjunto, más de la mitad de los ingresos mundiales del sector agroalimentario.

Estamos hablando de una agricultura industrial con la que los países más ricos y las corporaciones multinacionales trasladan la escasez de agua a las regiones más pobres, mediante la importación de productos hídricos intensivos como frutas, verduras, carne, flores y agua embotellada del extranjero. Además, el impacto de la agricultura industrial en la contaminación del agua es muy significativo.

El análisis revela que menos de un tercio de las empresas hacen pública la proporción de agua que extraen de zonas afectadas por estrés hídrico. Y aún más preocupante, a pesar de la grave crisis de agua que hemos sufrido en los últimos años en muchas partes del mundo, el análisis evidencia que solamente el 28 % de las empresas agroalimentarias más influyentes del mundo afirman estar reduciendo sus extracciones de agua y, únicamente el 23 %, toma medidas para reducir su contaminación.

Claramente, todavía no podemos confiar en la buena voluntad de las empresas por conseguir un cambio en las prácticas. Son los gobiernos quienes deben forzar esta mejora y proteger los bienes públicos comunes frente a la sed de beneficios de las empresas.

Un millón de botellas de agua cada hora

La industria del agua embotellada vende más de un millón de botellas individuales de agua cada hora. Este crecimiento vertiginoso muestra la mercantilización y la explotación del agua por parte de las grandes empresas, lo que agrava la desigualdad, la contaminación y los daños asociados. Según Naciones Unidas, la multimillonaria industria del agua embotellada pone en peligro los avances en el cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS6) dedicado a conseguir el acceso universal a agua potable.

No hace falta ir muy lejos. A mediados del año pasado, en Francia, las autoridades francesas impusieron restricciones en el uso del agua a miles de personas en el departamento de Puy-de-Dôme, gravemente afectado por la sequía, entre ellas las residentes en la comuna de Volvic.

Estas restricciones no se aplicaron a la Société des Eaux de Volvic, una filial de la multinacional francesa Danone, que durante ese mismo período siguió extrayendo agua subterránea para abastecer la planta embotelladora de Volvic. En 2023, Danone registró beneficios de 881 millones de euros y repartió 1.238 millones de euros entre sus accionistas.

Esta sed del sistema industrial tiene consecuencias peligrosas cuando compite con necesidades humanas vitales. Así, por ejemplo, la instalación de una planta procesadora de fosfato en Gabes (Túnez) se ha traducido en el deterioro y la desaparición de los oasis locales, y los agricultores ahora luchan por sobrevivir. Una situación que se repite en otros contextos. En las provincias patagónicas de Argentina, el gas de esquisto se ha topado con la oposición, por un lado, de las comunidades mapuches directamente impactadas en la

provincia de Neuquén. Y, por otro, con la de los habitantes y agricultores que viven aguas abajo, en la zona frutícola de la provincia de Río Negro.

Cuando las grandes empresas contaminan o consumen enormes cantidades de agua, son las comunidades las que sufren sus consecuencias en forma de pozos secos, facturas de agua más caras y fuentes de agua contaminadas no aptas para el consumo. Menos agua significa más hambre, más enfermedades y más personas obligadas a abandonar su casa.

Con la mercantilización de bienes y servicios públicos, los gobiernos no están cumpliendo sus obligaciones en materia de derechos humanos. Los titulares de derechos se transforman en clientes de empresas privadas que solo buscan la maximización de los beneficios y que rinden cuentas solo a sus accionistas. Esto afecta a nuestras democracias, refuerza las desigualdades y genera una segregación social insostenible.

Por eso, desde Oxfam Intermón instamos a los gobiernos a reconocer el agua como un derecho humano y un bien público. Los beneficios económicos no deberían ser la prioridad cuando se trata de proporcionar servicios de abastecimiento de agua a la población.

Además, les recordamos la importancia y la urgencia de aprobar normativas nacionales y de alcance internacional, que obliguen a todas las empresas a respetar estándares medioambientales y de derechos humanos básicos, en toda su actividad y allí donde operen.

EL AGUA COMO ARMA DE GUERRA

La violencia por el agua tiene una larga historia. La primera guerra por el agua conocida ocurrió hace casi 4.500 años entre las antiguas ciudades-estado de Umma y Lagash en Mesopotamia por el acceso al agua de riego del río Tigris. Desde entonces ha sido una constante.

En muchos casos, es justamente la falta de agua la que desencadena o agrava situaciones de conflicto. En los últimos años, hemos visto disturbios en India e Irán por la escasez de agua y por la sequía, o conflictos entre agricultores y pastores en África por la tierra y las fuentes de agua. Nuestros recursos de agua dulce se han convertido en desencadenantes, armas y víctimas de guerras y conflictos.

El agua no conoce fronteras tiradas con escuadra y cartabón: actualmente, 4.000 millones de personas viven en cuencas fluviales que cruzan fronteras políticas. Más de 1.000 cuencas transfronterizas que, en la mayoría de los casos, no disponen de acuerdos internacionales de intercambio o comisiones conjuntas de cuencas fluviales. Una realidad que, en contextos de escasez, puede generar tensiones y disputas, y que refuerza la necesidad de colaboración y coordinación entre países.

La sociedad civil sigue siendo la gran perdedora en todos los conflictos armados. Sudán, Gaza, Ucrania, Etiopía, Afganistán, Siria, República Democrática del Congo... Y así hasta 56 conflictos activos en el mundo en 2024, la cifra más alta desde la Segunda

Un grupo de pastores junto a su ganado llega a la comunidad de Sincaro, en Somalia, un punto estratégico en las rutas de transhumancia y donde Oxfam Intermón ha construido un sistema de suministro de agua para las personas y los animales. La ONG ha acondicionado el pozo, construido bebederos, un depósito en altura y canalizaciones. Miles de animales acuden cada día a beber allí, ya que es el único pozo en kilómetros a la redonda. © Pablo Tosco/Oxfam Intermón.



Guerra Mundial. Conflictos de consecuencias devastadoras para la población civil. Y en todos los casos, el acceso al agua y su control son una herramienta militar y un objetivo estratégico.

La ONU declaró formalmente el derecho humano al agua en 2010 y el derecho internacional humanitario exige la protección de la infraestructura hidráulica civil durante cualquier conflicto. También prohíbe el uso del agua como arma de guerra y como forma de castigo colectivo. Y aún y así, vemos cómo —de forma reiterada y con impunidad— se siguen violando estos acuerdos, ya sea con los ataques a importantes represas y sistemas civiles de agua en Ucrania o con el uso del agua como arma de guerra en Gaza y Cisjordania.

El lago Chad representa el principal sustento para millones de personas que se benefician de su agua para beber, cultivar, pastar e incluso pescar y comerciar. Un lago que es la sombra de lo que fue: las sequías, el aumento del riego y los impactos climáticos lo han reducido a menos de una décima parte de lo que había sido. El agua, un recurso cada vez más escaso en la zona, es explotada y controlada por los grupos terroristas de Boko Haram, que lo usan como arma de presión y herramienta de reclutamiento; provocando desplazamientos forzados, una mayor presión en las zonas de refugiados y una escalada de conflictos por los recursos. Y las mujeres y los niños que se ven obligados a buscar agua están expuestos a mayores riesgos de sufrir daños y violencia sexual.

En marzo de 2024 se han cumplido 6 años del conflicto en Yemen. Un conflicto que ha destruido la mayoría de las infraestructuras, dejando a muchas zonas sin acceso a agua potable, provocando que las condiciones higiénicas y sanitarias sean paupérrimas. En Yemen el 80 % de la población necesita asistencia humanitaria, se trata del porcentaje más alto en cualquier país del mundo. Además, cerca de 16 millones de yemeníes no tienen acceso a agua apta para el consumo, principalmente en las zonas rurales. Los sistemas de salud también se han visto seriamente golpeados, lo que explica la grave epidemia de cólera registrada en el último año y que dejó miles de muertos.

Gaza: el agua como arma de guerra

«Uno de los juegos favoritos de los soldados israelíes es disparar a los depósitos de agua: cuanto más bajo acierta con la bala en el tanque, mayor es la pericia del tirador».

La situación en Gaza es insoportable, es el infierno en la Tierra. Una lucha diaria por la supervivencia. Desde hace casi un año, los más de 2 millones de habitantes del enclave palestino han visto cómo el agua, los alimentos, los medicamentos y otros suministros básicos se han reducido, hasta casi desaparecer.

El agua potable se ha convertido en un «lujo inalcanzable». Las y los gazatíes tienen acceso menos de 4,7 litros de agua al día para beber, cocinar y asegurar todo su aseo personal, menos de lo que nosotros usamos para la descarga de una cisterna de váter.

Las personas desplazadas de Rafah, en el sur de Gaza, utilizan las nuevas unidades de desalinización instaladas por Oxfam Intermón junto a organizaciones locales. Estas unidades proporcionan gratuitamente agua potable sin riesgo de contaminación. © Alef Multimedia/Oxfam.



La gente camina hasta medio kilómetro para conseguir agua. A diario, se forman largas colas. Familias enteras, incluidos niños y ancianos tienen que esperar horas bajo el sol para conseguir llenar una o dos garrafas de agua con las que pasar el día.

El Gobierno de Israel está usando la privación del agua como un arma de guerra, dinamitando el Derecho Internacional Humanitario. Los ataques sistemáticos contra las infraestructuras apuntan que existen esfuerzos coordinados e intencionados para paralizar el suministro de agua de Gaza.

Según nuestros informes, los ataques israelíes han dañado o destruido cinco instalaciones de agua y saneamiento cada tres días. Israel ha destruido todas las plantas desalinizadoras y la práctica totalidad de los pozos. Además, se ha acabado con el 70 % de las bombas de aguas residuales y todas las plantas de tratamiento de aguas grises. Estamos frente a un conflicto donde se vulneran de forma sistemática los principios humanitarios más básicos, las normas de la guerra y el derecho internacional humanitario.

En agosto de 2024, se estimaba que las muertes indirectas en la Franja —además de las más de 40.000 muertes por los bombardeos — pueden alcanzar las 186.000 personas, provocadas por traumatismos, malnutrición, enfermedades infecciosas y no transmisibles.

El bloqueo israelí y la destrucción de las instalaciones de suministro y de saneamiento por los bombardeos ha provocado una crisis sanitaria, con un impacto catastrófico para la salud de miles de gazatíes. Una crisis sanitaria de consecuencias mortales. La falta extrema de agua limpia y saneamiento está teniendo un gran impacto en su salud: más de una cuarta parte de la población del enclave ha caído gravemente enferma como consecuencia de enfermedades fácilmente prevenibles. Sobre todo, las personas más vulnerables, mujeres embarazadas o lactantes, niños y niñas, personas ancianas o discapacitadas.

Garantizar la asistencia humanitaria no es suficiente. Es imperativo que se asegure el acceso humanitario seguro, se respete el Derecho Internacional Humanitario y se busque una solución política y duradera al conflicto.



Personas trabajadoras contratadas en Gaza por Oxfam Intermón están fabricando seis unidades de desalinización, que se distribuirán en los lugares que las personas desplazadas internas utilizarán para acceder a agua potable limpia. © Alef Multimedia/Oxfam.

LA INNOVACIÓN, UNA HERRAMIENTA ESENCIAL

La ingeniería tiene un poder transformador innegable. Pensemos en algunos de los grandes desafíos planetarios que tenemos como sociedad: la descarbonización de nuestras energías, la adaptación y mitigación frente a los impactos del cambio climático, el diseño de ciudades más sostenibles e integradoras, la gestión de los residuos, la movilidad o la degradación de los suelos más fértiles.

En todos y cada uno de ellos la ingeniería puede aportar soluciones, que además sean herramientas cohesionadoras y redistributivas y contribuyan a asegurar que todas las personas, sin excepción, disfrutemos de los mismos derechos y tengamos garantizados una serie de servicios esenciales.

También cuando hablamos del acceso al agua. Para organizaciones como Oxfam Intermón, garantizar el derecho al agua es un elemento nuclear de nuestro trabajo. Un trabajo que tiene un poder transformador, y donde la ingeniería y la innovación juegan un papel clave.

Es extraordinario ver el impacto positivo de la puesta en marcha de sistemas de regadío en medio de las zonas más áridas de Somalia, rehabilitar el sistema de agua de una ciudad como Aleppo (Siria) arrasada por la guerra o de asegurar, cada día, en medio de los bombardeos, agua potable para más de 250.000 personas en Ucrania, rehabilitando sistemas dañados, instalando bombas y generadores nuevos o con la instalación de sistemas de ósmosis inversa.

Una parte sustantiva de nuestro trabajo se centra en responder a las necesidades más acuciantes de los millones de personas que sufren las consecuencias de la violencia armada, conflictos enquistados, sequías, inundaciones o terremotos en contextos como Bangladesh, Sudán del Sur, Yemen, Burkina Faso, República Centroafricana o Turquía.

A veces trabajamos en sitios muy remotos y en condiciones muy extremas. Garantizamos acceso al agua a personas que lo han perdido todo. Apoyamos a personas obligadas a dejar sus hogares para convertirse en refugiadas climáticas, y ponemos en marcha infraestructuras hidráulicas para que la gente pueda mejorar sus cultivos o la cría de ganado y mantener así sus medios de vida.

Trabajamos con centenares de ingenieros e ingenieras, técnicos y promotores de salud, en la casi totalidad del Sur Global. Lo hacemos trabajando codo con codo con autoridades, instituciones, organizaciones locales y organizaciones internacionales. Desde la constatación de que el problema de acceso al agua va mucho más allá de la escasez de recursos hídricos, y que es, en esencia, un problema de desigualdad: en cantidad, salubridad, accesibilidad y asequibilidad.

Las aguas salobres —con alto contenido salino— constituyen un problema cada vez más común. En algunas comunidades, existen fuentes subterráneas que contienen agua salada y arenosa. Khor Omeira es una región árida en la costa oeste de Yemen. Muchos de sus habitantes viven de la pesca, y la falta de servicios básicos es generalizada. La población tiene dificultades para cubrir sus necesidades básicas de agua. En general, la obtienen directamente del mar o de pozos profundos de los que sacan agua salada. La mayoría de las familias no se puede permitir comprar agua, sobre todo después de que su precio se duplicara debido al conflicto. En los asentamientos de Ras Al Ara y Al Mudaraba, Oxfam ha construido una planta desalinizadora alimentada con energía solar y eólica. Gracias a este proyecto innovador, las familias disponen de agua potable que pueden utilizar para beber y cocinar a un precio un 50 % más bajo que el del mercado.

En situaciones de emergencia, los sistemas de suministro de agua y saneamiento de los que dependen las comunidades, a menudo, resultan dañados o se sobrecargan. Además, las personas están con frecuencia traumatizadas, hambrientas, deshidratadas y exhaustas: son más vulnerables a la contracción de enfermedades como la diarrea o el cólera. Asimismo, las reparaciones o la ampliación de los sistemas requieren tiempo, un tiempo del que las personas que los necesitan para sobrevivir no disponen.



Hodan, ingeniera civil de Oxfam Intermón en Somalia. De nacionalidad somalí, trabaja en la base de Burao en proyectos de agua y saneamiento. © Pablo Tosco/Oxfam Intermón.

En todos estos contextos la ingeniería y el ingenio juegan un papel clave. Lo sabemos bien todas las organizaciones que hemos hecho de este derecho una especialidad, principalmente en contextos humanitarios, donde el éxito de nuestro trabajo depende de:

- *Rapidez.* Una persona puede estar a lo sumo 3 días sin beber agua. Ese es el tiempo disponible para hacer un diagnóstico de la situación y poner en marcha una primera respuesta que asegure unos mínimos de agua disponible.
- *Escala.* Queremos llegar al máximo de gente en el menor tiempo posible. Necesitamos asegurar agua suficiente para beber, cocinar y garantizar condiciones de salubridad, conscientes de que, en condiciones de hacinamiento, los riesgos de enfermedades incrementan de forma exponencial.
- *Continuidad.* Debemos garantizar la continuidad del servicio. El servicio no puede interrumpirse y es imprescindible anticipar posibles incidencias.
- *Idoneidad y sostenibilidad.* Es clave asegurar que las soluciones están cocreadas con las comunidades, que responden a sus hábitos, sus necesidades y sus intereses. Cualquiera de las soluciones que implementemos deberá tener muy en cuenta temas como el mantenimiento, los repuestos, los costes asociados en el corto o medio plazo, o la durabilidad de la solución.

Agua a través de la energía solar

Oxfam es pionera en la instalación de sistemas de bombeo de agua a gran escala con energía solar en campos de personas refugiadas en todo el mundo. Instaló los primeros sistemas solares de bombeo de agua en la década de los ochenta y, en el momento en el que el coste de los paneles fotovoltaicos se redujo, fue la primera organización en aplicarlos en campos con altas demandas como Dadaab en Kenia en 2012.

Al demostrar la viabilidad de energías renovables en un contexto humanitario, Oxfam ha contribuido a la «solarización», desplegando la implementación de grandes sistemas solares en campos en Sudán del Sur, Tanzania y Etiopía; aplicándolo en distintas respuestas en Chad, Gaza, Ghana, Somalia, etc.

Estos sistemas a gran escala pueden llegar a bombear más de 60.000 litros de agua por hora y satisfacer las necesidades de 15.000 personas. En lugares como Kenia, los sistemas instalados tienen capacidad para proporcionar más de dos millones de litros de agua diarios beneficiando a 250.000 personas.

Además de actuar con rapidez y eficacia, durante décadas y junto con organizaciones, universidades y empresas, hemos desarrollado muchísimas innovaciones para ofrecer soluciones innovadoras de bajo coste, sostenibles y que resistan el paso del tiempo, dirigidas a comunidades impactadas por desastres y conflictos.

Uno de los campamentos que forman el asentamiento de personas desplazadas en Cox's Bazar, en Bangladesh, el más grande del mundo y que acoge a más de 900.000 personas. © Fabeha Monir/Oxfam.





En un mundo con retos humanitarios cada vez más complejos, la experimentación y la innovación son esenciales para salvar vidas y mejorar el presente y futuro de millones de personas.

A veces, las innovaciones emergen de los sitios más insospechados, como el uso de los gusanos tigre para el tratamiento de heces de las letrinas. Una iniciativa que hemos testado con éxito en países como Liberia, Myanmar, Sierra Leona o Etiopía. Los gusanos no solo descomponen las heces de forma eficaz, sino que reducen la frecuencia de vaciado y producen compost.

Sistemas de saneamiento para los Rohingya en Cox's Bazar

Durante siglos, los Rohingya, una minoría étnica musulmana, vivieron en Myanmar, en su gran mayoría en el estado de Rakhine, la región más pobre de Myanmar predominantemente budista y anteriormente conocida como Birmania. Una minoría que durante décadas soportó persecuciones y discriminaciones en Myanmar, lo que provocó que más de un millón de rohingya huyera de la violencia en sucesivos desplazamientos desde la década de 1990.

En agosto de 2017, después de que estallara la violencia generalizada en el estado de Rakhine en Myanmar, casi 750.000 personas, principalmente mujeres y niños, huyeron de la persecución militar, en un éxodo masivo, buscando refugio en Bangladesh.

Desde entonces, la mayoría de los refugiados rohingya residen en 33 campamentos en Cox's Bazar. Se trata del mayor asentamiento de refugiados del mundo, un asentamiento que acoge a 943.000 personas.

En 2019 se informaron más de 200.000 casos de diarrea aguda en los campamentos rohingya, así como infecciones respiratorias y enfermedades de la piel como la sarna, todo relacionado con el saneamiento y la higiene deficientes.

En 2019 y 2020, durante siete meses, los ingenieros de Oxfam y los refugiados rohingya han construido el enorme sistema que ha sido especialmente diseñado para el terreno empinado y montañoso donde se ubica el campo y para tener los costos de operación y mantenimiento más bajos posibles.

Hemos puesto en marcha una planta ecológica a escala industrial puede procesar 40 metros cúbicos de desechos al día, una cantidad enorme, los desechos de 150.000 personas, número equivalente a la población de Logroño o Huelva. La planta también produce biogás: Oxfam está explorando cómo llevar esto a las familias de refugiados para que cocinen ¿Os imagináis el poder transformador que tiene para todas esas personas mejorar sus condiciones de saneamiento, prevenir brotes de enfermedades como el cólera, fiebre tifoidea o diarreas o y evitar la contaminación de las fuentes de agua locales?

CONCLUSIONES

Disponer de agua potable y un entorno limpio no debería ser un lujo. Lamentablemente, todavía estamos muy lejos de conseguir que sea una realidad para todo el mundo. Pero no nos podemos resignar. No es momento de discursos, sino de planes creíbles y ambiciosos. No podremos poner fin a la pobreza si no solucionamos este problema.

Pese a los avances, no hay muchos motivos para la complacencia y la celebración. Aún así, podemos darle la vuelta. No es ingenuidad, es determinación. La mayoría de los países de ingresos bajos y medios no están en el buen camino para alcanzar el ODS 6 en 2030. Revertir esta situación requiere acelerar los planes y dar un impulso importante.

Para hacerlo, el ritmo actual de progresos necesitaría multiplicarse por cuatro y seis veces. Necesitamos más inversiones, más alianzas y mayor decisión para poder avanzar. Unas inversiones en agua, saneamiento e higiene que proporcionan beneficios que superan con creces los costes iniciales. Los países ricos deben aumentar significativamente la cantidad de financiamiento, condonar deudas que lastran la capacidad de inversión pública de los países y evitar la condicionalidad y la privatización de servicios esenciales.

Incrementar la financiación es una condición necesaria, pero no suficiente. Necesitamos actuar con determinación para reducir las emisiones de carbono y dejar atrás un modelo de progreso económico basado en la explotación y el agotamiento de los recursos naturales. De lo contrario, soportaremos consecuencias irreversibles.

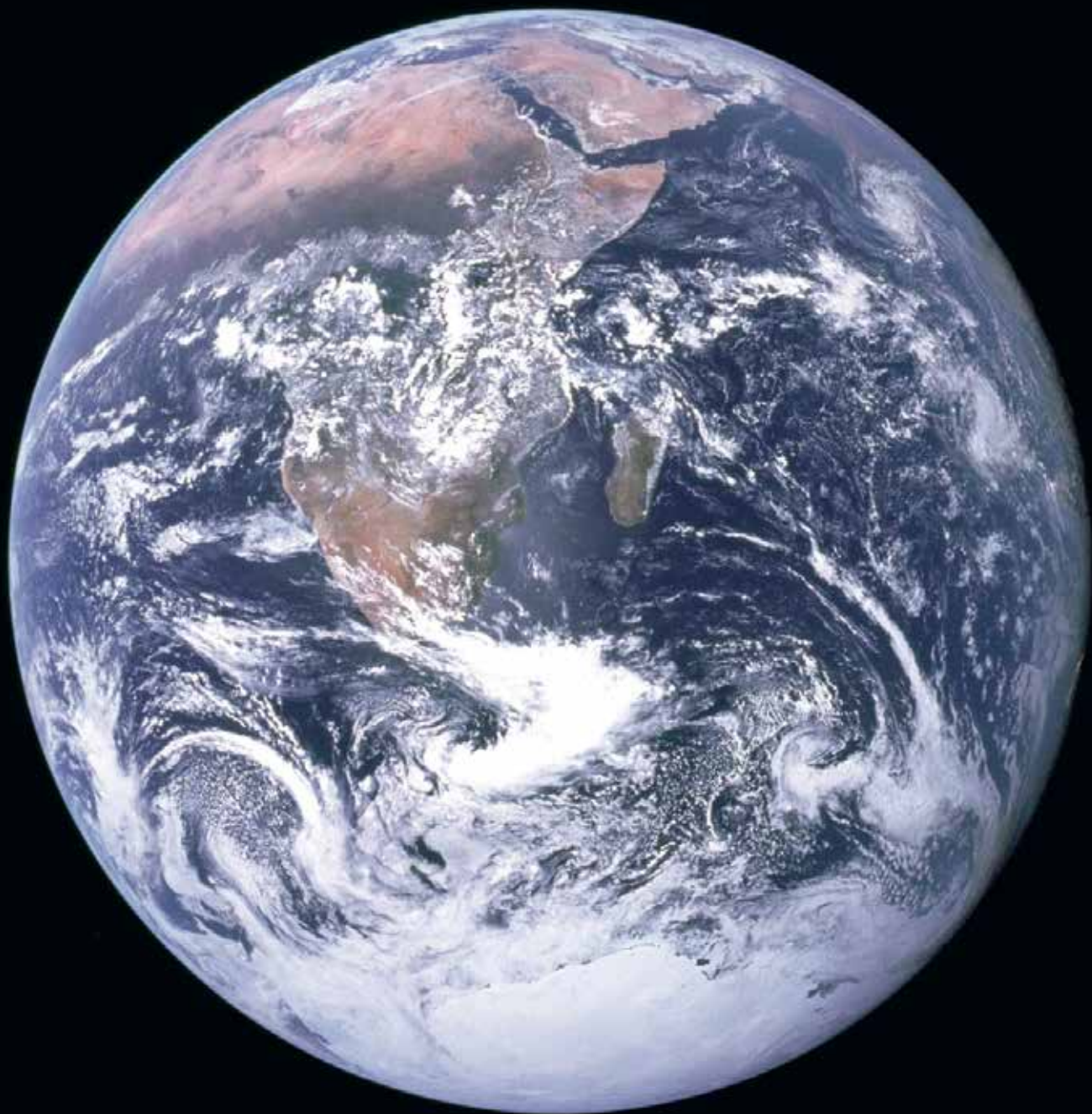
La transición ecológica debe impulsar un modelo de gestión del agua más sostenible, resiliente e inclusivo. Asegurar una gestión eficiente y responsable de los recursos hídricos y del consumo, así como una adecuada integración de los sistemas de abastecimiento de agua potable, saneamiento y alcantarillado, contribuyen a una mayor resiliencia de las ciudades. Además, la economía circular y el uso de recursos hídricos alternativos —como, por ejemplo, la reutilización de aguas pluviales para el riego de zonas verdes o la limpieza de las calles— se han vuelto fundamentales en el desarrollo de futuras soluciones para las grandes urbes del planeta.

En la actualidad, un porcentaje muy bajo de la financiación climática se invierte en ayudar a los países a adaptarse al cambio climático, y ese dinero no se destina a las comunidades más vulnerables al cambio climático. Este nivel de financiamiento es completamente inadecuado para la creciente crisis. Algunos de los países más vulnerables al cambio climático solo reciben 1 dólar por persona al año para invertir en agua. Proporcionar el dinero para fortalecer el acceso a WASH, como parte de la adaptación climática, traería beneficios económicos a sociedades enteras.

De los diecisiete objetivos, tal vez ninguno sea más urgente que el ODS 6 sobre el agua. A menos que controlemos la crisis mundial del agua, no podremos avanzar en los Objetivos de Desarrollo Sostenible, no podremos acabar con la pobreza ni reducir las desigualdades que condenan a millones de personas a sobrevivir.

Las expectativas son mayúsculas y también es mucho lo que está en juego. Tenemos los conocimientos, la tecnología e incluso los recursos económicos necesarios. Lo que necesitamos es voluntad política y acción. Necesitamos creer que el cambio es posible y exigir a nuestros gobernantes que actúen y tomen las decisiones necesarias.

Tenemos un sinfín de oportunidades de construir una vida mejor para todas las personas. Asegurar derechos tan esenciales como el derecho al agua, educación y salud para todas. Luchar contra el cambio climático, generando decenas de millones de puestos de trabajo verdes y bien remunerados. Podemos erradicar la pobreza. Podemos conseguir todo esto y mucho más si nos lo proponemos.



TRES

**LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO:
AGUA E INGENIERÍA**

Ignacio González-Castelao Martínez-Peñuela

INTRODUCCIÓN

El ciclo del agua es una parte esencial del clima, entendido este como una serie de condiciones atmosféricas que caracterizan a una región. Cualquier cambio en el clima tiene consecuencias en el ciclo del agua y viceversa, lo cual hace que el agua sea el principal medio de transmisión de los efectos del cambio climático a la sociedad. No hay que olvidar que entre 3.300 y 3.600 millones de personas aproximadamente viven en contextos altamente vulnerables al cambio climático, así como una elevada proporción de especies y ecosistemas (Pörtner, *et al.*, 2022).

Las previsiones de los distintos escenarios climáticos afectan a todos los seres vivos, pero más directamente al ser humano y especialmente a su estilo de vida actual, situación que se verá agravada por otros factores no climáticos, que también son motores de la futura escasez de agua, como el crecimiento de la población mundial y el modelo de desarrollo actual. No hay que olvidar que para vivir seguimos necesitando 1,56 veces más tierra de la que tenemos (WWF, 2020).

Resolver toda esta problemática no tiene nada que ver con salvar el planeta, pero sí con salvarnos a nosotros mismos, otros seres vivos y nuestras costumbres de vida. Hay que señalar que estas tendencias climáticas y sus efectos a nivel global están claros, pero el grado de incertidumbre aumenta a medida que la escala pasa a ser regional, de cuenca o local.

En diciembre de 2015 se adoptó en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP21) el Acuerdo de París, que entró en vigor en noviembre de 2016. El principal objetivo de este acuerdo es reducir sustancialmente las emisiones de gases de efecto invernadero para limitar el aumento de la temperatura global en este siglo a 2 °C en comparación con los niveles preindustriales (1850-1900), y esfuerzase para limitar este aumento incluso a tan solo 1,5 °C.

El motivo por el que se establece este umbral es que desde el punto de vista científico se considera que su rebasamiento aumentaría exponencialmente los riesgos, que difícilmente serían asumibles por los ecosistemas —en especial, por las personas y el resto de los seres vivos—. Las vías de desarrollo resilientes al clima también se ven progresivamente limitadas por cada incremento del calentamiento.

El proceso de mantener el aumento de la temperatura media mundial por debajo de estos límites es lo que se conoce como «mitigación del cambio climático». Se necesitan iniciativas de mitigación fuertes y de rápida implantación para evitar una mayor manifestación del cambio climático en todos los componentes del ciclo global del agua, aunque con los niveles actuales de incremento de temperatura algunos fenómenos se van a producir con independencia de la política o las acciones de mitigación que se adopten, como la variabilidad del ciclo del agua, los fenómenos extremos o el aumento del nivel del mar.

Los principales escenarios que se muestran en los informes del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) relacionados con el aumento de la

temperatura a nivel mundial adoptan, para evaluar el impacto y riesgos del cambio climático, tres períodos de referencia futuros, que cubren el corto plazo (2021-2040), el medio plazo (2041-2060) y el largo plazo (2081-2100).

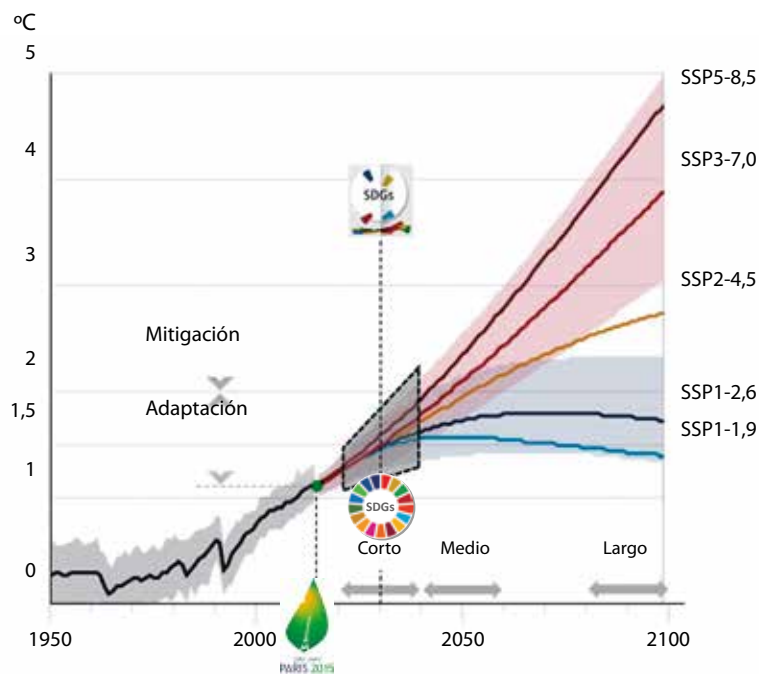
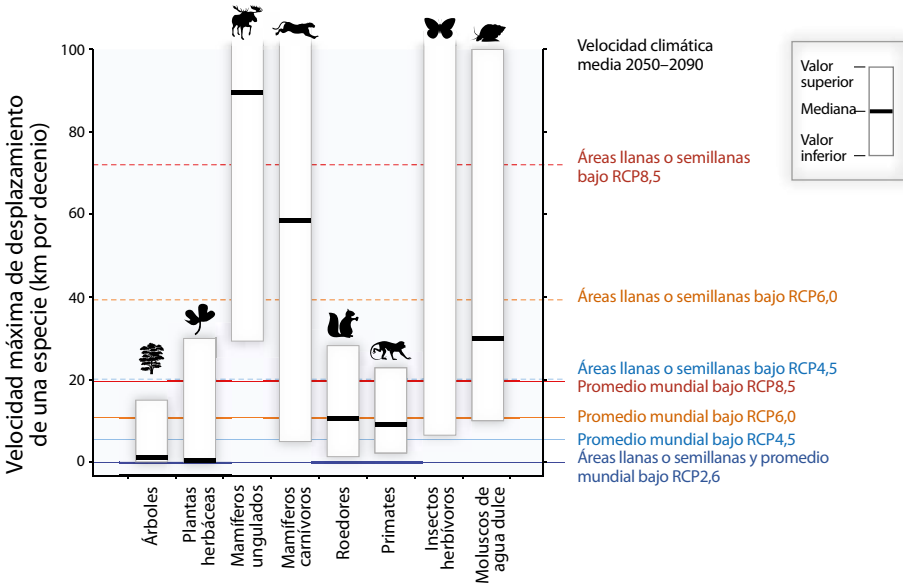


Figura 1. Proyecciones de incremento de la temperatura para distintos escenarios del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). Fuente: Elaboración propia preparada a partir de una ilustración del informe del IPCC (Pörtner, y otros, 2022).

Como se puede observar en la Figura 1, en el corto plazo los escenarios no divergen mucho, por lo que la ventana de oportunidad para hacer posible un desarrollo resiliente al clima es posible —aunque en poco tiempo esta oportunidad se reducirá rápidamente—. Si no se toman las necesarias medidas de mitigación, pasaremos de hablar de «cambio climático» a «emergencia climática» y el nivel de mitigación que finalmente alcancemos es el que determinará el grado de adaptación necesario. A mayor mitigación, menor adaptación, y más allá de la adaptación, para algunas especies, solo quedará la migración.

Las distintas trayectorias divergentes futuras simplemente señalan la velocidad a la que nos tenemos que adaptar al cambio. El más pesimista de los escenarios que se muestran en la Figura 1 significa que los seres vivos tendrían que aumentar su velocidad de adaptación a estas nuevas situaciones en comparación con el más optimista. Si bien todos tenemos una capacidad limitada de adaptación; por lo que, para muchas especies, el cambio puede ser más rápido que su velocidad de adaptación (véase la Figura 2). No hay que olvidar que la vulnerabilidad humana y la de los ecosistemas son interdependientes.

Figura 2. Velocidades máximas a las que se pueden desplazar las especies (basado en las observaciones y los modelos; eje vertical de la izquierda), en comparación con las velocidades a las que se proyecta que las temperaturas avancen a través de los paisajes (velocidades climáticas para la temperatura; eje vertical de la derecha). Las intervenciones humanas, como el transporte o la fragmentación de hábitats, pueden redundar en mayores o menores velocidades de desplazamiento. Las columnas blancas con listones negros indican rangos y medianas de velocidades de desplazamiento máximas para los árboles, plantas, mamíferos, insectos herbívoros (mediana no estimada) y moluscos de agua dulce. Respecto de los escenarios RCP2,6, RCP4,5, RCP6,0 y RCP8,5 para 2050-2090, las líneas horizontales muestran la velocidad climática para el promedio de las áreas terrestres globales y para las grandes regiones llanas o semillanas. Se prevé que las especies cuya velocidad de desplazamiento máxima esté por debajo de las distintas líneas no serán capaces de seguir el ritmo del calentamiento sin intervención humana. Ilustración elaborada por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (Ministerio de Agricultura, 2014), basado en materiales contenidos en el Quinto Informe de Evaluación del IPCC, Grupo de Trabajo II (Field, y otros, 2014).



El grado de cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en 2030 será un buen indicador de medición de nuestra capacidad de cambio, en el que el cumplimiento del ODS-6 «Agua limpia y saneamiento» tiene una importancia extraordinaria, dado su carácter transversal con respecto al resto de ODS (véase la Figura 3). El nexo agua-energía-alimentos-salud afecta a las tres dimensiones del desarrollo sostenible —la social, ambiental y económica— y, si no se alcanzan los objetivos del ODS-6, difícilmente se podrán alcanzar las metas del resto de objetivos.

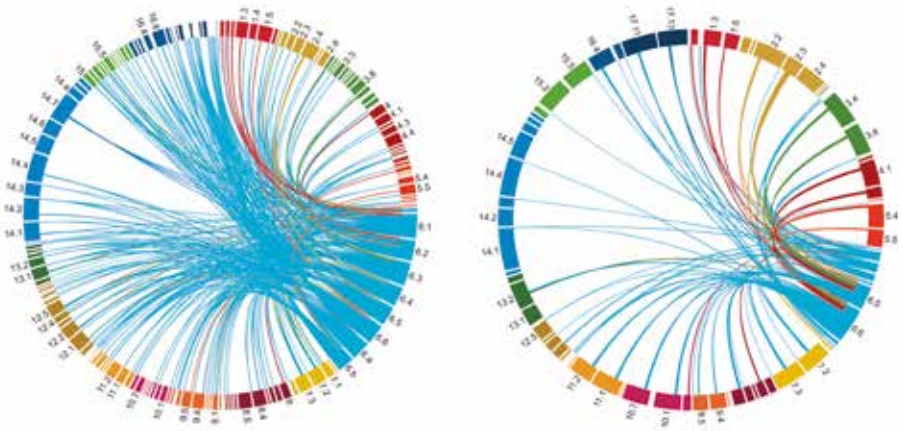


Figura 3. Interrelaciones del ODS 6 «Agua limpia y saneamiento» con el resto de los ODS. Sinergias positivas (imagen izquierda) y conflictos (imagen derecha). (European Commission, 2022).

Si tenemos en cuenta la situación mundial de los once indicadores globales de seguimiento de los avances hacia el ODS-6 (véase la Figura 4), parece que estamos lejos de alcanzar nuestros ansiados objetivos.

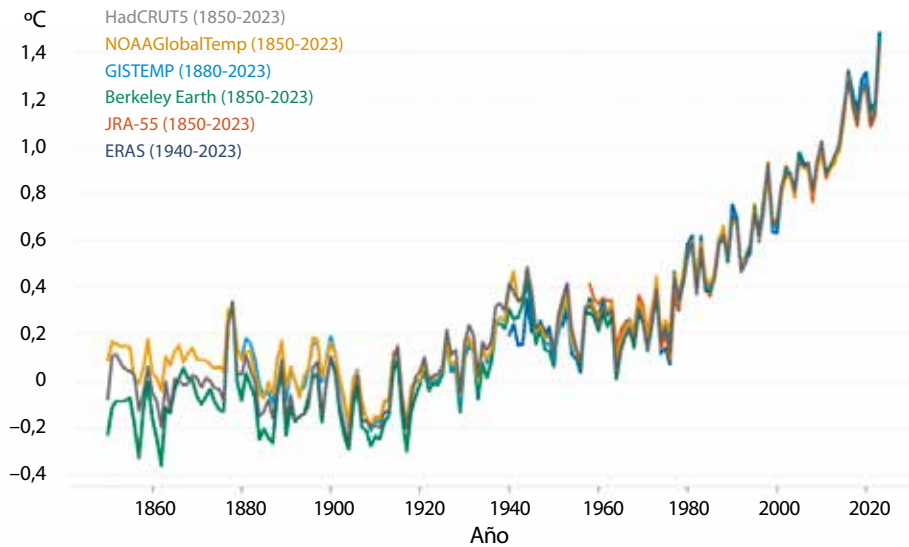


Figura 4. Situación mundial de los once indicadores globales de seguimiento de los avances hacia el ODS-6. En la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, los países se han comprometido a hacer un seguimiento y una revisión sistemáticos de los avances hacia la consecución de los objetivos y las metas, utilizando para ello un conjunto de indicadores mundiales. Tal como indica Naciones Unidas, para algunos indicadores no existen suficientes datos nacionales disponibles que permitan hacer una estimación mundial. Ilustración de UN-Water (UN-Water, 2024).

En cuanto al incremento de la temperatura a nivel mundial, seis de los principales conjuntos de datos internacionales utilizados para el seguimiento de las temperaturas globales (véase la Figura 5) y consolidados por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) muestran que la temperatura media anual global se situó $1,45 \pm 0,12^{\circ}\text{C}$ por encima de los niveles preindustriales (1850-1900) en 2023 (Organización Meteorológica Mundial, 2024).

Se trata de un dato cuanto menos inquietante porque el «Acuerdo de París sobre el cambio climático pretende limitar el aumento de la temperatura a largo plazo —promediado a lo largo de décadas y no de un año concreto como 2023— a no más de 1,5 °Celsius por encima de los niveles preindustriales» (Organización Meteorológica Mundial, 2024).

Figura 5. Incremento de la temperatura a nivel mundial comparada con los niveles preindustriales. Se muestran seis de los principales conjuntos de datos internacionales utilizados para el seguimiento de las temperaturas globales. Ilustración de la Organización Meteorológica Mundial (Organización Meteorológica Mundial, 2024).

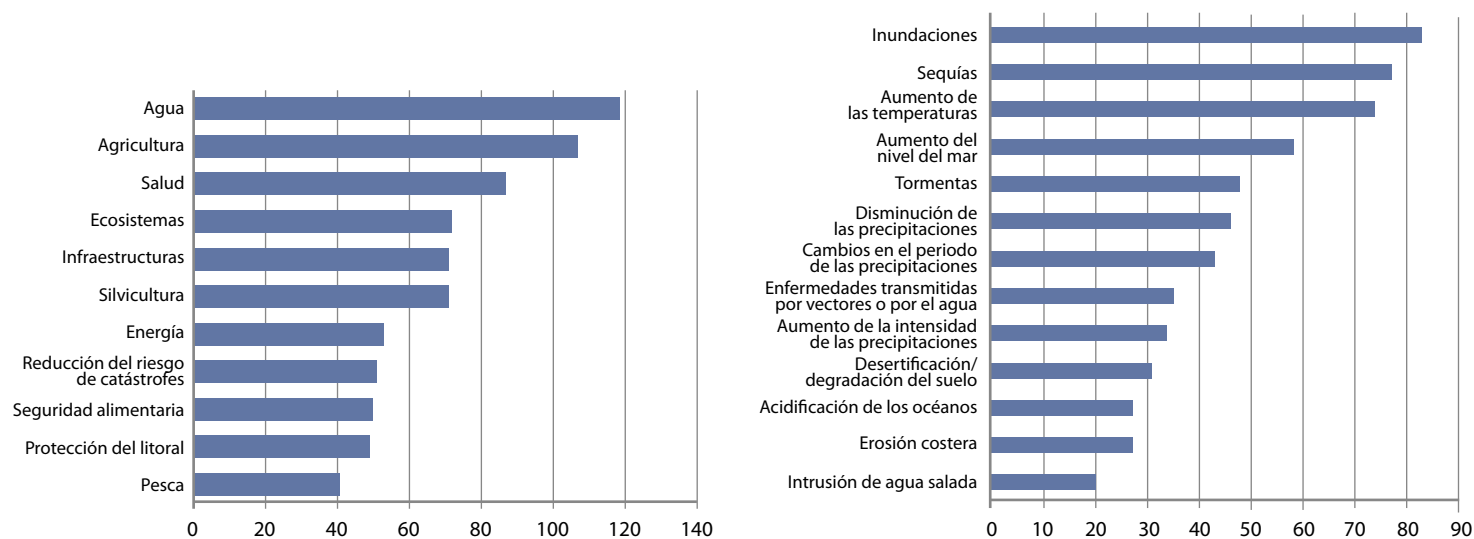


Todo esto significa que todavía no avanzamos a la velocidad ni a la escala necesarias para alcanzar las metas establecidas para el desarrollo sostenible. Este escenario sugiere que las acciones encaminadas a la adaptación, que hasta ahora no han tenido el suficiente interés ni la adecuada financiación —la abrumadora mayoría de la financiación mundial se destina a la mitigación—, empiezan a ser una tarea urgente que debemos acometer. Cabe resaltar que la mitigación tiene un ámbito global y la adaptación una escala local.

Normalmente, los cambios se producen a continuación de los avances tecnológicos, pero en el caso del cambio climático ocurre lo contrario. Primero está ocurriendo el cambio y las soluciones tecnológicas van rezagadas. En muchos casos se están dando soluciones tradicionales, y lo que realmente necesitamos son avances disruptivos que aumenten la biocapacidad del planeta y que disocien progresivamente el desarrollo de la sobreexplotación de recursos.

Aunque el cambio climático no afecta a todos los lugares de la misma manera, ni todos los países tienen las mismas necesidades o el mismo nivel de desarrollo, la mayoría de los gobiernos han reconocido el agua y sus sectores relacionados como riesgos climáticos clave y como opciones de adaptación prioritarias (UNFCCC, 2016). Las acciones prioritarias en materia de agua para la adaptación propuestas por estos países (véase la Figura 6) tienen que ver principalmente con las relacionadas con la gestión y

la gobernanza (70 %), el desarrollo de infraestructuras (68 %), la gestión de los recursos hídricos (63 %) y las medidas de conservación de ecosistemas e infraestructuras (51 %) (Global Water Partnership, 2018).



No obstante, la adaptación también está sujeta a límites distintos de los propiamente físicos, me refiero a los límites del conocimiento, la gobernanza y la financiación. Sin estos tres pilares será difícil garantizar la seguridad hídrica para las actividades socioeconómicas y los ecosistemas, o una asignación justa del agua o avanzar en las medidas de adaptación.

El conocimiento incluye tanto la formación como la información, y el conocimiento no solo científico. Hay que reconocer el valor de otras formas del conocimiento —como el de los pueblos o indígena, el autóctono o el de la ciencia ciudadana— para comprender y evaluar los procesos y acciones de adaptación. Estos pueden incorporarse mediante la participación ciudadana en los procesos de participación pública de los proyectos. Además, esta participación puede facilitar la concienciación, aumentar la percepción del riesgo e influir en los comportamientos.

Sin embargo, no hay que olvidar que es la ingeniería la que tiene un cometido destacado en todas las acciones que hay que acometer, ya que esta es la que materializa o hace realidad el conocimiento poniéndolo al servicio de la sociedad. Hoy en día, la ingeniería necesita urgentemente tener una voz más fuerte en la escena del agua, para recordar a la sociedad y a los políticos la importancia de nuestra contribución. Con este objetivo, la World Federation of Engineering Organizations (WFEO) estableció, a instancias del Instituto de la Ingeniería de España y de la Ordem dos Engenheiros de Portugal, el Comité Técnico Permanente del Agua, que tengo el honor de presidir y cuya actividad

Figura 6. El gráfico de la izquierda refleja las áreas y sectores prioritarios para las acciones de adaptación identificadas por los distintos países. El sector principal es el agua, y el resto de las áreas están indirectamente relacionadas con el agua, excepto la reducción del riesgo de desastres, vinculada al agua directamente. El gráfico de la derecha muestra los principales riesgos climáticos identificados en el componente de adaptación. Casi todos ellos están relacionados directa o indirectamente con el agua, excepto las altas temperaturas. Ambos gráficos indican el número de países que se refieren a cada sector. Fuente: (UNFCCC, 2016).

engloba todas las iniciativas de la WFEO en el ámbito del agua y sus relaciones con los organismos y agencias de Naciones Unidas, principalmente con la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) y con ONU-Agua, organismo del que recientemente hemos obtenido el estatus de *partner*.

La WFEO es la organización mundial de la profesión de ingeniero. Fundada en 1968, bajo los auspicios de la UNESCO, reúne a instituciones nacionales de ingeniería de unos 100 países y representa a más de 30 millones de ingenieros. La WFEO tiene vinculación con distintas agencias de la ONU y con organismos intergubernamentales.

El objeto de este artículo es, precisamente, señalar aquellas alternativas de adaptación al cambio climático en el ámbito del agua que la ingeniería puede aportar a la sociedad, pero antes de identificar estas medidas de adaptación es necesario conocer los distintos escenarios de cambio a los que nos enfrentamos. Este asunto se trata de forma muy generalista en el apartado «Agua y cambio climático», donde se resumen los principales efectos directos e indirecto del cambio climático en el agua.

Las principales medidas de adaptación se describen en el apartado «Agua, adaptación e ingeniería». Para una mayor facilidad de comprensión, se han agrupado en tres categorías: medidas de adaptación relacionadas con la oferta-demanda de agua, fenómenos meteorológicos extremos, y medidas relacionadas con la subida del nivel del mar. Todas se explican con carácter divulgativo, aunque otros autores hablen de algunas de ellas con más detalle y ejemplos a lo largo de este libro.

Dado que cada país y cada región difieren en historia, en condiciones socioeconómicas, en contexto cultural y político y en características medioambientales, no existe un modelo único de adaptación. No obstante, todos ellos deben abordarse desde una perspectiva basada en los derechos humanos y teniendo siempre presentes a los colectivos más vulnerables, no dejando a nadie atrás.

AGUA Y CAMBIO CLIMÁTICO

El ciclo del agua es una parte esencial del clima y, por tanto, de su cambio; así pues, como conector climático, existe un solapamiento entre los retos hídricos y los climáticos. Según las pruebas existentes, es probable que la influencia humana haya afectado al ciclo global del agua desde 1960 (Stocker, *et al.*, 2013).

Aunque la cantidad total de agua —la suma de los estados sólido, líquido y gaseoso— se ha mantenido constante durante millones de años, el cambio climático alterará su distribución actual en términos físicos, espaciales y temporales.

La Tierra se ha ido calentando debido a un incremento en el balance energético —energía entrante menos energía saliente—, calor que ha sido absorbido por los océanos (93 % considerando toda la profundidad oceánica y cerca del 64 % considerando solo la capa

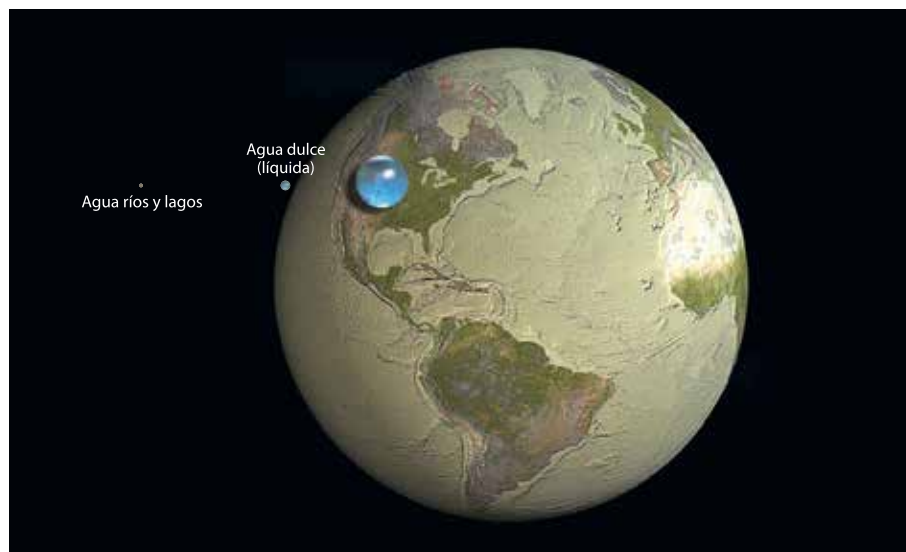


Figura 7. Las esferas azules representan las cantidades relativas de agua terrestre en comparación con el tamaño de la Tierra. El volumen de la esfera más grande representa la cantidad total de agua dentro, sobre y encima de la Tierra (1.385 km de diámetro). La esfera de agua dulce (líquida) representa las aguas subterráneas, los pantanos, los ríos y los lagos (272,8 km de diámetro). La esfera más pequeña representa el agua de ríos y lagos (56,2 km de diámetro). Imagen basada en una ilustración del U.S. Geological Survey (Perlman, Cook, Hole, Woods, & Nieman, 2016).

superior -0 a 700 m-), el deshielo (3 %), el calentamiento continental (3 %) y el calentamiento atmosférico (1 %).

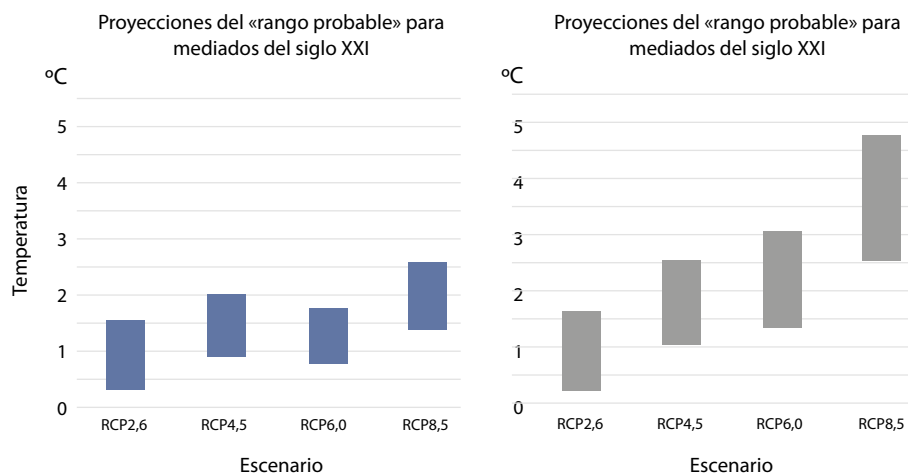


Figura 8. Proyecciones de «rango probable» de la temperatura media global del aire para mediados (2046-2065) y finales (2081-2100) del siglo XXI, en relación con el periodo de referencia 1986-2005. Los escenarios de «rango probable» mostrados son medias globales, por lo que las tendencias pueden ser más atenuadas o pronunciadas dependiendo de la ubicación geográfica. Fuente: gráfico realizado a partir de los datos del informe del IPCC de 2013 (Stocker, *et al.*, 2013).

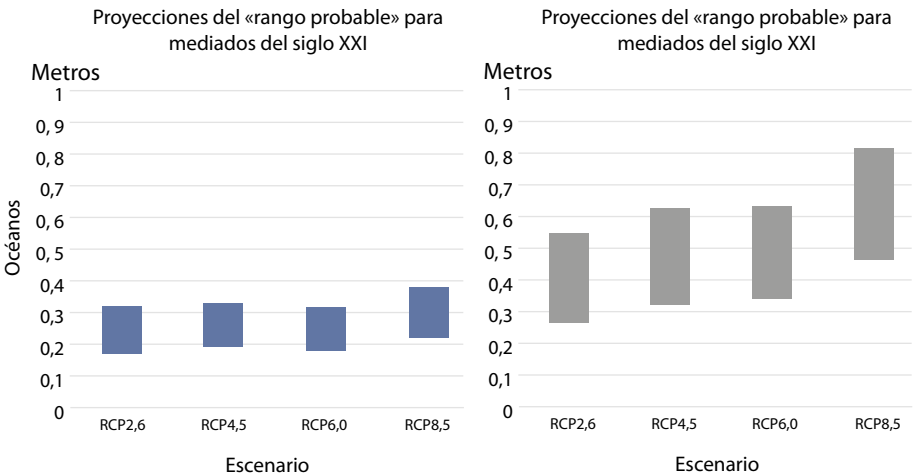
Esto ha provocado que la temperatura media global de la superficie terrestre haya aumentado desde finales del siglo XIX, concretamente 0,89°C durante el periodo 1901-2012. La zona de la atmósfera en la que tienen lugar los procesos meteorológicos y climáticos (troposfera) también se ha calentado, produciendo un aumento de la cantidad de vapor de agua en ella, tanto sobre la tierra como sobre los océanos. Cabe señalar que, con cada

grado adicional de temperatura del aire, la atmósfera puede contener aproximadamente un 7 % más de vapor de agua. Teniendo esto en cuenta, el aumento previsto de la cantidad media de vapor de agua en la atmósfera se sitúa entre el 5 % y el 25 % para finales del siglo XXI (Stocker, *et al.*, 2013), lo que aumentará a largo plazo las precipitaciones a escala mundial. Este aumento será de entre el 1 y el 3 % por cada grado centígrado (Stocker, *et al.*, 2013), lo cual no significa necesariamente una mayor disponibilidad de agua —la escasez de agua puede deberse a la limitación de las fuentes, a la falta de infraestructuras, al aumento de la demanda, a la falta de otros tipos de recursos o incluso a retos institucionales, entre otros—.

En general, estas precipitaciones serán más intensas y frecuentes, generando más inundaciones; sin embargo, habrá periodos secos más largos entre los episodios de lluvia, lo que provocará más sequías. La variación espacial de las precipitaciones será significativa: en algunas regiones aumentarán, en otras disminuirán y en otras no habrá cambios significativos. Los escenarios descritos favorecerán los procesos de eutrofización y el aumento de las concentraciones de contaminantes. La reducción del oxígeno disuelto en las aguas, debido al aumento de la temperatura y a los procesos de eutrofización, pondrá en peligro las condiciones de vida de numerosas especies acuáticas. Asimismo, el aumento de las lluvias torrenciales irá acompañado del arrastre de sedimentos y contaminantes (Ministry for Ecological Transition and the Demographic Challenge, 2020).

El cambio climático también afecta a la criosfera y al nivel del mar, que subirá principalmente debido al aumento del volumen del mar por la expansión térmica y el deshielo de los glaciares. La contribución de la expansión térmica al aumento del nivel del mar es del 30 % al 50 % del total y la de los glaciares del 15 % al 35 %. (Stocker, *et al.*, 2013).

Figura 9. Proyecciones de «rango probable» de la subida media global del nivel del mar para mediados (2046-2065) y finales (2081-2100) del siglo XXI, en relación con el periodo de referencia 1986-2005. Los escenarios de «rango probable» mostrados son medias globales, por lo que las tendencias pueden ser más atenuadas o pronunciadas dependiendo de la ubicación geográfica. Fuente: Gráfico realizado a partir de los datos del informe del IPCC de 2013 (Stocker, *et al.*, 2013).



La expansión térmica del océano puede oscilar entre 0,2 y 0,6 m por grado centígrado.

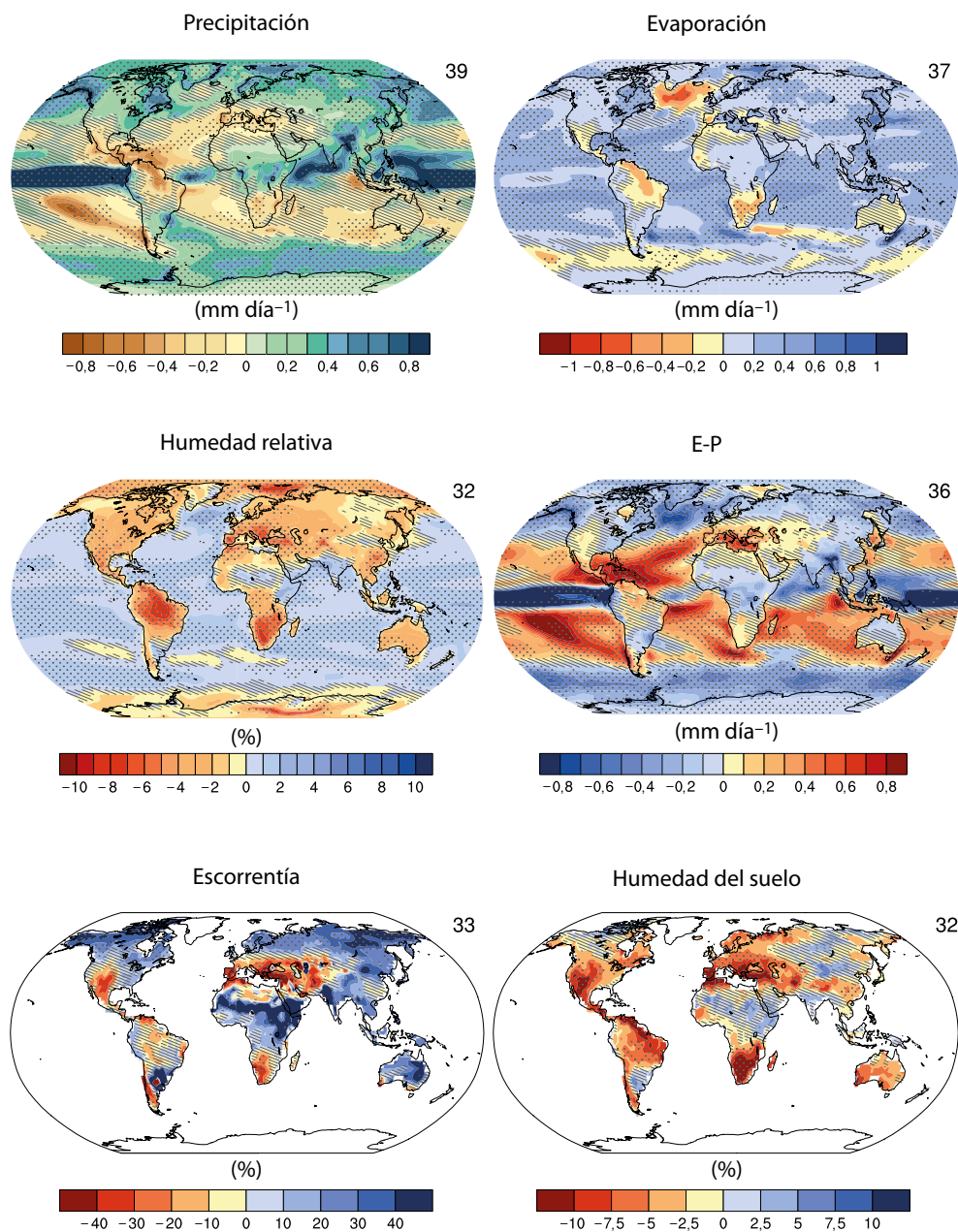


Figura 10. Cambios medios anuales en precipitación (P), evaporación (E), humedad relativa, E-P, escurrentía y humedad del suelo para 2081-2100 en relación con 1986-2005 bajo la Senda de Concentración Representativa RCP8.5. Ilustración del informe del IPCC, 2013 (Stocker, *et al.*, 2013).

A causa de la lenta transferencia de calor de la superficie oceánica a las aguas profundas, el calentamiento del océano seguirá produciéndose durante siglos. A finales del siglo XXI, se espera que el 50 % de la energía sea absorbida en los primeros 700 metros de profundidad y el 85 % en los primeros 2.000 metros. En cambio, la contribución del deshielo de los glaciares —cuyo volumen equivalente actual corresponde a 0,43 m del nivel del mar— a la subida del nivel del mar disminuirá con el tiempo a medida que disminuya su volumen (Stocker, otros, 2013).

En el Anexo Uno (1) de este artículo se presentan unas tablas que resumen los principales efectos a corto y largo plazo del cambio climático sobre los elementos relacionados con el agua descritos en diversas publicaciones del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). A largo plazo son más relevantes los forzamientos externos, y a corto plazo, las inercias actuales.

Hay que señalar que existen incertidumbres en las estimaciones de estos efectos en estas publicaciones, tanto en los escenarios de desarrollo como en los modelos y la escala. Además, las interacciones entre la energía, la tierra, el agua y la biodiversidad son cada vez más complejas. Esto significa que las tendencias climáticas y sus efectos, aunque claros a escala mundial, tienen un mayor grado de incertidumbre cuando se pasa a una escala regional, de cuenca o local. Por lo tanto, el reto está en saber gestionar la incertidumbre a nivel local, ya que puede afectar de forma diferente a los territorios y las poblaciones. Todo ello añade más complejidad al campo de la gestión de los recursos hídricos.

AGUA, ADAPTACIÓN E INGENIERÍA

El cambio climático afecta a distintos sectores, pero el del agua es prioritario a la hora de emprender medidas de adaptación. En esta sección se presentan medidas que la ingeniería puede aportar para adaptarse a los impactos climáticos previstos sobre el agua, aunque algunas de ellas pueden producir importantes resultados de mitigación. Estas estrategias se agrupan en tres áreas. La primera está relacionada tanto con la oferta —la obtención del recurso— como de la demanda —el usuario del recurso—. Es importante precisar que el término «demanda» hace referencia a todos los seres vivos y sus ecosistemas, y no solo a los seres humanos. La gestión de los recursos debe realizarse desde un punto de vista holístico e integrador. No hay que olvidar que los ecosistemas naturales son la base del abastecimiento de agua, por lo que la protección y la regeneración de los recursos hídricos debe ir de la mano de la protección y restauración de la biodiversidad y de los servicios ecosistémicos que los sistemas hídricos prestan a la sociedad.

Además de este enfoque oferta-demanda, se abordan también las estrategias de adaptación relacionadas con los fenómenos meteorológicos extremos y la subida del nivel del mar.

Como se ha comentado anteriormente, existe incertidumbre a nivel local sobre los efectos del clima en el ciclo del agua, aunque las tendencias globales son claras. En el escenario de incertidumbre parece razonable tomar primero aquellas medidas independientes del cambio climático o que generen beneficios colaterales, o incluso aplicar medidas de adaptación de forma escalonada, gradual o por fases. Estas medidas se denominan en algunos estudios *no regrets* (sin arrepentimiento) o *low regrets* (de bajo arrepentimiento). Sin embargo, esta terminología no parece muy apropiada, ya que una medida tomada en el marco de una planificación adecuada nunca puede considerarse *regrets* (de arrepentimiento). La incertidumbre relacionada con los escenarios futuros obliga a hacer todo lo posible por adoptar enfoques flexibles o resilientes, así como a centrarse en medidas a corto plazo y de baja incertidumbre.

Las medidas de adaptación deberían someterse en la medida de lo posible a un análisis coste-beneficio —entendiendo por *beneficio* no solo el económico, sino también el social y el medioambiental—. En todo caso, serían prioritarias las acciones dirigidas a un uso más eficiente del agua, la diversificación en las fuentes de recursos, la mejora del estado de las masas de agua y de los ecosistemas acuáticos, la mejora de la conectividad ecológica, la adaptación de las infraestructuras hidráulicas a los nuevos escenarios y la eficiencia energética, incorporando también las energías renovables al esquema conjunto de uso del agua.

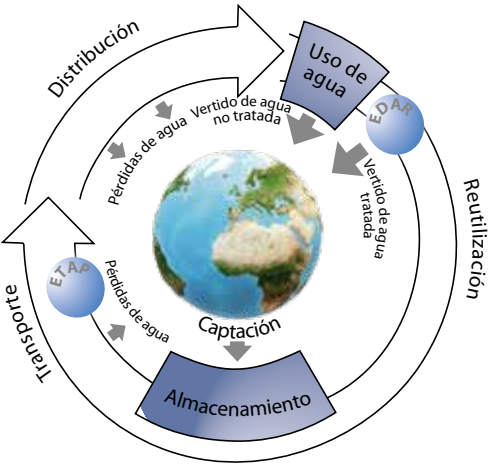
A continuación, se describe cada una de estas medidas, ya sean estructurales o no estructurales. Las primeras abarcan tanto las denominadas —no muy acertadamente— «infraestructuras grises» como las verdes y azules. Es importante destacar las «soluciones basadas en la naturaleza», no son más que soluciones tradicionales, ya aplicadas con anterioridad por diferentes disciplinas de la ingeniería, en las que un mayor conocimiento técnico y científico de los comportamientos naturales ha permitido una mejor comprensión de los ecosistemas y, por tanto, de las funciones que desempeñan. Esto permite diseñar propuestas ambientalmente más ventajosas y con un mayor grado de certeza sobre su eficacia y su eficiencia; es decir, un mayor grado de seguridad en sus resultados. Este tipo de actuaciones funcionan cuando las condiciones ambientales son adecuadas para un ecosistema determinado. La colaboración transversal entre distintas disciplinas de la ingeniería ha facilitado el uso de estas soluciones.

MEDIDAS DE ADAPTACIÓN RELACIONADAS CON LA OFERTA Y LA DEMANDA DE AGUA

La oferta de agua es la cantidad de este recurso, aportada por diferentes fuentes, existente en una región o cuenca durante un periodo de tiempo determinado. Los seres humanos extraen parte de esta agua para satisfacer su demanda, tanto para el abastecimiento como para la producción de alimentos, bienes y servicios —actividades sociales y económicas—.

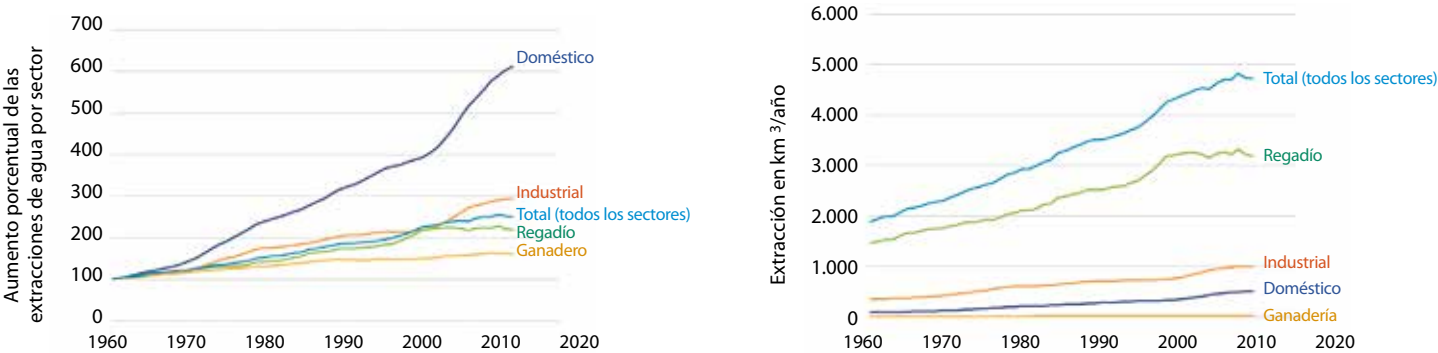
El agua extraída —recursos convencionales y no convencionales— es almacenada, transportada, tratada y distribuida hasta el lugar de demanda, aunque durante este recorrido se producen pérdidas o fugas y procesos que devuelven el agua al sistema, pero no a su lugar de origen ni con la misma calidad. Una vez consumida o utilizada, el agua puede volver al sistema contaminada o ser tratada para devolverla en condiciones ambientalmente aceptables incluso para un uso posterior (reutilización). Es lo que se llama «economía circular del agua» (véase Figura 11).

Figura 11. Ciclo del uso humano de los recursos hídricos desde su extracción hasta su devolución al medio ambiente (ETAP: Estación Depuradora, EDAR: Estación de Tratamiento de Aguas Residuales). Fuente: Elaboración propia.



En los diferentes escenarios indicados en el apartado anterior, el cambio climático afectará al suministro de agua en términos de disponibilidad, cantidad y calidad. La demanda se verá afectada principalmente por el aumento de la población mundial y las pautas de consumo del actual modelo de desarrollo. No hay que olvidar que la extracción de agua para uso doméstico ha aumentado más de un 600 % en los últimos 50 años (véase Figura 12), y se prevé que la necesidad de agua en 2030 sea un 50 % superior a la actual (World Resource Institute, 2020).

Figura 12. Evolución de las extracciones de agua por sectores (doméstico, industrial, ganadero y regadío) desde 1960. Fuentes: WRI-Aqueduct (World Resource Institute, 2020).



El equilibrio entre una oferta reducida en cantidad y calidad y una demanda creciente solo puede lograrse mediante una planificación adecuada y una gestión integrada de los recursos hídricos y del territorio (GIRH) (véase Figura 13), aunque solo una cuarta parte de los países que planifican medidas de adaptación relacionadas con el agua han adoptado o priorizado este enfoque de gestión integrada de los recursos hídricos (Global Water Partnership, 2018).

La GIRH es un concepto político intersectorial concebido para sustituir el enfoque sectorial tradicional y fragmentado de los recursos hídricos y su gestión, que a menudo ha dado lugar a servicios deficientes y a un uso insostenible de los recursos. La GIRH se basa en la idea de que los recursos hídricos son un componente integral del ecosistema, un recurso natural y un bien social y económico, y que los múltiples usos de unos recursos hídricos limitados son interdependientes.

Se han identificado siete medidas de adaptación que la ingeniería puede aportar para permitir aumentar la cantidad de recursos y mejorar su calidad desde el lado de la oferta. Desde el lado de la demanda, se proponen cinco medidas centradas en un uso más eficiente del agua. En la Figura 14, se indican estas medidas, si bien, en el Anexo Uno (2) se incluyen unas tablas que profundizan en cada una de ellas. No obstante, quisiera resaltar algunos aspectos que creo relevantes.

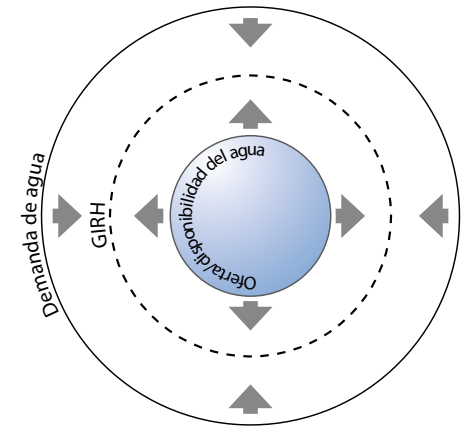


Figura 13. Solo una gestión integrada de los recursos hídricos y del territorio (GIRH) que sea participativa y tenga en cuenta los efectos del cambio climático optimizará la relación oferta/demanda. Fuente: elaboración propia.

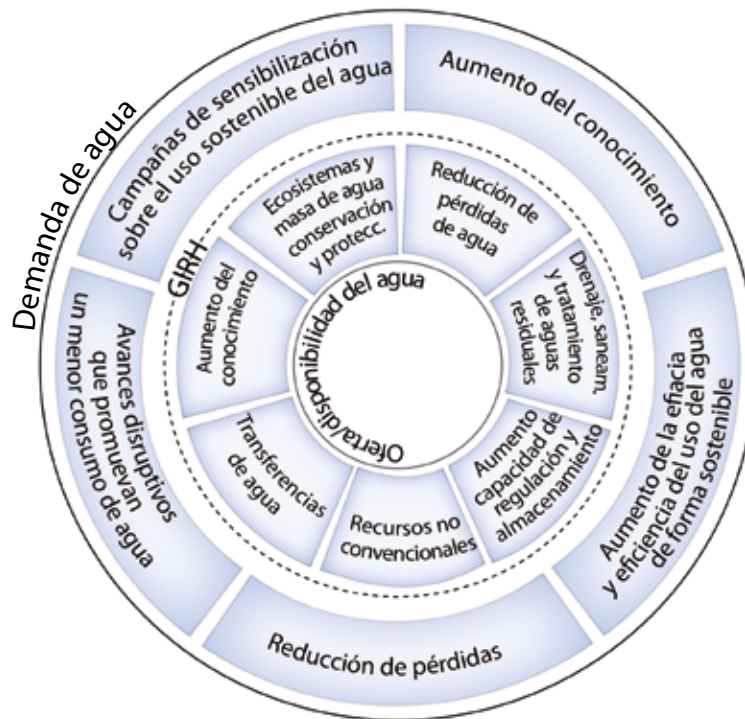
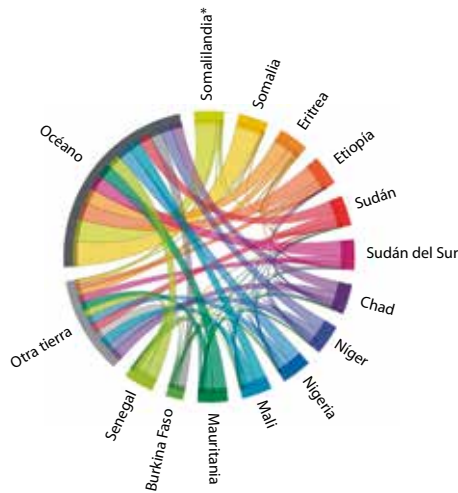


Figura 14. El punto de equilibrio entre la oferta y la demanda de agua se alcanza en el marco de una gestión integrada de los recursos hídricos y del territorio (GIRH). Las medidas de adaptación que puede aportar la ingeniería son un total de doce: siete corresponden a medidas centradas en el aumento de los recursos (aumento de la oferta), y cinco están destinadas a fomentar la eficiencia del uso del agua (disminución de la demanda). Fuente: Elaboración propia.



* Somalilandia es una región autónoma de Somalia, sujeta al Gobierno Federal Somalí.

Figura 15. Fuentes de precipitación o cuencas atmosféricas para la región del Sahel. La anchura del flujo corresponde a la fracción de precipitación recibida en el país/territorio. El color de un flujo corresponde al país/territorio en el que ese flujo de humedad cae en forma de precipitación. Cuando dos países/territorios intercambian humedad entre sí, el color de ese flujo corresponde al país con la mayor fracción (neta) recibida como precipitación. Empezando por el océano, los países/territorios se enumeran en el sentido de las agujas del reloj, de Este a Oeste. Fuente: ilustración del WWDR (WWAP (United Nations World Water Assessment Programme)/UN-Water, 2018).

Con los sistemas de información y análisis —datos satelitales, redes de comunicación, estaciones meteorológicas, sistemas de información sobre calidad del agua, análisis de *big data*, inteligencia artificial, etc.—, un mayor conocimiento contribuye a una mejor gestión de la incertidumbre, una mayor exactitud en las predicciones y, por lo tanto, un apoyo a la toma de decisiones temprana, especialmente en episodios de contaminación, fenómenos meteorológicos extremos, sobreexplotación de acuíferos, riego de cultivos, etc.

Los modelos hidrológicos del pasado ya no parece que sean guías precisas para la formulación de políticas del agua. Un mejor conocimiento de los usos del agua —información sobre el consumo real, las pérdidas en la red, la evaporación, los rendimientos del riego, etc.— y los datos que proporcionan estos sistemas de información permiten mejorar el análisis y la formulación de nuevas políticas. La cuenca hidrográfica como unidad se ajusta mejor a la gestión de las aguas, pero los nuevos conocimientos han sacado a la luz las «cuenas atmosféricas», también conocidas como «cuenas de precipitación» (véase Figura 15).

La protección y la conservación de humedales, meandros, riberas, masas de agua superficiales y subterráneas, la eliminación de vegetación invasora no autóctona y el mantenimiento de todas las infraestructuras naturales en su origen son fundamentales para una mejor calidad y cantidad del recurso. Estas medidas de protección y conservación deben estar claramente incentivadas para determinar los precios del agua —quien contamina paga— y la protección estratégica del territorio.

Se ha mencionado anteriormente que, cuando existe incertidumbre sobre el efecto del cambio climático en los recursos hídricos, es conveniente aplicar medidas que no causen un «arrepentimiento» posterior; es decir, que consigan beneficios independientemente del cambio climático. Entre estas medidas están las encaminadas a la reducción de las pérdidas de agua, la mejora del drenaje, las redes de saneamiento y el tratamiento de las aguas residuales. Como soluciones posibles cabe mencionar los filtros verdes y el drenaje urbano sostenible —cubiertas verdes, pavimentos permeables, etc.—. Este último permite, mediante evapotranspiración o infiltración, reducir la escorrentía superficial y, de este modo, una reducción de los tratamientos del agua —si se incorpora a la red de alcantarillado—, o una disminución de la contaminación —si no se trata—.

Para que todo el mundo tome conciencia de la magnitud del problema, hay que subrayar que, en todo el mundo, las pérdidas en las redes de abastecimiento de agua potable ascienden a 130 km³ al año (International Water Association). Otros organismos estiman que las pérdidas en estos sistemas urbanos ascienden a 50 km³ al año, cifra inferior pero aún extremadamente elevada (Kingdom, Liemberger, & Marin, 2006).

Asimismo, a nivel mundial, alrededor del 60 % de la población está conectada a un sistema de alcantarillado, 4.200 millones de personas carecen de un saneamiento gestionado de forma segura y cerca del 80 % de las aguas residuales se vierten al medio ambiente sin un tratamiento adecuado (WWAP-United Nations World Water Assessment Programme-, 2017). Todo esto origina que la descomposición de los residuos

acumulados en las aguas residuales represente el 1,3 % de las emisiones de gases de efecto invernadero. Se calcula que cada año se producen 380 km³ de aguas residuales en todo el mundo y se espera que aumenten a 470 km³ en 2030 y a 575 km³ en 2050 (UN-Water, 2020). A la vista de estos datos, parece que la mejora de estos servicios es independiente del cambio climático. Solo desde el punto de vista de la salud humana y el medio ambiente, esta acción es prioritaria.

La tendencia indicada por los diferentes modelos de predicción del cambio climático muestra la necesidad de una mayor capacidad de regulación y una mayor movilización de los recursos hídricos. La capacidad de almacenamiento y regulación es importante para incrementar la oferta y disponer del recurso cuando la demanda lo requiera. La recogida de agua de lluvia —técnicas de microrrecogida, recogida fuera del emplazamiento, cultivo en terrazas, tejados, etc.—, los embalses, la construcción o restauración de humedales, la recarga de acuíferos y las aguas subterráneas son las bases principales de esta medida. En cuanto a los embalses, algunos estudios indican que son una fuente importante de generación de gases de efecto invernadero. Esta afirmación debe analizarse caso por caso y no tratarse como algo generalizado, ya que depende de la carga orgánica presente en los ríos y de las medidas de eliminación de vegetación que se hayan llevado a cabo antes del llenado del embalse. Además, si se produce, lo hace durante el periodo de maduración del embalse.

En determinadas situaciones las transferencias de agua son imprescindibles porque no existe otra alternativa; sin embargo, si no se acometen en el marco de un consenso, pueden generar conflictos sociales y políticos entre los territorios de las cuencas cedente y receptora. Instintivamente, las transferencias de recursos hídricos se asocian a trasvases de agua, porque el agua se transporta de un lugar a otro de forma directa y visible. Esta transferencia también puede realizarse de muchas otras formas a través de importación y exportación de productos, bienes y servicios (agua virtual) (véase Figura 16).

Los recursos no convencionales, como la reutilización o regeneración, la desalinización del agua de mar o salobre o la captación de agua atmosférica, están cada vez más extendidos en las regiones con escasez de agua. En algunas ocasiones estos nuevos recursos permiten liberar otros recursos y diversificar las fuentes. La reutilización y la desalinización del agua han sido tradicionalmente aguas caras, debido sobre todo a los costes del consumo energético empleado en el proceso, pero en los últimos años las nuevas tecnologías han cambiado este aspecto sustancialmente, permitiendo un uso más extendido de estos nuevos recursos, como en la agricultura de alto valor añadido.

Teniendo en cuenta que más de 600 millones de personas —alrededor del 10 % de la población mundial— viven en zonas costeras que están a menos de 10 metros sobre el nivel del mar y que casi 2.400 millones de personas —alrededor del 40 % de la población mundial— viven a menos de 100 km, parece que la desalinización seguirá siendo un recurso indispensable en el futuro (UN, 2017).

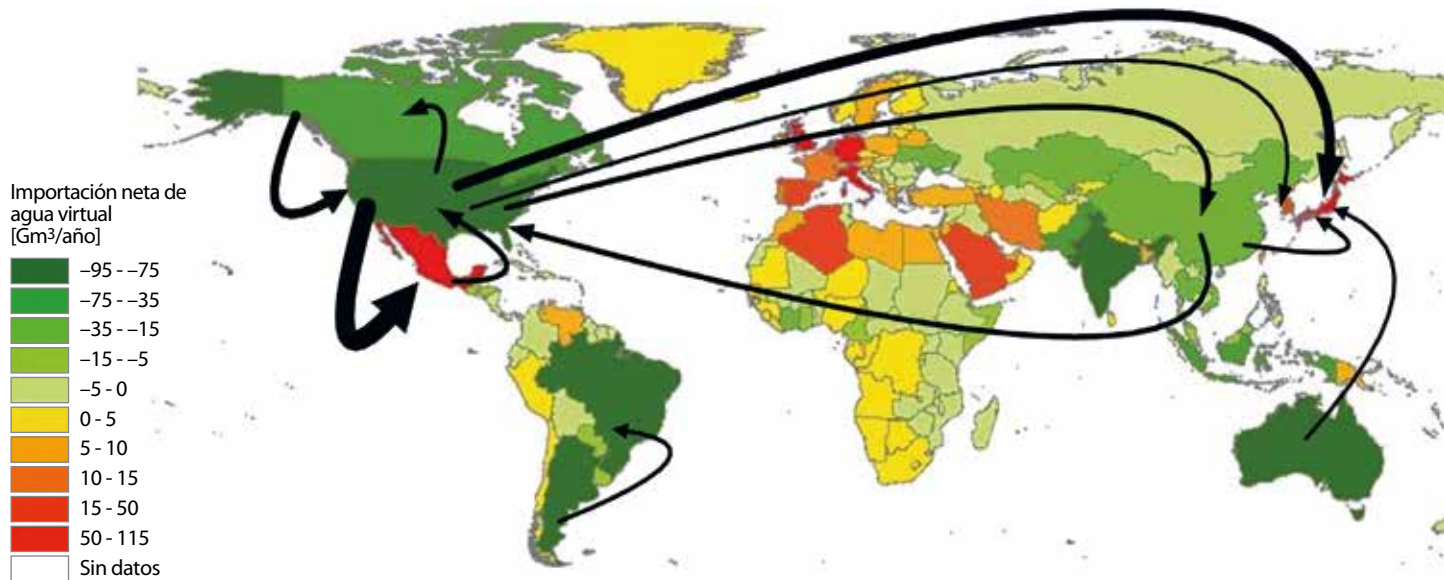


Figura 16. Balance de agua virtual por país y dirección de los flujos brutos de agua virtual relacionados con el comercio agrícola e industrial durante 1996-2005. Solo se muestran los mayores flujos brutos (> 15 Gm³/año); cuanto más ancha es la flecha, mayores son los flujos de agua virtual (Mekonnen & Hoekstra, 2011).

Todas estas medidas deben de ir acompañadas de la puesta en marcha de campañas de sensibilización sobre el uso sostenible del agua, tarea en la que los ingenieros también debemos participar activamente. Hay que aumentar la eficacia y eficiencia del uso del agua, tanto en los procesos industriales como en los cultivos —modernización del regadío, desarrollo de cultivos resistentes a la sequía, la salinidad y las plagas, etc.— para incrementar la productividad del recurso —téngase en cuenta que más del 70 % del agua consumida se destina a la agricultura—.

Una última medida, y quizá la más importante, son todos aquellos avances que permitan desvincular el desarrollo del uso del agua o cambios disruptivos que promuevan un menor consumo de agua o uso más eficiente. Estos avances liberarán recursos y garantizarán que el agua no sea un factor limitante para el desarrollo —que con el aumento previsto de la población requerirá más alimentos y bienes—. Algunos avances —nuevos materiales y energías, alimentos cultivados en laboratorio, etc.— están en una fase incipiente, pero este tipo de cambios son los que conducen a un aumento de la biocapacidad del planeta.

MEDIDAS DE ADAPTACIÓN A LOS FENÓMENOS METEOROLÓGICOS EXTREMOS

Se consideran extremos climáticos principalmente las temperaturas extremas, las olas de calor y los episodios cálidos, los valores extremos de precipitaciones y los ciclones. En el caso de algunos extremos climáticos, como las sequías, las inundaciones y las olas

de calor, deben combinarse varios factores para producir un evento extremo (Stocker, *et al.*, 2013).

Que un fenómeno meteorológico sea catastrófico no solo depende exclusivamente del valor extremo que tome el elemento climático —precipitación, temperatura, viento, presión, etc.—, sino también de otros factores, como la geomorfología de la zona afectada, la distribución de la población, el uso del suelo, las prácticas inadecuadas y las intervenciones humanas en el territorio, la ocupación de cauces y llanuras de inundación, por ejemplo. Muchos de ellos, en su mayoría provocados por razones económicas o sociales, pueden condicionar el carácter catastrófico de un fenómeno extremo de cierta frecuencia (Mata, 2001).

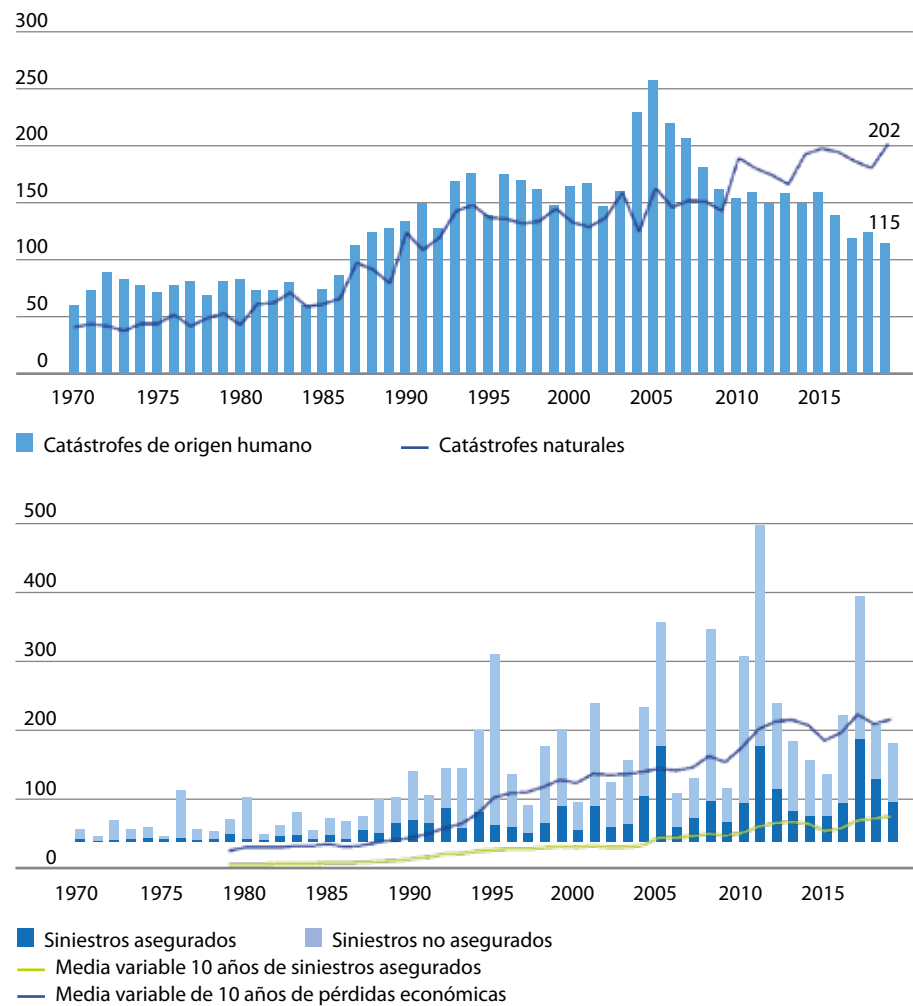


Figura 17. Número de eventos catastróficos ocurridos entre 1970 y 2019 por causas naturales y antrópicas (imagen superior) y coste de las pérdidas (miles de millones de USD, precios de 2019, imagen inferior). Fuente: Swiss Re Institute (Bevere & Gloor, 2020).

La sociedad, al realizar todas estas intervenciones, debe asumir los riesgos que estos fenómenos provocan en bienes, servicios y personas, bien mejorando las infraestructuras para resistir valores extremos de muy baja frecuencia o bien de forma pasiva contratando seguros que cubran los riesgos provocados.

Las medidas de adaptación para futuros fenómenos extremos, de mayor intensidad y frecuencia que los actuales, no varían mucho con respecto a las medidas aplicadas actualmente. Sí es cierto que tradicionalmente estos fenómenos extremos se han tratado como una situación de emergencia o crítica. En la actualidad, estas políticas están cambiando en todo el mundo, pasando de un enfoque de gestión de crisis a otro basado en la gestión de riesgos o la gestión adaptativa.

La ingeniería desempeña un papel importante en la estimación del tiempo de ocurrencia de los fenómenos naturales, las zonas afectadas, los riesgos y los daños potenciales, la definición de acciones de adaptación, las mejores opciones de evacuación a zonas no afectadas, así como para garantizar el uso esencial del agua y limitar el impacto de las sequías y desarrollar planes de gestión de riesgos.

La Federación Mundial de Organizaciones de Ingenieros elaboró en 2019 el documento *Buenas prácticas en la gestión de sequías e inundaciones: contribución de los ingenieros* (Estrela & Sancho, 2019). Este documento enumera varias medidas de adaptación, como puede verse en la selección recogida el Anexo Uno (3).

Una de las principales incertidumbres de estos fenómenos es la falta de conocimiento del futuro escenario hidrometeorológico. La tecnología y la innovación son esenciales en este sentido, así como para la evaluación y gestión de riesgos. Las medidas estructurales ante estos fenómenos tienen que ver con la realización de obras de infraestructura que afectan a los mecanismos de generación, acción y propagación de las crecidas, alterando sus características hidrológicas o hidráulicas. Entre ellas se encuentran las que reducen la magnitud y la frecuencia de las inundaciones, como las presas de laminación de avenidas o los canales de derivación hacia cauces alternativos o el mar. Otras medidas modifican los niveles de inundación, como terraplenes y diques y muros de protección u otras actuaciones en la sección del cauce y los tanques de tormenta. Por último, que modifican la duración de la crecida, como las obras de drenaje.

Las cuencas que albergan numerosas infraestructuras de protección contra las inundaciones han perdido en muchos casos la conexión entre los ríos y las llanuras aluviales. Las medidas de retención natural del agua intentan alcanzar los objetivos de gestión del agua restaurando la naturaleza y sus funciones. Este tipo de infraestructuras proporciona protección contra las inundaciones y generan múltiples beneficios, como el aumento de la biodiversidad o la mitigación de los gases de efecto invernadero. Entre las medidas utilizadas para el control de las inundaciones se encuentran el establecimiento de franjas de protección, la mejora de la cubierta terrestre mediante la conservación y la reforestación,

el control de la erosión mediante diques transversales, la eliminación de barreras transversales al flujo de las inundaciones y los sistemas de drenaje urbano sostenible. Cabe añadir también la creación de pequeños diques o humedales que funcionen como zonas de retención de agua.

Los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) son un enfoque alternativo del drenaje urbano basado en la contención y el almacenamiento de la escorrentía en su origen —por ejemplo, tejados, zonas impermeables, jardines, plazas, carreteras—. Estos sistemas pueden complementar las redes de drenaje convencionales y ayudar a controlar la escorrentía urbana mediante técnicas que reproducen el comportamiento de la naturaleza. Los SUDS pueden alcanzar tres objetivos: reducir el volumen total de la escorrentía infiltrando parte de ella, mejorar la calidad del agua tratando física y biológicamente la escorrentía, y atenuar y reducir los caudales punta.

Las medidas para hacer frente a los riesgos de sequía se basan en la gestión integrada de los recursos hídricos y el establecimiento de planes y medidas de gestión —asignación de recursos, ahorro de agua y transferencia/intercambio temporal de derechos de agua—, control y sistemas de alerta de sequía. Hay que destacar que las medidas medioambientales también son esenciales en situaciones de sequía.

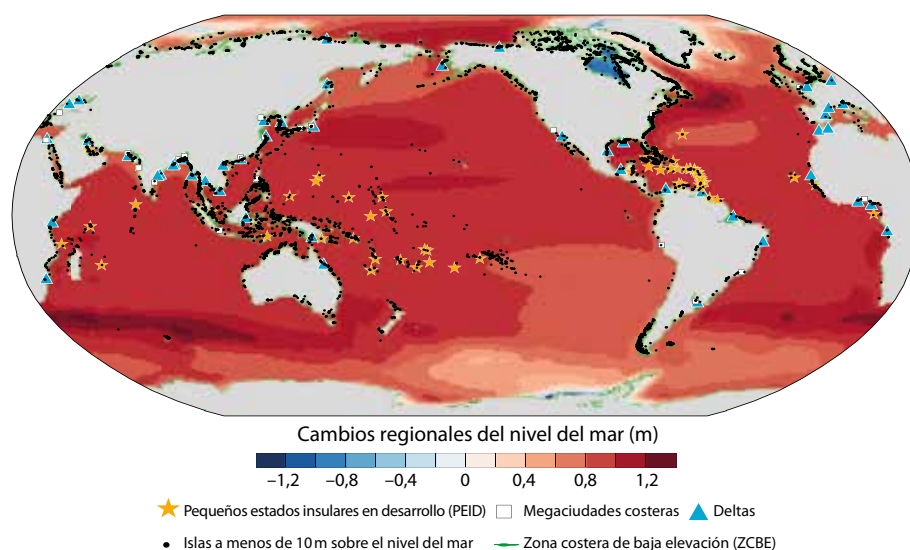


Figura 3.8. Distribución mundial de las islas y costas bajas especialmente amenazadas por la subida del nivel del mar. Este mapa tiene en cuenta las costas bajas, las islas con una elevación máxima de 10 m sobre el nivel del mar, los pequeños estados insulares en desarrollo, las megaciudades costeras (ciudades con más de 10 millones de habitantes, situadas a menos de 100 km de la costa y con una elevación máxima de 50 m sobre el nivel del mar) y los deltas. Los cambios regionales del nivel del mar se refieren a las proyecciones según el RCP8.5 (2081-2100). Fuente: ilustración del IPCC (Pörtner, *et al.*, 2019).

MEDIDAS DE ADAPTACIÓN DEBIDO A LA SUBIDA DEL NIVEL DEL MAR

Los principales riesgos causados por la subida del nivel del mar son las inundaciones, el aumento de la erosión costera, la pérdida y el cambio de los ecosistemas costeros, la salinización de los suelos, los acuíferos y las aguas superficiales, y la obstaculización del drenaje. Tienen consecuencias perjudiciales directas en la tierra y en sus usos, en los servicios de los ecosistemas costeros y marinos, así como en las personas, las actividades humanas, y los bienes y servicios.

Los ecosistemas costeros se ven afectados por la subida del nivel del mar y otros cambios oceánicos relacionados con el clima, además de por los efectos adversos de las actividades humanas en el océano y la tierra.

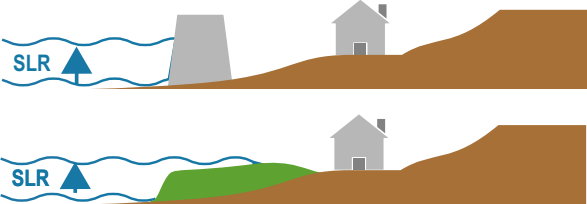
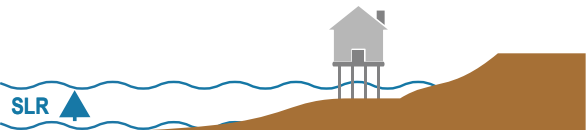
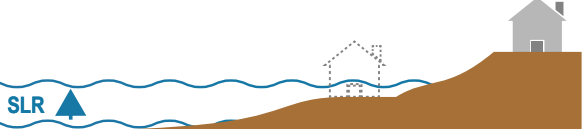
Respuestas adaptativas a la subida del nivel del mar	
Protección del litoral	
	• Protección dura, como diques, malecones, rompeolas, barreras y diques de contención. • Protección basada en los sedimentos, como la regeneración de playas y costas. • Protección basada en los ecosistemas: conservación o restauración de los ecosistemas costeros (sistemas de dunas, humedales, arrecifes, marismas y manglares).
Avance costero	
	• Ganar terreno al mar rellenándolo con arena, escollera u otro material y plantando vegetación para favorecer la acumulación natural del suelo.
Adaptación costera	
	• Nuevos códigos y materiales de construcción. • Sistemas de drenaje. • Cambios en el uso del suelo. • Sistemas de planificación, alerta precoz y emergencia. • Contratación de pólizas de seguro
Retiro o retranqueo costero	
	

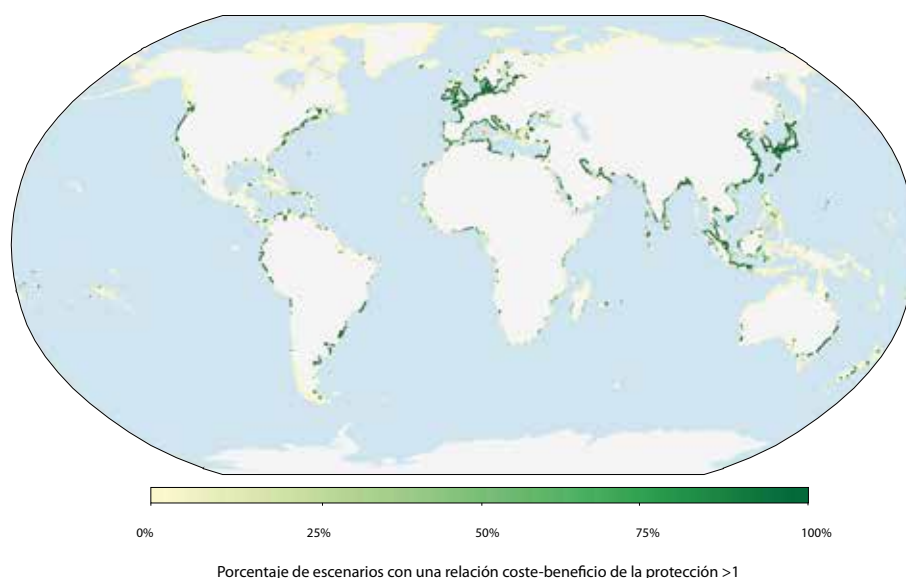
Tabla 3.9. Principales respuestas de adaptación a la subida del nivel del mar (SLR).
Fuente: elaboración propia con imágenes del informe del IPCC *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* (Pörtner, y otros, 2019).

Dado que el nivel del mar seguirá subiendo independientemente de las medidas de mitigación que se adopten y que el 10 % de la población mundial vive entre 1 y 10 metros por encima del nivel del mar, la adaptación parece ser una prioridad. Además, la capacidad de los sistemas morfológicos y ecológicos para proteger los asentamientos humanos y las infraestructuras atenuando los fenómenos de subida del nivel del mar y estabilizando las costas se pierde progresivamente debido a la reducción del espacio costero, la contaminación, la degradación y fragmentación del hábitat.

Las principales medidas de adaptación son la protección del litoral, el avance costero, la adaptación o el retroceso (véase Figura 3.9.). Todos los tipos de respuestas tienen funciones importantes y sinérgicas en la integración y la conservación de los recursos naturales.

Las medidas de protección costera impiden el flujo hacia el interior de la subida del nivel del mar, reduciendo el riesgo y los efectos perjudiciales. Lo mismo ocurre con el avance costero. Ambas medidas pueden ser rentables para las ciudades, pero no asequibles para las zonas rurales y más pobres (véase Figura 3.10.).

Los principales problemas del avance costero son la salinización de las aguas subterráneas, el aumento de la erosión y la pérdida de ecosistemas y hábitats costeros, y el crecimiento de la llanura costera inundable. A escala mundial, se calcula que en los últimos 30 años se han ganado al mar 33.700 km² de tierra —aproximadamente un 50 % más de lo que se ha perdido—.



*Figura 3.10. Solidez económica de la protección costera en escenarios de aumento del nivel del mar (SLR) de 0,3-2,0 m, las cinco Vías Socioeconómicas Compartidas (SSP) y tasas de descuento de hasta el 6%. Las costas están coloreadas según el porcentaje de escenarios en los que la relación coste-beneficio de la protección —reducción del riesgo de inundación dividido por el coste de la protección— es superior a 1. Fuente: *Protección económicamente sólida contra la subida del nivel del mar en el siglo XXI* (Lincke & Hinkel, 2019).*

Las respuestas de adaptación basadas en los ecosistemas proporcionan una combinación de beneficios de protección y avance basados en la gestión sostenible, la conservación y la restauración de los ecosistemas. Pueden reducir la erosión costera y atenuar las olas actuando como barreras y proporcionando espacio de retención. Estas soluciones funcionan cuando las condiciones ambientales son apropiadas para un ecosistema determinado y requieren una superficie mayor que las soluciones tradicionales. Cabe señalar que los manglares, las marismas saladas y los arrecifes se encuentran a lo largo del 40-50 % de las costas del mundo. Las soluciones híbridas, que combinan medidas estructurales y basada en los ecosistemas, como los bosques de manglares frente a los diques, o la construcción de mejoras ecológicas en estructuras de ingeniería, pueden ofrecer una solución eficaz.

La adaptación o acomodación tiene por objeto la habitabilidad —de la población, las actividades humanas, los ecosistemas, etc.— en las zonas costeras mediante la reducción de los riesgos y las vulnerabilidades, a pesar de los riesgos. Las medidas no son solo estructurales, sino que también pueden estar relacionadas con el establecimiento de nuevos códigos de construcción, una mejor planificación, el establecimiento de sistemas de previsión y alerta temprana, entre otras.

El retroceso costero evita el riesgo desplazando a las personas y los bienes fuera de la zona de peligro. Esto puede hacerse de forma permanente o temporal, voluntaria o involuntaria —migración, desplazamiento o reubicación—. Se trata de una solución eficaz, pero que plantea graves problemas sociales y políticos.

Las medidas de adaptación debidas a la subida del nivel del mar no solo deben ser físicas y ecológicas, sino también sociales, de gobernanza, económicas y basadas en el conocimiento. Estos últimos deben permitir gestionar la incertidumbre a los responsables de la toma de decisiones.





CUATRO

EL AGUA: UN RECURSO VALIOSO MÁS ALLÁ DE SU PRECIO

Montserrat Termes Rifé

El agua es un recurso vital que trasciende su valor económico, desempeñando un papel esencial en la salud pública, la sostenibilidad ambiental y la cohesión social. Este artículo examina el agua como bien económico, al tiempo que destaca sus dimensiones ecológicas, culturales y sociales. Se aboga por un enfoque integral de gestión que garantice su uso sostenible y equitativo, considerando su clasificación variable como bien público, común o privado según su disponibilidad y su regulación. Además, se analizan las externalidades positivas del agua, como su valor ecológico y social, subrayando la importancia de reconocer el acceso a este recurso como un derecho humano fundamental. A pesar de las dificultades inherentes a la valoración económica del agua, se plantea la necesidad de incluir tanto su valor monetario como sus dimensiones intrínsecas, para así promover una gestión eficiente que asegure su disponibilidad para las generaciones futuras. En conclusión, el agua tiene un valor multifacético que debe ser reconocido para garantizar una gestión justa y sostenible.

INTRODUCCIÓN

Reconocer y valorar de forma adecuada el agua es uno de los puntos esenciales para poder lograr una gestión sostenible y equitativa de los recursos hídricos. El agua, recurso esencial para la vida en la Tierra, tiene un valor que va más allá de su función económica tradicional. Enfrentamos desafíos globales como el cambio climático, la escasez de recursos hídricos y el crecimiento poblacional, lo que hace imperativo reconocer el agua como un elemento crucial para la salud pública, la sostenibilidad ambiental y la cohesión social. Este artículo explora las múltiples dimensiones del valor del agua, incluyendo sus aspectos ecológicos, culturales y sociales, y propone un enfoque integral para su gestión que garantice su disponibilidad y su calidad para las generaciones futuras. Al comprender el agua en su totalidad, podemos fomentar políticas y prácticas que aseguren su uso sostenible y equitativo, promoviendo así un desarrollo que respete tanto a las personas como al medio ambiente.

El agua es vital para la existencia en nuestro planeta, desempeñando un papel fundamental en la supervivencia de todos los seres vivos. Más allá de su importancia biológica, el agua también es un motor clave para el desarrollo económico y social de las sociedades. Desde la agricultura hasta la industria y el consumo doméstico, el agua es un input indispensable en numerosos sectores económicos, contribuyendo a la generación de riqueza y empleo. Además, el acceso a agua potable y saneamiento adecuado es crucial para la salud humana, previniendo enfermedades y promoviendo el bienestar de las comunidades. Por lo tanto, la gestión sostenible del agua es vital para garantizar la supervivencia de las generaciones presentes y futuras, así como para impulsar el desarrollo económico y mejorar la calidad de vida de las personas.

Así, el valor del agua trasciende la mera función económica que tradicionalmente se le ha atribuido. A medida que enfrentamos desafíos globales, se hace imperativo reconocer el agua no solo como un bien económico, sino como un elemento esencial de la salud pública, la sostenibilidad ambiental y la cohesión social.

En este artículo, se presentan los tipos de bienes según la perspectiva de la economía y la discusión sobre el tipo de bien que es el agua. Se aboga por considerar el agua más allá de un bien estrictamente económico para seguir con la incorporación del valor del agua y los diferentes métodos de valoración. Se presentan algunas ideas actuales sobre el valor del agua y se finaliza con algunas conclusiones.

TIPOS DE BIENES EN ECONOMÍA

El análisis de los diferentes tipos de bienes sirve de base para diseñar políticas públicas eficientes que permitan una asignación y distribución eficiente de recursos. La mayoría de los bienes de nuestras economías se asignan en los mercados en los que los compradores pagan por lo que compran y los vendedores por lo que venden. Entendemos que la señal para tomar la decisión de comprar o vender descansa en el precio. Sin embargo, hay casos en los que se dispone de bienes por los que no se paga un precio y que, sin duda, son un reto para el análisis económico.

En general, se considera que hay dos tipos de bienes: públicos y privados. Sin embargo, los economistas hacemos una distinción más amplia que se basa en dos características: si el bien es excluyente¹ y si es rival en el consumo². Estas características son fundamentales para la gestión y la distribución de los recursos en una economía y ayudan a determinar qué mecanismos son los más adecuados para la provisión de los diferentes tipos de bienes y servicios. Sin embargo, la combinación de estas características nos lleva a cuatro tipos de bienes.

Los bienes públicos, como los parques públicos o la protección ambiental, están disponibles para todos, y su consumo por parte de un individuo no reduce la disponibilidad para otros. Son no excluibles y no rivales, lo que significa que no se puede impedir que alguien los use, y su consumo por una persona no reduce su disponibilidad para otros. De ahí que, al no ser excluibles, podamos encontrar casos en los que se recibe el bien, pero no se ha pagado por el mismo. En consecuencia, para saber si un bien es público deberíamos saber el número de beneficiarios y si pueden ser excluidos de ese bien. En caso de que haya un número de beneficiarios importante y que no se pueda excluir a ninguno, nos encontramos ante el problema del parásito (*free-rider*). De ahí que los bienes públicos estén suministrados por el Estado.

Los bienes privados, como la comida o la ropa, son aquellos que son excluibles y rivales en el consumo; es decir, una vez que alguien los consume, no están disponibles para otros. La mayoría de los bienes son privados, por los que se paga un precio. Requieren mecanismos de mercado para que su distribución sea eficiente para evitar la escasez.

¹. Significa que se puede impedir que se use ese bien.

². Si el uso de un bien por una persona impide o reduce la capacidad de uso por otra persona.

Esta primera aproximación a los tipos de bienes no debe ceñirse solo a bienes públicos y privados, sino que, en base a si un bien presenta o no ambas características, podemos hablar de dos tipos más de bienes. Los bienes comunes o recursos comunes —como los acuíferos— son aquellos que son rivales en el consumo, pero no son excluibles, lo que puede llevar a un problema de sobreexplotación y, en último término, a su agotamiento. Esta situación se conoce como la tragedia de los comunes que puede ser combatida con una buena regulación y con cooperación para evitar la sobreexplotación. Por último, los bienes de club o los bienes reservados —como los servicios de suscripción a una biblioteca o a un club de deporte privado— son aquellos que son no rivales en el consumo, pero son excluibles para quienes no pagan por ellos. La comprensión de estas categorías es fundamental para diseñar políticas eficaces de gestión de recursos y promover un uso eficiente de los mismos. Además, nos permite entender mejor el valor del agua según las características que presenta y poder enfocar la discusión sobre el valor del agua en los casos de ser un bien público y un bien comunal, ya que no es posible excluir a través de un precio.

Así, se evidencia que hay bienes que no se suministran por el mercado y en todos los casos se debe a que no están correctamente establecidos los derechos de propiedad. De ahí que en aquellos casos en los que se provoca un fallo de mercado, el Estado puede intervenir para resolver esa asignación. Esto ocurre, por ejemplo, con el mercado de los permisos por contaminar en los que la regulación establece derechos de propiedad y da paso a un mercado. En otros casos, se regula la conducta o el bien es suministrado directamente por el sector público.

¿QUÉ TIPO DE BIEN ES EL AGUA?

Siguiendo esta aproximación, hay bienes que presentan las diferentes características y, por tanto, pueden ser cualquiera de los tipos de bienes, como por ejemplo ocurre con el agua. El agua puede clasificarse como un bien público debido a su no rivalidad y no excludibilidad en el consumo. Como bien público, el agua limpia es un recurso que está disponible para todos los individuos y cuyo consumo por parte de uno no reduce la disponibilidad para otros. Un ejemplo claro de esta circunstancia es el agua en los ríos y océanos, que puede ser utilizada por múltiples usuarios sin agotarse y, además, es difícil de excluir. Esto es cierto en situaciones en las que el agua es abundante y fácilmente accesible.

Por otro lado, el agua también puede considerarse un bien común cuando su uso no está regulado y puede sufrir de sobreexplotación, como en el caso de los acuíferos compartidos entre agricultores que compiten por el mismo recurso. Aunque el agua sea compartida, su uso excesivo por parte de algunos puede afectar a la disponibilidad para otros. Dado que es difícil excluir a los miembros de una comunidad del uso del agua, la gestión se basa en la cooperación y el respeto mutuo. Por ejemplo, en países con estrés hídrico, como España o California, esta problemática es muy relevante y esta circunstancia se convierte en un desafío para una gestión sostenible del recurso. Estos ejemplos ilustran cómo el

agua puede encajar en diferentes categorías de bienes en economía, dependiendo de su disponibilidad, su rivalidad en el consumo y su regulación.

Si seguimos con esa mirada, podemos ver que no siempre es un bien público.³ Por ejemplo, el agua que se gestiona a través de las redes urbanas y que llega a nuestro grifo tiene las características de bien privado y, por tanto, se espera que se financie con el pago de un precio. El agua que encontramos en el medio ambiente —lagos o ríos o caudales ecológicos, por ejemplo— se considera un bien público y, de ahí, que su gestión se financie con impuestos. El agua para regadío o la que extraemos de un acuífero tiene las características de bien común y, de ahí, que corra el riesgo de la sobreexplotación, ya que es difícil identificar el sobreuso para poder excluir. Y, finalmente, el agua de un tramo de un río en el que se puede pescar tiene la característica de bien de club, ya que se necesita una licencia para la pesca. En consecuencia, y aunque todo es agua, según lo que llevamos a cabo con el recurso, se modifica el tipo de bien, la manera de financiarlo y el valor del bien o servicio. En la siguiente tabla encontramos una síntesis con ejemplos de los diferentes tipos de bienes que puede ser el agua dependiendo de sus características.

El agua según sus diversas características		
Tipo de bien	Características	Ejemplo aplicado al agua
Bienes privados	Son excluibles y rivales en el consumo.	Agua embotellada vendida en tiendas.
Bienes públicos	No son excluibles ni rivales en el consumo.	Sistemas de riego público de jardines públicos.
Bienes de club	Son excluibles, pero no rivales en el consumo.	Pertenencia a un club de natación con acceso a una piscina.
Bienes comunes	No son excluibles, pero sí rivales en el consumo.	Acuíferos compartidos para riego.

Tal y como hemos señalado, la forma en que financiamos los diferentes tipos de bienes está estrechamente relacionada con su clasificación económica. Por ejemplo, los bienes públicos suelen financiarse a través de impuestos y presupuestos gubernamentales, ya que su provisión beneficia a toda la sociedad y no puede excluirse a ningún individuo de su consumo. En el caso de los bienes privados, su financiamiento se basa en el principio de propiedad privada y el pago directo por parte de los consumidores a través de precios de mercado. Los bienes comunes pueden financiarse a través de mecanismos de regulación y gestión cooperativa para evitar la sobreexplotación y garantizar su sostenibilidad. Por último, los bienes de club suelen financiarse mediante cuotas de afiliación o pagos de suscripción, donde aquellos que desean acceder al bien deben contribuir económicamente a su provisión. Sin embargo, como veremos, en algunos casos (bienes públicos y comunes) no podemos poner un precio y la noción de valor del agua cobra un interés específico.

Algunas personas suelen decir que, como llueve y tiene su ciclo natural, no es necesario pagar por el agua que utilizamos. Aunque eso es así, dado que no pagamos por el recurso,

3. Cabe recordar que el agua es de titularidad pública, pero no siempre tiene las características de bien público. En otras palabras, la Ley de Aguas establece que todas las aguas superficiales y subterráneas son de dominio público, y el uso del agua se asigna mediante concesiones temporales, por lo que no hay derechos de agua.

no podemos olvidar que, además del ciclo natural, el agua presenta un ciclo integral que incluye su captación, potabilización, transporte y almacenaje, distribución, alcantarillado, depuración y restitución al medio natural o regeneración, un proceso que tiene unos elevados costes. En consecuencia, no pagamos por el agua, sino que pagamos por los servicios de agua que, en situación de sequía, sufren un aumento de sus costes debido a los procesos de desalinización de agua y de regeneración, con el objetivo de disponer de una mayor cantidad de recurso. De ahí que, en el contexto urbano con usos industriales, comerciales y domésticos, lo que se paga es una tarifa por los servicios del agua. En el caso de los regantes, pagan el canon de regulación y la tarifa de utilización de agua.⁴ Además, el agua presenta un conjunto de externalidades, tanto positivas como negativas que, como veremos, hay que tener en cuenta al hablar del valor económico del agua. Por ejemplo, el impacto ambiental que genera la sobreexplotación del recurso o el coste social de la falta de acceso al agua potable.

De ahí que sea importante considerar el agua de forma correcta, dado que esto influye tanto en el diseño de las políticas públicas como en su financiación.

EL AGUA, ¿MÁS QUE UN BIEN ECONÓMICO?

La clasificación del agua discutida en el punto anterior influye en su valor y su gestión. En 1776, Adam Smith, en su obra *La riqueza de las naciones*, destacó la paradoja del agua, señalando que, a pesar de ser esencial para la vida, a menudo tiene poco valor en términos de intercambio:

Las cosas que tienen el mayor valor de uso frecuentemente tienen poco o ningún valor de cambio; y, por el contrario, aquellas que tienen el mayor valor de cambio frecuentemente tienen poco o ningún valor de uso. Nada es más útil que el agua; pero apenas se puede comprar algo con ella; casi nada se puede obtener a cambio de ella. Un diamante, por el contrario, tiene escaso valor de uso; pero frecuentemente se puede obtener una gran cantidad de otros bienes a cambio de él.

Cuando hablamos del valor del agua, debemos considerar el valor de uso que se refiere a su utilidad para satisfacer necesidades o deseos y que se refleja en la disposición a pagar. El valor de cambio se refiere a la capacidad de un bien para ser objeto de transacción en el mercado y se manifiesta en el precio. El valor de uso determina la demanda y la utilidad de un bien, mientras que el valor de cambio influye en la asignación de recursos y en los precios relativos. En áreas donde el agua es accesible y abundante, su valor de uso es elevado pero su valor de cambio es reducido. Sin embargo, en épocas de sequía esa dualidad puede verse modificada. Así, el valor del agua es un tema complejo que ha sido objeto de debate durante muchos años.

⁴ El canon de regulación y la tarifa de utilización de agua grava a los beneficiados por las inversiones en infraestructuras de regulación y transporte del agua y, además del agua para riego, también grava la de abastecimiento y la de usos hidroeléctricos.

La Conferencia Internacional sobre Agua y Medio Ambiente en Dublín en 1992 fue un evento clave que contribuyó a poner en un primer plano la consideración del agua como un bien económico. Durante esta conferencia, se estableció la Declaración de Dublín, que incluyó varios principios fundamentales para la gestión del agua, uno de los cuales es que el agua debe ser reconocida como un bien económico debido a su valor en todos sus usos competitivos y a la necesidad de una gestión eficiente y equitativa del recurso. Se abordaron temas relacionados con la gestión sostenible del agua y se reconoció la importancia de aplicar principios económicos en la asignación y el uso eficiente de este recurso vital. La racionalidad detrás de considerar el agua como un bien económico radica en la necesidad de valorar adecuadamente este recurso escaso, promover su uso sostenible y garantizar su acceso equitativo para todos. La idea principal era que, al considerar el agua como un bien económico, se podría incentivar su uso eficiente, fomentar la inversión en infraestructuras hídricas y promover su conservación a largo plazo. Así, según la Declaración de Dublín de 1992, el agua es considerada un bien económico, lo que implica que tiene un valor y un coste asociado, similar a otros recursos económicos. Esta perspectiva es crucial para la gestión sostenible del agua, ya que promueve el uso eficiente y responsable de este recurso vital.

La razón principal para considerar el agua como un bien económico radica en su escasez y en la necesidad de gestionarla de manera sostenible. El reconocimiento del agua como un bien económico implica que su gestión debe incluir consideraciones de eficiencia económica, lo que significa que debe asignarse a los usos que generen el mayor beneficio económico y social. Este enfoque busca incentivar el uso responsable y la conservación del recurso, así como asegurar que los costos de provisión y mantenimiento del agua sean cubiertos, promoviendo así la sostenibilidad a largo plazo.

Sin embargo, esta consideración ha sido objeto de debate y controversia. Algunos autores señalan que puede restringirse el acceso al recurso a las comunidades más pobres y vulnerables y que también puede entrar en conflicto con su reconocimiento como un derecho humano fundamental. Además, muchas culturas tienen una relación simbólica y espiritual con el agua que no se refleja en su valoración económica y se puede correr el riesgo de ignorar su importancia ecológica y cultural. El agua es vital para el mantenimiento de los ecosistemas y tiene un valor intrínseco que no puede ser medido únicamente en términos económicos. También puede exacerbar conflictos geopolíticos, especialmente en regiones donde los recursos hídricos son escasos. La competencia por el control y la distribución del agua puede llevar a tensiones entre países y dentro de las comunidades, lo que se ha descrito como las «guerras por el oro azul». Por lo tanto, la gestión del agua como un bien económico debe equilibrarse cuidadosamente con sus dimensiones sociales, culturales y ecológicas para asegurar que se satisfagan las necesidades básicas de todas las personas y se protejan los ecosistemas sin comprometer la capacidad de futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades.

En consecuencia, es muy relevante tener en cuenta otros valores, además del económico, que tiene el recurso y que destacamos a continuación:

- *Derecho humano.* El acceso al agua es reconocido como un derecho humano fundamental. Esto implica que todas las personas deben tener acceso a agua potable y saneamiento, independientemente de su capacidad económica.
- *Valor ecológico.* El papel del agua en los ecosistemas y su importancia en la conservación de la biodiversidad y el equilibrio ecológico es vital. El agua es fundamental para el mantenimiento de los ecosistemas. Proporciona hábitats para una amplia variedad de especies y es crucial para los procesos ecológicos, como el ciclo de nutrientes y la regulación del clima. La calidad del agua y su disponibilidad afectan directamente la salud de los ecosistemas acuáticos y terrestres, de ahí que el agua desempeña un papel crucial en los ecosistemas acuáticos, contribuyendo a la biodiversidad, la regulación del clima y la purificación del agua. Por tanto, su valor ambiental radica en su importancia para mantener la salud de los ecosistemas y garantizar la sostenibilidad de la vida en la Tierra. Además, no podemos olvidar que la gestión del agua es clave para la adaptación y la mitigación del cambio climático. El agua ayuda a las comunidades a enfrentar fenómenos extremos como sequías e inundaciones, lo que resalta su importancia en la planificación y gestión ambiental.
- *Valor social y cultural.* El agua tiene un profundo significado cultural y espiritual en muchas comunidades. Se asocia con tradiciones, rituales y prácticas que son esenciales para la identidad cultural y la cohesión social y, por tanto, es esencial para la cohesión social. En ciudades como Bogotá, el agua juega un papel central en el proceso de urbanización y refleja la integración al espacio social, revelando el conflicto entre la ciudad formal y la marginal. No podemos obviar el hecho de que el acceso y la gestión del agua pueden fomentar la cohesión social y la cooperación entre comunidades. La gestión comunitaria del agua puede fortalecer los lazos sociales y promover la participación ciudadana.
- *Valor de salud pública.* El acceso a agua limpia y segura es vital para la salud pública. La falta de agua potable y saneamiento adecuado puede conducir a enfermedades y afectar el bienestar general de las comunidades. La percepción de la conservación del agua y su escasez también están relacionadas con la salud y la calidad de vida de las personas. El agua no solo sustenta la vida, sino que también es esencial para la higiene y la prevención de enfermedades.
- *Valor educativo y de concienciación.* El agua también tiene un valor educativo, ya que su gestión y conservación son temas importantes en la educación ambiental. La conciencia sobre la importancia del agua puede influir en las actitudes y acciones de las personas hacia su uso y conservación, como se observa en estudios sobre la percepción de los estudiantes universitarios respecto a la escasez de agua.
- *Valor recreativo y estético.* El agua proporciona oportunidades recreativas y estéticas, como la natación, la navegación y la contemplación de paisajes acuáticos, que contribuyen al bienestar emocional y físico de las personas.

Este conjunto de valores, que son las externalidades positivas que genera, pueden ayudarnos a entender mejor e intentar valorar el agua. Por ejemplo, es crucial para la seguridad alimentaria dado el papel que desempeña como bien económico en la agricultura y la producción de alimentos. Tampoco podemos obviar que el agua tiene un valor intrínseco que no se puede medir solo en términos económicos. Sostiene la vida y el bienestar humano, así como a la propia naturaleza, y ese valor debería ser reconocido en las políticas de gestión.

El valor del agua, en consecuencia, trasciende su mero aspecto económico, abarcando dimensiones ambientales, sociales y culturales que son fundamentales para su gestión sostenible. La valoración del agua debe considerar no solo su importancia como recurso económico, sino también su papel en la salud pública, la biodiversidad, la equidad social y la cultura. Diversos estudios académicos han resaltado la necesidad de adoptar enfoques integrales que reconozcan el valor intrínseco del agua en los ecosistemas, así como su relevancia para el bienestar humano y el desarrollo sostenible. La gestión eficaz del agua requiere una valoración adecuada que refleje su complejidad y su importancia multifacética en la sociedad y en el medio ambiente, de manera urgente para asegurar tanto el futuro de la humanidad como el del planeta.

En conclusión, el valor del agua va más allá de la función económica y, en la actualidad, se reconocen ampliamente en la literatura sobre gestión del agua. En cualquier caso, esta situación no obvia el preguntarnos cuál es el valor económico del agua y si es posible asignarle algún tipo de valor monetario, ya que ello permite ayudar a la toma de decisiones en la gestión del agua. El valor monetario, en este caso, no significa necesariamente que sea este su valor, sino que nos sirve para disponer de una orden de magnitud.

EL VALOR DEL AGUA Y SU VALORACIÓN

La valoración monetaria del agua está relacionada con el concepto de externalidades en la economía del bienestar y es una herramienta útil para valorar las externalidades ambientales. Desde un punto de vista ético, se cuestiona la idea de asignar un valor monetario al agua, un recurso vital para la vida, ya que esto podría entrar en conflicto con principios de equidad y justicia. Además, a nivel ecológico, la consideración del agua como un bien económico podría no reflejar adecuadamente su valor intrínseco en los ecosistemas naturales y su importancia para la biodiversidad y el equilibrio ambiental.

No obstante, los economistas disponemos de herramientas que posibilitan dar un valor económico al agua, considerando los diversos valores que este recurso posee. Es crucial recordar que el valor económico del agua es un tema central en la gestión de recursos hídricos, especialmente en contextos de escasez y competencia entre diferentes usos. Este valor puede variar significativamente según el sector de uso, la región geográfica y las condiciones específicas del entorno.

Tal como hemos señalado, el valor del agua no se limita a su uso directo, también incluye el valor de no uso o los beneficios indirectos que proporciona; por ejemplo, el control de inundaciones o la protección contra tormentas. Así, el valor de uso se refiere al valor del agua relacionado con su uso presente o futuro por parte de los individuos. Por otro lado, también es necesario recordar que hay que mantener la existencia y la posibilidad de garantizar que las generaciones futuras también tengan acceso al agua. Por definición, este valor no está asociado con el uso de ese recurso o con los beneficios tangibles que se derivan de su uso, sino que se consideran valores de no uso.

Por lo tanto, la valoración económica del agua se puede dividir en «valores de uso» (directo, indirecto y de opción) y «valores de no uso» (existencia y legado).

Los valores de uso incluyen:

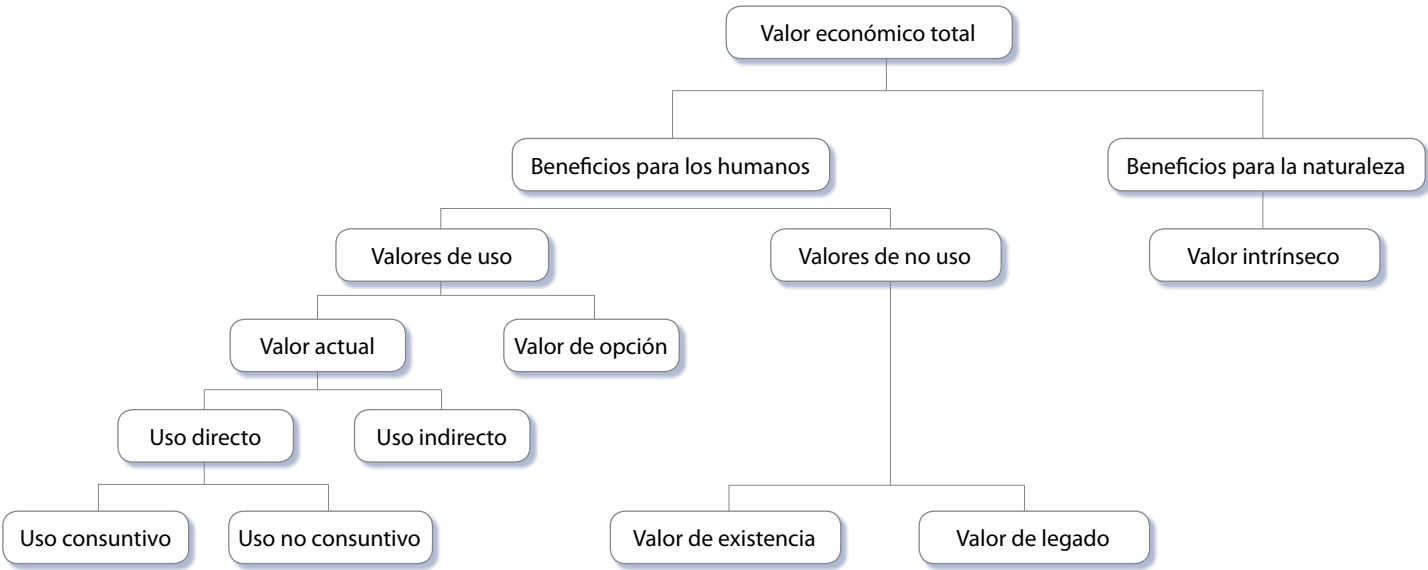
- *El valor de uso directo* se deriva del uso actual del agua por parte de los individuos, la agricultura y las empresas, y se reconoce de manera inmediata a través del consumo del recurso o de los servicios que presta y puede estar incluso asociado a un valor en el mercado. Incluye el consumo doméstico, el industrial y el agrícola.
- *El valor de uso indirecto* se relaciona con los beneficios derivados de las funciones de los ecosistemas y los servicios ecosistémicos que proporcionan. Los beneficios indirectos o el denominado «uso indirecto» abarcan los diferentes servicios ecosistémicos proporcionados por los sistemas hídricos, como la regulación del clima y el mantenimiento de la biodiversidad.
- *El valor de opción* se refiere al valor de los usos potenciales, conocidos y desconocidos, en el futuro. Por ejemplo, el valor que tiene un curso de agua para futuros usuarios potenciales, aunque no tenga la intención de usarlo inmediatamente.

Los valores de no uso incluyen:

- *El valor de existencia* es el valor que se asigna a un bien o recurso por su mera existencia —el valor del curso de agua no por su uso presente o futuro, sino por su existencia como tal—.
- *El valor de legado* o *herencia* considera el valor asociado a la posibilidad de que las generaciones futuras puedan hacer uso del bien. Por ejemplo, un curso de agua puede ser visitado por las generaciones futuras constituyendo un legado que se traspa.

Más recientemente también se ha introducido *el valor intrínseco del agua*, que se relaciona con los beneficios que el recurso aporta a la naturaleza. Aunque el concepto de *servicios ecosistémicos* no abarca todos los beneficios a la naturaleza ni el valor intrínseco de tales beneficios, no es necesariamente incompatible con la valoración económica. Es importante tener en cuenta que el término *valoración económica* es sinónimo de *valoración monetaria*, mientras que el término *naturaleza* presenta beneficiarios no humanos

de la conservación, aunque las entidades que deben considerarse como tales beneficiarios dependen de las opiniones morales de cada uno. El siguiente esquema nos permite entender los diferentes componentes.



MÉTODOS DE VALORACIÓN

Medir el valor intangible del agua presenta dificultades debido a su naturaleza no cuantificable directamente en términos monetarios, un reto similar al de otros activos intangibles como las patentes o la fidelidad de los clientes. A pesar de esto, existen enfoques y métodos que permiten capturar su valor, considerando factores como su escasez, demanda, oferta y los beneficios asociados a su uso. Para medir estos valores, se suelen utilizar métodos de valoración de preferencias reveladas y métodos de valoración de preferencias declaradas de los usuarios.

Los métodos de «valoración de preferencias reveladas» estiman el valor del agua analizando el comportamiento de los individuos en mercados reales relacionados con el recurso. Se aplican principalmente para el cálculo del valor de uso. Los métodos específicos que incluye son:

- *Método del costo de viaje.* Estima el valor económico del agua mediante los costes monetarios y de tiempo en los que las personas incurren para viajar y disfrutar de recursos hídricos recreativos, como lagos o ríos.

- *Método de precios hedónicos.* Evalúa el valor del agua a partir del impacto en el mercado inmobiliario debido al acceso o mejora a fuentes de agua de calidad.
- *Método de costos evitados.* Calcula el valor del agua en términos de costes evitados por no tener que recurrir a alternativas más caras.

Los «métodos de valoración basados en la preferencia declarada» inferen el valor del agua a partir de crear escenarios hipotéticos y a partir de encuestas. Se suelen utilizar para el cálculo de los valores de no uso. Algunos de los métodos específicos que incluye son:

- *Valoración contingente.* Este enfoque se basa en la disposición a pagar de las personas por mejoras en la calidad del agua o por la conservación de ecosistemas acuáticos.
- *Experimentos de elección.* Presenta a los individuos diferentes escenarios con varias combinaciones de atributos del agua para que declaren sus preferencias.

Finalmente, recordemos que el valor intrínseco del agua no se atribuye a la propia naturaleza, sino a los beneficios para la naturaleza de la existencia del agua. De ahí que pueden ser valorados económicamente en base a la «metodología de transferencia de beneficio», que es una técnica utilizada para estimar el valor económico de bienes o servicios ambientales sin necesidad de realizar estudios costosos o largos en un contexto específico. Se basa en trasladar o adaptar los valores económicos obtenidos previamente en un lugar o situación a otro contexto similar.

La valoración económica del agua es fundamental para informar la toma de decisiones en la gestión sostenible de los recursos hídricos y para reconocer su importancia en términos de bienestar humano y desarrollo económico.

En conclusión, la gestión del agua desde una perspectiva económica implica reconocer su valor en todos sus aspectos y utilizar este conocimiento para promover un uso sostenible y equitativo. Esto requiere una combinación de políticas de precios, inversiones en infraestructuras, educación y concienciación y introducción del valor económico total en la medida de lo posible en la toma de decisiones. Solo así podremos asegurar que este recurso esencial esté disponible para las generaciones presentes y futuras.

POR UNA GESTIÓN JUSTA Y SOSTENIBLE DEL AGUA

Al comprender y valorar el agua en estas múltiples dimensiones, se puede promover una gestión más justa y sostenible que asegure su disponibilidad y calidad para las futuras generaciones. Equilibrar el uso económico del agua con su uso ambiental o ecológico es fundamental para garantizar la sostenibilidad a largo plazo de este recurso vital. Para lograr este equilibrio, es necesario implementar estrategias y políticas que consideren tanto las necesidades económicas como la conservación de los ecosistemas acuáticos

y las necesidades sociales y culturales. Algunas propuestas y enfoques para lograr este equilibrio incluyen:

- Promover prácticas de uso eficiente del agua en sectores económicos clave, como la agricultura y la industria, a través de incentivos y tecnologías sostenibles.
- Implementar mecanismos de valoración del agua que reflejen su valor ambiental y ecológico, cuantificando servicios ecosistémicos que proporciona el agua, como la regulación del clima, la biodiversidad y la purificación del agua. Estos enfoques permiten comprender mejor la importancia integral del agua en los ecosistemas.
- Establecer áreas protegidas y corredores ecológicos en torno a fuentes de agua para conservar la biodiversidad y los servicios ecosistémicos asociados.
- Implementar caudales ecológicos es crucial para asegurar que los ecosistemas acuáticos reciban suficiente agua para mantener su salud y su funcionalidad. Por ejemplo, en Perú se han desarrollado metodologías para definir caudales ecológicos que equilibran las necesidades de los ecosistemas y los usuarios humanos del agua.
- Aplicar la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH). Esta metodología busca coordinar el desarrollo y la gestión del agua, la tierra y los recursos relacionados para maximizar el bienestar económico y social de manera equitativa sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales. La GIRH promueve la participación de todos los sectores involucrados y considera tanto las necesidades humanas como las ecológicas.
- Fomentar la participación activa de las comunidades locales en la gestión sostenible del agua, incorporando conocimientos tradicionales y prácticas de gestión sostenible.
- Implementar la economía circular del agua: estrategias que promueven la reutilización, el reciclaje y la gestión sostenible del agua dentro de un enfoque de economía circular, minimizando el desperdicio y maximizando la eficiencia en el uso del recurso. Este enfoque busca minimizar el desperdicio de agua y maximizar su reutilización. La economía circular puede incluir prácticas como la recogida de agua de lluvia, el reciclaje de aguas residuales y la implementación de tecnologías eficientes en el uso del agua en procesos industriales y agrícolas.
- Incorporar e integrar principios ecológicos en las políticas y regulaciones relacionadas con el agua puede ayudar a proteger los recursos hídricos y asegurar su uso sostenible.
- Fomentar la innovación tecnológica para la gestión del agua y el desarrollo de tecnologías innovadoras, como sensores inteligentes, sistemas de seguimiento en tiempo real y soluciones de tratamiento de aguas avanzadas, para mejorar la gestión y conservación del agua.
- Diseñar políticas públicas efectivas y una gobernanza inclusiva que reconozca el valor multifacético del agua. Asegurar que las inversiones en infraestructuras (grises y

verdes) no solo tengan en cuenta la rentabilidad económica, sino también la sostenibilidad ambiental y un acceso equitativo.

Los principales desafíos y limitaciones de estas estrategias para una gestión justa y sostenible del agua incluyen la resistencia de los sectores económicos a adoptar prácticas de conservación debido a la percepción de costes a corto plazo, la falta de datos precisos para la valoración de servicios ecosistémicos, las diferencias culturales y sociales que pueden dificultar la participación comunitaria, así como la necesidad de un marco regulatorio robusto que garantice la implementación de políticas efectivas, todo esto en un contexto de creciente escasez hídrica y el impacto del cambio climático, que complican aún más la planificación y gestión integrada de los recursos hídricos.

ALGUNAS IDEAS NOVEDOSAS SOBRE EL VALOR DEL AGUA

El Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos publicado en 2021 incide en la idea de que el agua debe valorarse no solo desde una perspectiva económica, sino también considerando sus valores sociales, culturales, ambientales y políticos. El informe subraya la necesidad de un enfoque holístico para una gestión sostenible, identificando los beneficios directos e indirectos del agua y su valor sociocultural, además de mejorar la gobernanza del agua.

El informe agrupa metodologías y enfoques actuales para el valor del agua desde cinco perspectivas: valoración de fuentes de agua, recursos hídricos y ecosistemas *in situ*; valoración de la infraestructura hídrica para el almacenamiento, uso, reutilización o ampliación del suministro de agua; valoración de los servicios hídricos, principalmente el agua potable, el saneamiento y los aspectos relacionados con la salud humana; el valor del agua como insumo para la producción y la actividad socioeconómica, tales como la alimentación y agricultura, energía e industria, empresas y empleo y, finalmente, otros valores socioculturales del agua, incluyendo los atributos recreativos, culturales y espirituales.

Actualmente, se están discutiendo varias ideas novedosas sobre el valor del agua, que van más allá de su valoración económica tradicional. Estas ideas buscan integrar aspectos ecológicos, sociales y culturales en la gestión y valoración del agua y, además, contribuyen a la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). A continuación, se presentan algunas de estas ideas:

- *Huella hídrica y desarrollo sostenible.* La huella hídrica es un indicador que mide el volumen total de agua dulce utilizada para producir bienes y servicios consumidos por una persona, comunidad o empresa. Este enfoque considera tanto el uso directo como el indirecto y, por tanto, incluye el agua consumida internamente como la utilizada en otros países para producir bienes importados. Se considera una herramienta

importante para evaluar el impacto del consumo humano en los recursos hídricos y para promover la gestión sostenible del agua. La relación entre el valor del agua y la huella hídrica radica en la necesidad de asignar un valor adecuado al agua, considerando no solo su disponibilidad física, sino también su uso eficiente y sostenible en la cadena de suministro. La idea es utilizar este indicador para desarrollar políticas de agua más sostenibles y equitativas, regulando el consumo y promoviendo un modelo de desarrollo territorial sostenible.

- *Calidad del agua y contaminación.* Se están desarrollando índices de calidad y contaminación del agua que integran múltiples variables fisicoquímicas y microbiológicas. Estos índices ayudan a evaluar y gestionar la calidad del agua de manera más holística, considerando su impacto en la salud humana y en los ecosistemas. La idea es avanzar hacia una gestión del agua que no solo se enfoque en la cantidad, sino también en la calidad del recurso.
- *Proyectos de investigación y transferencia de conocimiento sobre el valor del agua en diferentes contextos.* La investigación se centra en evaluar el estado y los desafíos de la valoración del agua en diferentes sectores y según las diferentes perspectivas. En los últimos años se ha avanzado en la investigación sobre el valor económico de los servicios de los ecosistemas acuáticos, aunque no se ha avanzado tanto en la transferencia de ese conocimiento tanto a la política pública como a la sociedad. Es necesario introducir los resultados de la investigación en la toma de decisiones para llevar a cabo políticas de agua sostenibles, así como crear experiencias educativas que resalten la importancia del agua más allá de su valor económico.
- *Implementar instrumentos económicos como el Pago por Servicios Ambientales (PSA) y los mercados de derechos de agua representan una innovación clave en la gestión del valor del agua.* El PSA ofrece incentivos económicos a quienes contribuyen a la provisión y la mejora de servicios ambientales, como la conservación de cuencas hidrográficas. Por su parte, los mercados de derechos de agua se fomentan la asignación eficiente, permitiendo que quienes valoran más el recurso puedan adquirir esos derechos. Ambos instrumentos crean un sistema de incentivos que contribuye a hacer la gestión del agua más sostenible y equitativa.
- *Aplicar el análisis del ciclo de vida (ACV) en la gestión y en el valor del agua para evaluar y cuantificar de manera exhaustiva los impactos ambientales asociados al uso del agua, no solo en términos de consumo, sino también en relación con su contaminación y los efectos sobre los ecosistemas.* El ACV mide las entradas y salidas de recursos en cada etapa del ciclo de vida de un producto o proceso, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final, pasando por el uso y el tratamiento de residuos. La ISO 14040 establece los estándares para realizar el ACV, lo que la convierte en una herramienta clave para la toma de decisiones en la gestión sostenible del agua. El ACV se puede aplicar, por ejemplo, para evaluar la sostenibilidad en la agricultura, identificando

los puntos críticos de uso del agua y proponiendo mejoras en la eficiencia. Además, el ACV permite comparar diferentes métodos de gestión del agua, ayudando a las empresas y gobiernos a minimizar su huella ambiental en el contexto del cambio climático y la escasez de agua.

En conclusión, los conceptos introducidos aportan herramientas esenciales para promover un uso más responsable y sostenible del agua. Estas propuestas no solo permiten valorar el agua desde una dimensión monetaria, sino también reconocer su relevancia en términos de salud pública, desarrollo económico y preservación ambiental. Solo mediante un enfoque holístico que contemple los múltiples valores del agua y mejore la gobernanza de los recursos hídricos, será posible garantizar su disponibilidad y calidad para las generaciones futuras.

CONCLUSIONES

El valor económico del agua presenta diversas facetas y depende del contexto específico de su uso. En la agricultura, la valoración varía según el tipo de cultivo y la ubicación; mientras que, en la industria manufacturera, el valor puede diferir significativamente entre sectores. Sin embargo, el agua trasciende su función económica, abarcando dimensiones ambientales, sociales y culturales que son esenciales para su gestión sostenible.

La valoración del agua debe incluir su importancia económica, así como su papel en la salud pública, la biodiversidad y la equidad social. Una gestión eficaz del agua requiere un enfoque que refleje la complejidad y la relevancia multifacética del agua en la sociedad y el medio ambiente. El agua, más que un recurso económico, es un tesoro invaluable que sustenta la vida en nuestro planeta. Desde su valor económico hasta su impacto en la salud pública, la educación y la cultura, el agua se revela como un recurso multifacético que merece ser gestionado con sabiduría y responsabilidad.

Si bien consolidar diferentes enfoques y métodos para valorar el agua es un desafío continuo, es necesario avanzar hacia herramientas que reconozcan y preserven los valores intangibles asociados al agua, especialmente en contextos socioculturales variados. En este sentido, la economía juega un papel clave en el desarrollo de métodos de valoración adecuados que permitan gestionar eficientemente los recursos hídricos.

A diferencia de la mayoría de los recursos naturales, determinar el «auténtico» valor del agua es extremadamente complicado. Esta dificultad implica que la importancia crucial de este recurso vital no se refleje adecuadamente en la atención política y la inversión financiera en muchas regiones del mundo. Como resultado, se generan desigualdades en el acceso a los recursos y servicios hídricos, un uso ineficiente e insostenible, y contribuye a la degradación de las reservas de agua y afecta la consecución de casi todos los ODS y los derechos humanos fundamentales.

En este contexto, la innovación tecnológica, la valoración de servicios ecosistémicos y la economía circular emergen como enfoques clave para garantizar la sostenibilidad y el equilibrio en el uso del agua, especialmente en un mundo cada vez más consciente de su importancia vital. Al considerar la huella hídrica junto al valor del agua, se abre la puerta a una gestión más integral y eficiente de este recurso, promoviendo la conciencia sobre su escasez y la necesidad de protegerlo para las generaciones futuras. Es imperativo que investigadores, políticos y la sociedad en general reconozcan y actúen con la premisa del valor integral del agua.

Es fundamental que la sociedad comprenda que el agua, siendo un recurso limitado, no es gratuita y requiere de un sistema de precios que refleje su verdadero valor. El coste del agua debe abarcar no solo el tratamiento y la distribución, sino también los impactos ambientales y sociales asociados con su uso. Esta concienciación permitirá promover un consumo más responsable y sostenible, incentivando la conservación y el uso eficiente del agua, además de facilitar la inversión necesaria en infraestructuras hídricas que garanticen su disponibilidad para las generaciones futuras.

Para garantizar la sostenibilidad del recurso, es imperativo que los sistemas de gestión consideren políticas inclusivas, la cooperación entre actores públicos y privados, y el uso de tecnologías innovadoras que promuevan el uso eficiente del agua. Solo mediante una gestión justa y equitativa se podrá asegurar el acceso universal a este recurso vital para las generaciones presentes y futuras.

La escasez de agua se convierte en un reto cada vez más apremiante. En este contexto, es crucial que la sociedad y los responsables de la toma de decisiones reconozcan el valor integral del agua. Al integrar perspectivas económicas, ambientales y sociales, podemos avanzar hacia una gestión sostenible y equitativa, asegurando la disponibilidad de este recurso vital para las generaciones futuras.





CINCO

EL USO DEL AGUA EN LA AGRICULTURA: AVANZANDO EN LA MODERNIZACIÓN DEL REGADÍO Y LA GESTIÓN EFICIENTE DEL AGUA

Judit Montoriol Garriga

El agua es un bien imprescindible para la agricultura. El cambio climático está convirtiendo el agua en un recurso más escaso e impredecible.

La sequía de que ha afectado a gran parte de la península ibérica en los últimos años ha realizado uno de los desafíos más importantes a los que se enfrenta el sector agroalimentario español: mejorar el uso de los recursos hídricos ante una perspectiva de mayor escasez de agua. El cambio climático requiere un ingente esfuerzo para adaptar el regadío español a las nuevas circunstancias y, en este sentido, las inversiones de los fondos Next Generation EU (NGEU) son un gran apoyo. Unos fondos que en este ámbito tienen como objetivo principal modernizar los regadíos y mejorar su gobernanza, promoviendo el ahorro de agua y la eficiencia energética, mediante sistemas de riego más eficientes, sistemas de generación de autoconsumo eléctrico con fuentes de energía renovables, o usando fuentes de agua no convencional, como aguas residuales regeneradas o desalinizadas.

LA ESCASEZ DE AGUA, UN RETO PARA LA AGRICULTURA GLOBAL

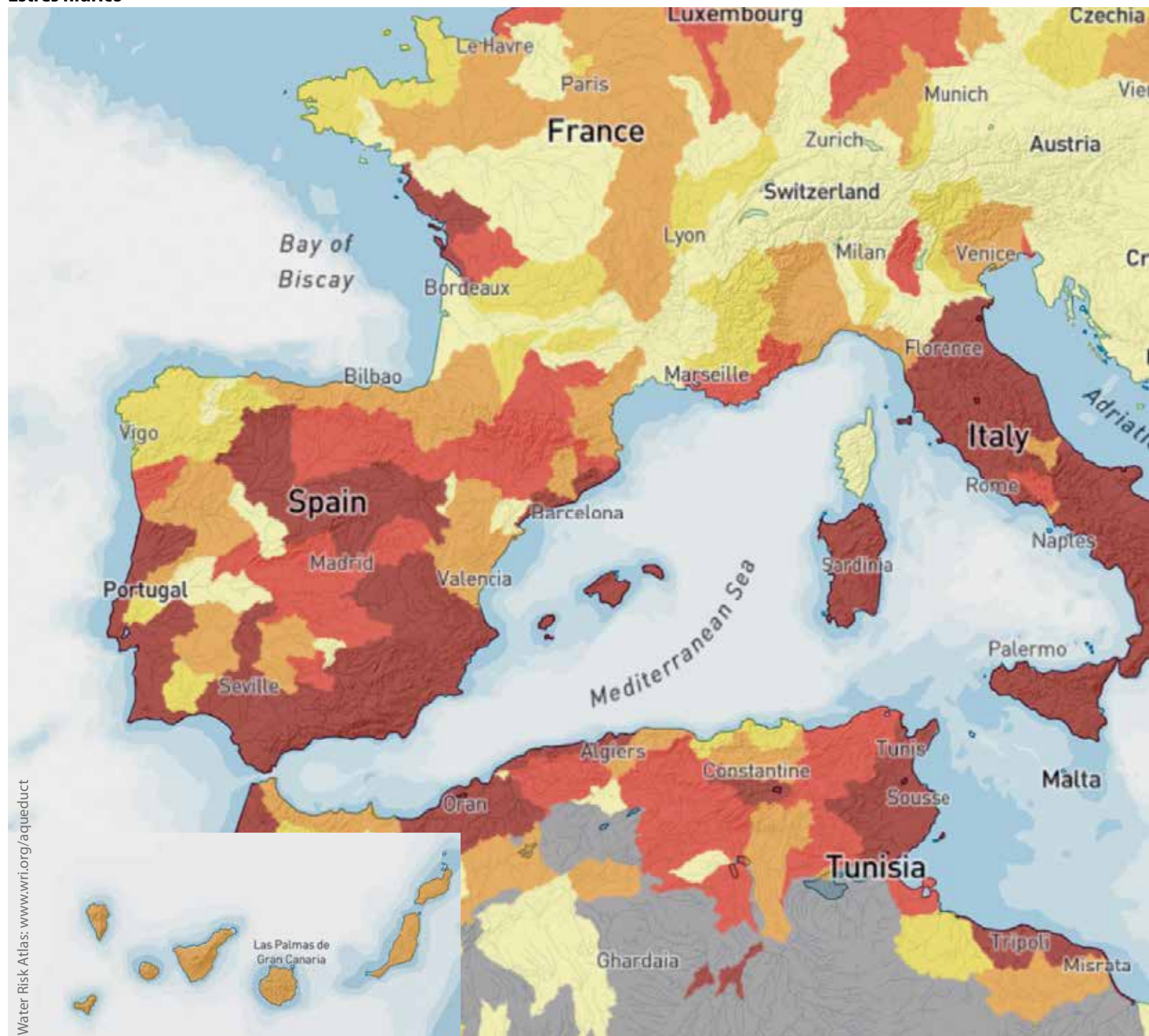
El agua es un recurso crucial para la agricultura. A escala mundial, el 72 % de todas las extracciones de agua dulce se destinan al sector agrario. Del resto, un 12 % se destina a la industria y a la producción de energía, y un 16 % al consumo humano de forma directa. La FAO calcula que en 2050 la agricultura tendrá que producir casi un 50 % más de alimentos, fibras y biocombustibles que en 2012 para satisfacer la demanda mundial.¹ Un objetivo difícilmente alcanzable si no se incrementa la superficie destinada al regadío teniendo en cuenta su mayor productividad: la agricultura de secano produce el 60 % de los alimentos del mundo y ocupa el 80 % de las tierras cultivadas, mientras que el regadío produce el 40 % en el 20 % de las tierras.

La intensificación agrícola ejerce una tensión creciente sobre los recursos de agua dulce que se ve agravada por las consecuencias del cambio climático. En muchas regiones del mundo, incluidas algunas españolas (véase el mapa), el agua está sometida a niveles altos de estrés hídrico.² Asimismo, es probable que los niveles de estrés hídrico aumenten en las áreas actualmente más estresadas a medida que se intensifiquen los efectos del cambio climático. En España, se prevé una reducción de recursos hídricos en general más intensa hacia el sur peninsular y los archipiélagos.³

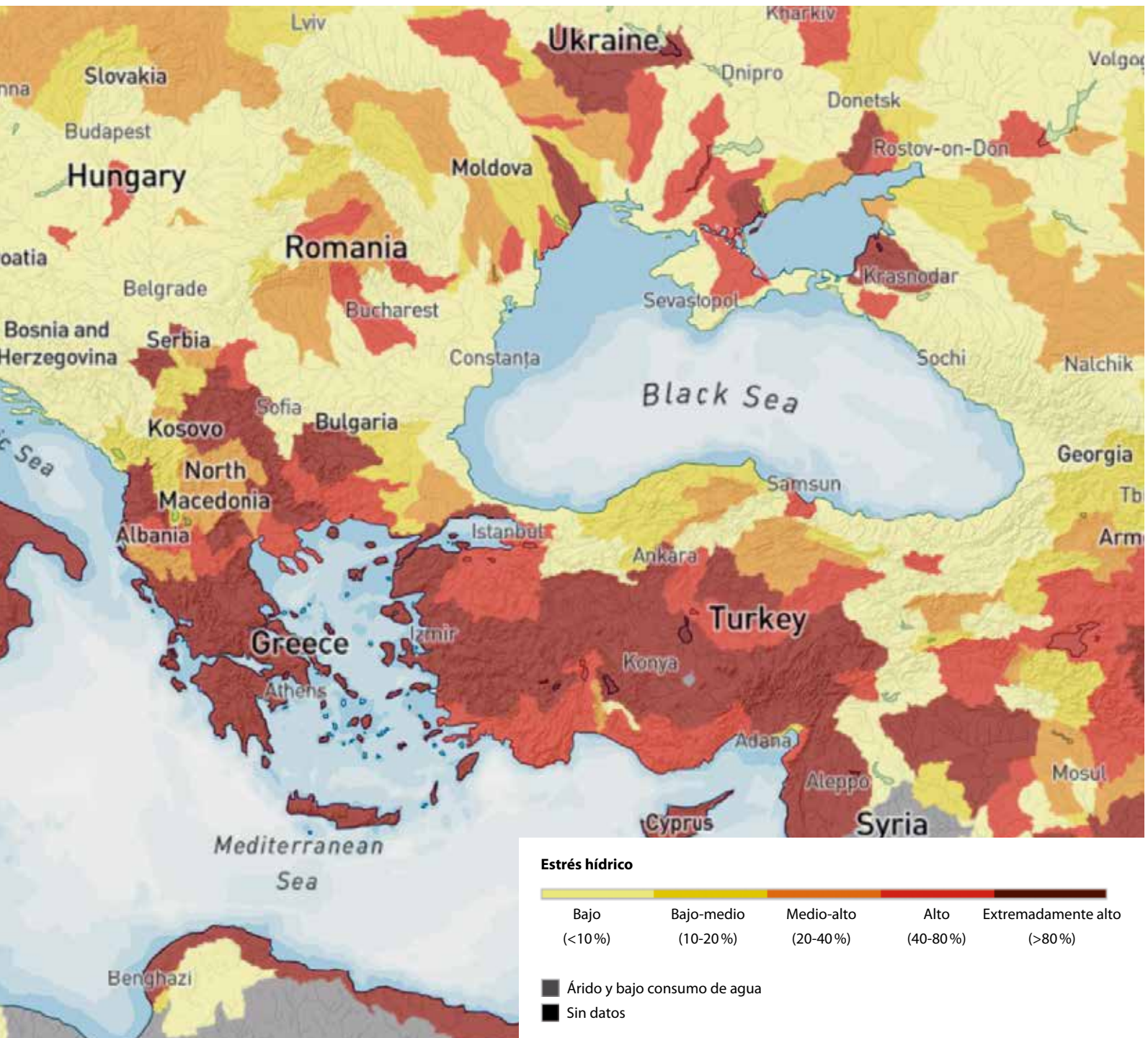
Esta grave situación hace imprescindible un sistema de planificación y gestión integrada de los recursos hídricos que garantice el suministro en cantidad y en calidad suficiente, bajo criterios de sostenibilidad, de adaptación al cambio climático y alineado con los principios de la economía circular. Asimismo, la gestión del agua debe promover el cumplimiento de los objetivos medioambientales marcados por la UE en el Pacto Verde Europeo y en la Directiva Marco del Agua, y la consecución de los objetivos marcados por la Agenda 2030 de Naciones Unidas en el Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 (ODS6, Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos).

1. La FAO prevé un incremento de la demanda de biocombustibles motivado por el menor uso de combustibles fósiles, y un aumento en el consumo de alimentos ante el crecimiento de la población mundial, la mayor urbanización y el cambio de una dieta basada principalmente en almidón a una demanda creciente de carne y productos lácteos que consumen más agua, a medida que aumentan los ingresos en muchos países. Véase el Informe SOLAW «El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura», FAO (2021).
2. Se considera estrés hídrico «alto» cuando en promedio se retira más del 40% de la oferta de agua disponible cada año y donde la demanda de agua es más alta que la cantidad disponible durante cierto periodo de tiempo. España es uno de los 44 países con niveles «altos» de estrés hídrico (World Resources Institute, 2019).
3. Véase «Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España», CEDEX, 2017.

Estrés hídrico



El estrés hídrico mide la relación entre las extracciones totales de agua y los suministros renovables de agua superficial y subterránea disponibles. Las extracciones de agua incluyen los usos domésticos, industriales, de riego y ganaderos, tanto consuntivos como no consuntivos.



La gestión integrada del agua ha de hacer compatible la consecución de los objetivos ambientales con los objetivos socioeconómicos.

LA IMPORTANCIA DEL REGADÍO EN ESPAÑA

En España, el sector agrícola acapara el 82,1 % de los usos de agua (los hogares usan el 12,8 % y el 5,1 % restante se destina al resto de las actividades económicas).⁴ En efecto, el regadío es un elemento básico de nuestro sistema agroalimentario: la superficie regada en España alcanzó su máximo en 2021, cuando llegó a representar un 22,9 % de la superficie de cultivo y un 7,8 % de la superficie geográfica total. Sin embargo, las severas sequías de los años 2022 y 2023 han supuesto un cierto retroceso de la superficie de regadío (−4,4 % entre 2021 y 2023), de modo que su peso disminuyó ligeramente hasta suponer el 22,1 % de la superficie de cultivo y el 7,5 % sobre la superficie geográfica total en 2023.

El mayor rendimiento de los cultivos de regadío en comparación con el secano hace que, pese a ser solo el 23 % del total de la tierra cultivada, su producción aporta cerca del 65 % del valor total de la producción vegetal final. Sin ningún lugar a duda, el regadío es el pilar fundamental en el que descansa el potencial productor y exportador del sector hortofrutícola: España es el primer exportador de frutas y hortalizas de la Unión Europea y uno de los tres primeros exportadores mundiales junto a China y EE. UU., una destacada posición que le ha conferido la denominación de «la huerta de Europa».

El regadío ha experimentado un proceso continuado de modernización que está llevando a expandir progresivamente las técnicas de riego eficiente.

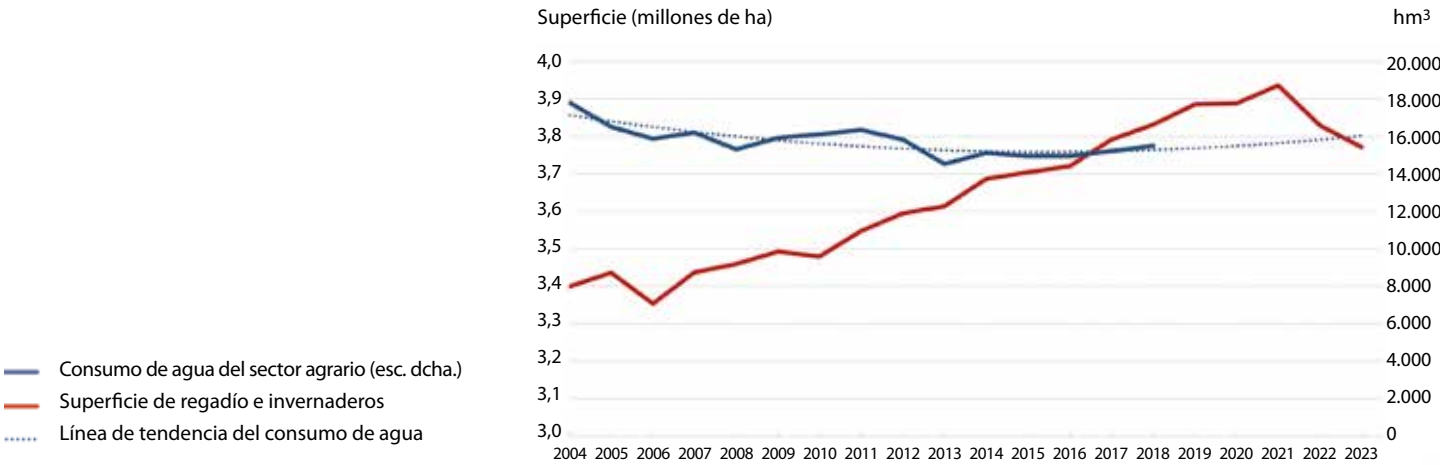
En el siguiente gráfico se puede observar el significativo aumento de la superficie de regadío en España entre 2004 y 2021, un incremento de más de medio millón de hectáreas hasta alcanzar los 3,9 millones en 2021.⁵ En este periodo, sin embargo, el consumo de agua del sector agrario se ha mantenido bastante estable —o incluso ha tendido a decrecer ligeramente— gracias al notable esfuerzo de modernización de los regadíos.

En efecto, a lo largo de estos años, ha aumentado la superficie regada mediante el sistema de riego localizado (goteo), una técnica mucho más eficiente y con unas demandas de agua muy contenidas, en detrimento del sistema de gravedad, con un consumo de agua mucho mayor. El sistema de aspersión, un sistema más propio de cultivos herbáceos, también se ha ido implantando a lo largo de estos años.

⁴. Datos de la cuenta satélite del agua (INE) del 2010, último dato disponible. La gran parte del agua usada por el sector agrario se destina a regadío. El consumo de agua por parte de la ganadería es escaso. Sin embargo, tiene gran importancia el efecto que la producción y la gestión de los residuos ganaderos puede tener en las masas de agua.

⁵. Este incremento del regadío ha ido acompañado del desarrollo de infraestructuras hidráulicas como los embalses y los trasvases, fundamentales para el transporte y la regulación del agua. El descenso entre 2021 y 2023 se debe a la situación de sequía prolongada que han experimentado muchas zonas de España en este periodo, lo que ha conllevado una reducción de la superficie de cultivo de regadío.

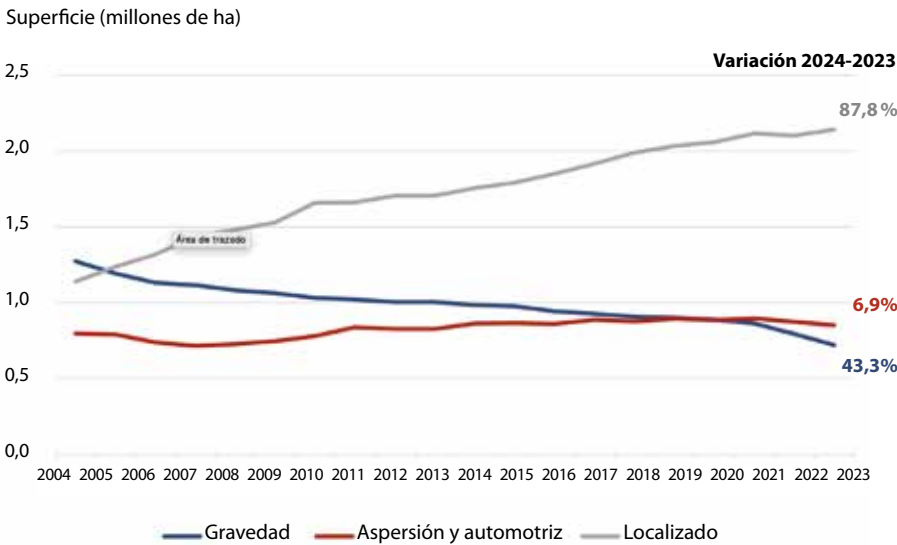
La superficie de regadío aumentó notablemente hasta 2021, pero el volumen de agua usado ha permanecido relativamente estable...



Nota: El último dato disponible de la Estadística del uso del agua corresponde a 2018. Fuente: CaixaBank Research, a partir de datos del INE (EUASA) y del MAPA (ESYRCE).

... gracias a la modernización del regadío.

Distribución de las tierras de cultivo de regadío por técnicas de riego



Esta expansión de las técnicas de riego más eficientes refleja una coherencia con las políticas de regadío desarrolladas en los últimos años encaminadas a lograr una agricultura sostenible y eficiente. Pero, como ya se ha apuntado, la modernización de los regadíos no ha ido acompañada de un ahorro de agua en agregado, pues muchas veces se da simultáneamente una intensificación de cultivos, obteniéndose un mayor rendimiento por m³ de agua empleado, pero por otro lado disminuyen los retornos de riego a las masas de agua.⁶

Por tipos de cultivo, las mayores superficies puestas en regadío en 2023⁷ fueron: el olivar, que representó el 23,5 % del total de la superficie regada, seguido de los cereales en grano (20,5 %), los frutales no cítricos (12,1 %) y el viñedo (10,7 %). Excepto los cereales, estos cultivos son los que han experimentado un mayor crecimiento de la superficie regada entre 2004 y 2023, destacando el olivar, que ha sumado casi 400.000 hectáreas. Por otra parte, si se analiza la superficie de regadío en el total de cada uno de los grupos de cultivos, puede observarse que el riego es mayoritario en algunos de ellos, como los cítricos, las hortalizas y flores, y los tubérculos (92,3 %, 89,1 % y 80,6 % respectivamente).

Las técnicas de riego usadas dependen en gran medida del tipo de cultivo. Así, el riego por gravedad se utiliza principalmente para los cereales y las plantas forrajeras, alcanzando el 39,1 % y 50,5 % de sus respectivas superficies de cultivo en regadío. El riego por aspersión destaca fundamentalmente en los tubérculos (76,7 %) y otros cultivos herbáceos como leguminosas, plantas industriales y cereales. Finalmente, el riego localizado (goteo) es el sistema mayoritario en los cultivos leñosos como el olivar, el viñedo y los frutales, cítricos y no cítricos. En el grupo de las hortalizas también destaca el sistema de riego localizado (55,1 %), en el que se incluye también la superficie de invernadero.

6. Los retornos de riego son todos los flujos de agua que provienen del regadío y retornan a los ríos, a las aguas subterráneas, etc.

7. Datos de la «Encuesta sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos» (ESYRCE, 2021) y «Análisis de los regadíos españoles, año 2020», ambos publicados por el MAPA.

Distribución de la superficie regada por tipos de cultivo y técnica de riego en 2023									
Grupos de cultivos	Hectáreas cultivadas en 2023			Variación de la superficie de regadío entre 2004 y 2021 (miles de ha)	Superficie de regadío en 2023		Técnicas de riego (% de la superficie de regadío de cada cultivo)		
	Secano	Regadío	Total hectáreas cultivadas		En % de la superficie de riego total	En % de la superficie del cultivo	Gravedad	Aspersión y automotriz	Localizado
Olivar	1.913.496	874.564	2.788.060	395	23,5	31,4	4,0	0,3	95,6
Cereales grano	4.946.723	761.565	5.708.288	-165	20,5	13,3	39,1	58,4	2,5
Frutales no cítricos	857.254	449.155	1.306.409	186	12,1	34,4	11,5	1,5	87,0
Viñedo	546.035	399.080	945.115	131	10,7	42,2	1,9	1,3	96,9
Frutales cítricos	23.498	283.220	306.717	-19	7,6	92,3	13,8	0,3	85,9
Forrajeras	705.469	226.493	931.963	-43	6,1	24,3	50,5	49,3	0,2
Hortalizas y flores	25.124	204.561	229.685	-27	5,5	89,1	13,7	31,3	55,1
Industriales	790.343	176.272	966.615	-43	4,7	18,2	21,2	61,4	17,5
Tubérculos	9.216	38.290	47.505	-18	1,0	80,6	11,4	76,7	11,9
Leguminosas grano	456.592	34.468	491.060	2	0,9	7,0	12,7	85,6	1,6
Resto (barbechos, viveros, huertos familiares, etc.)	2.795.340	266.269	3.061.609	36	7,2	8,7	-	-	-
Superficie cultivada	13.069.089	3.713.936	16.783.025	436	100,0	22,1	19,4	22,9	57,6
Superficie geográfica	46.826.049	3.771.549	50.597.598	372		7,5			

* La superficie de invernadero se incluye en regadío y en la técnica de riego localizado. Fuente: CaixaBank Research, a partir de datos del mapa (ESYRCE, 2023).

NOTABLES DIFERENCIAS REGIONALES EN EL REGADÍO

La extensión del regadío, la especialización de cultivos y las técnicas de riego muestran una notable diversidad geográfica (véase la tabla). Así, por ejemplo, en las regiones del norte, la abundante pluviometría hace innecesario en muchos casos el riego, mientras que la meseta, con más deficiencia hídrica, ostenta una participación moderada en el regadío. La Comunidad Valenciana y la Región de Murcia son las comunidades autónomas con mayor porcentaje de superficie agrícola en regadío (en torno al 40 %) y se especializan, como es bien conocido, en la producción de frutas y hortalizas, que suelen usar técnicas de riego localizado.

Andalucía es la tercera comunidad con mayor porcentaje de riego en proporción de su superficie geográfica (12,1%), con presencia destacada del olivar, de riego localizado. En Castilla y León predomina la producción de cereales mediante riego por aspersión y automotriz, y en Castilla-La Mancha predomina el viñedo (aproximadamente la mitad de la superficie de riego de la comunidad se destina a este cultivo) con riego localizado. El riego por gravedad se localiza mayoritariamente en los regadíos de la cuenca del Ebro (Cataluña, Aragón y Navarra) en cultivos herbáceos.

Superficie de regadío en las comunidades autónomas, técnicas de riego y principales cultivos de regadío en 2023						
Comunidades autónomas	Superficie de regadío (% superficie geográfica)	Superficie de regadío (% superficie de cultivo)	Técnicas de riego (% de la superficie de regadío en la C. A.)			Cultivos con mayor superficie regada en cada comunidad autónoma
			Gravedad	Aspersión y automotriz	Localizado*	
Murcia	15,7	38,1	12,3	0,2	87,5	Limonero, melocotón, melón
Comunidad Valenciana	12,1	45,2	25,6	0,4	74,0	Naranja, mandarina, uva
Andalucía	12,1	30,0	8,5	7,1	84,4	Aceituna, algodón, naranja
Navarra	9,9	31,6	42,2	36,1	21,7	Maíz, trigo, viñedo
La Rioja	8,6	27,4	29,6	18,5	51,9	Uva, trigo, cebada
Aragón	8,5	22,8	42,0	37,7	20,2	Cebada, alfalfa, maíz
Cataluña	7,9	31,0	43,0	16,9	40,1	Maíz, cebada, aceituna
Castilla-La Mancha	7,5	16,1	3,9	27,4	68,8	Uva, aceituna, cebada
Extremadura	6,2	25,7	21,1	12,1	66,9	Aceituna, maíz, uva
Castilla y León	4,9	12,9	22,0	69,6	8,4	Maíz, trigo, cebada
Baleares	4,2	13,2	6,8	32,3	60,9	Uva, forrajes, aceituna
Canarias	3,5	60,4	10,4	16,5	73,1	Platanera, uva, aguacate
Madrid	2,2	8,5	51,3	37,3	11,5	Maíz, cebada, alfalfa
País Vasco	0,8	6,7	30,4	38,6	31,0	Viñedo, trigo, cebada
Galicia	0,6	4,8	66,0	22,8	11,2	Patatas, uva, maíz
Cantabria	0,1	9,6	19,6	80,1	0,3	Patata, maíz, alfalfa
Asturias	0,0	1,6	17,2	9,8	73,0	Judías secas, manzano, tomate
Total nacional	7,3	22,1	19,4	22,9	57,6	Aceituna, uva, maíz.

(*) La técnica de riego localizado también incluye la superficie de invernaderos. Datos de 2023.

Fuente: Caixabank Research, a partir de datos del mapa (ESYRCE, 2023).

El rendimiento del regadío es naturalmente superior al del secano, con notables diferencias entre tipos de cultivos y regiones. Nótese que las diferencias regionales de rendimiento pueden llegar a ser muy importantes en determinados cultivos, incluso entre parcelas localizadas a cierta proximidad, pues, además del riego, muchos otros factores inciden sobre el rendimiento (orientación de la parcela, factores ambientales, fertilizantes, etc.). A efectos ilustrativos, la anterior tabla muestra el rendimiento medio del regadío y el secano, medido como el número de kilos de producción por hectárea, de tres cultivos representativos y muy extendidos en la geografía española: la uva de transformación (vino), la aceituna de almazara (aceite de oliva) y el trigo blando.

Rendimiento del secano y el regadío de tres cultivos representativos en 2023									
Comunidades autónomas	Viñedo (uva de transformación)			Olivar (aceituna de almazara)			Trigo blando		
	Secano (kg/ha)	Regadío (kg/ha)	Rendimiento regadío/secano	Secano (kg/ha)	Regadío (kg/ha)	Rendimiento regadío/secano	Secano (kg/ha)	Regadío (kg/ha)	Rendimiento regadío/secano
Andalucía	4.567	5.355	1,2	1.567	2.321	1,5	1.047	2.612	2,5
Aragón	3.406	4.980	1,5	986	1.646	1,7	1.324	5.070	3,8
Asturias	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Balears	3.084	5.096	1,7	892	2.261	2,5	2.462	4.555	1,8
C. Valenciana	4.910	4.933	1,0	1.830	1.448	0,8	612	3.215	5,3
Canarias	5.245	5.126	1	-	-	-	685	-	-
Cantabria	4.587	-	-	-	-	-	1.879	2.041	-
Castilla y León	4.045	7.058	1,7	1.923	-	-	1.843	5.110	2,8
Castilla-La Mancha	4.569	9.892	2,2	1.122	3.319	3,0	569	5.225	9,2
Cataluña	3.482	8.083	2,3	950	2.977	3,1	954	3.981	4,2
Extremadura	1.719	4.210	2,4	2.114	8.037	3,8	1.091	2.322	2,1
Galicia	9.529	839	0,1	-	-	-	2.069	-	-
La Rioja	6.798	7.091	1,0	1.628	5.301	3,3	2.559	4.225	1,7
Madrid	2.805	5.000	1,8	784	1.745	2,2	1.340	3.999	3,0
Navarra	6.546	7.851	1,2	3.633	7.909	2,2	3.750	6.147	1,6
País Vasco	-	-	-	932	1.066	1,1	5.889	-	-
R. de Murcia	2.311	6.489	2,8	643	2.991	4,7	59	766	-
España	4.416	8.361	1,9	1.456	2.854	2,0	1.598	4.908	3,1

Fuente: Caixabank Research, a partir de datos del mapa (ESYRCE, 2023).

LOS FONDOS NGEU:
UN NUEVO IMPULSO A LA MODERNIZACIÓN DEL REGADÍO

El Plan para la mejora de la eficiencia y la sostenibilidad en regadío (inversión 1 del Componente 3 del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia, PRTR) contempla la inversión de 712 millones de euros en la modernización de más de 100.000 hectáreas de regadíos existentes. Con datos hasta junio de 2024, se han formalizado inversiones por un importe equivalente al 10 % de esta partida.⁸ El Plan prioriza aquellas actuaciones que cuentan con un elevado impacto en la sostenibilidad ambiental

⁸. Datos del Observatorio interactivo del PRTR de la Airef: acortar.link/9Qx5lh.

o con un componente innovador importante, como la incorporación de tecnologías y herramientas digitales en las comunidades de regantes para conseguir un riego más eficiente.⁹ En cuanto a actuaciones con elevado impacto medioambiental, se priorizan las actuaciones de modernización de regadíos que incluyan la generación de autoconsumo eléctrico con fuentes de energía renovable, por ejemplo, utilizando las infraestructuras de canalización del agua para generar energía eléctrica, o bien actuaciones que usen fuentes de agua no convencionales, como son las aguas residuales regeneradas o aguas desalinizadas.¹⁰

Los fondos NGEU priorizan las modernizaciones de regadíos con mayor impacto ambiental y que incorporen el uso de nuevas tecnologías.

La modernización de los regadíos debería ayudar a cumplir con la normativa comunitaria Directiva Marco del Agua, al contribuir a la protección de las aguas superficiales mediante la reducción de su extracción para riego. Además, también puede ayudar a cumplir los objetivos de la Directiva de Nitratos¹¹ y los de reducción de la contaminación del suelo por el uso de fitosanitarios, ya que la implantación de sistemas de riego por aspersión y goteo permiten una aplicación en el agua de riego de fertilizantes y fitosanitarios en la dosis estrictamente necesaria y en el momento que el cultivo lo necesita. También el uso de aguas regeneradas, que ya contienen nutrientes, permitiría una reducción en el uso de fertilizantes. Todo ello estaría en consonancia con las políticas de la UE enmarcadas dentro del Pacto Verde Europeo, como son la estrategia De la Granja a la Mesa o la estrategia europea de adaptación al cambio climático.

El PRTR también cuenta con un importante impulso reformista que acompaña el plan de inversiones.¹² En este ámbito, se ha establecido la Mesa Nacional del Regadío, un mecanismo de gobernanza a nivel nacional que permita a todos los representantes de las Administraciones públicas y los sectores afectados promover y facilitar la cooperación, consulta e intercambio de información en todos los aspectos relacionados con el regadío. Por otra parte, se ha creado el Observatorio de la Sostenibilidad del Regadío, que tiene como función proporcionar datos objetivos sobre el impacto económico, social y ambiental de los regadíos sobre el territorio.¹³

En definitiva, el regadío es esencial para la producción agraria, es clave para la seguridad alimentaria y un pilar fundamental del desarrollo rural. Su modernización ha sido la gran apuesta para conseguir una agricultura competitiva, rentable y eficiente en el consumo del agua. Con visión de futuro, los escenarios de cambio climático para España prevén una menor disponibilidad de agua (reducción de los recursos hídricos disponibles entre el 12 % y el 40 % antes de final de siglo dependiendo de las regiones) y una distribución más irregular de las lluvias, por lo que es imprescindible seguir mejorando la eficiencia y la sostenibilidad del regadío.

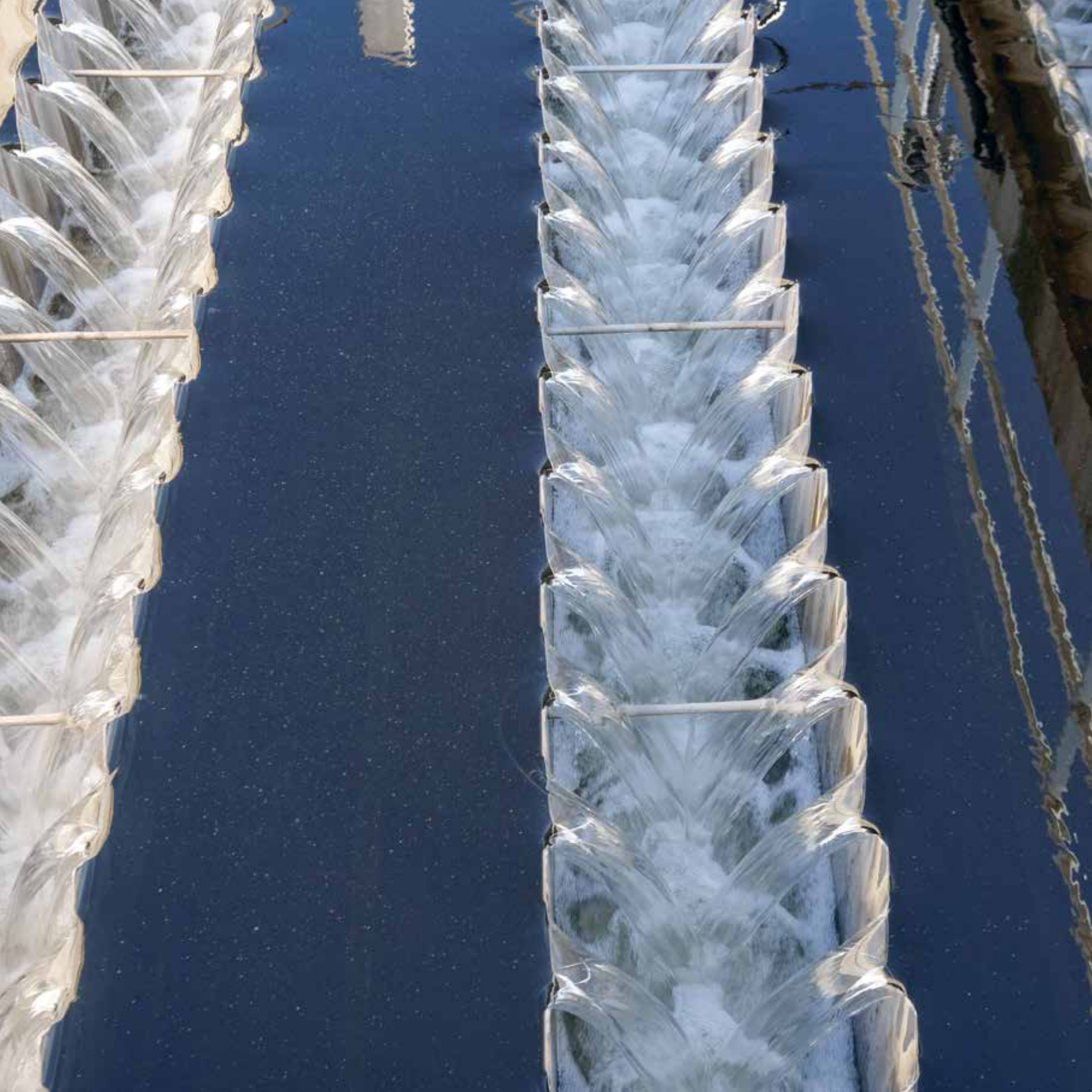
9. El Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SiAR) ofrece información sobre las demandas hídricas de los cultivos bajo riego, permitiendo la optimización en el uso de recursos hídricos.

10. Véase «Fomento de la reutilización de las aguas residuales - Informe complementario», MITECO, 2020.

11. En diciembre de 2021, la Comisión Europea decidió remitir a España al TJUE por no haber tomado las medidas suficientes en relación con la contaminación de nitratos procedentes de fuentes agrarias. Los flujos de retorno de riego se consideran los mayores contribuyentes difusos (no puntuales) de la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas.

12. Reforma 4 «Impulso a la gobernanza y a la sostenibilidad de las inversiones en los regadíos españoles».

13. Véase Real Decreto 854/2022 de 11 de octubre, por el que se crea la Mesa Nacional del Regadío y el Observatorio de la Sostenibilidad del Regadío: [acortar.link/tCGxiT](https://www.boe.es/eli-rd/2022/09/29/854).



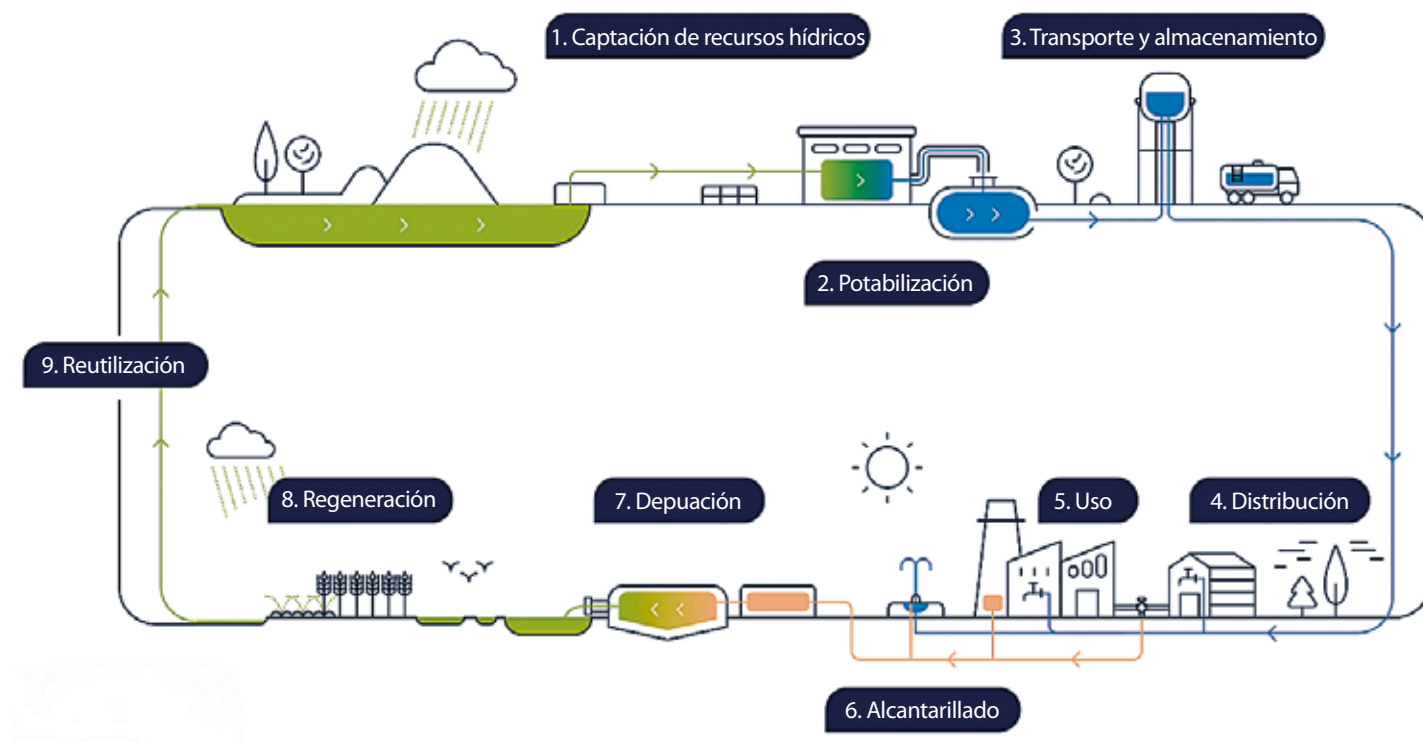


SEIS

EL NUEVO CICLO DEL AGUA.
EFICIENCIA, DESALACIÓN, REGENERACIÓN

Rubén Ruiz Arriazu

CICLO INTEGRAL DEL AGUA URBANA



Todos recordamos aquel gráfico que nos explicaban en los primeros años de la enseñanza básica y que pretendía representar, de un modo sencillo —¡éramos infantes!— el ciclo natural del agua. El profesor o profesora empezaba comentando que en las montañas llovía o nevaba y que así se formaban los ríos. Que estos ríos iban circulando, buscando el mar —que, en contra de lo que tan bellamente escribió Jorjé Manrique, en el caso del ciclo del agua no son el morir—. Una vez el agua en el mar, el sol provocaba la evaporación del agua y la formación de nubes que, vientos mediante, viajaban hasta las montañas donde se deshacían en forma de lluvia (o nieve), iniciándose de nuevo el ciclo natural del agua.

Evidentemente, en función del curso en que nos explicasen esto y del interés del profesor, los detalles podían ser mayores. Que si los acuíferos y los ríos subterráneos, que si la evapotranspiración que realizaban los árboles... Pero tampoco era muy necesario, en el fondo el objetivo era que, desde pequeños, tuviéramos claro de dónde venía el agua.

Es verdad que para los que nacimos antes de los 80 y recibíamos esa formación la explicación del ciclo del agua llevaba implícito un mensaje pernicioso: el agua era inagotable, siempre se reponía y, por lo tanto, no era necesario ningún tipo de cuidado especial, más allá de no contaminarla en exceso.

Años después, y ya no a todos, en secundaria (BUP para los antiguos) nos explicaban el ciclo urbano del agua. Solía ser en clase de Geografía. En aquel momento, el gráfico que ilustraba la materia no solo tenía la montaña con la lluvia de rigor. También incluía campos, ciudades e industrias. Había canales que llevaban el agua a los campos, había potabilizadoras que permitían que el agua pudiera beberse con todas las garantías y había depuradoras que conseguían la devolución al medio receptor del agua residual tratada para minimizar el impacto en dicho medio. Esta forma de explicar el ciclo urbano del agua a mitad de los años 90 era muy optimista, en especial en lo que a depuración se refiere —tengamos en cuenta que, por ejemplo, hasta el año 2004 no se depuró el 100% de las aguas residuales de la ciudad de Barcelona—.

Y hasta aquí toda la formación que mi generación recibió sobre el origen del agua y sus usos. Los mensajes importantes eran fáciles y calaban entre los adolescentes: 1) durante la historia, todo asentamiento se había producido siempre al lado de una fuente de agua y 2) el agua conforma un ciclo.

Y es así. Sin una fuente de agua no había pueblo, por pequeño que fuera. El agua era condición imprescindible para el desarrollo humano. Pero se ha dado la circunstancia de que el crecimiento urbano ha provocado que los recursos de agua originarios sean del todo insuficientes para la realidad actual. Y más todavía para lo que vamos a vivir en las próximas décadas. Ni Madrid se abastece ya de los «viajes del agua», ni Barcelona del acueducto de Dosrius.

Las ciudades han tenido que proveerse de agua mediante fuentes cada vez más lejanas. Se han desarrollado infraestructuras (presas, canales, plantas de tratamiento de aguas...)

que han permitido el desarrollo social y económico durante los siglos XIX, XX y principios del XXI.

Pero la parte central del siglo XXI afronta una serie de retos que están transformando todos los ámbitos humanos: cambio climático, tecnología, seguridad, crecimiento demográfico... afectan sobremanera a la forma de vivir que conocíamos hasta ahora. Y la disponibilidad del agua para la vida humana no se libra de ello. Incluso es uno de los aspectos más influenciados, diría yo.

El primer gran reto que afrontamos como humanidad es el del aumento de la población mundial. Según un informe de Naciones Unidas, «la población mundial alcanzó los 8.000 millones a mediados de noviembre de 2022, desde los 2.500 millones de personas estimadas en 1950, añadiendo 1.000 millones de personas desde 2010 y 2.000 millones desde 1998. Se estima que la población mundial aumentará casi 2.000 millones de personas en los próximos 30 años, pasando de los 8.000 millones actuales a los 9.700 millones en 2050, pudiendo llegar a un pico de cerca de 10.400 millones para mediados de 2080». Este incremento de población requiere y requerirá más alimentos, más energía y más agua para su desarrollo y su bienestar. Pero el planeta es el mismo.

El segundo gran reto, cuyas consecuencias ya estamos padeciendo, es el cambio climático. Concretamente, en lo que al agua se refiere, sin pretender ser exhaustivo y únicamente para ilustrar lo que a continuación propondré, ya estamos viendo reducción y cambio en la precipitación, aumento de la evapotranspiración, reducción de escorrentía y, en resumen, menos agua disponible en las fuentes tradicionales.

Según el CEDEX, en su «Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España» se calcula un descenso en la precipitación de «-2 % y -4 % para 2010-2040, -6 % y -8 % para 2040-2070 y -7 % y -14 % para 2070-2100», y de la escorrentía de «-3 % y -7 % para 2010-2040, -11 % y -14 % para 2040-2070 y -13 % y -24 % para 2070-2100». También se concluye que «se pronostica de manera general una reducción de recursos hídricos en España conforme avance el siglo XXI y por lo tanto un aumento de la escasez de agua en España». Finalmente, afirma que «las sequías de 2 años de duración serán más frecuentes [...]. Lo mismo ocurre con las sequías de 5 años de duración».

Así pues, afrontamos un doble problema: un crecimiento nunca conocido de población —y, por lo tanto, de necesidad de alimentos, agua y energía— y, en paralelo, una disminución de recursos tradicionales de agua. Por ejemplo, si esto lo aterrizamos al caso de Cataluña —como ejemplo de región mediterránea— en el «Plan de gestión del distrito de cuenca fluvial de Cataluña y programa de medidas. 2022-2027. Documento de síntesis» de la Agencia Catalana del Agua (ACA) se explica como las reducciones relativas de las aportaciones anuales a nivel de cuencas principales —comparando estimaciones de 2021-2050 vs 1971-2000— son del 18,3 % para el distrito de cuenca fluvial de Catalunya. La misma ACA estimaba hace unos años «que el déficit hídrico actual

en la región metropolitana es de 2 m³/s, equivalente a 60 hm³ al año. Un déficit que se duplicará en 2027 (4 m³/s y unos 125 hm³ anuales) y llegará a 6 m³/s en 2039 (aproximadamente 190 hm³ al año)».

Y eso, como no puede ser de otra manera, afecta al ciclo urbano del agua. Las grandes metrópolis necesitan cada vez más recurso y, sobre todo, que este sea más resiliente. Es la única forma de garantizar la seguridad hídrica; esto es, disponer de forma continua del volumen y calidad de agua necesaria para el desarrollo de la actividad social, económica y ambiental. De lo contrario, la interrumpibilidad de la disponibilidad de agua —ya sea por carencia o por falta de calidad necesaria para su uso— causa un impacto grave en la vida cotidiana de los ciudadanos: eliminación de mantenimiento de zonas verdes, limpieza viaria y fuentes ornamentales, restricción de uso en algunas actividades económicas —llegando incluso a implicar reducción de plantillas, despidos y cierres de empresa—, restricciones a determinados usos domésticos... y llegando, en caso extremo, a cortar el suministro domiciliario durante alguna hora o de forma total —esto implicaría la necesidad de evacuar dicha población—. Todo esto nos puede parecer exagerado e improbable, pero en los últimos años ciudades como Ciudad del Cabo, São Paulo o Barcelona han vivido estos escenarios.

Ante estos retos, las metrópolis deben aumentar su seguridad hídrica. Esto pasa por aumentar la eficiencia del uso del recurso donde sea posible, avanzar en un uso más responsable del agua —esto fue muy demandado en la actual sequía de Cataluña, a pesar de que la dotación doméstica del Área Metropolitana de Barcelona estaba en unos 105 l/hab.día y no había margen de mejora sustancial, como así pasó— y aumentar la resiliencia de los recursos.

Por aumentar la resiliencia de los recursos entendemos tener más fuentes y más seguras, con menos posibilidad de fallo por contaminación, disminución o carencia de algún elemento esencial para su producción —como la energía en el caso de la desalinización—. Para ello contamos, hoy en día, con un desarrollo tecnológico y de conocimiento que permite transformar en agua potable casi cualquier tipo de agua, con toda garantía y con un coste asumible.

Actualmente, como fuentes de agua «no convencionales» se está apostando tanto por la desalinización como por la reutilización de aguas regeneradas. Me centraré en esta segunda, dado que es la que más transforma el ciclo urbano del agua.

La reutilización de aguas regeneradas es un concepto sencillo: se trata de, una vez que el agua residual ha sido depurada, se le aplica un tratamiento adicional (terciario) para adecuar el agua a una serie determinada de usos. En un ámbito periurbano, la utilización del agua regenerada para uso agrícola tiene mucha tradición y gran implantación, sobre todo en el levante español, Israel y California. A medida que las necesidades se han ido incrementando, se propone la utilización de esta agua regenerada para usos urbanos sin necesidad de calidad de agua potable, como podrían ser usos industriales (refrigeración),

riego de parques y jardines, limpieza viaria y del alcantarillado... Esto obliga a la construcción de nuevas redes de distribución de esta agua regenerada, con el coste económico asociado. Finalmente, en el caso de Barcelona, ante la emergencia provocada por la sequía, la falta de anticipación de las administraciones públicas y la disponibilidad de la capacidad de regenerar agua, pero no de distribuirla, se ha optado por una solución innovadora y pragmática.

Lo que se ha hecho en Barcelona durante la sequía que en el momento de escribir estar líneas estamos viviendo —y que empezó en 2022— es regenerar toda el agua que se podía regenerar en la Ecofactoría del Baix Llobregat —hasta un límite de unos 1.500-1.800 l/s, dependiendo de la época del año—, bombear esa agua hasta unos 8 km aguas arriba de la Estación Potabilizadora (ETAP) de Sant Joan Despí, mezclarla con el río Llobregat —en proporciones cercanas a 1:1— y captarla toda en dicha ETAP para potabilizarla. Esto ha permitido, durante la segunda mitad del 2023 y la primera del 2024 que un 25 % del agua potable abastecida en el Área Metropolitana de Barcelona haya tenido como origen agua residual regenerada, de forma que se hayan suministrado unos 50 Hm³/año que, de no hacerlo, habría provocado el vaciamiento de los embalses y la discontinuidad en el suministro de agua potable a más de 5 millones de personas. No hace falta decir que la autoridad sanitaria ha supervisado y validado en todo momento esta operación y que se ha mantenido la máxima garantía sanitaria de forma continua y permanente.



Agua regenerada.



Tuberías.

Esta operación, única en el mundo, más allá de ser un éxito de gestión que pocos conocen y menos agradecen como se debería, abre muchos temas a tratar.

Por ejemplo, ¿esto es seguro desde un punto de vista sanitario? Indudablemente lo es. Se estableció el mayor control paramétrico para un agua potable de la historia, pero cambia el paradigma del ciclo urbano del agua. Y abre cuestiones sociales que debemos tratar: ¿estamos preparados para asumir que el agua potable que sale por nuestro grifo hace 48 horas era el agua residual de nuestros retretes? Además, apostar por las aguas regeneradas como parte esencial en el ciclo urbano del agua obliga a replantearse la consideración que le damos a los sistemas de saneamiento. En este nuevo paradigma, los colectores de aguas residuales son tan importantes para la garantía de suministro como las tuberías de agua potable y, por lo tanto, así debemos tratarlos. Esto implica mejor conocimiento de su funcionamiento, mayor capacidad de gestión y, sobre todo, muchísimo más control de las aguas vertidas —en especial, desde el punto de vista industrial—.

Otro aspecto a abordar es del modelo de gestión y financiación: ahora sí únicamente hay un ciclo, el ciclo integral del agua urbana. Esto implica la necesidad de que tanto la regulación como la gestión se alineen a este nuevo escenario. Por ejemplo, puede darse la necesidad de invertir en una depuradora que sí que cumple con la legislación de agua residual pero que necesita mejoras para optimizar el proceso de regeneración posterior del agua para garantizar el abastecimiento. Si los departamentos que validan estas inversiones no tienen esta visión conjunta, puede pasar —ha pasado— que se demoren *sine die* actuaciones muy necesarias.

También hay que plantearse por qué modelo estructural de implantación del agua regenerada apuestas. ¿Es mejor apostar por la utilización de esta agua para usos de menor calidad, como riego de parques y jardines o limpieza viaria? ¿O se prefiere apostar por aportar el agua regenerada como agua prepotable aguas arriba del sistema de potabilización? Estas preguntas, que en muchos casos no nos estamos haciendo, apostando automáticamente por la primera opción —ya que esta no obliga a afrontar el dilema social de aceptar que el agua es agua, independientemente de su «historia» o de sus «antecedentes»—, es fundamental. Aquí hay una cuestión de fondo —agua potable que antes fue residual— y la necesidad de explicárselo a la sociedad y garantizar la seguridad sanitaria. Pero también hay cuestiones de inversión —en redes de distribución de agua regenerada vs en sistemas de tratamiento más potente en estaciones de potabilización—. Pero, para mí, lo que inclina la balanza hacia un modelo u otro es el nivel de garantía que tienes de la seguridad hídrica. Si tu sistema es débil, deberías apostar por utilizar el agua regenerada como agua prepotable, ya que, si apuestas por su utilización en usos «secundarios», ante un nivel de emergencia importante, podría darse la circunstancia de no tener agua potable en nuestros grifos, pero sí tener agua para limpiar las calles o regar los jardines. Esto sería inadmisible y un fallo de la planificación imperdonable.

Y ya que estamos: ¿podemos plantear una potabilización directa de agua regenerada? Hoy en día, esto no está contemplado por la legislación europea —sí en California, por ejemplo—. Desde un punto de vista tecnológico, no hay ninguna necesidad de verter el agua a un río para posteriormente captarla y potabilizarla. Al contrario, es contraproducente desde un punto de vista de resiliencia del sistema. Un vertido a ese río, lluvias torrenciales que incrementen mucho la turbidez, etc., hacen que esa agua no se pueda potabilizar, incluyendo el agua regenerada que, por sí misma, sí se podría. Como digo, a nivel de conocimiento y tecnología, somos capaces de potabilizar —es decir, producir agua para consumo humano con todas las garantías sanitarias y cumpliendo la estricta regulación actual— desde agua regenerada. Es viable técnicamente y económicamente —es más barata que otras fuentes «no convencionales»—.

Finalmente, ¿cómo queda el nuevo ciclo del agua urbana? Claro, porque según lo que nos enseñaban en el colegio el origen era la lluvia. Pero ahora, si decidimos apostar de una forma estructural por la reutilización de agua regenerada, ¿cuál es el origen del agua? ¿La lluvia? ¿La cisterna del retrete? Yo me imagino, en quizá no muchos años, que el ciclo del agua urbana no incluya montañas ni ríos y sí plantas regeneradoras de agua, desalinizadoras y acuíferos. Sería un ciclo que empezaría en nuestra cisterna del retrete, que pasaría por las alcantarillas y los colectores, llegaría a plantas de regeneración y posteriormente de potabilización para pasar a las redes de distribución de agua potable y a nuestros grifos y cisternas de retrete.

Esto, lejos de asustarnos, sería una forma de desconectar el sistema natural, que también tiene sus necesidades —el primer impacto ante la escasez de agua es el ambiental, la biodiversidad; y es un impacto que no hemos internalizado como sociedad y que requiere una reflexión profunda—, del sistema urbano. Serían dos sistemas en paralelo, con sus recursos y usos, pero desconectados. Esto redundaría en que un sistema, el natural, no sería fuente del otro sistema, el urbano, que internalizaría costes ambientales —actualmente externalizados— de forma que el ciclo urbano del agua incorporaría, por fin, todos los costes del mismo. Esto es posible hoy en día, será necesario mañana e imprescindible pasado mañana.









SIETE

**LA IMPORTANCIA DE LAS AGUAS
SUBTERRÁNEAS EN LA GESTIÓN MODERNA
INTEGRADA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS**

Xavier Sanchez-Vila

Daniel Fernàndez-Garcia

Las aguas subterráneas son una de las componentes del ciclo natural del agua, y por ello constituyen uno de los pilares fundamentales de la gestión sostenible de los recursos hídricos en cualquier cuenca hidrográfica. Los recursos subterráneos son ubicuos y representan el 99 % de la totalidad del agua dulce en estado líquido del planeta, pero al tratarse de reservas ocultas bajo la superficie terrestre, son a menudo «invisibles», y por ello, aunque ya desde la antigüedad han sido aprovechadas por las distintas civilizaciones para satisfacer necesidades básicas como el consumo humano, la agricultura, la ganadería y, posteriormente, la industria, en la actualidad siguen siendo las grandes ignoradas.

El papel de las aguas subterráneas va mucho más allá del suministro de agua; desempeñan una función crítica en la regulación de los caudales base de los ríos y en el mantenimiento de humedales y otras masas de agua superficial de carácter permanente o semipermanente —un ejemplo paradigmático son los oasis—. La implicación inmediata de estas relaciones es que las aguas subterráneas son las responsables directas del mantenimiento de los ecosistemas acuáticos que dependen de estas aportaciones de agua subterránea a la superficie. Otro ejemplo de la relevancia de las aguas subterráneas son las surgencias naturales, aprovechadas industrialmente para embotellar agua, o como fuente de turismo, incluyendo la posible presencia de aguas termales.

El ciclo del agua convencional, y la correspondiente gestión de los recursos hídricos, se ha visto modificado en los últimos años con la incorporación de recursos no convencionales, incluyendo la desalación de agua marina y la regeneración de aguas entre otras. Sin embargo, esta última implica de nuevo la utilización de los acuíferos como elemento básico con un alto impacto en la cantidad de los recursos hídricos, pero también en su calidad. Esta implicación permite reevaluar el papel global de los acuíferos en la gestión, en un contexto de amenazas sobre los recursos ligadas al contexto de sobrepresión sobre los mismos por el aumento de la demanda y la reducción de la oferta ligada a los efectos del cambio climático.

EL CICLO DEL AGUA Y LA IMPORTANCIA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

EL CICLO HIDROLÓGICO

El ciclo del agua es el proceso continuo de circulación del agua en la Tierra, en el cual las aguas subterráneas juegan un papel esencial (Figura 1). Este ciclo involucra la evaporación del agua desde los océanos, lagos y ríos hacia la atmósfera, la condensación que forma las nubes, y la precipitación en forma de lluvia o nieve que retorna el agua a la superficie terrestre. De un modo muy simplificado, y obviando muchos de los procesos que tienen realmente lugar pero que son poco importantes desde el punto de vista cuantitativo, se puede considerar que la precipitación se divide en tres grandes componentes: 1) la puramente superficial, que eventualmente alcanza los arroyos, rieras y ríos de manera más o menos directa, 2) la componente que se infiltra en el suelo y es captada por la cubierta vegetal y que, por tanto, es la responsable de mantener bosques, pastos y parte del terreno agrícola, y 3) la que una vez infiltrada en el suelo prosigue infiltrándose por gravedad a través de los poros en los materiales no consolidados y de fisuras en las rocas, hasta alcanzar capas de roca impermeable que impiden que prosiga su descenso, y conformando así los reservorios subterráneos conocidos como acuíferos.



Figura 1. El ciclo hidrológico (acortar.link/VIDYFK).

Los acuíferos se definen como formaciones geológicas que poseen dos propiedades: contienen agua y son capaces de transmitirla. El volumen de agua almacenado en un acuífero se obtiene como el producto del volumen total del reservorio multiplicado por la fracción de volumen de los poros o de las fisuras rellenas de agua —factor que se conoce por el nombre de *porosidad*—, y en general suponen volúmenes muy importantes. Tanto es así que se ha cuantificado que el volumen almacenado en los acuíferos a escala mundial es igual a 100 veces el volumen de agua dulce superficial si sumamos la presente en los lagos de agua dulce más la que se encuentra circulando por los ríos o almacenada en embalses superficiales en cualquier momento dado.

El agua en los acuíferos fluye a velocidades muy lentas —típicamente algunos metros por año— hacia el mar, pero un volumen significativo aflora a la superficie durante esta travesía, saliendo bien por manantiales o surgencias naturales, o por la liberación lenta hacia ríos, lagos y humedales, especialmente durante períodos secos, lo que redunda en el mantenimiento de estos cuerpos de agua.

El agua subterránea también puede extraerse mediante algún tipo de obra hidráulica, siendo la más común los pozos verticales.

LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS COMO RECURSO ESTRATÉGICO

Las aguas subterráneas son un recurso estratégico debido a su estabilidad y su disponibilidad a largo plazo. A diferencia de las aguas superficiales, que pueden ser rápidamente afectadas por la variabilidad climática, como sequías o inundaciones, las aguas subterráneas ofrecen una fuente más constante y predecible de agua. Esto es particularmente crucial en regiones áridas y semiáridas, donde los acuíferos a menudo representan la única fuente de agua disponible durante los largos períodos de sequía.

A nivel mundial, se estima que aproximadamente el 30 % del agua dulce disponible proviene de fuentes subterráneas (Figura 2). Este porcentaje es aún mayor en algunas regiones donde la escasez de agua superficial es crítica. Por ejemplo, en muchas partes de África, Asia y América Latina, las aguas subterráneas representan más del 50 % del agua utilizada para consumo humano, agricultura e industria.

En realidad, estos números son muy discutibles, y corresponden solo a las extracciones directas. Si consideramos que gran parte del agua captada de los ríos son, fundamentalmente, aportaciones de las aguas subterráneas, se entiende que algunos autores hablen de que las aguas subterráneas representan directa o indirectamente más del 70 % del consumo a escala mundial.

¿Dónde está el agua de la Tierra?

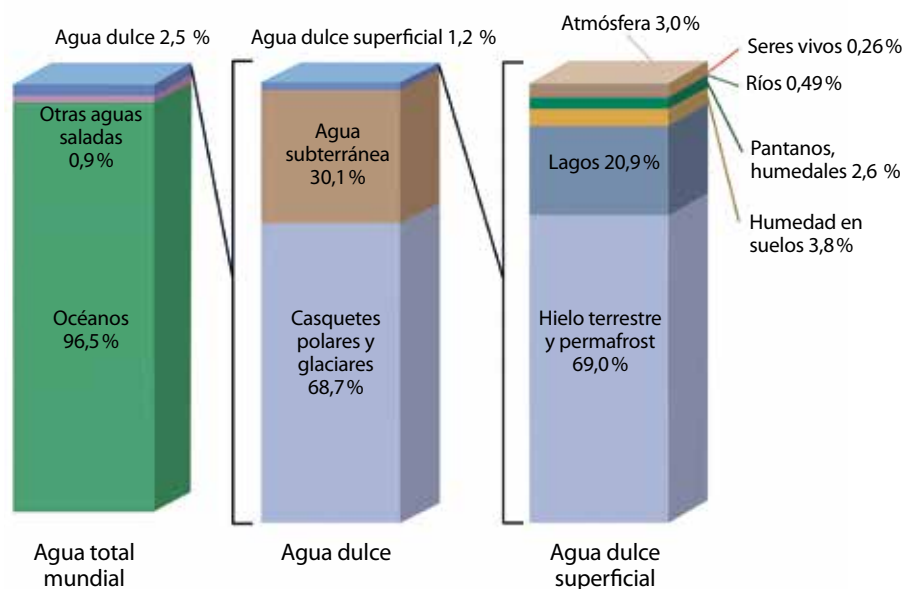


Figura 2. Distribución del agua en la tierra (acortar.link/n28iaj).

La capacidad de las aguas subterráneas para actuar como una reserva de agua durante períodos de escasez ha llevado a su sobreexplotación en muchas regiones. La extracción excesiva de agua subterránea sin una recarga adecuada ha dado lugar a una serie de problemas graves, como la disminución de los niveles freáticos, la subsidencia del suelo y la intrusión de agua salina en acuíferos costeros, que se comentarán más adelante.

LA CALIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

La calidad de las aguas subterráneas es un aspecto crucial para su utilización en diversas actividades humanas. De modo general, las aguas subterráneas son de mucho mejor calidad que las superficiales, debido a una combinación de factores. El agua subterránea no solamente está menos expuesta a la contaminación humana y atmosférica por no tener contacto directo con la actividad humana, sino que, además, al filtrarse a través del terreno, experimenta un proceso natural de purificación que elimina patógenos y reduce la carga de compuestos químicos indeseados. Al mismo tiempo, al interactuar con el terreno, incorpora minerales naturales que la hacen más saludable y de mejor sabor. Sin embargo, aun así, las actividades antrópicas pueden deteriorar esta calidad, añadiendo un

conjunto de contaminantes debidos a las actividades productivas (agricultura, ganadería, industria y turismo), la aportación de aguas residuales o los lixiviados de vertederos, entre otros.

La calidad del agua debe ser gestionada y protegida para garantizar su disponibilidad y seguridad para el consumo humano, la agricultura, la industria, y la preservación de los ecosistemas. El monitoreo constante y la mitigación de las fuentes de contaminación son esenciales para mantener la calidad de este recurso natural.

EL PAPEL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL MANTENIMIENTO DE LAS MASAS DE AGUA SUPERFICIAL

CONTRIBUCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS AL CAUDAL BASE DE LOS RÍOS

El caudal base de un río es el flujo de agua que se mantiene en el curso del mismo durante períodos en los que no hay aportes significativos de agua superficial, como en las temporadas secas o de estiaje. Este caudal es fundamentalmente sostenido por la descarga de aguas subterráneas hacia el río. En muchas cuencas hidrográficas, el caudal base representa una porción significativa del flujo total del río, y en algunos casos, como en zonas semiáridas o áridas, puede ser el único aporte de agua durante los períodos secos. En términos generales, el tiempo en el que el agua circula por un río puede ser de horas o de unos pocos días, mucho menor que el periodo entre dos episodios de lluvia consecutivos, de modo que los ríos se secarían completamente si no existiese esta aportación subterránea.

Las aguas subterráneas contribuyen al caudal base de los ríos a través de un proceso conocido como descarga directa o de base. Este proceso ocurre cuando el nivel freático, que es la superficie superior del agua subterránea en un acuífero, se encuentra por encima del nivel del agua en el río. En tales condiciones, el agua subterránea aporta un flujo continuo que es aproximadamente proporcional a la diferencia entre estos dos niveles. Este flujo hacia los ríos es especialmente importante en regiones donde las precipitaciones son estacionales o donde las fuentes superficiales de agua son limitadas.

El caudal base de un río puede verse afectado por una variedad de factores, tanto naturales como antrópicos. Entre los factores naturales se incluyen la geología de la cuenca, el clima, la topografía y la vegetación. Las cuencas con suelos altamente permeables y acuíferos bien desarrollados tienden a tener un caudal base más alto, ya que permiten una mayor infiltración de agua y una descarga subterránea sostenida. Por otro lado, las actividades humanas, como la extracción de aguas subterráneas, la agricultura intensiva

y la deforestación, pueden reducir significativamente el caudal base de un río, ya que tienen un efecto en la reducción del nivel freático, y por tanto la aportación de agua subterránea.

CONTRIBUCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS AL MANTENIMIENTO DE HUMEDALES

En muchos humedales, especialmente en aquellos no conectados directamente a ríos o lagos, las aguas subterráneas son la principal fuente de aporte de agua. En general, los humedales pueden actuar como zonas de recarga donde las aguas superficiales penetran en el subsuelo, o como zonas de descarga donde las aguas subterráneas emergen a la superficie. En este último caso, las aguas subterráneas, al pasar por capas de suelo y rocas, suelen llegar a los humedales con menos contaminantes, actuando como una fuente de agua limpia a temperatura más o menos constante durante todo el año. Esto es esencial para mantener la calidad del agua en el humedal y sostener la vida acuática y terrestre.

Los humedales alimentados por aguas subterráneas pueden actuar como amortiguadores naturales, absorbiendo el exceso de agua durante lluvias intensas y liberándola lentamente, lo que reduce el riesgo de inundaciones. Estos mismos humedales pueden suponer un elemento de protección contra la desertificación al mantener una fuente constante de agua.

En las zonas costeras existe una interrelación entre el nivel freático del acuífero y el nivel del mar, así como de las oscilaciones de ambos. Las variaciones naturales o antrópicas en los niveles del acuífero suponen unas implicaciones en la calidad del agua del mismo, con variaciones en la distribución de la salinidad. De esta manera, en algunos humedales costeros, las aguas subterráneas dulces pueden mitigar la salinidad, creando un ambiente propicio para diversas especies que no toleran altas concentraciones de sal.

IMPACTO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LOS ECOSISTEMAS ASOCIADOS

ECOSISTEMAS DEPENDIENTES DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Los ecosistemas dependientes del agua subterránea son aquellos que dependen, total o parcialmente, de las aguas subterráneas para su existencia y funcionamiento. Estos ecosistemas incluyen sistemas de vegetación ribereña y bosques de ribera, además de los asociados a humedales o manantiales.

El caudal base de los ríos, sostenido por la descarga de aguas subterráneas, es fundamental para mantener la integridad ecológica de los ecosistemas acuáticos y ribereños. Una función clave del caudal base es la de regular la temperatura del agua, especialmente en regiones donde las temperaturas ambientales pueden variar significativamente. El agua subterránea, al ser más fría que el agua superficial, ayuda a mantener temperaturas óptimas en los ríos durante el verano, lo que es crucial para la supervivencia de especies acuáticas sensibles, como ciertos peces y macroinvertebrados. Además, el caudal base garantiza un suministro constante de nutrientes y sedimentos, que son esenciales para la productividad biológica de los ríos y sus llanuras aluviales. Estos nutrientes y sedimentos, transportados por el flujo de agua, soportan la cadena alimentaria acuática, desde las plantas y algas hasta los peces y otros organismos superiores. Sin el caudal base, la disponibilidad de nutrientes podría reducirse, afectando la producción primaria y, en consecuencia, la biodiversidad del ecosistema.

El caudal base también juega un papel importante en la dilución de contaminantes en los ríos. Durante las temporadas secas, cuando el flujo superficial es bajo, la descarga de aguas subterráneas puede ayudar a diluir las concentraciones de contaminantes, manteniendo la calidad del agua en niveles adecuados para la vida acuática y los usos humanos. La reducción del caudal base, por lo tanto, puede conducir a una mayor concentración de contaminantes, lo que resulta en la degradación de los hábitats acuáticos y la pérdida de biodiversidad.

Un flujo constante de agua es necesario para mantener los hábitats acuáticos, garantizar la calidad del agua y proporcionar las condiciones necesarias para la vida de diversas especies.

Una disminución de las aportaciones podría tener graves consecuencias para los ecosistemas acuáticos y las comunidades humanas que dependen de los ríos. Sin un flujo constante de agua subterránea, los ríos se pueden secar durante la estación seca, lo que afecta la biodiversidad acuática, la calidad del agua y el suministro de agua para usos domésticos, agrícolas e industriales.

Por lo que respecta a los humedales dependientes de las aguas subterráneas, destacar que estos sistemas actúan como esponjas naturales que almacenan agua durante las temporadas húmedas y la liberan lentamente durante las temporadas secas, manteniendo hábitats críticos para una amplia variedad de especies. Los humedales también desempeñan un papel crucial en la recarga de acuíferos, la regulación del clima local y la mejora de la calidad del agua a través de la filtración de sedimentos y contaminantes.

Otro ejemplo son los manantiales, que son puntos donde las aguas subterráneas emergen naturalmente a la superficie. Los manantiales pueden formar ecosistemas únicos que albergan especies endémicas y proporcionan fuentes de agua vitales para la fauna local y las comunidades humanas. Estos ecosistemas son extremadamente sensibles a los cambios en el nivel freático y pueden verse gravemente afectados por la sobreexplotación de aguas subterráneas.

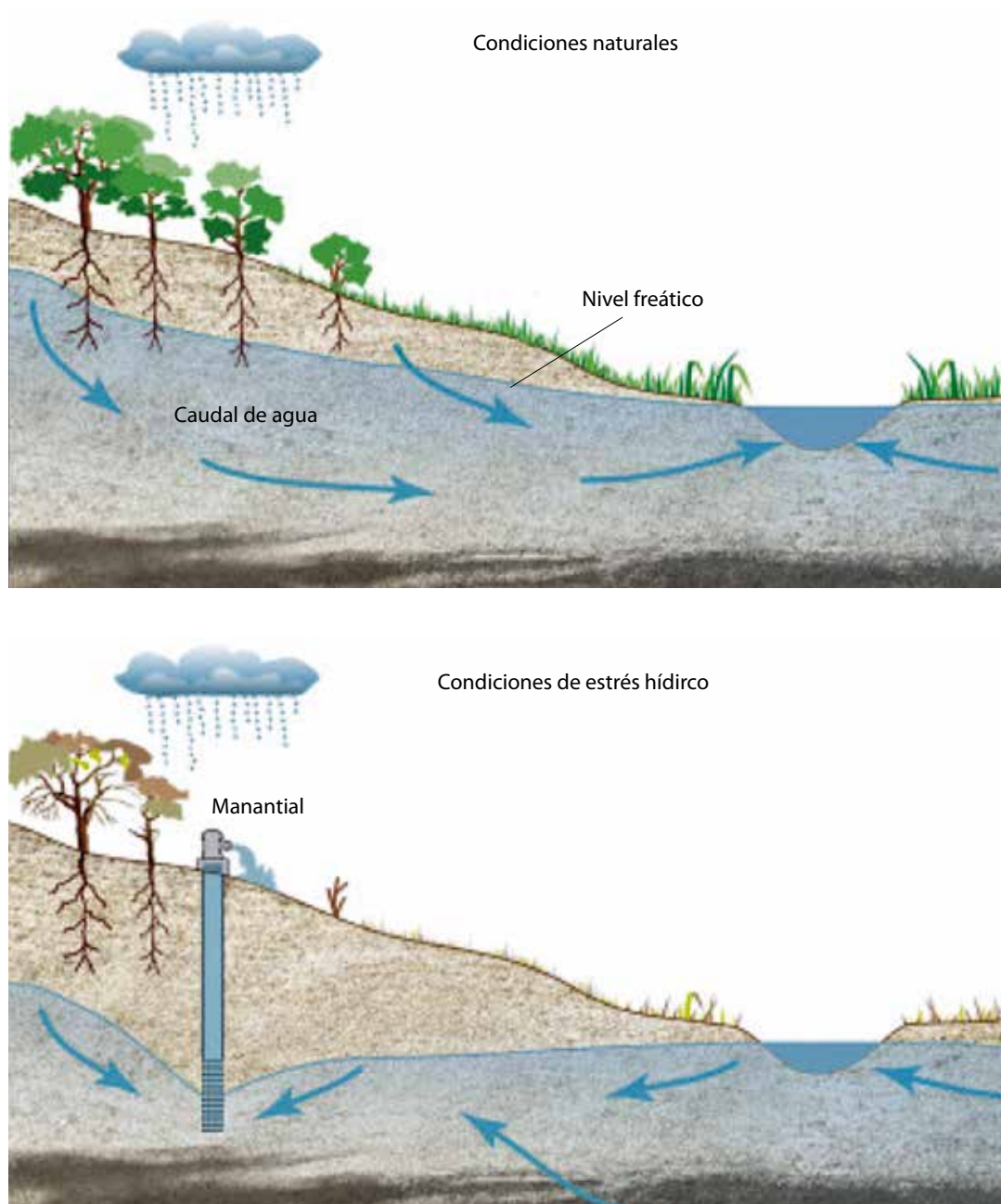


Figura 3. Figura ilustrativa de impacto de sobreexplotación de acuífero (Fuente: acortar.link/NSPGFc).

CONSECUENCIAS DE LA REDUCCIÓN DE LAS APORTACIONES SUBTERRÁNEAS A LAS MASAS DE AGUA SUPERFICIAL

La reducción de los caudales aportados a las masas de agua superficial, debido a la sobre-explotación de aguas subterráneas o a la alteración de las zonas de recarga, puede tener consecuencias devastadoras para los ecosistemas acuáticos y ribereños. Entre las principales consecuencias se incluyen:

DESECACIÓN DE RÍOS, MANANTIALES Y ARROYOS

Uno de los impactos más directos de la reducción del caudal base es la desecación de ríos, manantiales y arroyos durante la estación seca. Sin un aporte constante de aguas subterráneas, muchos ríos pueden reducirse a pequeños flujos o secarse por completo, lo que resulta en la pérdida de hábitats acuáticos y la interrupción de los ciclos de vida de numerosas especies. La desecación de ríos y arroyos también afecta a las comunidades humanas que dependen de estos cuerpos de agua para el abastecimiento de agua potable, el riego agrícola y otras actividades económicas. La Figura 3 muestra de forma ilustrativa la desecación de ríos y manantiales producidos por el desarrollo agrícola.

PÉRDIDA DE BIODIVERSIDAD

La reducción del caudal aportado por los acuíferos base puede conducir a la pérdida de biodiversidad en los ecosistemas acuáticos. Muchas especies acuáticas, incluyendo peces, anfibios y macroinvertebrados, dependen de un flujo constante de agua para sobrevivir. Las alteraciones o discontinuidades en las aportaciones pueden alterar las condiciones del hábitat, como la temperatura, la disponibilidad de oxígeno y la hidroquímica del agua, lo que puede hacer que estos hábitats sean inhabitables para algunas especies. Además, la reducción del flujo de agua puede fragmentar los hábitats acuáticos, dificultando la migración y reproducción de las especies.

DEGRADACIÓN DE HUMEDALES

La reducción del flujo de agua subterránea hacia los humedales puede resultar en su desecación, lo que afecta no solo a la biodiversidad local, sino también a los servicios ecosistémicos que estos proporcionan, como la regulación del clima, la recarga de acuíferos y la mejora de la calidad del agua. La pérdida de humedales también puede aumentar la vulnerabilidad de las zonas circundantes a inundaciones y sequías. Un caso emblemático en España son las Tablas de Daimiel (Figura 4), donde el riego tradicional de los pozos, que proporcionaban cerca de 60 millones de m³ anualmente para el riego de 300 km², fue desplazado gradualmente y por mediados de 1980 más de 1.250 km² estaban bajo riego,

con un máximo de 600 millones de $\text{m}^3/\text{año}$ de agua subterránea, suponiendo casi el doble de la cantidad de agua renovable (unos 320 millones de $\text{m}^3/\text{año}$).



Figura 4. Evolución de niveles piezométricos en las tablas de Daimiel (Custodio, 2002).

AUMENTO DE LA CONTAMINACIÓN

La reducción del caudal base también puede exacerbar los problemas de contaminación en los ríos. Sin un flujo constante de aguas subterráneas para diluir los contaminantes, las concentraciones de sustancias nocivas en el agua pueden aumentar, lo que pone en peligro la vida acuática y la salud humana. Este problema es particularmente grave en áreas urbanas e industriales, donde la contaminación de fuentes puntuales y difusas es una preocupación constante. La Figura 5 muestra el porcentaje de cuerpos de agua superficial en las demarcaciones hidrográficas de Europa que no están en buen estado/potencial ecológico.

EL PAPEL DE LOS ACUÍFEROS EN LA GESTIÓN SOSTENIBLE MODERNA

DESAFÍOS DE LA GESTIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La gestión de las aguas subterráneas presenta una serie de desafíos debido a su naturaleza oculta y a la complejidad de las dinámicas hidrogeológicas. A diferencia de las aguas superficiales, que son visibles y relativamente fáciles de medir, las aguas subterráneas requieren un conocimiento especializado y herramientas avanzadas para ser monitoreadas y gestionadas de manera efectiva.

Uno de los principales desafíos es la falta de datos precisos sobre los acuíferos, incluyendo su extensión, capacidad de almacenamiento, tasas de recarga y calidad del agua. Sin esta información, es difícil desarrollar políticas de gestión efectivas que equilibren la extracción con la recarga natural. Además, la falta de monitoreo continuo y la ausencia de

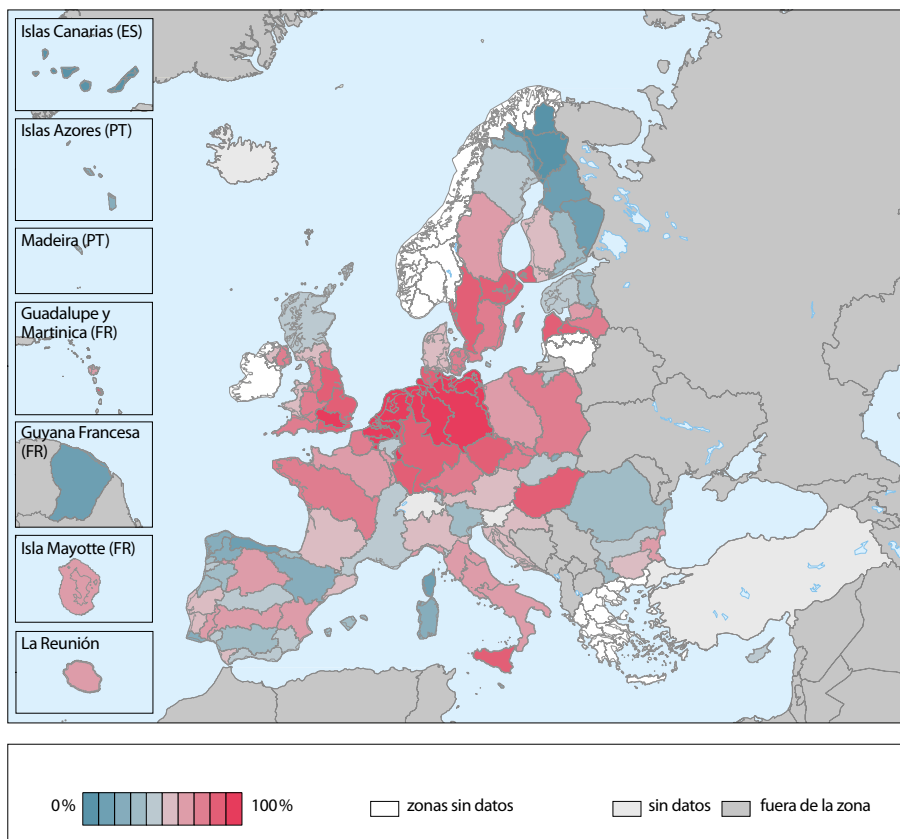


Figura 5. Porcentaje de cuerpos de agua superficial en las demarcaciones hidrográficas de Europa que no están en buen estado/potencial ecológico: segundos planes de gestión de cuencas hidrográficas (RBMPs).

regulaciones adecuadas pueden llevar a la sobreexplotación y degradación de los acuíferos, con consecuencias a largo plazo para el suministro de agua y los ecosistemas.

ESTRATEGIAS PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE

La gestión sostenible de las aguas subterráneas requiere un enfoque integral que considere conjuntamente las necesidades humanas y la protección de los ecosistemas. Algunas estrategias clave incluyen:

MONITORIZACIÓN Y EVALUACIÓN CONTINUA

La monitorización continua es esencial para comprender las dinámicas de los acuíferos y detectar cambios en los niveles de agua y la calidad del agua a lo largo del tiempo. Esto puede lograrse mediante la instalación de redes de pozos/puntos de observación, el uso de tecnologías de teledetección y la implementación de modelos hidrogeológicos que

simulen el comportamiento de los acuíferos bajo diferentes escenarios de extracción y recarga, aspecto en el que incidiremos más adelante.

La monitorización también permite la detección temprana de problemas, como la sobreexplotación o la contaminación, y facilita la adopción de medidas correctivas antes de que se produzcan daños irreversibles. Además, los datos recopilados pueden utilizarse para informar la planificación y la toma de decisiones en la gestión de los recursos hídricos a nivel local, regional y nacional.

PROTECCIÓN DE LAS ZONAS DE RECARGA

Las zonas de recarga natural, donde el agua de precipitación se infiltra en el suelo y recarga los acuíferos, son áreas críticas que deben ser protegidas para garantizar la sostenibilidad de las aguas subterráneas. Estas zonas a menudo están amenazadas por la urbanización, la agricultura intensiva y otras actividades humanas que pueden reducir la infiltración de agua o contaminar los acuíferos.

La protección de las zonas de recarga puede lograrse mediante la implementación de regulaciones de uso del suelo que limiten el desarrollo en estas áreas y promuevan prácticas sostenibles, como la conservación de la vegetación natural y la restauración de humedales. Además, es importante promover la reforestación y otras prácticas de manejo del paisaje que aumenten la capacidad del suelo para infiltrar agua.

REGULACIÓN DE LA EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La extracción de aguas subterráneas debe ser regulada para evitar la sobreexplotación y garantizar que los acuíferos puedan recargarse de manera sostenible. Esto puede incluir la emisión de licencias de extracción que limiten la cantidad de agua que se puede extraer de un acuífero, así como la implementación de tarifas de agua que incentiven el uso eficiente del recurso.

Además, es importante promover la gestión integrada de los recursos hídricos, que considera tanto las aguas superficiales como las subterráneas, así como los recursos no convencionales, en un enfoque holístico. Esto incluye la coordinación entre diferentes niveles de gobierno, comunidades locales y otros actores para asegurar que las políticas de gestión de aguas subterráneas sean coherentes y efectivas.

RECURSOS NO CONVENCIONALES: LA RECARGA GESTIONADA DE ACUÍFEROS

La recarga gestionada de acuíferos es una estrategia que ayuda a aumentar las reservas de agua subterránea en áreas donde la recarga natural es insuficiente o donde los acuíferos han sido sobreexplotados, o simplemente incluyendo el concepto en un contexto de

economía circular, aprovechando el agua de una forma oportunista. Este proceso implica la inyección de agua superficial, agua tratada o agua de lluvia en los acuíferos mediante pozos de inyección, estanques de infiltración u otras técnicas.

Entre las principales ventajas de la recarga gestionada se encuentra la capacidad de aumentar el almacenamiento de agua subterránea, además de mantener o elevar los niveles freáticos, lo cual es esencial para la estabilidad de los ecosistemas dependientes de aguas subterráneas, como los humedales, y para asegurar un suministro constante de agua en épocas de sequía. Además, esta técnica ayuda a prevenir la intrusión salina en acuíferos costeros, un problema común en áreas altamente sobreexplotadas.

El uso de agua regenerada proveniente de las estaciones depuradoras de aguas residuales en la recarga de acuíferos es una práctica cada vez más relevante. Esta estrategia permite reutilizar el agua, reduciendo la presión sobre las fuentes naturales de agua y disminuyendo el impacto ambiental. El agua regenerada, tras un tratamiento avanzado que elimina contaminantes y patógenos, se reintroduce en los acuíferos, contribuyendo así a la recarga de estos cuerpos hídricos. Esta práctica no solo mejora la disponibilidad de agua, sino que además fomenta la sostenibilidad al promover un ciclo cerrado del agua, donde el recurso es reciclado y reutilizado de manera eficiente. En el contexto del cambio climático y el aumento de la demanda de agua, la recarga gestionada de acuíferos, combinada con el uso de agua regenerada, es una herramienta vital para garantizar la seguridad hídrica a largo plazo.

EDUCACIÓN Y CONCIENCIA PÚBLICA

La educación y la conciencia pública son fundamentales para la gestión sostenible de las aguas subterráneas. Es esencial que las comunidades comprendan la importancia de las aguas subterráneas, los desafíos asociados con su gestión y las acciones que pueden tomar para proteger este recurso vital. Los programas educativos pueden incluir talleres, campañas de sensibilización, materiales educativos y la integración de temas relacionados con las aguas subterráneas en los currículos escolares. Además, es importante involucrar a las comunidades locales en la toma de decisiones relacionadas con la gestión de las aguas subterráneas, promoviendo la participación ciudadana y la adopción de prácticas sostenibles a nivel comunitario.

USO DE MODELOS NUMÉRICOS PARA LA GESTIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Los modelos numéricos son herramientas esenciales para la gestión de las aguas subterráneas, ya que permiten simular y predecir el comportamiento de los acuíferos bajo diversas condiciones. Los modelos son representaciones matemáticas de los sistemas hidrogeológicos que integran datos sobre la geología, hidrología, uso del suelo, extracción de agua y recarga, entre otros factores.

A través de los modelos numéricos, se pueden evaluar diferentes escenarios de gestión, identificar riesgos potenciales, y desarrollar estrategias sostenibles para la explotación y conservación de las aguas subterráneas. La Figura 6 muestra, como ejemplo emblemático, el modelo flujo y transporte con densidad variable del acuífero del Delta del Llobregat desarrollado por el Grupo de Hidrología Subterránea de la UPC. El acuífero del delta del Llobregat es uno de los sistemas hídricos subterráneos más importantes de la provincia de Barcelona, ubicado en la región del delta del río Llobregat, al suroeste de la ciudad de Barcelona. Este acuífero juega un papel clave en el suministro de agua para diversos usos, incluyendo el abastecimiento urbano, industrial y agrícola. El acuífero está formado por sedimentos aluviales depositados por el río Llobregat a lo largo de miles de años. Estos sedimentos incluyen gravas, arenas, limos y arcillas, lo que da lugar a diferentes niveles de permeabilidad en el sistema. El modelo (Figura 6) representa dos unidades principales: un acuífero libre superficial, y un acuífero confinado más profundo, separados por capas de sedimentos de baja permeabilidad.

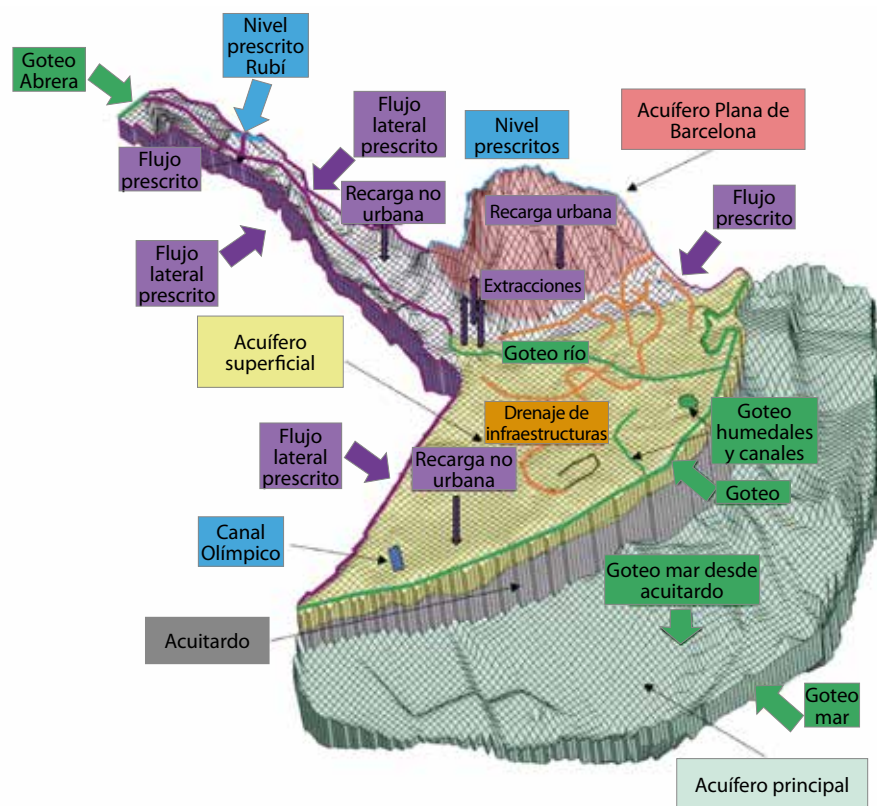


Figura 6. Modelo numérico de flujo y transporte con densidad variable del acuífero del Delta del Llobregat desarrollado por el Grupo de Hidrología Subterránea de la UPC.

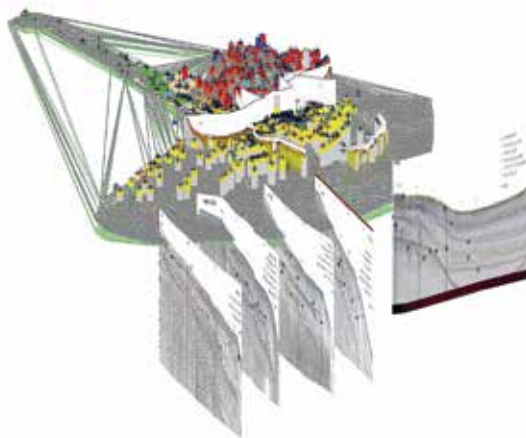


Figura 7. Recopilación de datos y configuración del modelo numérico de flujo y transporte del acuífero del Delta del Llobregat desarrollado por el Grupo de Hidrología Subterránea de la UPC. Integración de información geológica, geotécnica y geofísica.

RECOPILACIÓN DE DATOS Y CONFIGURACIÓN DEL MODELO

El primer paso en el uso de modelos numéricos es la recopilación de datos detallados del área de estudio. Estos datos incluyen características geológicas (conductividad hidráulica y porosidad de los materiales del subsuelo), datos hidrológicos (niveles freáticos, caudales de recarga y descarga), y datos de uso del recurso (como la ubicación de pozos y tasas de extracción). Con estos datos, se configura el modelo numérico, generalmente tridimensional, que representa las variaciones espaciales de las propiedades del acuífero. La Figura 7 muestra la recopilación de datos (geológicos, geotécnicos y geofísicos) para el desarrollo del modelo del acuífero del Delta del Llobregat.

SIMULACIÓN DE ESCENARIOS

Una vez configurado, el modelo numérico se utiliza para simular distintos escenarios. Por ejemplo, se puede evaluar cómo respondería el acuífero a un aumento en la extracción de agua, a cambios en las precipitaciones debido al cambio climático, o a la implementación de técnicas de recarga gestionada. Estas simulaciones permiten predecir el comportamiento futuro del acuífero y ayudan a identificar posibles problemas, como la sobreexplotación, la disminución de los niveles freáticos, o la intrusión salina en áreas costeras.

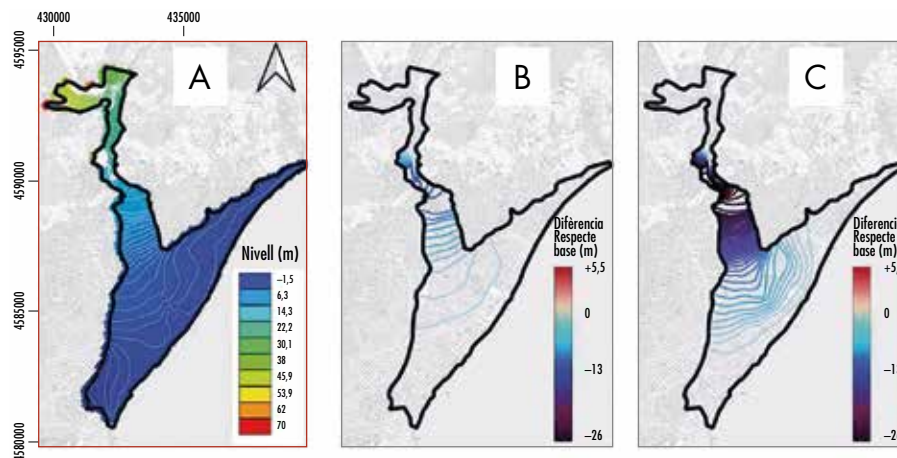


Figura 8. Simulación de escenarios de explotación de las aguas subterráneas del acuífero del Delta del Besòs (Proyecto GIR-Besòs, «Model de gestió integrada dels recursos hídrics del Besòs davant el canvi climàtic: solucions per a l'autoabastament i resiliència del sistema hídic a l'Àrea Metropolitana de Barcelona», Premis de Recerca Científica a reptes urbans a la Ciutat de Barcelona 2020, Ajuntament de Barcelona, referencia 20S08703).

La Figura 8 muestra la simulación de escenarios de explotación de las aguas subterráneas en el acuífero del Delta del Besòs del área metropolitana de Barcelona. Los tres escenarios evidencian que la recarga gestionada es absolutamente indispensable para extraer volúmenes relevantes sin generar un descenso elevado en los niveles. El escenario A es un escenario de referencia con explotación mínima del acuífero por parte de la central de bombeo

del Besòs. El escenario B y C presentan una explotación de la central de bombeo del Besòs de 5 y 15 hm³/año. Los resultados muestran (escenario C) que sin recarga gestionada se generaría una disminución de 26 metros, un valor físicamente imposible. El escenario B, por su parte, indica que mientras no se alcancen caudales de extracción considerables, el balance es positivo para el acuífero.

OPTIMIZACIÓN Y TOMA DE DECISIONES

Los modelos numéricos también se pueden utilizar para optimizar la gestión de las aguas subterráneas. Esto implica la identificación de estrategias de extracción que maximicen el uso sostenible del recurso, minimizando impactos negativos como la degradación de la calidad del agua o la disminución de caudales base a un río o el aporte a un humedal. Los gestores pueden utilizar los resultados del modelo para tomar decisiones informadas sobre la ubicación y cantidad de extracción permitida, la necesidad de recarga gestionada, o la protección de zonas de recarga.

MONITOREO Y ACTUALIZACIÓN DEL MODELO

El uso de modelos numéricos no es un proceso estático. Los modelos numéricos se deben actualizar regularmente con nuevos datos obtenidos del monitoreo continuo del acuífero. Esta actualización permite que el modelo refleje con precisión las condiciones actuales del sistema, mejorando la precisión de las predicciones y la efectividad de las estrategias de gestión.

En resumen, los modelos numéricos son herramientas poderosas para la gestión de las aguas subterráneas, ya que permiten una comprensión profunda del comportamiento del acuífero y la evaluación de diferentes estrategias de manejo. Al integrar datos y simular escenarios futuros, estos modelos facilitan la toma de decisiones informadas, promoviendo el uso sostenible del recurso.

LA EVOLUCIÓN HACIA LOS GEMELOS DIGITALES

En la actualidad, los modelos numéricos están derivando hacia la construcción de gemelos digitales, que son réplicas virtuales precisas de los acuíferos, que permiten su monitoreo, simulación y análisis en tiempo real. Estos gemelos digitales se crean utilizando datos obtenidos de las tareas de monitoreo comentadas anteriormente, que luego se procesan y representan en un modelo digital. Este modelo refleja fielmente el estado, el comportamiento y las características del acuífero, permitiendo la interacción. Los gemelos digitales permiten optimizar el rendimiento de los acuíferos entendidos como sistemas complejos al simular diversas condiciones y escenarios.

PERSPECTIVAS FUTURAS

En un contexto de cambio climático, crecimiento poblacional y aumento de la demanda de agua, la gestión sostenible de las aguas subterráneas se enfrenta a desafíos cada vez mayores. El cambio climático está alterando los patrones de precipitación, lo que afecta la recarga natural de los acuíferos y aumenta el riesgo de sequías. Al mismo tiempo, el crecimiento poblacional y el desarrollo económico están incrementando la demanda de agua para consumo humano —también ligada a la estacionalidad de la población debida al turismo—, agricultura e industria, lo que ejerce una presión adicional sobre los recursos hídricos subterráneos.

En este contexto, es crucial desarrollar enfoques innovadores y adaptativos para la gestión de las aguas subterráneas que consideren las incertidumbres asociadas con el cambio climático y las dinámicas socioeconómicas. Esto incluye la mejora de la monitorización y modelización de los acuíferos, la promoción de tecnologías de ahorro de agua y la integración de la gestión de las aguas subterráneas en las estrategias de adaptación al cambio climático.

Las aguas subterráneas son un recurso fundamental para la gestión sostenible de los recursos hídricos y el mantenimiento de los caudales base de los ríos y humedales y los ecosistemas asociados. A través de su contribución al caudal base, las aguas subterráneas aseguran la continuidad de los flujos de los ríos o la misma existencia de los humedales durante las temporadas secas, lo que es vital para la biodiversidad acuática, la calidad del agua y el suministro de agua para usos humanos.

Sin embargo, la sobreexplotación de las aguas subterráneas y la alteración de las zonas de recarga están poniendo en peligro este recurso crítico y los ecosistemas que dependen de él. Para abordar estos desafíos, es necesario adoptar un enfoque integral y sostenible para la gestión de las aguas subterráneas, que incluya la monitorización continua, la protección de las zonas de recarga, la regulación de la extracción, el aumento de recursos en un contexto de circularidad y la educación pública.

En última instancia, la sostenibilidad de las aguas subterráneas es esencial no solo para garantizar el suministro de agua a las generaciones presentes y futuras, sino también para preservar la integridad ecológica de los ecosistemas acuáticos y terrestres que dependen de ellas. La gestión responsable de las aguas subterráneas es, por lo tanto, una tarea de vital importancia que requiere la colaboración de todos los sectores de la sociedad.





OCHO

LA HUELLA HÍDRICA Y LA GESTIÓN SOSTENIBLE DEL AGUA EN EL TEJIDO EMPRESARIAL

Desirée Marín



LA URGENCIA DE UNA GESTIÓN HÍDRICA EFICIENTE

En un contexto de emergencia climática, en territorios donde los impactos del cambio climático son más evidentes, las empresas se enfrentan cada vez más al problema de la gestión del agua. Por ejemplo, Cataluña, al igual que muchas otras regiones, sufre ciclos de sequía que afectan tanto a la disponibilidad de agua como a la calidad de vida urbana y la actividad económica. La interconexión entre el agua y las actividades empresariales es clara: sin un uso responsable y sostenible de este recurso, no solo se pone en peligro el medio ambiente, sino también la continuidad de muchos negocios.

Los informes del CDP Water (2020) revelan que el 69 % de las empresas que reportan sobre el agua han identificado riesgos sustanciales vinculados a la disponibilidad de este recurso, con un impacto financiero estimado en 301.000 millones de dólares a nivel global. Estos riesgos incluyen la interrupción de la producción, lo cual puede resultar en pérdidas de hasta un 40 % en sectores como la agricultura, el textil o la energía. Según el Banco Mundial (2016), la demanda global de agua superará la oferta en un 40 % para el año 2030, lo que podría disparar los costes operativos para las empresas e incrementar la competencia por los recursos hídricos. Asimismo, el World Economic Forum (WEF, 2024) sitúa la crisis del agua como uno de los cinco riesgos más importantes para el crecimiento empresarial durante la próxima década. Además, siguiendo el ejemplo de Cataluña, hemos visto durante el 2024 cómo muchas empresas se han enfrentado a la reducción inesperada de sus consumos hasta en un 25 %, todo un reto para la competitividad económica.

En cuanto a la calidad del agua, la OCDE (2009) estima que las empresas pueden llegar a gastar hasta un 20 % más en tratamiento de agua y saneamiento en las regiones donde la contaminación es un problema creciente. Este riesgo se ve amplificado por las regulaciones más estrictas, que pueden implicar multas y sanciones si las empresas no cumplen con los estándares ambientales.

Además, el Banco Mundial (2020) calcula que los conflictos por el control de las fuentes de agua afectarán a un tercio de la población mundial para el año 2050, lo que puede interrumpir las cadenas de suministro en sectores dependientes del agua, con consecuencias económicas potenciales que superan los 250.000 millones de dólares anuales.

Pero, ¿cómo podemos cuantificar el impacto y el riesgo asociado al agua de una empresa? ¿Cómo saber si una organización está utilizando este recurso de manera sostenible? ¿Cómo pueden ejercer las empresas el rol de ser motores de cambio? En este contexto, la huella hídrica se convierte en una herramienta fundamental para mejorar la gestión de los recursos hídricos, ya que permite medir, reducir e incluso compensar el impacto del uso del agua.

LA HUELLA HÍDRICA: DEFINICIÓN Y APLICACIÓN PRÁCTICA

La huella hídrica es una métrica que nos permite entender la cantidad de agua dulce utilizada directa o indirectamente por una actividad, considerando aspectos de cantidad y calidad. Se puede analizar a diferentes niveles de actividad: persona, territorio, cuenca, país, organización, producto, etc., pero a diferencia de la huella de carbono, tiene una componente geográfica y temporal, por lo que el resultado de la huella dependerá de dónde y cuándo se produce la actividad analizada.

Un buen ejemplo para entender este concepto es el de una taza de café. Es obvio que casi la totalidad de la masa de un café es agua. Sin embargo, para producir una sola taza de café se necesitan aproximadamente 140 litros de agua, distribuidos entre el cultivo del café, el procesamiento de los granos, el transporte y, finalmente, la preparación de la bebida (Chapagain & Hoekstra, 2003).

El ciudadano promedio en España utiliza unos 6.700 litros de agua diarios (Mekonnen & Hoekstra, 2011) si se considera no solo el agua directa que utiliza para beber o ducharse —que representa solo un 1 % de la huella hídrica y corresponde a 128 litros/persona-día de consumo según el Instituto Nacional de Estadística en 2022—, sino también la huella hídrica de todos los productos y servicios que consume. Los alimentos como la carne de vacuno, los cereales y los lácteos representan un alto consumo de agua indirecta (4.556 l/persona-día), lo que convierte al sector agroalimentario en un actor clave en el cuidado del agua como recurso.

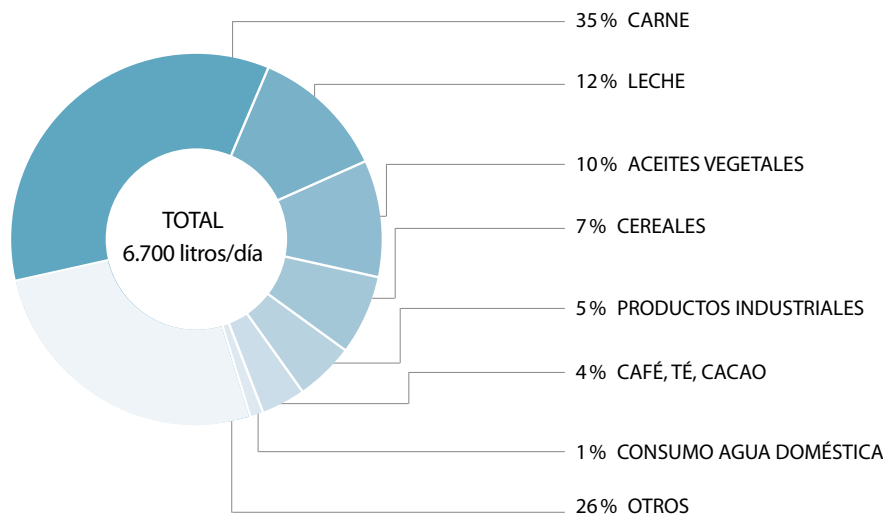


Figura 1. Huella hídrica de un ciudadano español (Mekonnen & Hoekstra, 2011).



La huella hídrica de un ciudadano europeo
(Mekonnen & Hoekstra, 2012).

El resto de nuestra huella hídrica proviene de la producción industrial de otros bienes de consumo que utilizamos a diario; por ejemplo, la electricidad (5,2 litros/kWh); la construcción de viviendas (6.000.000 litros/vivienda) o la ropa (11.000 litros/kg algodón).

A escala europea, el 40 % de nuestra huella hídrica proviene de otros países, y en ocasiones, de zonas con escasez coyuntural y déficit hídrico. Por tanto, a través las cadenas de valor comerciales, importamos agua virtual en la Unión Europea, generando fuertes dependencias internacionales e impacto en las cuencas de origen.

Estas cifras, junto con el análisis de la situación hídrica mundial, ponen de manifiesto la magnitud del problema: la huella hídrica de la sociedad no es sostenible y, por tanto, resaltan la importancia de tomar medidas tanto a nivel individual como empresarial para reducir el consumo de agua y mejorar la cantidad y la calidad de las masas de agua.

WATER FOOTPRINT NETWORK E ISO 14046: DOS METODOLOGÍAS PARA MEDIR LA HUELLA HÍDRICA

Existen dos metodologías estandarizadas para evaluar la huella hídrica: la metodología de la Water Footprint Network (Hoekstra *et al.*, 2011), centrada en un balance de la presión sobre los recursos hídricos en una cuenca que ejerce una actividad determinada y la recogida en la ISO 14046-2014, que va más allá, analizando los impactos ambientales del uso del agua. Mientras que en inglés ambas son llamadas *Water Footprint*, en español se ha adaptado el término «Huella de Agua» en concreto para referirse exclusivamente al indicador de impacto referido por la ISO 14046.

Ambos métodos son complementarios, puesto que el primer paso del análisis puede ser tener un valor global y sencillo de comunicar a efectos de sensibilización con WFN, mientras que como siguiente paso y para facilitar la toma de decisiones, convenga la traducción impactos con la ISO 14046, para poder discernir mucho mejor los riesgos locales asociados al agua y a una cuenca en concreto.

La Water Footprint Network (WFN) define la huella hídrica (HH) como un indicador global de apropiación de los recursos de agua dulce. Este indicador se compone de tres tipos de huella hídrica: azul, verde y gris. Las dos primeras cuantifican el consumo de agua dulce por fuente, mientras que la última representa la contaminación del recurso hídrico. Además, la huella hídrica puede ser directa o indirecta dependiendo si el uso o la contaminación del agua dulce ocurre a lo largo del proceso principal o si proviene del resto de la cadena de suministro. En concreto:

- *Huella hídrica azul*: se refiere al agua dulce superficial o subterránea (ríos, lagos y acuíferos) consumida por evaporación o incorporación en productos y no devuelta a la misma cuenca.

- *Huella hídrica verde*: asociada al consumo de agua de lluvia, ya sea evaporada o incorporada en productos.
- *Huella hídrica gris*: está relacionada con la calidad del agua vertida al medio de una actividad y mide el agua que sería necesaria para que el medio receptor asimilara los contaminantes vertidos por la actividad.

Las empresas, los gobiernos o los individuos pueden utilizar estas tres categorías para obtener una visión completa de su presión sobre los recursos hídricos. Los resultados del cálculo de la huella hídrica se presentan en m³ de agua dulce. Aunque, en la Figura 2, se indica la diferencia entre la *huella hídrica* y la medida del consumo de agua que se suele reportar como indicador de la gestión del agua. Específicamente, en el cálculo de la huella hídrica se realiza un balance de flujos de agua intercambiados con la cuenca para llevar a cabo la actividad, excluyendo el uso no consuntivo del agua, y a su vez incluyendo el agua de lluvia y de forma indirecta, también la contaminación causada al medio por los vertidos de la actividad.

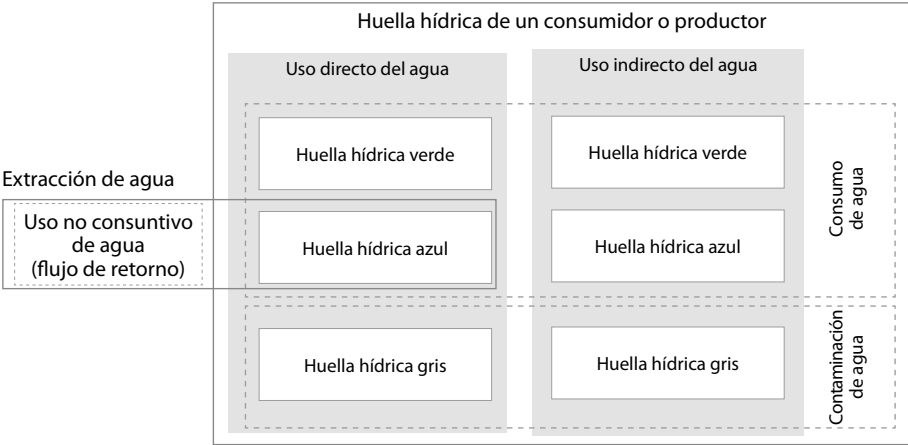


Figura 2. Alcance de la Huella hídrica (Hoekstra et al., 2011).

De este modo, la HH de un producto se define como el volumen de agua consumido tanto de forma directa como indirecta para su producción. El consumo directo para la fabricación de un producto incluiría el agua utilizada o contaminada durante el proceso de fabricación y el agua incorporada en el propio producto como ingrediente. Por su parte, el consumo indirecto correspondería a toda el agua necesaria para producir las diferentes materias primas utilizadas en el proceso (cadena de suministro).

La huella hídrica tiene necesariamente dimensión temporal y espacial. Se debe calcular con datos recogidos en un período de tiempo concreto —habitualmente, los datos utilizados son anuales— y en un lugar geográfico perfectamente delimitado —una fábrica específica en una cuenca concreta, una región, etc.—.

La ISO 14046:2014 «Gestión ambiental. Huella de agua. Principios, requisitos y directrices» es un estándar internacional que establece los principios, requerimientos y guías por la evaluación de la Huella de Agua (HA) de productos, procesos y organizaciones y está basada en la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV, también estandarizada por las normas ISO 14040 y 14044). La ISO 14046 define la HA como un indicador o grupo de indicadores que cuantifican los impactos ambientales potenciales relacionados con el agua, ocasionados por un producto, proceso u organización. Un análisis de HA de acuerdo con este estándar tiene que incluir pues las cuatro fases de un ACV: 1) definición del objetivo y el alcance; 2) análisis del inventario; 3) evaluación del impacto; y 4) interpretación de los resultados. El resultado de una evaluación de huella de agua puede ser un valor único (m^3 de agua equivalentes) o un perfil de indicadores de impacto ambiental relacionados con el agua.

El enfoque según la ISO 14046 va un paso más allá y, a partir del inventario inicial de flujos intercambiados con la cuenca, cuantifica todos los impactos asociados con el agua tanto si se relacionan con su consumo como con su degradación:

- *Uso consuntivo de agua.* Representa el agua dulce extraída que se evapora, se incorpora en productos o la que se devuelve a una cuenca diferente o al mar después de su uso.
- *Uso degradativo de agua.* Describe un cambio de calidad peyorativo en el agua utilizada y devuelta a la misma cuenca donde se ha captado.

Una evaluación de HA recopila y evalúa todas las entradas y salidas del sistema y los impactos ambientales relacionados con el agua utilizada o afectada directa o indirectamente por el producto, proceso u organización analizados, a lo largo de todo el ciclo de vida del producto —tanto aguas arriba como abajo—. La pérdida de la disponibilidad de agua, por tanto, puede ser debida a su consumo —el agua deja de estar disponible para su uso dentro de la misma cuenca— o bien debida a su degradación —el agua está demasiado contaminada para ser utilizada para una determinada función— y además genera huella degradativa por otros problemas ambientales, como pueden ser la eutrofización, la acidificación, la toxicidad humana o la ecotoxicidad (Bayart *et al.*, 2010). Estos últimos, son indicadores *midpoint* (impacto) que refieren cada uno de ellos a distintos impactos sobre el medio ambiente. Además de indicadores de impacto, un estudio de HA evalúa también indicadores *endpoint* (daños) o de daño ambiental sobre la sociedad y, en concreto, el daño a la salud humana, los ecosistemas y los recursos (Pfister *et al.*, 2009). En el cómputo se considera también el uso consuntivo, relacionado directamente con el consumo y el estrés hídrico de la cuenca en el que se dé el mismo. Para la huella consuntiva, deberemos multiplicar el consumo de agua por el «índice de estrés hídrico» de la cuenca en la que se da el consumo y dividirlo por el valor medio de la escasez hídrica mundial, según el método AWARE (Wulca, 2015). Por ejemplo, la captación de un m^3 en Sevilla supone un impacto de $2,97 \text{ m}^3 \text{ eq}$; sin embargo, la extracción del mismo volumen de agua en Santiago de Compostela supone un impacto de $0,05 \text{ m}^3 \text{ eq}$, mucho menor por tener un menor índice de estrés hídrico. Finalmente, es posible obtener

un indicador agregado *single score* o m^3 equivalentes, que simplifica la comprensión de los resultados y que se obtiene tras normalizar y ponderar los indicadores *midpoint* y *endpoint*.

En este sentido, el análisis según la ISO 14046 es en algunos casos más completo y representativo que el análisis según la WFN, puesto que tiene en cuenta todo el ciclo de vida y considera mayor o menor impacto según si la cuenca está o no estresada y además considera diferentes efectos sobre el medio ambiente y daños sobre la sociedad, con la ventaja que todo ello puede ser simplificado en una medida de m^3 equivalentes.

MÁS ALLÁ DEL AGUA: LA HUELLA HÍDRICA COMO INDICADOR DE RESILIENCIA CLIMÁTICA

En los últimos años, la Unión Europea ha intensificado su enfoque en la sostenibilidad corporativa, impulsando nuevas normativas que obligan a las empresas a reportar su impacto ambiental, incluyendo la gestión del agua. Con la Directiva de Información No Financiera (NFRD) de 2014 y su sucesora, la Directiva de Informes de Sostenibilidad Corporativa (CSRD), a partir de 2024, la Unión Europea exige que las empresas informen sobre su impacto ambiental, cubriendo aspectos como el uso de recursos hídricos, estrategias de reducción y riesgos asociados a la escasez hídrica. La CSRD amplía estas obligaciones a un mayor número de empresas y detalla con mayor precisión la información requerida. En cuanto a los indicadores sobre el agua que las empresas deben reportar, se incluyen aspectos clave como:

- *Consumo total de agua:* cantidad de agua utilizada por la organización en sus operaciones y cadena de suministro, tanto agua potable como no potable.
- *Impacto en las fuentes hídricas:* información sobre el origen del agua utilizada (superficial, subterránea, reciclada) y si proviene de zonas con estrés hídrico.
- *Contaminación del agua:* indicadores sobre la cantidad de agua residual generada, la calidad de esta agua antes y después de su tratamiento, y las medidas tomadas para minimizar la contaminación.
- *Riesgos asociados al agua:* evaluación de los riesgos que enfrenta la empresa debido a la escasez de agua, como interrupciones en la cadena de suministro, y cómo se están gestionando esos riesgos.
- *Progreso en la reducción del uso del agua:* estrategias implementadas para mejorar la eficiencia en el uso del agua, reducción del consumo y la reutilización de aguas residuales.

En este contexto, la huella hídrica se ha consolidado como un indicador esencial que permite a las organizaciones ser transparentes en su gestión hídrica, el uso del agua y su impacto ambiental, midiendo su progreso en sostenibilidad y adaptación al cambio climático y facilitando trasladarlo a sus grupos de relación.

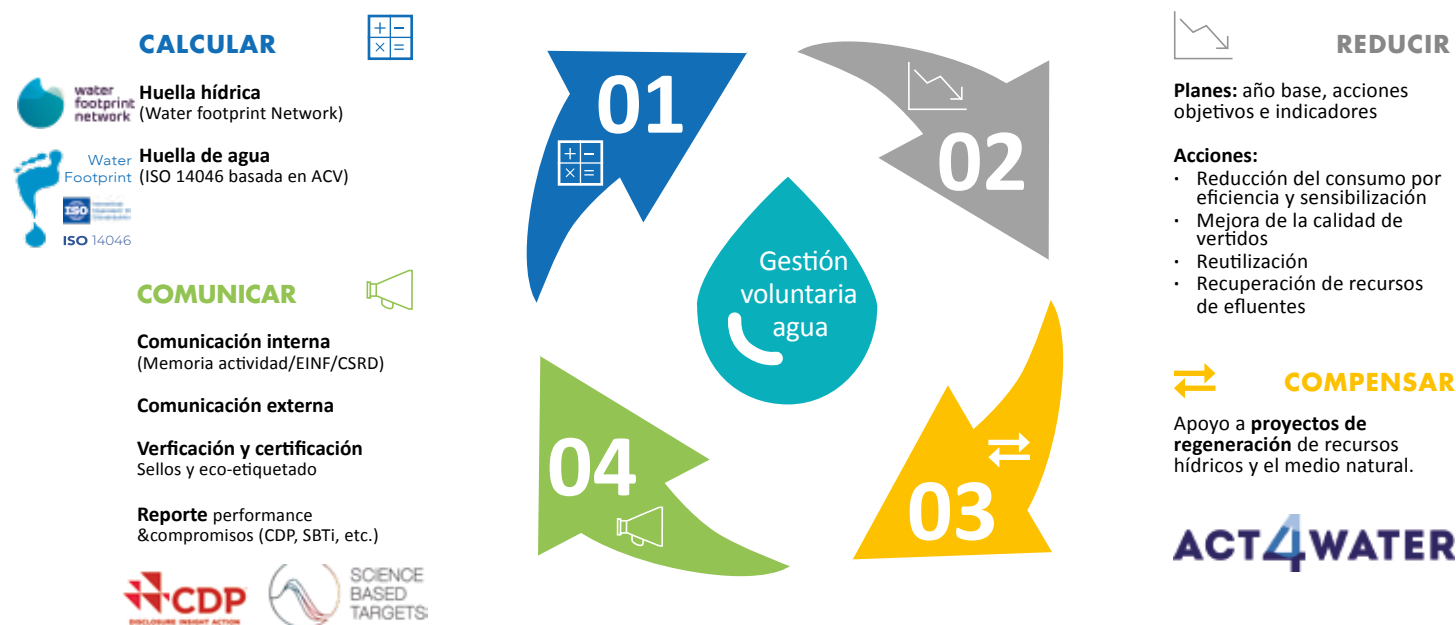


Figura 3. Sistema de gestión voluntaria de la huella hídrica (elaboración propia, 2023).

De hecho, la huella hídrica va más allá de la mera medida del indicador, sino que es una herramienta potente para la gestión del riesgo asociado al agua de un negocio. Las empresas que dependen de grandes cantidades de agua para sus operaciones son vulnerables a las consecuencias del cambio climático, como las sequías o inundaciones. A partir del cálculo de la huella hídrica, es posible trazar un plan de reducción de impactos mediante acciones como la eficiencia hídrica, la mejora de la calidad de los vertidos o la reutilización del agua. En especial por lo que respecta a la reutilización, existe hoy en día un potencial enorme de aplicación en el sector agrícola e industrial, que permitiría reducir la dependencia del recurso convencional. A través de procesos de auditoría hídrica se puede establecer:

- Fuentes de agua utilizadas en una industria.
- Necesidades en cantidad y calidad para los procesos productivos.
- Potencial de ahorro de agua por optimización de procesos, por recuperación de corrientes y por introducción de nuevos abastecimientos como pueden ser la reutilización interna

de las aguas residuales, o la incorporación de agua regenerada proveniente de una depuradora urbana.

- Posibles soluciones técnicas para materializar esos ahorros, junto con su dimensionamiento a nivel de CAPEX y OPEX.

Toda esta información ayuda a la hora de priorizar y seleccionar las acciones a implantar con mejor ecoeficiencia. Un plan estructurado de acciones, calendarizado y presupuestado, ofrece una vía clara para la inversión en tecnología e innovación, mejorando la capacidad de adaptación de las empresas a los efectos del cambio climático y la dependencia hídrica.

Además de ser un indicador de sostenibilidad, la huella hídrica tiene aplicaciones directas en la gestión de crisis, como las sequías. A través de la medición de su huella hídrica, las empresas pueden elaborar «planes de ahorro de agua» para presentarlos a las autoridades, como la Agencia Catalana del Agua (ACA), en Cataluña. Estos planes demuestran su capacidad para reducir el consumo en momentos de crisis y, en ciertos casos, permiten solicitar una relajación de las restricciones impuestas por la sequía.

Cada vez más empresas van un paso más allá, contribuyendo a proyectos locales que mejoran el estado de la cuenca, tanto en cantidad como en calidad del agua. Esto actúa como una compensación de la huella hídrica que no se puede reducir, mediante el apoyo financiero a proyectos fuera del perímetro empresarial que mejoran la resiliencia climática local. Un ejemplo de esto es la iniciativa Act4water (www.act4water.org), que propone un mercado voluntario de Créditos de Agua Positiva (CAP). Este mecanismo permite financiar proyectos certificados que generan un impacto positivo en las cuencas hídricas, al tiempo que ofrece a las empresas un sistema de mejora continua y reconocimiento a través de una certificación en tres niveles: «calculo y reduzco» (*water committed*), «compenso» (*water active*) y, tras alcanzar la neutralidad, *water positive*.

Estas certificaciones permiten a las empresas comunicar su grado de adaptación al cambio climático a clientes, proveedores, trabajadores e inversores. A su vez, muestran cómo han gestionado su huella hídrica y generado impactos positivos en las cuencas, reforzando la resiliencia hídrica del territorio. Realizar una gestión hídrica más allá del control de consumo tiene beneficios tangibles, no solo para la resiliencia climática, sino también para el acceso a financiación sostenible. Las empresas comprometidas con la reducción de riesgos ambientales y climáticos suelen obtener mejores condiciones financieras. Así como las trayectorias de reducción de emisiones y las certificaciones de gestión de carbono son valoradas por los inversores, la huella hídrica y los «créditos de agua positiva» ya han sido utilizados como indicadores en operaciones de financiación sostenible, demostrando el compromiso empresarial con la adaptación al cambio climático.

CONCLUSIONES

La gestión sostenible del agua se ha convertido en un tema de debate para el tejido empresarial, especialmente en regiones vulnerables como Cataluña, donde los efectos del cambio climático son cada vez más pronunciados. A medida que la disponibilidad de agua se ve comprometida por ciclos de sequía y una demanda creciente, las empresas deben adoptar prácticas responsables para asegurar la continuidad de sus operaciones y contribuir a la sostenibilidad ambiental.

La huella hídrica emerge como una herramienta crucial en este contexto. Su capacidad para cuantificar el uso y el impacto del agua permite a las organizaciones identificar áreas de mejora y desarrollar estrategias efectivas para mitigar los riesgos asociados con la escasez hídrica. Al medir tanto el consumo directo como el indirecto, la huella hídrica ofrece una visión integral del impacto que las empresas tienen sobre los recursos hídricos, permitiendo la implementación de «planes de ahorro de agua» que pueden ser vitales durante situaciones de restricción.

Las metodologías de la Water Footprint Network y la ISO 14046 no solo permiten evaluar la huella hídrica, sino que también facilitan la identificación de riesgos y oportunidades de mejora en la gestión del agua. Esto es esencial, dado que el informe del CDP Water indica que una parte significativa de las empresas ya reconoce los riesgos asociados a la disponibilidad del agua y los costes que esto implica. A medida que se implementan normativas más estrictas en torno a la sostenibilidad, las empresas se ven impulsadas a reportar su impacto ambiental y su gestión hídrica, lo que representa tanto un reto como una oportunidad para mejorar su imagen y competitividad en el mercado.

Además, la huella hídrica no solo es un indicador de sostenibilidad, sino que también refleja la resiliencia climática de las empresas. Aquellas que logran reducir su huella hídrica y contribuir a la mejora de la calidad de los recursos hídricos no solo están mejor preparadas para afrontar los efectos del cambio climático, sino que también pueden acceder a condiciones de financiación más favorables. Las iniciativas de compensación que buscan mejorar el estado de las cuencas también destacan el compromiso empresarial con la sostenibilidad y la responsabilidad social.

En conclusión, la integración de la huella hídrica en la estrategia empresarial es fundamental para afrontar los desafíos actuales y futuros relacionados con el agua. Al adoptar un enfoque proactivo en la gestión de este recurso, las empresas no solo protegen su viabilidad operativa, sino que también contribuyen al bienestar de las comunidades y ecosistemas en los que operan, convirtiéndose en motores de cambio hacia un futuro más sostenible. La transición hacia una economía del agua más consciente y eficiente es, por lo tanto, un imperativo que requiere la colaboración de todos los actores involucrados, desde los gobiernos hasta la sociedad civil y el sector privado.





NUEVE

**ALGUNAS OBRAS SOBRE LA CONDICIÓN,
LAS PROBLEMÁTICAS Y LAS POSIBILIDADES
DEL AGUA EN LA COLECCIÓN DEL MACBA**

Claudia Segura Campins

El aire olía a madrugada, que es un olor sin sabor, como el agua, tan buena que no se puede describir, y se oía el ruido de las ramas altas de los árboles y de los pájaros alegres y cantadores.

Irene Solà
Canto yo y la montaña baila, 2021

El MACBA entiende la defensa del medio ambiente como un catalizador de nuevas formas de conocimiento y pensamiento que abogan por un análisis de las articulaciones interspecies, la conciencia ecológica y la urgencia medioambiental.

Desde una aproximación amplia a las ecologías contemporáneas, la colección del MACBA quiere priorizar prácticas que desafían las categorizaciones rígidas, abrazando los estudios postnaturales, la ecología *queer*, así como las políticas de hibridación, mutación y solidaridad entre cuerpos y ecosistemas. En ese sentido, presentamos algunas obras de la Colección del MACBA, Museo de Arte de Barcelona, sobre la condición, las problemáticas y las posibilidades del agua.



FINA MIRALLES

«La mujer, la fuente, el río, el mar, el océano, el alma azul. Movimiento eterno, raíz profunda, inmensidad del tiempo». El agua tiene una presencia destacada en la obra poética y plástica de Fina Miralles. Ya en sus primeras acciones de los setenta, en la serie *Relaciones*, en una acción de 1975, la artista se sumerge en agua del mar y se aleja nadando hacia el horizonte. Después, en sus pinturas, hay un primer baño de sirena pintado en 1989. Y es que de las profundidades marinas y de las formas del agua llegan, en la obra de Fina Miralles, las sirenas, las mujeres de agua, las mediadoras y las profetas. En 2014, la artista nada en aguas del Cap de Creus mientras una cámara captura su rastro en una «fotoacción» llamada *El rastro de la sirena*. Es la misma Miralles quien, entrevistada por Mireia Sallarès en un vídeo que no puedes perderte, cuenta: «Lo importante es el agua que canta, el agua viva. Canta el agua, cantan los pájaros, los ángeles, las sirenas, las ballenas y cantamos nosotros».

Fina Miralles. *El rastro de la sirena*, 2020, Colección MACBA. Consorci MACBA.



Miquel Barceló. *Saison des pluies n.º 2*, 1990, Colección MACBA. Fundación MACBA.

MIQUEL BARCELÓ

«Rogamos tengan la amabilidad de economizar el agua porque la traemos desde el pueblo en bidones sobre la cabeza. Gracias. Buena ducha». Miquel Barceló transcribe este cartel que encontró en el Hotel Fan Dogon el 19 de enero de 1999, en uno de sus viajes a Mali, en su diario *Cuadernos de África*. Desde que realizó su primer viaje a este país, en 1988, África se convirtió en un referente espiritual que impregnó toda su pintura. Sus telas se llenaron de una iconografía nueva en la que el agua, este elemento esencial que hace posible la vida, tiene una presencia recurrente, con piraguas transportando pasajeros, lagunas, corrientes y grandes lluvias, como *Saison des pluies n.º 2*. Esta obra de la Colección MACBA forma parte de una trilogía pintada en 1990 (*Saison des pluies n.º 1*, *Saison des pluies n.º 2* y *Le Déluge*) que evoca el curso de un río durante un temporal. Mientras el norte de Mali es una zona árida donde no llueve nunca; en el sur, desde finales de junio hasta comienzos de diciembre, las inundaciones del río Níger transforman el día a día de sus habitantes. Barceló pinta el dinamismo del agua, que ocupa toda la tela, con gotas que caen con ímpetu y animales que buscan un lugar donde beber. Pintada en tonos grises, blancos, rosados y terrosos, celebra la fuerza de la lluvia y sus virtudes benéficas.

LUZ BROTO

Instalación permanente de una manguera de 200 metros escondida para desviar 40 l/h de un canal hacia un río.

Históricamente, el río Segre proporcionaba el agua suficiente para cultivar a sus orillas la poca agricultura de regadío que existía en Lleida. Con el tiempo se ha ampliado gracias a la red de canalizaciones, que han convertido la tierra de secano en una importante zona de producción frutícola. Durante este proceso de transformación del territorio, el caudal del río ha disminuido y se encuentra por debajo del mínimo exigido por los estándares medioambientales. La concesión pública de explotación privada del río, para abastecer a una central hidroeléctrica, sigue siendo la misma desde principios del siglo xx y ha sido renovada recientemente por cien años más en las mismas condiciones: 60.000 l/s para el canal, y 2.000 l/s para el río.

La intervención trata de descompensar ínfimamente, desde lo furtivo y precario, la incidencia que tienen las grandes infraestructuras en el estado de un territorio. El funcionamiento del dispositivo dependía de un cuidado externo que pudo proporcionarse solo durante una semana. El dispositivo permaneció instalado, pero inactivo durante siete meses, hasta que desapareció.

La obra presenta dibujos de las distintas opciones de recorrido de la manguera, parcialmente borrados para omitir su localización, documentación de su instalación, fotografías aéreas del paisaje donde se encuentra y del seguimiento de su funcionamiento.

Luz Broto. *Aumentar el caudal de un río*, 2018, Colección MACBA. Depósito de la Generalitat de Catalunya.





Instalación permanente de una manguera de 200 metros escondida para desviar 40 l/h de un canal hacia un río.

THE OTOLITH GROUP

Hydra Decapita evoca el mundo subacuático imaginado por el dúo electrónico de Detroit Drexciya. Se trata de un mundo habitado por los descendientes de los africanos arrojados al mar desde los barcos de esclavos, como el *Zong*, durante la travesía del Atlántico o el «pasaje intermedio» en 1781. Esa atrocidad se llevaba a cabo con el objetivo de cobrar el seguro por la «carga» perdida en alta mar.

El reducido lenguaje visual de la película, que se centra en el océano y se acompaña de música electrónica contemplativa y de voces, entretiene varias referencias históricas: el *Zong*; la pintura de J. M. W. Turner titulada *The Slave Ship* (1849), que alude al terrible acontecimiento; y el análisis del crítico John Ruskin de esa pintura. Utilizando el tráfico de esclavos como alegoría, *Hydra Decapita* combina mito e historia para examinar las intrincadas relaciones entre poder, muerte, globalización, abstracción y el sistema de capital financiero contemporáneo.

The Otolith Group. *Hydra Decapita*, 2010. Colección MACBA. Fundación MACBA.







Cecilia Jurado Chueca, *Mermaids in the Basement* (2023). Cortesía de la artista.

DIEZ

ESCUCHAR EL AGUA. MEDITACIONES
HÍDRICAS Y OTRAS ACUATOPÍAS

Blanca de la Torre

Esther Pizarro, *Huella hídrica mundial* (2023). Fotografía: Markus Schroll. Cortesía de la artista.





De manera similar a cómo los ecofeminismos revelan las interconexiones que subyacen en las relaciones de dominación y explotación sobre las mujeres y sobre la naturaleza, los hidrofeminismos ayudan a explorar las estructuras de poder que operan en los vínculos que las mujeres tienen con el agua. Echar mano de esta corriente de pensamiento que enlaza aguas y cuerpos nos puede servir para aportar una mirada a la actual crisis ecológica y climática. Su principal teórica, Astrida Neimanis, señala que el agua responde a otras lógicas y patrones y que supone, al mismo tiempo, un conducto y un modo de conexión. Para la autora, «así como las corrientes oceánicas transportan el calor del sol, bancos de peces e islas de plástico degradado de un mar planetario a otro, nuestros cuerpos acuosos sirven como medios materiales».

Las propuestas aquí recogidas no vienen solamente de la mano de mujeres artistas; pues, aunque como apunta Neimanis, «el cuerpo fluido no es específico de la mujer, la corporeidad acuosa sigue siendo una cuestión feminista», los hidrofeminismos nos invitan a «pensar cómo un cuerpo acuoso tiene el potencial de bañar nuevos conceptos y prácticas feministas en la existencia». Las artes visuales pueden jugar un papel esencial en visibilizar cómo, tal y como señala Sonia Fernández Pan, «el agua, como el resto del planeta, está mediada por el poder del capital... No solo es un archivo planetario de vida y muerte, de memoria y olvido: es un elemento que conecta materialmente todos los cuerpos y que se introduce en las grietas de la ontología para disolver las separaciones que creamos entre las cosas».

El hidrofeminismo nos ofrece una mirada renovada ante los derechos del agua, fuertemente vulnerados a causa de las políticas de privatización, la contaminación y otras lógicas de acumulación derivadas de un modelo de desarrollo extractivista.

ESTRÉS HÍDRICO

Las propuestas ecotópicas de Mary Mattingly surgen de la creencia de que el arte y el pensamiento en torno a utopías ecológicas pueden ser el detonante de un cambio social sistémico. La artista creció en un pueblo agrícola rural de los Estados Unidos que carecía de agua potable, lo que le hizo consciente del valor de este elemento y de la relación entre las infraestructuras y las necesidades básicas. Con la obra *Limnal Lacrimosa* (2021) habla de lo cíclico entre el agua, el aire y las plantas. Consiste en una gran escultura donde el agua fluye desde un conjunto de tubos y tuberías hacia diferentes recipientes, donde las gotas emiten sonidos diversos al caer. La obra exige escuchar, y nos hace pensar en los relojes de agua, las clepsidras, y en el tiempo glaciario o el tiempo ecológico. Junto a ella un vídeo nos traslada a un entorno lluvioso dentro de un edificio donde los goteos quedan atrapados en los vasos lacrimógenos y el vídeo avanza y retrocede entre los ciclos naturales del agua.



Rachel Schmidt + basurama.org CCBY-NC-SA 4.0





Rachel Schmidt + basurama.org CCBY-NC-SA 4.0



Mary Mattingly, *Clepsydra*, 2021. Cortesía de la Bienal de Cuenca y Robert Mann Gallery.

Y es precisamente en el funcionamiento de los ciclos del agua donde puso el acento el colectivo Basurama, en colaboración con Rachel Smith, para la realización de *Water Memories Itinerant Office* (2019), una oficina itinerante en Washington DC con la que reunieron historias sobre el agua que embotellaron a modo de cápsulas de tiempo en diferentes formatos que incluían imágenes, dibujos, textos, proyecciones y sonidos. El objetivo no era solamente reflexionar sobre el acceso desigual al agua, su calidad y su escasez, sino también mostrar la desconexión entre el concepto idealizado del agua como elemento de la naturaleza y los residuos industriales derivados de su consumo, proponiendo una revisión de su ciclo «natural» versus los ciclos «reales» de esta.

CONTAMINACIÓN HÍDRICA

Asimismo, en Washington tuvieron lugar dos proyectos centrados en la polución del agua, creados a partir de la recolección de muestras en diferentes partes del río que atraviesa la ciudad. Para ello, Juan Zamora colaboró con la asociación de cuidadores del río Potomac, en cuyo barco-laboratorio se cultivaron las muestras recogidas en placas petri, cuyos resultados fueron trasladados a partituras musicales. Así, *The Coliform Project: Performing Water* (2019) visualizaba la contaminación del agua en clave musical para ser posteriormente interpretada por David Schulman en el DC Listening Lounge del Smithsonian Hirshhorn Museum and Sculpture Garden.



Juan Zamora, *The Coliform Project: Performing Water*, 2019. Cortesía del artista.

La contaminación humana está alterando el equilibrio de los océanos e influyendo en la vida y el comportamiento de todo el circuito interconectado del ecosistema.

Por su parte, Juanli Carrión realizó una obra más de su serie *pH* (2018-en proceso), que también ha desarrollado en lugares como India o Costa Rica, para la que utiliza tintes textiles de origen alimentario —repollo morado, rubia cordifolia o frijol negro—, que varían de color dependiendo de la acidez del agua y, por tanto, de su nivel de contaminación. Como resultado, se muestra una instalación compuesta por tejidos que reflejan los distintos niveles de contaminación en una gama de tonos diferentes en función de cada caso.

Juanli Carrión, *pH*, 2018. Cortesía del artista.





La contaminación humana está alterando el equilibrio de los océanos e influyendo en la vida y el comportamiento de todo el circuito interconectado del ecosistema. La presencia antropogénica, resultado del modelo actual sociotecnológico global y su interés geopolítico y económico en las aguas del mundo, es ahora parte de todos los hábitats acuáticos.

Dicha presencia es protagonista de la obra *Aqua forensic* (2018- 2022) con la que Robertina Šebjanič y Gjino Šutić iluminaban la existencia de contaminantes químicos antropogénicos invisibles, residuos del consumo humano y «monstruos» acuáticos, combinando arte y ciencia.

EXTRACTIVISMO HÍDRICO

Neimanis señalaba también cómo el giro hidrológico nos ofrece nuevas formas de concebir los flujos de relaciones, el poder y el compromiso con nuestro entorno acuático. Así, el hidrofeminismo nos ofrece una mirada renovada ante los derechos del agua, fuertemente vulnerados a causa de las políticas de privatización, la contaminación y otras lógicas de acumulación derivadas de un modelo de desarrollo extractivista.

Este es el punto de partida de la obra de Regina José Galindo, *Ríos de gente* (2021), realizada en Guatemala, lugar de origen y residencia de la artista. El proyecto, concebido junto al líder comunitario y defensor de los derechos de los pueblos indígenas Abelino Chub Caal, consistió en la creación de una escultura humana que evocaba los lugares por donde alguna vez pasó un río.

A la performance se unieron más de mil niñas, niños, mujeres y hombres de diferentes comunidades que coreaban consignas como «libertad para el agua», «luchamos por la vida, luchamos por el agua», «el agua es vida no mercancía». En la instalación audiovisual, la artista ha combinado imágenes profesionales y amateur, tomadas por algunos de los participantes, aludiendo a la importancia de la acción colectiva desde diversos ángulos para enfrentar la actual crisis socioecológica.

Carolina Caycedo, *WaterPortraits* (2019). Vista de instalación de Carolina Caycedo, exposición *Wanaawna, Rio Hondo and Other Spirits*. Fotografía: Juliana Paciulli. Cortesía de Orange County Museum of Art.





En la serie de retratos de agua de Carolina Caycedo, *Water Portraits Series* (2016 - en proceso), las imágenes de ríos y cascadas de diferentes partes del mundo evocan cuerpos de agua como entidades vivientes y como agentes políticos activos en los conflictos ambientales, en lugar de recursos para el extractivismo humano. Realizados sobre tejidos de varios metros de largo, se convierten en estructuras fluidas que en ocasiones bañan techos y paredes. Se basan en visiones medicinales y chamánicas indígenas, invitando al espectador a experimentar y encontrar sus propias imágenes que, según la artista, buscan «una descolonización de la mirada desaprendiendo formatos formales artísticos patriarcales y eurocéntricos, como el paisaje, una oportunidad para desafiar nuestra relación con la naturaleza».

PRIVATIZACIÓN Y DERECHO AL AGUA

El agua empezó a cotizar en el mercado de futuros de Wall Street en diciembre de 2020, rompiendo todos los acuerdos establecidos sobre el derecho a su acceso libre. Ese fue el punto de partida de la obra *Cuanto río allá arriba* (2022) creada por Asunción Molinos Gordo a partir del uso de alfarería y cerámica de Ecuador. La artista creó un conjunto de esculturas inspiradas en objetos que se han empleado a lo largo de la historia para contener agua en diferentes regiones de Abya Yala. La obra alude al derecho al agua, así como a la interdependencia y la ecodependencia a través del ensamblaje vertical de las diferentes obras, una disposición que acentúa la idea de tótems. El tótem representa la ordenación del mundo y aquí invoca a través de sus cualidades apotropaicas a la protección que ahora mismo necesitan los cuerpos de agua para ser defendidos de su privatización.

En Costa Rica, donde también encontramos una problemática similar a pesar de ser un país con una gran cobertura y calidad de agua potable, centró su obra Lucía Loren, *Cuerpo de agua* (2022). Para tratar de dar solución a las problemáticas de almacenamiento, numerosos tanques o depósitos de poliéster se distribuyen por los núcleos habitacionales, generando un fuerte impacto visual en el entorno de vida cotidiano. Como contrapeso a esta disonancia, la obra de Loren proponía crear un prototipo para una posible cobertura de camuflaje de estos depósitos realizada con tejidos vegetales provenientes de podas de plantas exóticas invasivas. Realizada en colaboración con Alessandra Sequeira, en ese recubrimiento la artista integró varias tinajas de barro repletas de agua, creadas por artesanos locales, que funcionaban como bebedero para las aves de la zona.



Lucía Loren, con la colaboración de Alessandra Sequeira, *Cuerpo de agua*, 2022. Cortesía de la artista.



Asunción Molinos Gordo, *Cuanto río allá arriba*, 2022. Cortesía de la artista.



En este sentido, la obra opera bajo el principio de que cualquier cosa es igualmente valiosa como registro, todo forma parte de una crónica de pérdida. Este archivo se estructura en colecciones «comunes pero diferenciadas», en línea con la clasificación de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), que divide a los países en grupos de acuerdo con la responsabilidad de estos en función de sus emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero.

Anne Duk Hee Jordan, *Ziggy and the Starfish* (2016). Cortesía de la artista.



Algunas artistas llevan el foco del impacto del cambio climático sobre las agencias no humanas acuáticas. Es el caso de *Ziggy and the Starfish* (2016), una instalación en la que Anne Duk Hee Jordan exploraba la diversidad de la sexualidad en el océano y las formas en que analizamos nuestro entorno a través de los ojos de otros no humanos para detonar la comprensión del complejo entramado en que estamos integrados. La artista señalaba cómo el cambio climático es un factor decisivo en la alteración de patrones de sexualidad de los habitantes de los océanos a través de una compilación de imágenes sensuales y atractivas en torno a la vida sexual de pulpos, estrellas de mar y otros animales.

DERRETIMIENTO DE LOS GLACIARES

Posiblemente el derretimiento de los glaciares sea una de las ilustraciones que más pueblan nuestro imaginario cuando se trata de traducir de manera gráfica el cambio climático. A uno de ellos nos traslada la obra de Cristina Lucas *The people that is missing* (2019) filmada en el archipiélago de Svalbard, Noruega, en el Polo Norte, área que ha perdido el 35 % de su hielo debido a las emisiones de gases de efecto invernadero. El vídeo ilustra un poema compuesto por citas de una variedad de pensadores y figuras influyentes —y a menudo contradictorias—, incluidos Alexander von Humboldt, James Lovelock, Donald Trump y Bruno Latour, entre otros. Los versos se muestran escritos a mano en la pared, mientras el vídeo se refleja en un espejo de agua que se expande por toda la sala. Con ella Lucas apela a la capacidad del arte para catalizar un tipo de comunidad aún por construir, con una fuerza verdaderamente integradora y con el propósito colectivo de avanzar hacia un futuro sostenible.



Basia Irland, *Lucy Lippard launching*, «Santa Fe River Ice Book X, Volume 2: Book of Seeds» (2023). Cortesía de la autora.

Cristina Lucas, *The People That Is Missing* / *El pueblo que falta* 2019. ©Fundación Municipal Biental de Cuenca.

También Basia Irland ha centrado toda su carrera en investigaciones en torno al agua, y desde 2007 lleva desarrollando su serie *Ice Receding/Books Reseeding* en ríos de todo el mundo. Con agua tomada de estos, la artista crea libros congelados en los que incrusta semillas endémicas en sustitución del texto, que después son lanzados al mismo río a fin de repoblar sus orillas una vez derretidos. Su trabajo enfatiza la necesidad del esfuerzo comunitario y la importancia de establecer alianzas globales y cooperación entre la comunidad artística y la científica para abordar los problemas derivados de la alteración del clima y la restauración de cuencas hidrográficas.

Basia Irland, *Bernesga River Ice Book 1* (2017). Cortesía de la autora.



EL AGUA COMO PRESENTE AUSENTE

No son pocas las artistas que abordan el tema a partir de metáforas en que este elemento opera como «presente ausente». Es el caso de las investigaciones de Esther Pizarro en torno a la huella hídrica, a través de la serie *Mapping Virtual Water :: Huella hídrica / 6.700 l./24 h.*, que aborda este tema y el consumo de agua virtual desde una escala global, nacional, local y doméstica. De lo macro a lo micro. Si bien se ha vuelto común hablar de huella de carbono, aún no es nada habitual pensar en términos de «huella hídrica», un concepto acuñado en 2002 por el profesor Arjen Hoekstra para medir el volumen total de agua dulce utilizado para producir los bienes y servicios que consumimos.

Para ello, la artista crea metáforas visuales a partir de la interpretación artística de datos reales. Con ellas pone sobre la mesa datos de análisis de esta problemática y nos acerca también a la huella de elementos de nuestra vida cotidiana, como unos pantalones vaqueros (10.800 litros de agua), un kilo de carne (15.400 litros de agua) y una tableta de chocolate (24.000 litros de agua). Pizarro crea unas esculturas donde la impronta en negativo de estos tres elementos queda encapsulada en una urna transparente que está unida a una bolsa de infusión por goteo.

Si bien se ha vuelto común hablar de «huella de carbono», aún no es nada habitual pensar en términos de «huella hídrica».

Por su parte, Tania Candiani creó cuatro arpas de agua que tomaban como base cuatro antiguos telares circulares Scott & Williams (*Arpas de agua*, 2021). Las cajas de resonancia de los instrumentos permitían una traducción sonora del itinerario de los cuatro ríos que pasaban por la ciudad de Cuenca, Ecuador, para cuya Bienal desarrolló la obra. Los trazados de estos mismos ríos sirvieron como inspiración para cuatro piezas bordadas que colgaban del techo de la sala.

También C. J. Chueca fabula en torno al agua ausente a través de narrativas de nostalgia y tierra perdida. Con el título *Mermaids in the Basement* (2023), tomado de un poema de Emily Dickinson, construía un espacio metafórico compuesto por diferentes obras que se entrelazaban para crear una instalación inmersiva.

Con él alude a la figura de la sirena, que aquí se encarna en mujeres migrantes de todo el mundo que entonan canciones de añoranza. A través de obra sonora, pinturas, cerámicas y mosaicos, la artista invita a la inmersión en una suerte de piscina que cambia de gradación de tonos azules, reforzando la intención de abordar el paso del tiempo y la transformación que las cantantes han experimentado. Con el uso de los azulejos, la artista remite al imaginario de herencia colonial en los territorios de Abya Yala (Latinoamérica), que conduce a una revisión del papel del colonialismo en la emergencia ecológica y al concepto de deuda climática con los países del Sur Global.

Esther Pizarro, *Huella hídrica doméstica*:
1 kg de carne 15.400 l (2023). Fotografía:
Markus Schroll. Cortesía de la artista.



Pues son las mujeres de las zonas rurales del Sur Global las encargadas de la mayoría de las tareas relacionadas con el abastecimiento de agua. En *Women and the Vanishing Waters*, Vandana Shiva explica cómo la desecación de los acuíferos en la India, debido sobre todo a la expansión de los monocultivos, ha provocado que estas se vean obligadas a caminar distancias cada vez más largas para encontrar este preciado recurso, un hecho que ha repercutido directamente en los índices de alfabetización de las niñas, que al tener que cumplir con esta obligación no pueden asistir a la escuela.

Las obras mostradas son solo algunos ejemplos de la capacidad de las artes visuales para explorar las dimensiones simbólicas y políticas del agua y elaborar relatos de reparación, resiliencia y coexistencia. Como señala Neimanis, «pocas cosas son más planetarias e íntimas que nuestros cuerpos de agua. [...] El agua no solo nos conecta, nos gesta, nos sustenta; más que esto, el agua perturba las mismas categorías que fundamentan el pensamiento en los ámbitos de lo social, lo político, lo filosófico y lo medioambiental, y también los de la teoría y la práctica feministas. Pensar en nosotros mismos y en nuestras comunidades de manera expandida, como comunidades acuáticas, puede liberarnos de manera fértil —aunque en ocasiones arriesgada—».

Aproximadamente el 60 % de nuestro cuerpo es agua. Indaguemos en sus imaginarios y poéticas. Escuchemos sus sonidos y memorias que nos hablan del tiempo eterno. Pensarnos desde el agua permite abrir espacios de transformación y negociación de nuevos pactos de interdependencia y ayuda mutua. Pensar las artes visuales desde el agua puede ayudar a tejer imaginarios nuevos en torno a la memoria de los pueblos, a la memoria de las memorias, esa que huye de las narrativas oficiales y, sugerir nuevas formas de relación, de establecer vínculos desde otro lugar para trabajar una posible transición ecosocial.

Tania Candiani, *Arpas de río* (2022). Fotografía:
Ricardo Bohórquez. Cortesía de la artista.



New River a su paso por Enfield.





ONCE

CIUDADES DE AGUA

Sonia Freire Trigo



© Manuel M. Vicente

Mi primer día en la Escuela de Arquitectura comenzó con una clase magistral para unos doscientos alumnos. Me tocó sentarme en las filas de atrás, por lo que me costó centrarme en lo que nos contaba aquel profesor desde su podio. Dos ideas sí me hicieron agudizar el oído todo lo que pude: que *espacio* es la esencia de la arquitectura; y que *genius loci*¹ lo es de un lugar. Treinta años después de aquel comienzo de curso, esas dos ideas siguen formando parte integral de mi lectura de las ciudades. Entender su relación, el modo en que el medio construido se integra o desestabiliza un territorio, y las consecuencias sociales, ambientales, y económicas de dicho encuentro, ocupa mi labor investigadora y docente —y también mucha parte de mi ocio, como apuntarían los que mejor me conocen—. Es desde esta perspectiva que abordo el presente artículo sobre la relación de las ciudades con el agua.

Revisando la evolución urbana de dos capitales europeas, Londres y Madrid, exploramos el modo en que ambas ciudades han sabido integrar —o no— su *genius loci* a lo largo del tiempo. Por sus trayectorias históricas y las características de cuencas hidrográficas, ambas ciudades ofrecen dos casos muy diferentes dentro de un contexto europeo común. Así, su comparación nos permitirá entender mejor qué dinámicas son inevitables y cuáles contingentes en el estudio de la relación ciudad-agua. En cuanto a dinámicas inevitables, la comparación nos muestra cómo, en ambos casos, la relación con el agua cambia de forma radical a partir del momento en que la expansión urbana de la ciudad requiere encontrar fuentes de abastecimiento en otros lugares. A raíz de esto, el agua pasa de ser la razón de origen de los asentamientos a convertirse en un mero problema urbanístico más a tratar. En cuanto a los aspectos contingentes, la comparación nos permite observar cómo estos aparecen ligados a las diferentes capacidades institucionales para imaginar y gestionar la relación con sus acuíferos. Las distintas intervenciones que en ambas ciudades se hacen sobre sus aguas son la prueba de dichas diferencias.

El artículo acaba con una llamada a repensar el agua como un elemento integral e integrador de la ciudad y su territorio. Para ello, se reclama una visión ecosistémica en la que el agua vuelve a recuperar su valor territorial y vital, trascendiendo el utilitarismo urbano al que ha sido confinado. No se aboga aquí por una vuelta a las sociedades agrícolas, pero sí por entender las ciudades como parte de un territorio natural amplio, no independientes de él. Se trata de buscar nuevas formas de habitar el territorio para asegurar no solo su mantenimiento y recuperación, sino nuestra propia existencia.

EL NACIMIENTO DE DOS CIUDADES

La primera diferencia evidente entre las dos ciudades se encuentra ya en su fecha de constitución como asentamientos propiamente urbanos. Mientras que Londres debe su existencia a la expansión del Imperio romano por el norte de Europa, Madrid no aparece como un enclave de relevancia hasta que el Imperio islámico llega a la península ibérica. Estos dos orígenes imperiales distintos se conservan todavía en la raíz de sus nombres,

1. *Genius loci* es un término latino que en la antigua Roma se refería al espíritu protector de un lugar. En arquitectura y paisajismo, este término se ha aplicado como un principio de diseño que aboga por entender el contexto donde se va a intervenir, para así poder preservar su esencia y sus rasgos distintivos.

Londinium y Mayrit. Pero en ambos casos el agua es germen de su fundación, aunque de modos diferentes, y revela el papel que a ella atribuían romanos y musulmanes.



Figura 1. Mapa idealizado de Londinium entre los siglos II y V.

Londinium se ubicó en las riberas del río Támesis, en un punto que era fácilmente remon-
table en barco desde el mar, pero suficientemente lejos de él como para que sus mareas no
impidiesen cruzarlo de una orilla a otra. Tal como muestra Morris (1984) en su análisis
sobre el crecimiento de Roma y sus ciudades, esta ubicación estratégica de Londres seguía
un patrón común. El imperio, en su afán conquistador, utilizaba los ríos y mares como
vías de comunicación entre sus ciudades relevantes, pues ofrecían una más ágil capacidad
de transporte que su incipiente red de calzadas. Esto explica la fundación de importantes

asentamientos romanos, como Londres, Viena o Toledo, a orillas de ríos de cierto calado conectados con el mar, como el Támesis, el Danubio o el Tajo (ibid.). La orilla donde se instaló la inicial base militar que después creció hasta convertirse en Londinium también se explica desde su relación con el agua. El lecho del Támesis tenía en la zona escogida para el asentamiento una suave pendiente hacia la orilla sur, mientras que presentaba un borde más abrupto en la orilla norte. Así, los romanos escogieron la orilla norte para instalarse, por ser menos inundable que la opuesta (Farrell 2010). En ese mismo punto también desembocaba el Walbrook, un afluente que debido a su calado permitía la posibilidad de crear un embarcadero natural (Morris 1984), sumando motivos para el establecimiento en ese lugar específico. Así vemos cómo Londinium se fundó y creció en torno al agua: desarrollándose a ambos lados del Walbrook, y a orillas del Támesis y, por tanto, en conexión con el resto del imperio (Figura 1).

El Manzanares, aunque caudaloso, no es navegable ni llega al mar. Por eso no es de extrañar que la principal presencia de restos romanos en la región no se encuentre en Madrid sino en Toledo (Toletum), cuyo asentamiento inicial aprovechó el alto de un recodo en el río Tajo para establecerse. No será hasta el siglo IX, durante el periodo de expansión urbana del Imperio omeya en la península, cuando encontramos las primeras referencias arqueológicas y escritas de la existencia de Mayrit (Mazzoli-Guintard 2011). Quizás para defenderse de los ataques por el norte del reino cristiano, o quizás para proteger Toledo de los incesantes asedios por parte de tribus insumisas, el emir Muhammad I mandó construir un lugar fortificado (Figura 2) sobre parte de lo que hoy ocupan la Catedral de la Almudena y el Palacio Real (ibid.). La fortificación se situó sobre el farallón delimitado al oeste por el barranco del Manzanares, al norte por el barranco del arroyo Arenal, y al sur por el del arroyo San Pedro (Aroca 2016), cuyas vaguadas han dado lugar a las calles Arenal y Segovia (Guerra Chavarino 2006). La posición estratégica del promontorio y la abundancia de aguas subterránea favorecieron que alrededor de este punto defensivo creciese un pequeño asentamiento urbano estable, que se dedicaba en gran medida a labores agrícolas (Aroca 2013). Mayrit, por tanto, también se funda y crece en torno al agua, si bien en este caso utilizándola más como elemento de defensa que de comunicación.

Es en esta conexión tan directa con el agua en su momento fundacional dónde Mayrit y Londinium muestran una evidente conexión con su *genius loci*, con la esencia del lugar. Ambos asentamientos demuestran una profunda comprensión del territorio que las rodea, lo que las ayuda a maximizar sus características sin necesidad de grandes modificaciones. Intervención y naturaleza se funden para formar un lugar en el que ambas dimensiones se complementan perfectamente. Y es tan profunda esta relación, tan intrínseca, que su huella y sus funciones perduran en la actual trama urbana. Así, la famosa City de Londres ocupa casi exactamente la misma área de la antigua Londinium y sigue ejerciendo un poder de dominación nacional e internacional, con su densa concentración de famosas firmas de abogados, entidades financieras y aseguradoras. En el caso madrileño, la desa-

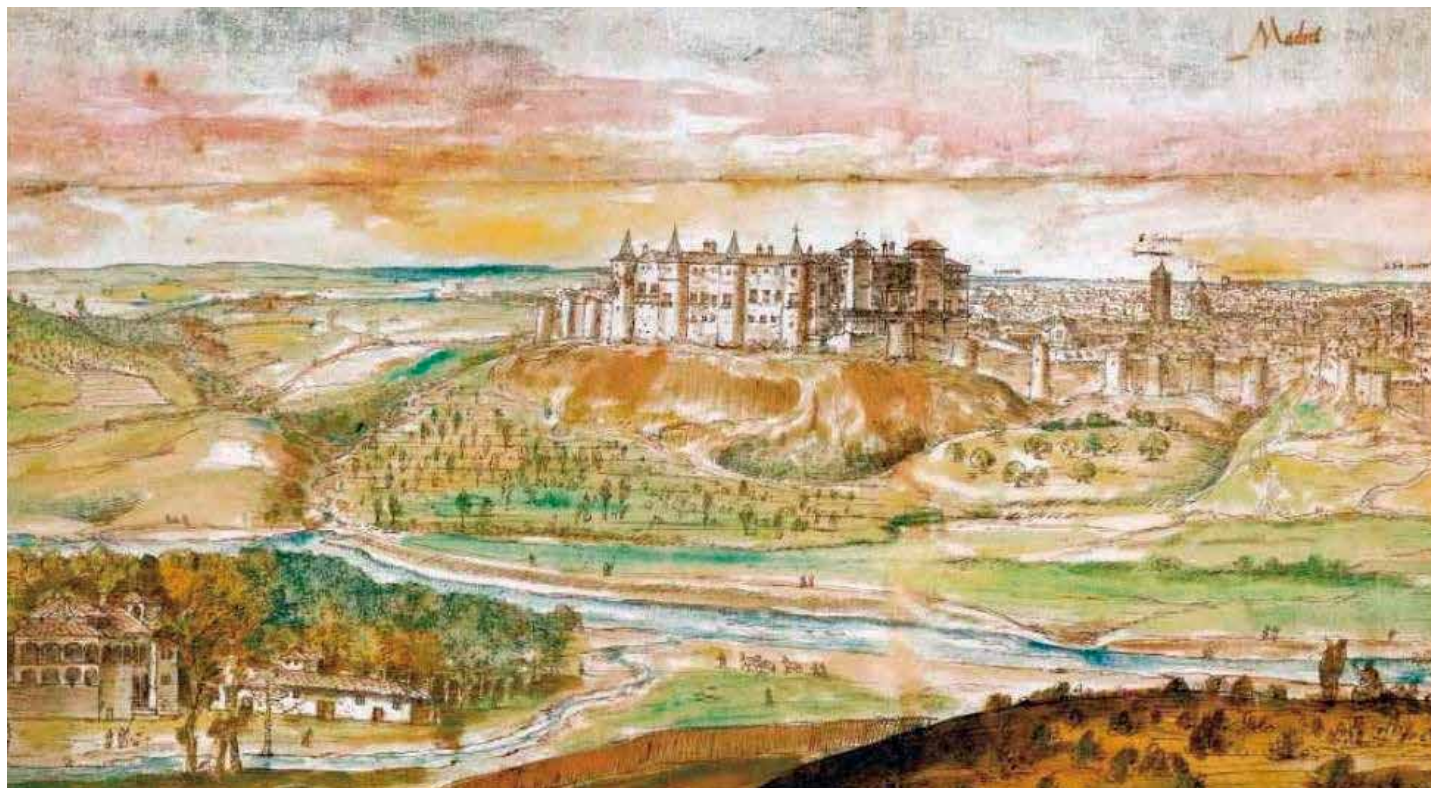


Figura 2. Vista de Madrid en 1526. Dibujo preparatorio de Antón van der Wyngaerde.

parecida almudaina, o fortaleza, sobrevive todavía en el nombre de la actual catedral. Su función de control y poder también se conserva en la ubicación del actual Palacio Real, construido sobre la huella de aquella fortaleza inicial (Aroca 2013). La memoria urbana de estos usos, nombres y trazados son lo que Aldo Rossi (1982) denominó elementos primarios de la ciudad: actividades o construcciones que, por ser catalizadores de la existencia del hecho urbano, permanecen a lo largo del tiempo en la estructura urbana. El papel estratégico del agua, bien como vía de comunicación en Londres o bien como barrera defensiva en Madrid, está pues en los genes de los elementos primarios que conforman el núcleo original de ambas ciudades y ha mantenido su huella a lo largo de los siglos.

Pero las crecientes necesidades sociales y económicas de ambas concentraciones de población fueron borrando el papel fundacional del agua para reemplazarlo por uno secundario, de servicio a las necesidades de los habitantes. La comprensión territorial que manifestaban Mayrit y Londinium en su relación con sus cursos de agua se fue olvidando una vez que ambos asentamientos se estabilizaron y comenzaron a crecer. Como veremos a

continuación, este proceso de expansión impone una subordinación del agua hacia el hecho urbano, de modo que el agua acaba alienándose de su valor natural y territorial para convertirse en mero objeto de ingeniería y diseño urbanos.

CRECIMIENTO Y DISTANCIAMIENTO

La continuidad y estabilidad de Madrid como núcleo de población desde su fundación hasta el advenimiento de la Corte con Felipe II se debió, entre otras cosas, a la abundancia y buena calidad de sus aguas subterráneas y al ingenioso sistema de captación de estas, importado por los musulmanes. Los llamados «viajes de agua» de Madrid son la traslación del antiguo sistema persa de captación subterránea, llamado *qanat* o *khanat*, al contexto español de manos del Imperio omeya (Guerra Chavarino 2006). Estos viajes eran «unos ríos subterráneos artificiales que desembocaban en aljibes desde donde se distribuía el agua a sus usuarios». Sus puntos de origen, como explica Guerra Chavarino, solían iniciarse en una mina subterránea a unos 7 km o 12 km de la villa, desde donde el agua discurría por gravedad y presión atmosférica, a través de las galerías excavadas a mano, hasta los aljibes de la villa. Una vez ahí almacenada, el agua se distribuía entre sus habitantes a través de fuentes privadas, para aquellos que pudieran pagar un canon anual, y de fuentes públicas, a las que tenían acceso gratuito los vecinos sin servicio privado y los aguadores². Este eficaz sistema de captación de aguas subterráneas, junto con la fertilidad de la vega del Manzanares y la abundante caza de los montes aledaños, permitió que Mayrit dejase de ser un mero puesto de defensa para convertirse en un próspero realengo³, durante un periodo histórico bastante convulso en la península (Aroca 2013).

Los viajes de agua fueron el sistema de abastecimiento de Madrid hasta la construcción del Canal de Isabel II, a mediados del siglo XIX (Canal de Isabel II, s.f.). Pero los primeros signos de crisis del sistema de viajes comenzaron mucho antes, con la decisión de Felipe II de establecer Madrid como corte única y permanente del imperio (García de Cortázar y González Vesga 2022). El monarca escogió Madrid por su posición estratégica respecto a los otros centros urbanos relevantes dentro de España, pero también por la abundancia de recursos naturales mencionada (Aroca 2013). Una vez Madrid se convirtió en Corte, su población se triplicó en un periodo de treinta años, alcanzando unos 90.000 habitantes (ibid.) y forzando la construcción de más viajes de agua para abastecer la creciente demanda en la ciudad (Guerra Chavarino 2006). La llegada de la Corte a Madrid también alteró la distribución de agua entre los habitantes. La mayor concentración de cortesanos y nobles en la ciudad incrementó la demanda de fuentes privadas, mermando así la disponibilidad de viajes para abastecer fuentes públicas que, a su vez, se disputaban vecinos y aguadores (ibid.). Es a raíz de estas presiones de demanda y competición por el agua que el gobierno central comenzó a regular su consumo, tanto en fuentes privadas como en públicas, regulando de paso el oficio de los aguadores y fontaneros (ibid.). Incluso el uso de las aguas del Manzanares comenzó a regularse con más cuidado, trasladando las actividades más

2. Los aguadores se encargaban de transportar agua desde las fuentes públicas a las domicilios e instituciones que, sin poder pagar una fuente privada, sí podían costear el servicio de estos transportistas de agua.
3. En el sistema feudal, el realengo era un pueblo que estaba bajo jurisdicción directa del rey. Eran así distintos de los señoríos, pueblos y tierras cuya propiedad y jurisdicción el rey habría otorgado a un noble, o señor, en pago a sus servicios.

nocivas, como las tenerías, aguas abajo del encuentro con el arroyo de San Miguel (Aroca 2013). Siguiendo el argumento de Hardin (1968), se puede argumentar que la incipiente sobreexplotación del agua, debido al rápido crecimiento de población, resultó en una institucionalización estatal de este recurso para evitar su absoluta destrucción.

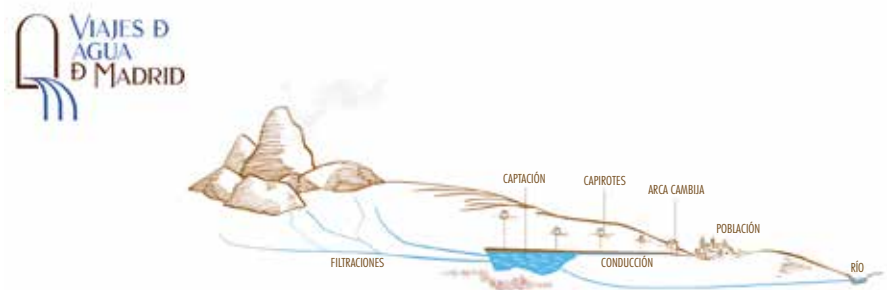


Figura 3. Esquema idealizado de un viaje de agua.

Si bien la regulación consiguió mantener la eficiencia de los viajes como sistema de abastecimiento de la ciudad, su curva ascendente de crecimiento poblacional lo llevó a una nueva situación de crisis a mediados del siglo XIX, cuando la sobreexplotación redujo el suministro a siete litros por habitante (Canal de Isabel II, s.f.). Madrid había alcanzado los 270.000 habitantes a mediados del siglo (Aroca 2013). Las aguas subterráneas sobre las que se había fundado Mayrit ya no eran suficientes para abastecer a los madrileños, lo que forzó la búsqueda de otras fuentes mucho más allá de los límites de la ciudad. Así se plantea la presa del Pontón de Oliva en el río Lozoya, a 77 km de Madrid, y su conducción hasta la capital a través del Canal Isabel II, infraestructura que, aunque modificada y ampliada, sigue vigente hoy en día (Canal de Isabel II, s.f.). Este salto de escala territorial, del ámbito local al regional, supuso un claro punto de inflexión en la relación de la ciudad con sus aguas. Los viajes, fuentes, y arroyos que tan importantes fueron para el desarrollo de Madrid se vieron reemplazados por una infraestructura que nada tenía que ver con su *genius loci*. La ciudad bebía directamente de la sierra, por lo que dejó de preocuparse de las aguas en torno a las que había surgido. Arroyos como Castellana, Arenal, San Bernardo, Goya, Barquillo, etc. se cubrieron para facilitar el crecimiento del tejido urbano y sus antiguas vegas se convirtieron en calles. El Manzanares, el único arroyo que se mantuvo como tal, se convirtió en un improvisado colector de aguas residuales por su ubicación en la parte baja de la ciudad (Pinto Crespo *et al.* 2015).

La evolución de la relación de Londres con sus aguas tiene muchos paralelismos con la de Madrid, aunque existen importantes diferencias. Tras la retirada de las tropas romanas de la isla, en el siglo V, la ciudad se vio expuesta a constantes ataques vikingos (Ackroyd 2001, Inwwood 2000). El Támesis, razón de origen de la ciudad, se convirtió entonces en

el flanco débil de la misma, facilitando las incursiones por río de estos bárbaros nórdicos (ibid.). Así, Londinium cayó en un periodo de decrecimiento, e incluso total abandono, durante varios siglos. Pero su ubicación estratégica en la isla respecto al continente trajeron de vuelta la actividad a la urbe de forma paulatina, y a principios del siglo *x*i la monarquía se trasladó de su sede en Winchester a Westminster, a unos pocos kilómetros río arriba de la City (ibid.). La marcada diferencia funcional entre estos dos núcleos, política y comercial respectivamente, generó una estructura urbana bipolar que explica la inicial expansión de Londres a lo largo del Strand (Morris 1984), el frente fluvial que se extendía a orillas del Támesis entre Westminster y la City. El acceso directo al río facilitaba la comunicación entre los dos polos de poder, por lo que esta fachada enseguida se vio colmatada con la presencia de grandes construcciones, propiedad de familias nobles cuyos apellidos, en muchos casos, siguen ligados a la contemporánea vida política y comercial del país. El Támesis era, una vez más, el factor decisivo en el patrón de crecimiento de la ciudad.

El crecimiento de la población en Londres no solo se debió al traslado de la corte a Westminster, como en el caso de Madrid, sino también a la exitosa actividad comercial internacional de la City, que en el siglo *x*i ya contaba con una población de unos 18.000 habitantes (Morris 1984). Esta concentración de personas tuvo un impacto negativo sobre la calidad de las aguas de arroyos, fuentes naturales y pozos artesanos de los que la City se había abastecido hasta entonces. El mayor número de personas también aumentó el número de vertidos incontrolados en el Támesis, el Walbrook y el Fleet, haciendo que sus aguas no fuesen aptas para el consumo (Ackroyd 2001, Inwwod 2000). Por este motivo, la Corporación de la City, una suerte de organismo municipal similar al Concejo de la villa de Madrid pero con una fuerte influencia de los gremios, financió las primeras obras de captación de aguas y distribución desde el arroyo Tyburn, cerca de Westminster (ibid.). A medida que Londres fue expandiéndose a lo largo del Strand y hacia el norte, se fueron construyendo más canalizaciones (*conduits*) desde los arroyos del oeste de la ciudad para abastecer las fuentes públicas y privadas, sujetas al pago de un canon, de modo similar a lo que sucedía en Madrid con la gestión de los viajes de agua.

Pero cuando a principios del siglo *xvii* la población alcanza los 200.000 habitantes (Morris 1984), la gestión que la City hacía de los *conduits* resultó tan insuficiente como el marco regulatorio de los viajes de agua en el *xix*. La expansión urbana de la ciudad ya había alcanzado el Tyburn, con la consiguiente contaminación de sus aguas, por lo que se hizo necesaria la búsqueda de fuentes de agua todavía más lejos de la ciudad (Tomoroy 2017). Así es como nace el *New River* (Figura 4), un canal artificial que captaba el agua a unos 60 km al norte de Londres, en la zona de Hertfordshire. Desde allí, el agua se canalizaba hasta unos grandes depósitos en Islington Hill, cerca ya de la ciudad, desde donde se distribuía a los diferentes hogares de la City por gravedad. Así, Londres tuvo su Canal de Isabel II, y la ruptura con su *geniu loci*, dos siglos antes que Madrid. Los afluentes Westbrook, Tyburn, Fleet y Walbrook habían regado y saciado la sed de la población hasta

entonces, enmarcando también la ubicación de las grandes promociones inmobiliarias de la nobleza entre los siglos XVI y XVII (Farrell 2010). Pero una vez que Londres resolvió beber las aguas de otro lugar, estos afluentes perdieron su valor como fuentes de vida y se convirtieron en molestas barreras para la expansión urbana, además de olorosas cloacas a cielo abierto (Farrell 2010). Así es como todos ellos fueron cubriéndose y transformándose en parte del alcantarillado urbano. Al igual que en Madrid, la memoria de estos acuíferos ha quedado tan solo en los nombres de las calles que los cubren, convirtiéndose en *the lost rivers of London* (Barton 1996).

El sistema de captación de aguas lejanas siguió expandiéndose a medida que lo hacía la ciudad. El éxito de la New River Company, la compañía propietaria y gestora del canal New River, se debió a su original modelo de financiación, basado exclusivamente en el capital privado de sus socios (Tomoroy 2017). Este modelo facilitaba una gestión y un desarrollo mucho más ágiles que si el canal hubiera estado en manos del Estado, cuya capacidad para recaudar fondos y terrenos para el desarrollo de estas infraestructuras era limitada y a menudo chocaba con los intereses privados de los grandes terratenientes. La gran demanda de servicio privado de agua hizo que enseguida surgiesen compañías similares a la New River Company, en directa competición con ella (ibid.), lo que trajo consigo una acelerada mejora tecnológica de los servicios. Así, a mediados del siglo XIX, la mayor parte de los hogares de Londres estaban dotados de un sistema de abastecimiento privado individual (ibid.). Solo las clases pobres recurrían ya a las fuentes públicas, cuyas aguas venían todavía de los arroyos contaminados de la ciudad, con los consiguientes efectos negativos para su salud (*The Conversation* 2023). El agua había dejado de ser un bien común que se regulaba para protegerlo de su sobreexplotación, para convertirse en un objeto de consumo urbano cuya regulación tenía un carácter principalmente comercial. La tragedia de los bienes comunes de Hardin (1968) se volvía a manifestar en el caso de Londres, aunque el tipo de institucionalización que se dio aquí fue mercantil, no estatal.

El crecimiento de Madrid y Londres, aunque en distintos momentos y a distintas velocidades, tuvo por tanto un efecto similar en su relación con el agua. En ambos casos, las ciudades crecieron de forma incontrolada, sin que los esfuerzos estatales por regular y limitar su expansión fuesen efectivos. Ambos centros ofrecían una oportunidad de empleo y prosperidad mayores que en otras ciudades de sus respectivos países, por lo que la gente siguió desplazándose hacia ellas. Este crecimiento motivado por factores económicos y desigualdad territorial, sin ningún tipo de consideración acerca de los límites naturales del territorio sobre el que se implantaban, llevó a ambos lugares a explotar recursos más allá de sus bordes construidos. El perfeccionamiento tecnológico de dicha explotación reforzó el crecimiento de la mancha urbana todavía más. Así, una vez rota la dependencia de los asentamientos con sus recursos locales, ambas ciudades dejaron de formar parte del ecosistema que las había sostenido (Meadows *et al.* 1972; Meadows *et al.* 1992), actuando como entes ajenos a él,

como una suerte de especie invasora. Así pues, observamos en ambos casos cómo una vez rota la relación con su *genius loci*, el agua se cosifica, lo que deviene no solo en una sobreexplotación de un territorio cada vez más amplio, sino también en una mala utilización de los recursos locales, como veremos a continuación.

RUPTURA

Se dice que el ser humano no puede sobrevivir más de 3 minutos sin aire, más de 3 días sin agua, ni más de 3 semanas sin comida. La supervivencia, en fin, nos obliga a centrarnos en los recursos que necesitamos consumir. Es quizás por esto que prestamos menos atención a los desechos que generamos a través de ese consumo, especialmente cuando conseguimos hacerlos desaparecer de nuestra vista. Ya se sabe, ojos que no ven, corazón que no siente. La contaminación de las aguas por culpa de nuestros vertidos es un ejemplo perfecto de este comportamiento.

El avance tecnológico que permitió a Madrid y Londres beber las aguas de fuentes mucho más allá de sus bordes construidos, no se aplicó con la misma celeridad a sus sistemas de saneamiento. Las filtraciones de aguas residuales al terreno desde un pésimo alcantarillado, así como los vertidos directos a los pocos cauces de agua todavía visibles, fueron contaminando las aguas locales de ambas ciudades a medida que iban creciendo (Pinto Crespo *et al.* 2015; Royal Museums Greenwich 2015). Pero hasta mediados del siglo XIX, la ciencia todavía creía que enfermedades como cólera o tifus se debían a los malos olores que emanaban de las aguas sucias, las llamadas *miasmas*, no a su consumo (Royal Museums Greenwich 2015). Así, los esfuerzos regulatorios se centraron inicialmente en ubicar las actividades responsables de esa contaminación lo más lejos posible de las viviendas y en la dirección de los vientos predominantes (Pinto Crespo *et al.* 2015; Royal Museums Greenwich 2015), alejándolas de la vista y el olfato de clases medias y altas. No es casualidad, por tanto, que las clases más pobres acabasen concentrándose en las zonas más afectadas por las supuestas miasmas; es decir, las riberas del Manzanares y el este de Londres. Pero los fortísimos brotes de cólera en Madrid y Londres, así como el descubrimiento de su verdadero origen —esto es, el consumo de agua contaminada—, forzaron a ambos gobiernos a tomar medidas radicales para resolver el problema. Así aparecen en escena Joseph Bazalgette y su propuesta de encauzamiento y colectores del Támesis, construida en la segunda mitad del siglo XIX (Halliday 2001); y una propuesta similar de Eduardo Fungairiño para el Manzanares, construido en las primeras décadas del siglo XX (Pinto Crespo *et al.* 2015).

De modo similar al efecto que tuvo el perfeccionamiento tecnológico del abastecimiento de aguas, los avances en el saneamiento aumentaron la habitabilidad de las ciudades, lo que contribuyó a atraer cada vez más población hacia ellas. Lejos de recuperar su relación con las aguas locales, los avances de saneamiento las relegaron a meros vehículos de trans-

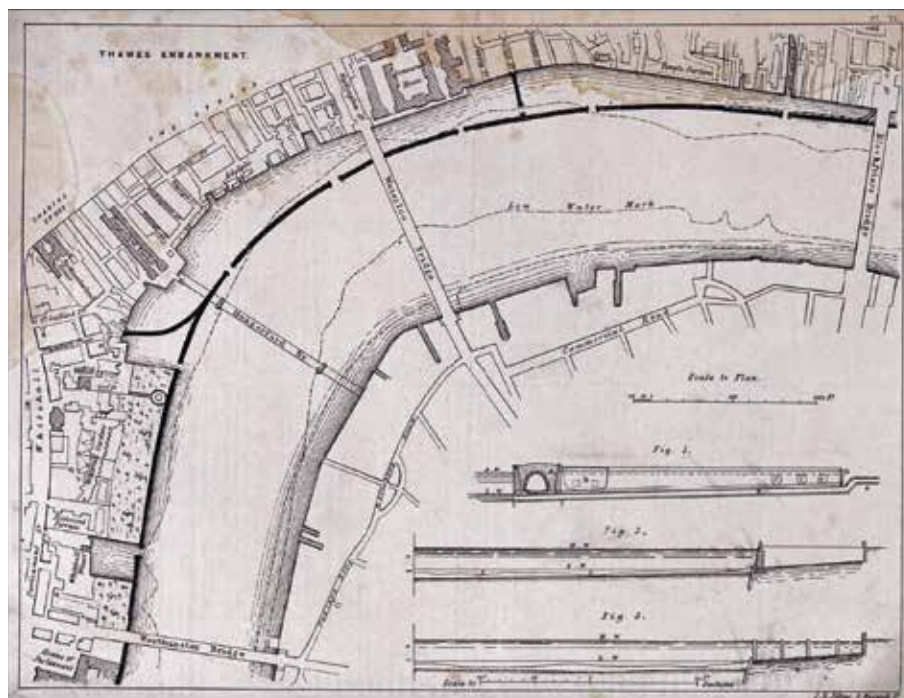


Figura 5. Planos del proyecto de encauzamiento de Joseph Bazalgette.

porte de aguas residuales. Así, tanto el Támesis como el Manzanares siguieron presentando episodios de alta contaminación y malos olores durante el siglo xx, cuando las lluvias o el aumento de población llevaban las infraestructuras de saneamiento a nuevos momentos de crisis (Pinto Crespo *et al.* 2015; Halliday 2001). Con cada episodio, se realizaban nuevas actuaciones sobre la red para aumentar su eficiencia, pero el papel de ambos ríos como elementos naturales de conexión entre la ciudad y el territorio había desaparecido. Así, el 90 % de las aguas que actualmente discurren por el Manzanares, a su paso por Madrid, son aguas residuales tratadas (*Caminar el agua* 2020); algo similar a la situación del Támesis, que recibió más de 72 billones de litros de aguas residuales sin tratar entre 2020 y 2023 (BBC 2023).

Aunque el saneamiento de Madrid esté ahora por delante del de Londres en cuestiones de depuración, en ambos casos sus redes de saneamiento han fagocitado al Manzanares y al Támesis hasta convertirlos en grandes colectores con aspecto de río. Ya nada queda del agua como *genius loci* de ambas ciudades.



Figura 6. Recuperación del Manzanares a su paso por el Pardo.

CIUDADES DE AGUA

A Londres la han denominado *liquid city* (Sinclair 2013) por los numerosos afluentes del Támesis que regaban la ciudad y hoy discurren ocultos, en su mayoría, bajo el asfalto. Por otro lado, el antiguo lema de la villa de Madrid afirmaba que estaba «sobre agua edificada» (Guerra Chavarino 2006:421) y muchos madrileños siguen afirmando que su agua «es la más rica». Pero ya poco queda de verdad en estos adjetivos y percepciones populares. Ni el agua que se bebe en ambas ciudades es de sus fuentes, ni sus ríos lo son ya en realidad.

Ante este panorama, podríamos adaptar una postura nihilista y aceptar el actual estado de cosas sin más, como parte inevitable de la evolución del ser humano y sus ciudades. Pero los evidentes impactos que dicha actitud ha tenido, y sigue teniendo, sobre la sostenibilidad urbana deberían invitarnos a repensar urgentemente este camino. Como alternativa, podríamos adoptar una postura completamente utópica, reclamando el retorno a un estado de Nueva Obsidiana (Jacobs 1970) en el que la agricultura y el comercio locales fueran el único motor económico de las ciudades, controlando así la expansión territorial ilimitada de nuestro consumo urbano. Pero el costo de esta transformación la hace inviable, sin hablar ya de las enormes resistencias políticas, sociales y culturales que tal propuesta suscitaría. Existe una tercera vía, más pragmática y realista, que asume el punto evolutivo en que nos encontramos sin resignarse a seguir por un camino de completa destrucción del territorio. Es el de las «ciudades regenerativas» (Girardet 2015). Esta propuesta busca modos de reequilibrar la relación de las ciudades con sus ecosistemas, viéndolas como parte integrante de los mismos y no como algo ajeno. Se trata de ver en los recursos naturales mucho más que recursos de explotación, para entenderlos como ejes vertebradores de valor ambiental y paisajístico que juegan un papel fundamental en el equilibrio del ecosistema territorial.

Desde esta visión regenerativa, el agua volvería a recuperar su inherente valor de vida, rompiendo su actual subordinación a las demandas urbanas. Recuperar los arroyos locales en la medida de lo posible, por ejemplo, no solo reforzaría la variedad ecológica de nuestras ciudades, sino que también rescataría parte de su historia olvidada, en la que el agua tenía un papel principal. Repensar el modo en que tratamos nuestros desechos no solo tendría efectos medio ambientales positivos, sino que también abriría nuevas oportunidades para disfrutar los cursos de agua como lugares de ocio y contacto directo con la naturaleza. Existen iniciativas que proponen esta mirada regenerativa de las ciudades, como la Restauración Fluvial del Manzanares (MTERD s.f.) o el Plan de Santander, Hábitat Futuro (Landlab y Paisaje Transversal 2023), por nombrar algunos ejemplos cercanos. Pero hace falta convertir estos casos singulares en principios generales para el planeamiento futuro de nuestras ciudades. Solo así volverían las ciudades a reconciliarse con sus aguas y el *genius loci* que las vio nacer.





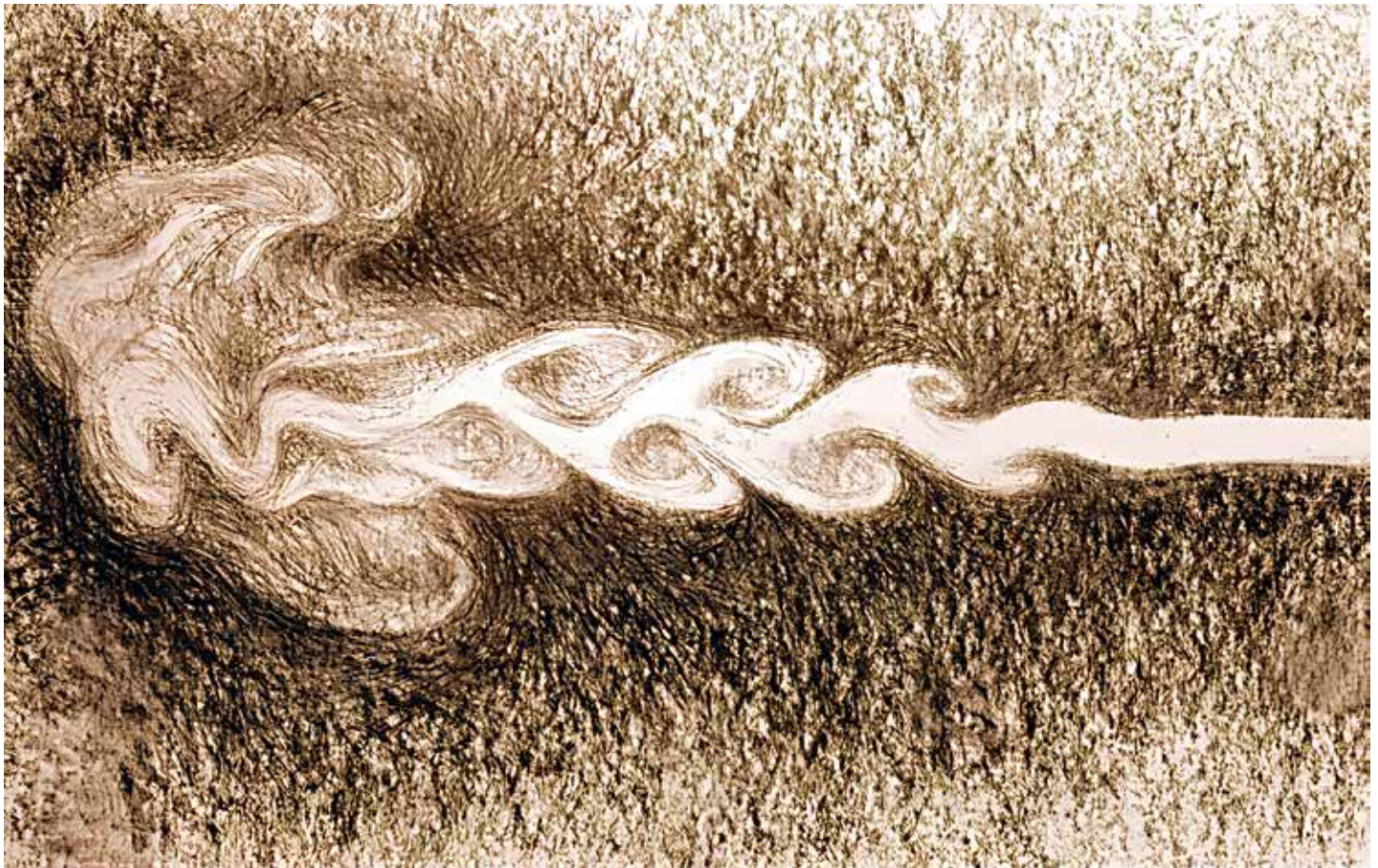
DOCE

JARDINES SUBMARINOS: APRENDER A TERRAFORMAR

**UN ENFOQUE REGENERATIVO DENTRO DE UNA
VISIÓN DE GESTIÓN DEL AGUA TRANSVERSAL,
APOYÁNDOSE EN LOS FONDOS MARINOS**

Marc García-Durán Huet

El movimiento del agua, *Vórtices*, Rudolf Steiner.



El término «terraformación» suele aludir a la transformación de los ecosistemas de otros planetas o satélites para que sean capaces de soportar vida similar a la de la tierra, pero las inminentes consecuencias ecológicas de lo que se ha denominado «antropoceno» sugieren que, en las próximas décadas, necesitaremos terraformar la Tierra si queremos que siga siendo anfitriona viable para sus propias formas de vida.

[...] la terraformación va más allá de la gestión de la radiación solar o la captura y almacenamiento de carbono: no es una tecnología, sino un proyecto que incluye una variedad de intervenciones sobre el clima a gran escala, empezando por la economía.

Toni Navarro

(Prólogo de *La terraformación*, de Benjamin Bratton, 2021)

Los ciclos naturales del agua son esenciales para la sostenibilidad de la biosfera y, por tanto, de los sistemas culturales, socioecológicos, territoriales, urbanos e industriales. El funcionamiento de los ecosistemas, y por ende la supervivencia de las especies que los componen, depende de ese ciclo del líquido elemento.

Sin embargo, cada vez hay más pruebas de que el impacto humano en los sistemas hídricos ya ha alcanzado la escala de biosfera, en la que la gestión del agua en una región puede tener consecuencias de gran alcance en el sistema hídrico mundial (Hoff, 2009). Como afirma Hoff en su documento, «las interdependencias de los recursos hídricos con otros sistemas ecológicos y sociales existen en todas las escalas espaciales».

Por lo tanto, la gestión y la gobernanza del agua deben evolucionar hacia sistemas holísticos que aborden los impactos a escala y sectoriales cruzados. Es crucial desentrañar las interdependencias de los recursos hídricos en todas las escalas espaciales, desde la estructura molecular del agua hasta su papel en la biosfera, para adaptarse adecuadamente a los retos del cambio climático.

Esto representa también una gran oportunidad, permitiendo pensar que las acciones locales también pueden influenciar en positivo al sistema global.

La implantación de proyectos estructurantes del territorio puede utilizarse para acelerar la transición y forzar a realinear los procesos de decisión de la gobernanza.

Este es, en parte, el origen de la estrategia de creación de los parques regenerativos y los Jardines Submarinos de Underwater Gardens.

CONTEXTO: HACIA UN PARADIGMA REGENERATIVO

LOS ODS Y EL AGUA

Desde 2016, el Informe sobre Riesgos Globales del Foro Económico Mundial incluye sistemáticamente las crisis del agua entre los riesgos mundiales de mayor impacto (FEM, 2016 y posteriores). Para mitigar el riesgo, los países han acordado colectivamente alcanzar 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para finales de 2030 (Randers *et al.*, 2019, Gupta y Vegelin, 2016), que deben apoyarse en el conocimiento científico, las políticas basadas en la evidencia y la participación activa de la sociedad.

El Objetivo 6 (Agua limpia y saneamiento) y el Objetivo 14 (Vida bajo el agua) están directamente relacionados con cuestiones hídricas en lo que respecta a la cantidad y la calidad del agua. Mientras que otros ODS, como el Objetivo 3 (Buena salud y bienestar), el Objetivo 7 (Energía asequible y limpia), el Objetivo 9 (Industria, innovación e infraestructuras), el Objetivo 11 (Ciudades y comunidades sostenibles) y el Objetivo 13 (Acción por el clima) se ven, a su vez, afectados por las prácticas de gestión del agua.

El pilar medioambiental de los ODS se fundamenta en el marco científico de los límites planetarios (Rockström *et al.*, 2009). El marco se desarrolló en colaboración entre científicos de diferentes disciplinas, para definir límites de precaución para las principales perturbaciones antropogénicas con el fin de evitar cambios irreversibles en el funcionamiento del sistema Tierra que generen riesgos para la continuidad de la biosfera tal y como la conocemos. El concepto incluye un conjunto de parámetros cuantitativos y cualitativos que permiten definir variables de control medibles y establecer límites específicos.

El objetivo de los límites planetarios es definir un «espacio operativo seguro» global para la humanidad, y ajustar las acciones empresariales y políticas en consecuencia.

Los indicadores ambientales de los límites planetarios muestran que la integridad de la biosfera y los flujos biogeoquímicos se encuentran ya en la zona de alto riesgo, lo que compromete la sostenibilidad global (Steffen *et al.*, 2015; Gupta y Vegelin, 2016). Por ello, la década de 2020 a 2030 está dedicada a numerosos proyectos de restauración de ecosistemas (Dudley *et al.*, 2020). Por ejemplo, nuevas iniciativas pretenden unir a más de 150 países participando en el Decenio de las Ciencias Oceánicas para el Desarrollo Sostenible y el Decenio de las Naciones Unidas sobre la Restauración de los Ecosistemas (Ryabinin *et al.*, 2019).

En este sentido, el marco de los límites planetarios es una de las herramientas clave de comunicación del conocimiento científico a los impulsores políticos sobre la gestión del agua.



Figura 1. Un solo océano.

Los límites planetarios abordan cuestiones cuantitativas y cualitativas relacionadas con el agua, como el «uso del agua dulce», los «flujos biogeoquímicos», la «acidificación del agua» y los «contaminantes químicos».

Sin embargo, el sistema global del agua es extremadamente complejo, con retroalimentaciones altamente interdependientes y conectadas, lo que dificulta una comprensión clara de la sostenibilidad de la biosfera.

Por ejemplo, el límite planetario del «cambio climático» no suele considerarse una cuestión relacionada con la gestión del agua, aunque el estado del agua, como el vapor de agua, es uno de los inductores de efecto invernadero más relevantes (Tuckett, 2019). Por lo tanto, además de la calidad y cantidad del agua, es fundamental incorporar un tercer parámetro: el «estado del agua», para evaluar la funcionalidad de la biosfera (Figura 1) desde un nivel molecular y teniendo en cuenta las propiedades específicas del agua.

El futuro de la seguridad hídrica debe ser responsable y coherente mediante una gestión del agua consistente y coordinada en todas las escalas y sectores. Reflexionar sobre este futuro ha impulsado la creación de una visión «proactiva» de la retroadaptación, que integra conceptos positivos, sostenibles y regenerativos en la gestión del agua.

Esto facilita una definición marco preliminar que sirve como motivación para el enfoque de diseño del ciclo del agua, tal como se plantea en la iniciativa de desarrollo de Parques Regenerativos con Jardines Submarinos de Underwater Gardens.

Los límites planetarios relacionados con el agua se revisan distinguiendo si se trata de una cuestión de calidad, de cantidad o del estado del agua. Este enfoque proporciona un nuevo sistema de clasificación para los posibles cambios en las estrategias de gestión del agua, que se inscriben en la gama de contextos socioecológicos, políticos, económicos y administrativos.

Para avanzar, definimos el agua como un sistema polimorfo autoorganizado que está presente en una variedad de estados físicos, manteniendo un flujo continuo y experimentando transformaciones dinámicas dentro de una masa de agua planetaria unificada.

Tomar conciencia de esto permite comprender y comunicar que cada acción genera un legado.

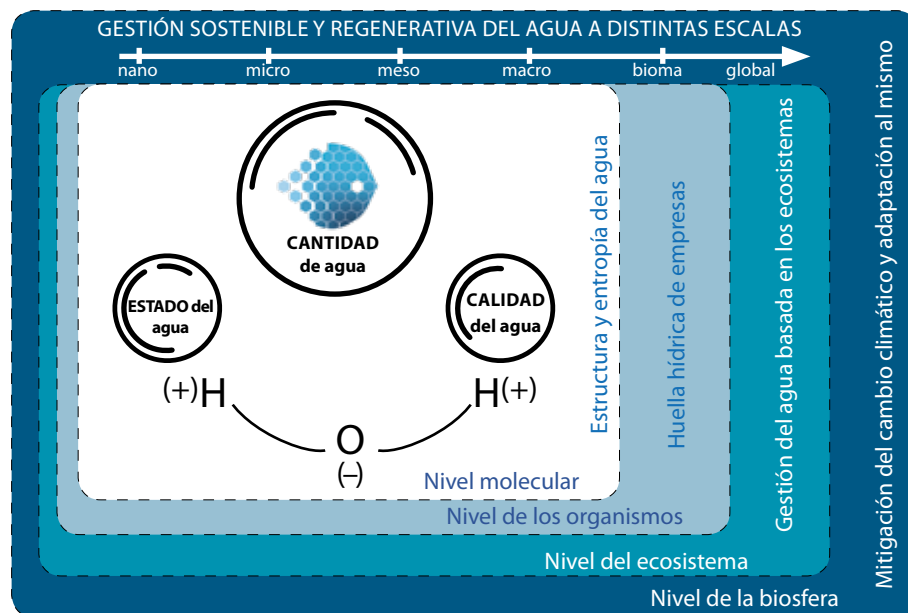


Figura 2. El marco conceptual de la gestión sostenible y regenerativa del agua a distintas escalas.

LOS ESTADOS DEL AGUA Y EL CAMBIO CLIMÁTICO

El límite planetario del «cambio climático» es probablemente el más conocido entre el público (Rockström *et al.*, 2009). Debido a su altísima complejidad, se recomienda distinguir entre causas y efectos del cambio climático. Por ejemplo, entre sus principales efectos se encuentran el aumento de la temperatura del océano, la acidificación del agua y el agotamiento del oxígeno en la columna de agua. Según el Grupo Intergubernamental

de Expertos sobre el Cambio climático (IPCC, 2019), existe evidencia substancial de que el contenido de oxígeno de los 1.000 m superiores ha disminuido, con una pérdida del 0,5-3,3 % del oxígeno total (100 %) de la atmósfera entre 1970-2010. La razón clave es el aumento de la estratificación del océano, que está alterando la ventilación oceánica y afectando la red de reacciones biogeoquímicas alimentadas por el oxígeno. En cuanto a las temperaturas del agua, es prácticamente seguro que el océano global ha experimentado un calentamiento constante desde 1970, absorbiendo más del 90 % del exceso de calor generado por el aumento de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

La disminución del pH del agua es un fenómeno tan extendido que existe un límite planetario dedicado a la «acidificación del agua». Por un lado, es un efecto del cambio climático debido a la mayor absorción de gas dióxido de carbono (CO_2) de la atmósfera al océano. El dióxido de carbono reacciona con el agua en solución para formar un ácido débil, el ácido carbónico (H_2CO_3), que a su vez se disocia en iones hidrógeno (H^+) e iones bicarbonato (HCO_3^-). Y, por otro lado, existe un bucle de retroalimentación que impulsa el cambio climático debido a la menor producción de oxígeno por parte del fitoplancton cuando el pH es más bajo.

La pérdida de biodiversidad debida tanto a la eutrofización como a la acidificación cambia la capacidad de absorción de carbono de las aguas naturales. Esto altera los equilibrios químicos entre la atmósfera y el océano, lo que aumenta las concentraciones de CO_2 en el aire.

La huella de carbono de las actividades antropogénicas se ha identificado como uno de los principales factores que contribuyen al cambio climático (Mikhaylov *et al.*, 2020). Sin embargo, sigue habiendo un gran número de interrogantes sobre las causas de este fenómeno. Por ejemplo, hasta hace muy poco, el concepto científico de límites planetarios se basaba únicamente en el punto de vista terrestre, lo que ha llevado a subestimar considerablemente el papel del océano en el cambio climático.

Los hallazgos de Nash *et al.* (2017) demuestran que cuando se añade la perspectiva marina se obtiene una mejor comprensión del cambio climático, el agotamiento del ozono estratosférico, la acidificación de los océanos, el uso del agua dulce y la transformación de la superficie terrestre.

Dado que el cambio climático tiene numerosos bucles de retroalimentación con otros límites planetarios (Steffen *et al.*, 2015), sus causas deben investigarse más a fondo y reevaluarse con respecto a la gestión del agua. Se considera que desentrañar las causas ocultas del cambio climático y tomar las medidas adecuadas es uno de los mayores retos a los que debe enfrentarse la sociedad en las próximas décadas (McEvoy, Fünfgeld y Bosomworth, 2013).

Es por esta razón que es esencial poder contar con *laboratorios de adaptación al cambio climático*, dedicados específicamente al seguimiento, comprensión, y desarrollo de solu-

ciones. Espacios que faciliten la integración y articulación del conocimiento existente, permitiendo un estudio continuo de los elementos necesarios para comprender las causas y desarrollar soluciones efectivas.

¿Qué elementos y criterios ha de incorporar un laboratorio de esta índole?

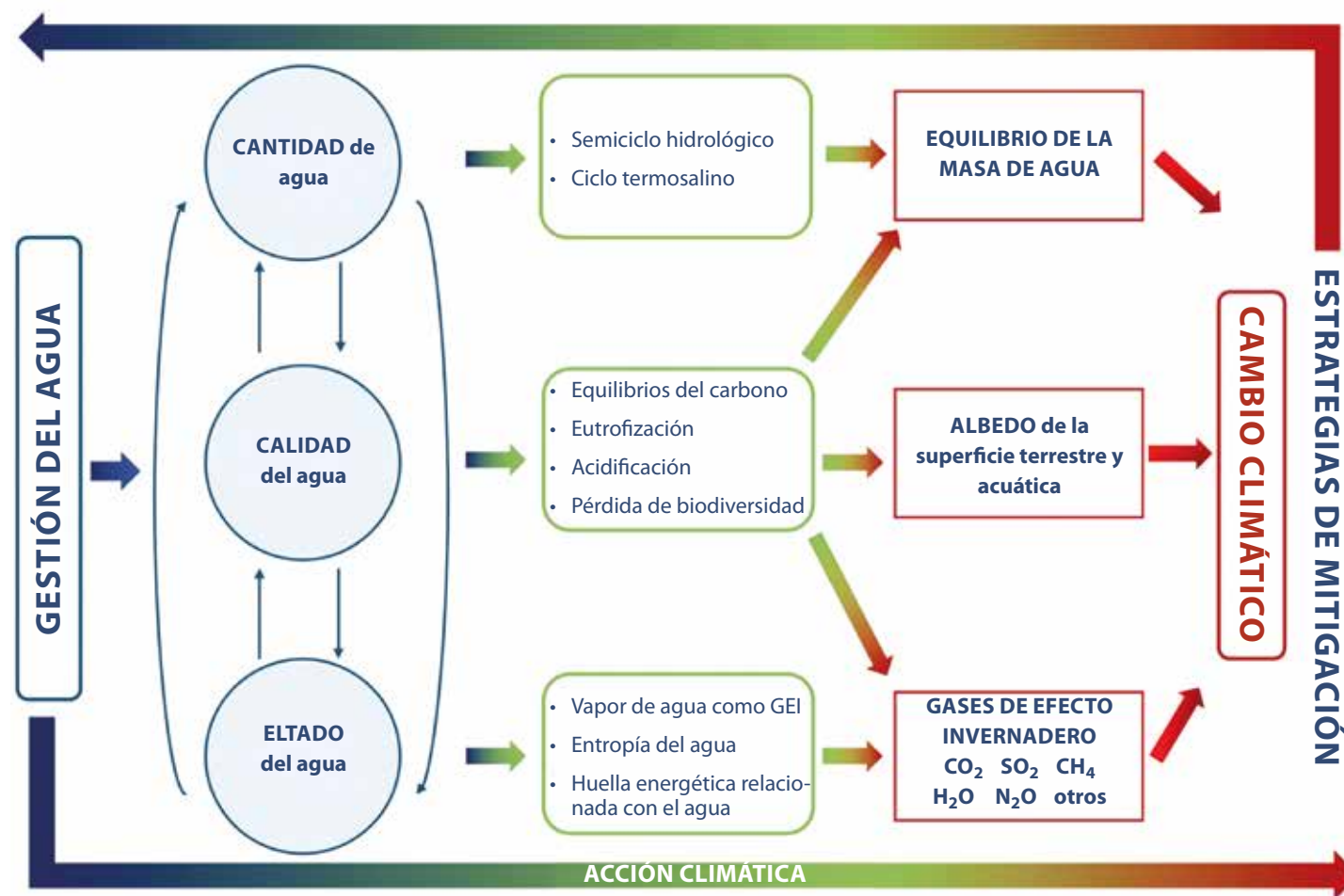


Figura 3. Marco conceptual del impacto de la gestión del agua en el cambio climático.

Existen circuitos de retroalimentación tanto positivos como negativos entre la gestión del agua y el cambio climático. El papel de la calidad y la cantidad del agua en el cambio climático es fundamental. Por ejemplo, en tierra, la urbanización del territorio

reduce la permeabilidad de las cuencas y aumenta la escorrentía de las aguas superficiales, lo que interfiere en el ciclo completo del agua, restringiéndolo a la mitad del ciclo hidrológico. Por un lado, el semiciclo hidrológico reduce las oportunidades de que el agua se gestione de forma natural con potencial para la autodepuración (calidad del agua) y la prevención de inundaciones (cantidad de agua). Por otro lado, aumenta la concentración de vapor de agua (H_2O_g) en la atmósfera (estado del agua), que es en sí mismo, como hemos mencionado antes, un potente gas de efecto invernadero (Tuckett, 2019).

Como ya se ha dicho, esto fundamenta la necesidad de considerar la importancia del estado del agua adicionalmente a la calidad y la cantidad del agua en la gestión de sus ciclos. La fase gaseosa del agua puede evaluarse como una de las causas y también como efecto del cambio climático. Una vez en la atmósfera, las concentraciones elevadas de vapor de agua impiden que el calor escape de la Tierra de vuelta al espacio, lo que es esencial para enfriar la temperatura de la superficie; de lo contrario, se induce y refuerza el cambio climático.

A pesar de ello, las medidas de mitigación siguen pasando por alto el impacto del vapor de agua y se centran en otros gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O), el ozono (O_3), el dióxido de azufre (SO_2) y algunas sustancias químicas artificiales como los clorofluorocarbonos (CFC).

Cálculos recientes estiman que el vapor de agua representa alrededor del 50 % del efecto invernadero de la Tierra, mientras que las nubes representan el 25 %, el dióxido de carbono el 20 %, y los gases de efecto invernadero menores y los aerosoles el 5 % restante (Schmidt *et al.*, 2010). Podría considerarse el vapor de agua como el principal gas de efecto invernadero, ya que absorbe la mayor parte de las emisiones de calor infrarrojo de la superficie terrestre (Tuckett, 2019).

Sin embargo, al ser un gas altamente reactivo, es difícil cuantificar el vapor de agua atmosférico, dando lugar a grandes incertidumbres en los datos publicados, que pueden oscilar entre el 50 y el 95 % dependiendo de las condiciones meteorológicas (Schmidt *et al.*, 2010; Easterbrook, 2016).

Como es bien sabido, el vapor de agua se genera continuamente por evaporación y se elimina continuamente de la atmósfera por condensación. El aumento de las concentraciones de vapor de agua crea más nubes, que reflejan la luz solar y contribuyen al efecto refrigerante del albedo. Al mismo tiempo, una mayor densidad de agua en la atmósfera conduce a temperaturas más cálidas, que hacen que el aire absorba más vapor de agua.

El calentamiento y la absorción de agua aumentan en un ciclo en espiral. La concentración de vapor de agua es variable en cantidad y no se mide de forma rutinaria en la atmósfera.

Para comprender mejor el papel del vapor de agua como gas de efecto invernadero, su seguimiento podría incluirse en los protocolos de gestión del agua y en los estudios de evaluación de impacto ambiental.

Por tanto, esta debería ser una de las funciones de un «laboratorio de adaptación al cambio climático».

Además del impacto directo de la gestión del agua sobre el cambio climático, derivado de las concentraciones de vapor de agua como gas de efecto invernadero, es fundamental considerar los impactos indirectos. Por ejemplo, la huella de carbono asociada a la gestión del agua incluye las emisiones de dióxido de carbono generadas durante el abastecimiento, tratamiento, distribución, uso y tratamiento de aguas residuales (Griffiths-Sattenspiel & Wilson, 2009). La concentración de dióxido de carbono (CO₂) se toma como indicador clave de la huella de carbono, y su valor límite de 350 ppm (en volumen) se establece sobre la base del valor preindustrial de 280 ppmv (Rockström *et al.*, 2009).

Pruebas recientes sugieren que la Tierra, que ahora supera las 420 ppm de CO₂ en la atmósfera, ya ha transgredido este límite planetario y se aproxima a varios umbrales del sistema terrestre.

En este sentido, un posible camino para alcanzar los objetivos de descarbonización—reducción de la huella de carbono— podría basarse, en primer lugar, en el reconocimiento de la magnitud del uso energético relacionado con el agua y, en segundo lugar, en la optimización de los sistemas de gestión del agua.

Solo en Estados Unidos, el uso de energía relacionada con el agua es de al menos 521 millones de MWh al año, lo que representa el 13 % del consumo eléctrico del país, con la correspondiente huella de carbono de unos 290 millones de toneladas métricas de CO₂ equivalente al año (Griffiths-Sattenspiel y Wilson, 2009).

Teniendo en cuenta la rapidez de los cambios en todos los límites planetarios, se espera que la huella de carbono de la gestión del agua aumente continuamente debido a varias razones. La menor disponibilidad de recursos de agua dulce provocada por el cambio climático, las mayores distancias de los sistemas de abastecimiento de agua y las tecnologías anticuadas de tratamiento de aguas residuales son algunas de ellas.

Para ir más allá de la gestión sostenible del agua y acercarnos a la gestión regenerativa, debemos tener en cuenta no solo la calidad y la cantidad del agua, sino también su estado físico y sus propiedades.

El agua es una sustancia singular en la Tierra, que podemos tocar y retener, y que se comporta de acuerdo con principios ondulatorios. Los patrones de interferencia del agua son análogos a los de otros procesos ondulatorios, como la luz y el campo electromagnético. Así, las variaciones en los niveles moleculares y en la estructura del agua dan lugar a

cambios en sus propiedades físicas, las cuales están determinadas por las interacciones de enlace de hidrógeno presentes en su composición (Cai *et al.*, 2009, Wang *et al.*, 2013).

Está demostrado que la resonancia magnética altera las características macroscópicas y las estructuras microscópicas del agua, mejorando sus propiedades físicas (Pang *et al.*, 2008). Estas mejoras incluyen la disminución de la tensión superficial, una mayor fluidez, la alteración de la capacidad calorífica y el aumento de las tasas de evaporación y congelación (Amiri *et al.*, 2006, Wang *et al.*, 2018).

AL REGENERAR LAS PROPIEDADES DEL AGUA, LA GESTIÓN DEL AGUA SE VUELVE MÁS EFICAZ, LOGRANDO REDUCCIONES SIGNIFICATIVAS EN EL USO DE ENERGÍA RELACIONADO

Por ejemplo, las tecnologías regenerativas de Nanoresonance Industries se basan en la resonancia electromagnética, en la que el agua y otros fluidos (por ejemplo, el combustible) se someten a frecuencias específicas. El agua así regenerada tiene mayor densidad de electrones y menor entropía específica, lo que se tradujo en una reducción del 13 % de las necesidades energéticas para el bombeo de agua en las torres de refrigeración de la central eléctrica EVAPCO (www.nanoresonance.org).

El ahorro energético conseguido por Nanoresonance Industries fue incluso mayor en el circuito de calefacción de un centro sanitario, lo que supuso un ahorro en calefacción del 18 % y el 20 % en los años 2015 y 2016, respectivamente. El tratamiento del agua basado en la resonancia y la frecuencia, fundamentado en los principios de la física cuántica, proporciona soluciones 100% libres de productos químicos, lo que permite métodos de bajo consumo energético y respetuosos con el medio ambiente para regenerar el ciclo natural del agua. Experiencias como esta indican que comprender el papel del estado físico del agua (por ejemplo, vapor de agua, tensión superficial, viscosidad) podría mejorar la gestión del agua en todas las escalas, y no solo en función de sus objetivos cualitativos y cuantitativos.

Todo ello resalta la necesidad de incorporar las cuestiones de calidad, cantidad y estado del agua en el contexto del cambio climático como límite planetario, teniendo en cuenta que estos factores son tanto impulsores del cambio como aspectos impactados por estos cambios.

Mientras tanto, las actualizaciones respectivas hacia un uso más eficiente y regenerativo del agua podrían recomendarse como primeros pasos obligatorios dentro de cada estrategia de gestión del agua.

LA GESTIÓN DEL AGUA BASADA EN LOS ECOSISTEMAS (EBM)

La destrucción de los ecosistemas acuáticos es especialmente preocupante. Los ecosistemas marinos y de agua dulce están experimentando una pérdida de biodiversidad más rápida que sus homólogos terrestres (O'Higgins *et al.*, 2020).

Al mismo tiempo, la gestión del agua de los ecosistemas acuáticos es mucho más difícil y sofisticada que la de las masas de agua individuales. El Informe de Evaluación Global sobre Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos (IPBES, 2019) destaca que las transformaciones sostenibles requieren enfoques intersectoriales, incluyendo enfoques paisajísticos, gestión integrada de cuencas hidrográficas y zonas costeras, planificación espacial marina, planificación a escala bioregional para la energía, y nuevos paradigmas de planificación urbana.

Los principios de las masas de agua unificadas y su relación con el contexto socioecológico de la gestión del agua, constituyen el núcleo de la Gestión Basada en los Ecosistemas (Ecosystem Based Management -EBM-), que está cobrando impulso en los últimos años.

Se aplica un enfoque holístico para integrar conocimientos interdisciplinarios y mejorar el protagonismo de la gobernanza del agua, teniendo en cuenta la relación entre las especies acuáticas, así como con su entorno abiótico, y las interacciones con los ecosistemas terrestres y las zonas costeras.

Como paso adelante hacia la coevolución de los seres humanos con la naturaleza, la EBM adopta la perspectiva de que los sistemas sociales humanos están contenidos en el ecosistema ecológico, manteniendo una relación de completa interdependencia (O'Higgins *et al.*, 2020).

A continuación, se resumen los aspectos más destacados de la EBM. Se recomienda la consulta de la publicación original: *Ecosystem-Based Management, Ecosystem Services and Aquatic Biodiversity*, de O'Higgins, Lago y DeWitt (2020).

La gestión del agua a nivel de ecosistema implicará el acoplamiento espacial de los ecosistemas locales, como la dinámica global fuente-sumidero, los patrones de diversidad-productividad, la estabilización de los procesos de los ecosistemas y las interacciones indirectas a escala de paisaje o regional. Según la EBM, los ecosistemas acuáticos se implican como masas de agua unificadas, premisa que nos sitúa en una mentalidad alejada de su consideración parcial, limitada a servicios únicos como el agua potable, el agua para riego, la capacidad de asimilación natural de la contaminación, etc. (O'Higgins *et al.*, 2020).

Esta tendencia a integrar el conocimiento sobre las masas de agua se refleja en otros trabajos, como el «uso conjunto» de las aguas superficiales y subterráneas (Singh, 2014).

Así, los ecosistemas de agua dulce, costeros, de transición y marinos se evalúan cada vez más como un sistema continuo, polimorfo y polifuncional autoorganizado, esencial para comprender el ciclo del agua.

El concepto de EBM promueve el respeto por la singularidad de cada sistema socioecológico. En lugar de aplicar supuestos generales para la gestión sostenible del agua, se elaboran recomendaciones específicas basadas en las características únicas de cada sistema (O'Higgins *et al.*, 2020).

La EBM propone una metodología que consta de etapas bien diferenciadas, siguiendo el esquema Planificar-Hacer-Verificar-Actuar: fase I) identificación de los objetivos sociales; fase II) establecimiento de la base de conocimientos y realización de una evaluación de riesgos; fase III) planificación de la gestión basada en los ecosistemas (EBM); y fase IV) aplicación, seguimiento y evaluación.

Los criterios ecológicos y sociales se analizan en profundidad para evaluar los conocimientos necesarios para el desarrollo del programa de EBM. Al elaborar un modelo ecológico, se tendrán en cuenta los siguientes criterios e indicadores para cada estudio de caso específico: integridad ecológica y biodiversidad, conexiones de los ecosistemas, naturaleza dinámica de los ecosistemas, reconocimiento de la incertidumbre, escalas espaciales y temporales, límites diferenciados, sistema socio ecológico acoplado, impactos acumulativos.

Al mismo tiempo, además de los criterios ecológicos, la implementación efectiva de la EBM requiere la formación de acuerdos de cooperación y la realización de acciones colectivas para compartir los diversos servicios de los ecosistemas acuáticos entre las diferentes partes interesadas y ámbitos políticos (O'Higgins *et al.*, 2020).

Por lo tanto, los criterios sociales de la EBM incluyen el uso de conocimientos científicos, la interdisciplinariedad, la participación de las partes interesadas, la gestión integrada, la gestión adaptativa, el enfoque de precaución, un seguimiento adecuado, decisiones que reflejen la elección de la sociedad y la sostenibilidad (Piet *et al.*, 2020).

En general, es fundamental integrar un contexto socioecológico como herramienta holística para evaluar las acciones de gestión del agua y su impacto en la calidad, la cantidad y el estado del agua a diferentes escalas.

EL CONCEPTO DE DESARROLLO REGENERATIVO

El concepto de *desarrollo regenerativo* es todavía relativamente nuevo y la mayoría de los proyectos siguen centrándose en reducir sus impactos negativos, es decir, en el llamado desarrollo sostenible. En cambio, para cambiar el objetivo hacia el *desarrollo restaurativo y regenerativo*, hay que hacer más hincapié en las estrategias empresariales que se centran en el impacto positivo neto.

Para garantizar que un ecosistema no vuelva a declinar después de la restauración, la verdadera regeneración requiere una educación temprana, un incremento en la conciencia medioambiental y la transformación activa del estilo de vida humano.

Mientras que la mayoría de las prácticas medioambientales se centran en restaurar los ecosistemas manteniendo a los humanos lo más alejados posible de la naturaleza para proteger la Tierra y el océano, el desarrollo regenerativo adopta un enfoque diferente, que se basa en la inclusión de los humanos para cocrear y evolucionar juntos con la naturaleza.

La coevolución de la conciencia humana con la naturaleza requiere una mayor concienciación sobre el papel de los humanos en la biosfera. En el libro *El pensamiento científico como fenómeno planetario*, escrito en 1936-1938, V. Vernadsky demostró que, a pesar de la biomasa relativamente pequeña de todos los humanos en el balance de masas de la biosfera, «la humanidad se convirtió en una totalidad única en la vida de la Tierra». Los cambios en la litosfera, la hidrosfera y la atmósfera —por ejemplo, el cambio climático— provocados por el estilo de vida humano, ya entonces estaban configurando un entorno completamente nuevo. En este sentido, V. Vernadsky sugirió que el papel clave de la humanidad podría ir más allá de sus actividades antropogénicas, definiéndose principalmente por la conciencia humana que crea el campo de la «noosfera».

Como él dijo, «la característica más importante de la noosfera es que el instrumento de su estabilización parece ser la razón humana, o mejor dicho, la razón científica. El pensamiento científico se considera una función de la biosfera o un fenómeno planetario». Por lo tanto, la comunicación científica y la transferencia de conocimientos entre disciplinas, desde el nivel molecular hasta el de la biosfera, pueden servir como una de las herramientas para evolucionar de la biosfera a la noosfera (Trubetskova, 2010).

En este contexto, la biogeoquímica (fundada por V. Vernadsky) fue una de las primeras ciencias verdaderamente inter o multidisciplinarias, que ahora se están expandiendo activamente desde las pequeñas escalas (microbiología, enfoques *ómicos*) a las grandes escalas como componente de la Ciencia del Sistema Tierra (Bianchi *et al.*, 2020). Más recientemente, el campo de la biogeoquímica está evolucionando hacia la integración de las ciencias sociales, lo que hará que los conocimientos biogeoquímicos estén más al alcance de los responsables políticos y los educadores.

Como sugieren Bianchi *et al.* (2020), una intensa colaboración entre científicos, funcionarios gubernamentales, el público, programas financiados internacionalmente y otros sectores sociales facilitará respuestas sostenibles y equitativas de la sociedad ante los cambios en la biosfera relacionados con el cambio climático y otros impactos antropogénicos.

En las condiciones de crecimiento demográfico e hiperconectividad del siglo XXI, el impacto humano sobre la sostenibilidad de la biosfera se hace más tangible, rápido y evidente, por lo que resulta ineludible asumir responsabilidades y actuar. Para actuar podemos ponernos el objetivo de crear parques regenerativos, como instrumentos de acción y laboratorios de adaptación al cambio climático, tal como se ha ido comentando a lo largo de este texto.

Los parques regenerativos: laboratorios de adaptación al cambio climático

[...] la necesidad de generar nuevos imaginarios más allá del excepcionalismo humano, poniendo de relieve la interdependencia y la interrelación como rasgos que definen la red de la vida. Sin embargo, parecen ser insuficientes para afrontar la devastación que nos atraviesa: los procesos de cambio cultural son lentos y, mientras tanto, asistimos con perplejidad al calentamiento global, la acidificación oceánica, la polución ambiental o la extinción de especies. Necesitamos cuestionar el rol de lo humano al mismo tiempo que buscamos vías de acción para detener la catástrofe en curso, que puede suponer (y ya está suponiendo) el sufrimiento y la muerte de billones de formas de vida.

Toni Navarro

(Prólogo de *La terraformación*, de Benjamin Bratton, 2021)

LAS EMPRESAS COMO INICIADORAS DEL CAMBIO DE PARADIGMA

Teniendo en cuenta que los ecosistemas acuáticos son dinámicos por naturaleza, es imposible simplemente «restaurarlos» y volver a la condición original como si se asumiera que han permanecido estáticos. Al igual que cualquier ser vivo, un ecosistema acuático nunca está en reposo; siempre se encuentra en un proceso de evolución o de involución (degradación). Para pasar de la degradación a la regeneración de los entornos naturales, es esencial avanzar más allá de los «programas de restauración», adoptando un enfoque holístico en la toma de decisiones que incluya la participación activa de la sociedad.

En este sentido cabe repensar el rol de la empresa, y su rol estructurante en la organización de la sociedad y de la acción humana sobre el medio.

Al igual que cualquier organismo vivo, una empresa tiene su huella medioambiental, compuesta por el uso de agua, tierra, materias primas y energía, así como por la cantidad y el tipo de residuos producidos. Hoy en día, las empresas empiezan a darse cuenta de que una mala gestión del agua puede dañar su marca, su credibilidad, su calificación crediticia y los costes de sus seguros. Esto crea la demanda de una gestión novedosa del agua que vaya más allá de la mera escala de una empresa (microecosistema) y se extienda al conjunto más amplio del medio ambiente, su macroecosistema, lo que, a su vez, requiere la comprensión del impacto ambiental en todas las escalas y sectores.

En respuesta a la «Hoja de ruta hacia una Europa eficiente en el uso de los recursos» de la Comisión Europea (CE, 2011), la iniciativa Huella Ambiental de la Organización proporciona una medida multicriterio del comportamiento ambiental de una empresa. Su objetivo es aumentar la productividad de los recursos y desvincular el crecimiento económico tanto del uso de los recursos como del impacto medioambiental, adoptando una perspectiva de ciclo de vida que abarca toda la cadena de suministro. Este enfoque

es fundamental para una gestión eficaz, ya que los significativos efectos medioambientales pueden manifestarse «aguas arriba» o «aguas abajo», lo que significa que no siempre son evidentes de inmediato. Este enfoque también es esencial para hacer transparentes las posibles compensaciones entre los diferentes tipos de impactos ambientales asociados a decisiones específicas de gestión, y para ayudar a evitar el desplazamiento involuntario de cargas.

En definitiva, puede encontrarse un camino para la adaptación al cambio climático en una visión biomimética de los cuerpos de las empresas.

La magnitud de los riesgos empresariales derivados de la emergencia climática y la inseguridad hídrica es enorme, al igual que las oportunidades para hacerles frente. Por lo tanto, el sector privado tiene un papel vital a la hora de abordar los riesgos medioambientales mediante estrategias más sostenibles e incluso regenerativas. Muchas empresas están informando sobre los avances en las métricas ambientales, sociales, de gobernanza y de respuesta al clima (ESG) (Fatemi, Glaum y Kaiser, 2018). Esto crea una ventaja competitiva que capacita a las empresas para participar en evaluaciones de clasificación y hacer de la sostenibilidad medioambiental una prioridad.

Es alentador y, al mismo tiempo, engañoso. Cada día aparecen nuevas etiquetas y las definiciones de las acciones sostenibles cambian rápidamente. Las empresas se etiquetan cada vez más como «ecológicas», «sostenibles desde el punto de vista medioambiental», «verdes», «circulares», «regenerativas», etc.

Es esencial destacar que todos los esfuerzos empresariales son complementarios y no excluyentes entre sí, ya que todos los niveles de práctica son necesarios para lograr este cambio hacia la regeneración (Craft *et al.*, 2017). Para clasificar las diversas estrategias, podemos emplear la siguiente categorización propuesta por Mang, P. y Reed, B. (2012), que abarca desde modelos «Convencionales» a «Verdes», «Sostenibles», «Restaurativos» y «Regenerativos». En la Figura 4 se resume el concepto actualizado para mejorar la comunicación de los objetivos empresariales entre las partes interesadas.

Un modelo empresarial «convencional» puede caracterizarse como la «ignorancia» de una empresa sobre su impacto ambiental, lo cual no es excusa según los principios jurídicos. Una vez que una empresa inicia sus actividades de evaluación del impacto ambiental, ya puede considerarse una empresa «verde». Aunque en esta fase la empresa es consciente de su huella ambiental y tiene objetivos para minimizar su impacto negativo (principio de «dañar menos»), sigue provocando la degradación (o degeneración) de la biosfera.

Una empresa «medioambientalmente sostenible» aspira a un impacto neutro en términos de agua, energía, carbono o residuos, compensando los impactos negativos con otros positivos. Esto puede relacionarse con el principio de «no dañar». Aunque estas aspiraciones son cruciales para alcanzar los ODS, es necesario un mayor esfuerzo para restaurar el entorno natural.

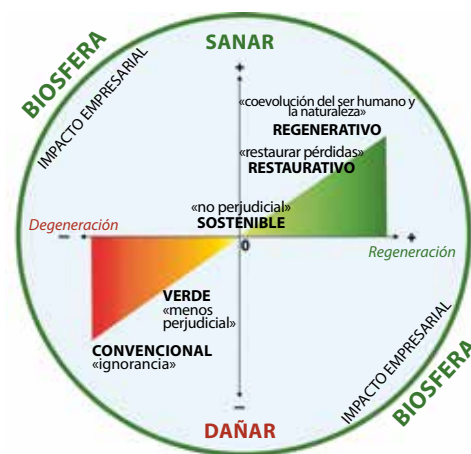


Figura 4. Evolución de los modelos de negocio y su impacto relativo en la sostenibilidad de la biosfera (modificado de Craft *et al.*, 2017).

Las estrategias empresariales del siglo XXI deben ir más allá de la sostenibilidad y aspirar a un beneficio medioambiental neto positivo para el mundo vivo.

Los modelos empresariales «restaurativos» cuentan con el apoyo del Decenio de las Naciones Unidas para la Restauración de los Ecosistemas, que se puso en marcha oficialmente el 5 de junio de 2021 y se extenderá de 2021 a 2030. Aplica proyectos de reforestación, permacultura y acuicultura para restaurar zonas previamente degradadas. La plantación de árboles (Stubbs, Cocklin y Stubbs, 2008) y la creación de arrecifes artificiales (Rinkevich, 2015) son algunos de los ejemplos.

Siguiendo los principios de la ecología industrial, las herramientas regenerativas para la gestión del agua pueden incluir: 1) modelos empresariales de economía circular, 2) estudios de flujo de materiales y energía («metabolismo industrial»), 3) desmaterialización y descarbonización, 4) planificación del ciclo de vida del cambio tecnológico y el medio ambiente, 5) diseño de productos sostenibles para el medio ambiente («ecodiseño»), 6) responsabilidad ampliada del productor («tutela del producto»), 7) parques ecoindustriales («simbiosis industrial»), 8) política medioambiental orientada al producto, 9) ecoeficiencia, y 10) tratamiento no químico del agua mediante tecnologías basadas en la resonancia y la frecuencia.

La aplicación de modelos empresariales «regenerativos» significa alejarse de los enfoques basados en el miedo y centrados en la escasez de recursos, la incertidumbre y el sacrificio, para adoptar un modelo positivo que alinee a la humanidad dentro de una comunidad de vida más amplia (Craft *et al.*, 2017).

Sus principios se basan en la «sanación» del medio ambiente a través de la red dinámica de ecosistemas naturales y humanos dentro de una región geográfica específica. Los enfoques regenerativos buscan no solo revertir la degeneración de los sistemas naturales de la Tierra, sino también integrar el pensamiento de diseño socioecológico de manera que tanto los seres humanos como el lugar coevolucionen. Exige difundir la inteligencia ecológica, es decir, los conocimientos sobre el funcionamiento de la naturaleza, para aumentar la responsabilidad medioambiental y elaborar estrategias de formulación de políticas. Cuando es posible, la comunidad y los clientes participan activamente en la conservación, restauración y regeneración de la naturaleza.

Impulsar cambios medioambientales positivos y duraderos es una tarea extremadamente difícil para las empresas: el sector privado debe promover modelos empresariales sólidos que ofrezcan resultados medioambientales y que, al mismo tiempo, demuestren su viabilidad financiera y la creación de puestos de trabajo de calidad para la economía local. Las empresas deben emplear el desarrollo socioecológico regenerativo y proporcionar herramientas regenerativas como primeros pasos hacia la gestión del agua a todas las escalas. Al fin y al cabo, los modelos empresariales regenerativos pueden desempeñar un papel esencial para el movimiento global a través de la inclusión de los clientes para cocrear y evolucionar juntos con la naturaleza.

En este sentido, la iniciativa Underwater Gardens International (UGI) nace con el ambicioso objetivo de promover la colaboración entre el mundo financiero y la funcionalidad de los ecosistemas para generar un impacto positivo en el medio ambiente. Con la misión de crear soluciones escalables para ayudar a la adaptación al cambio climático, la mitigación de sus efectos, y a ayudar en la protección de los límites planetarios mediante la realización de estudios científicos y la optimización de metodologías propias de restauración de los océanos, impulsando un cambio cultural consciente (www.underwatergardens.com).

Underwater Gardens está diseñando y creando *parques regenerativos* como motores de transformación nacidos de la necesidad de adaptación al cambio climático.

Se trata de la implementación de equipamientos territoriales donde la ciencia, la educación y el entretenimiento se unen para fomentar la regeneración activa del lugar a través de la implicación de los visitantes. La regeneración medioambiental incluye la aplicación de conocimientos científicos para restaurar el ciclo natural del agua y aumentar la biomasa en toda su biodiversidad, tanto terrestre como marina, en torno a los parques regenerativos. Su programa holístico se describe como un «programa restaurativo activo», en el que se enseña a los visitantes de los parques a convertirse en jardineros submarinos (Underwater Gardeners). Este enfoque socioecológico tiene el propósito de desarrollar conjuntamente, a través de la ciencia, el arte, la conciencia y la armonía con la naturaleza.

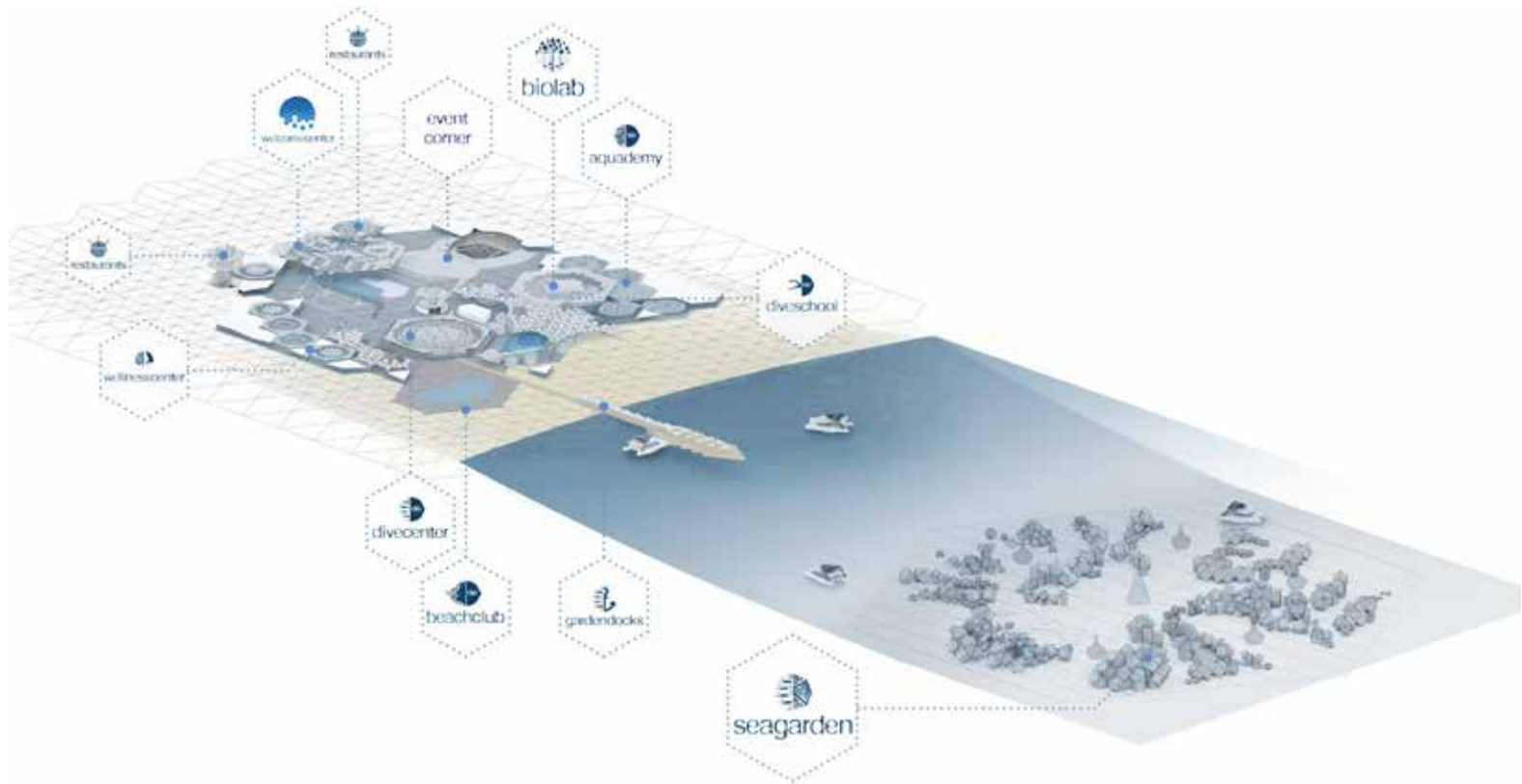
El modelo de negocio de la UGI proporciona substanciales mejoras sociales y culturales, poniendo de relieve que cada acción, decisión o transformación del territorio constituye un legado. En este contexto, el modelo de negocio está al servicio de la regeneración del patrimonio. Los beneficios económicos generados por este programa proporcionan sostenibilidad financiera a la empresa, además de permitir un seguimiento avanzado de los indicadores del cambio climático y de la dinámica de la biodiversidad. En conjunto, proporciona soluciones regenerativas y beneficios para la economía local, al tiempo que impulsa la innovación y la ventaja competitiva de la empresa.

Desde el punto de vista del cambio de paradigma, el desarrollo de los parques regenerativos se basa en la premisa de que debemos transicionar de un modelo de ingeniería de imposición al territorio —de un modelo de colonización o explotación— hacia una ingeniería ecológica, que incorpora la preservación de los servicios ecosistémicos a sus procesos de diseño e implementación de infraestructuras. Una ingeniería sensible, que debe permitir un nuevo pacto con el planeta y ofrecer la posibilidad de adaptación al cambio climático como una oportunidad de mejora y evolución.

Los parques regenerativos se conciben pues como instrumentos para la transformación territorial, a modo de artefactos ejemplares donde se unen conocimiento, sabiduría y ciencia (NBS, EBM y tecnología), para promover un nuevo modelo de convivencia con el ecosistema, preservándolo para poder seguir disfrutando de los beneficios que proporcionan sus servicios ecosistémicos.

Un parque regenerativo Underwater Gardens, pensado desde la intersección del cambio climático y la emergencia de modelos de digitalización del territorio, actúa como un sensor que monitoriza y genera bases de datos descriptivas sobre los cambios en el entorno en el que se implanta. Su propósito es establecer las bases para desarrollar criterios adecuados de adaptación. Entre los campos de conocimiento de los que se hace custodio, destaca, por supuesto, la gestión del agua.

Figura 5. Diagrama de un parque regenerativo Underwater Gardens



UN PROYECTO EN MARCHA: EL PARQUE REGENERATIVO UNDERWATER GARDENS DE TENERIFE

Esta visión de UGI se concreta en la propuesta de creación del parque regenerativo Underwater Gardens de Tenerife (UGPT), que fue declarado Proyecto de Interés Insular en febrero de 2022 por el Pleno del Cabildo.



Figura 6. El UGPT, un nuevo modelo de desarrollo de la costa en equilibrio con el paisaje y los servicios ecosistémicos.

Concebido como un espacio inspirado por el mar y su litoral, el UGPT ofrece al visitante experiencias múltiples, únicas e inolvidables: un entorno para la diversión y la emoción, para relajarse y descansar, y para conocer la naturaleza marina y del litoral, sus ecosistemas y la riqueza de su biodiversidad. Un lugar en el que aprender a cuidarla y a regenerarla, entendiendo las medidas que deben adoptar todos los agentes para la adaptación al cambio climático, y recordar la necesidad de proteger el océano.

El UGPT es un equipamiento estructurante y estratégico, innovador y singular, destinado principalmente a usos ambientales y recreativos. Puede considerarse como un multi-producto de actividad turística complementaria —es decir, sin alojamiento—, de alta calidad, y alineado con los objetivos de desarrollo sostenible y las estrategias planteadas para un destino turístico del litoral, sostenible, ecológico y responsable.

Esta concepción integral del UGPT hace que la actuación conjunta responda a dos partes: en tierra, lo que se denomina Garden Gate; y en el mar, el Sea Garden.

EL UGP POSIBILITA HACER RENTABLE CUIDAR DEL MEDIO AMBIENTE

En relación con el ciclo del agua, la actuación propuesta incluye regenerar áreas de costa y espacios del ámbito marino, donde la restauración es necesaria, y plantea estrategias para la gestión del agua sostenible y regenerativa. Todos sus componentes son biomiméticos y los diseños responden a soluciones basadas en la naturaleza.

Se trata de un nuevo producto turístico con múltiples experiencias relacionadas con el medio marino y el litoral, con incidencia en la cualificación de la oferta complementaria vinculada a los compromisos con la sostenibilidad y la biodiversidad del espacio insular costero y el mar que lo rodea, por lo que no solo es una aportación para las zonas turísticas del suroeste y el sur de la Isla, sino del conjunto insular, para los visitantes y para la población residente.

El modelo de negocio del UGPT integra: *entretenimiento*, como aprendizaje divertido (gamificación) y de conciencia ambiental; *economía*, con inversión socialmente responsable (economía azul y economía circular) en un nuevo producto de actividades de turismo sostenible con impacto ambiental positivo; y *ecología*, con la recuperación, la conservación y la protección de los ecosistemas marinos costeros y su biodiversidad, implementando un control continuo sobre las acciones de regeneración y la gestión del ciclo del agua.

Este nuevo concepto de «turismo regenerativo» funciona como un motor de conocimiento e innovación, llevando a cabo intervenciones para la regeneración ambiental tanto en el territorio como en el mar. El turismo regenerativo promueve la cultura y el patrimonio natural local, fomenta la conciencia ecológica e impulsa la investigación de la biodiversidad y su divulgación.

Desde el punto de vista científico, el UGPT es en sí mismo un sensor del cambio climático, monitorizando datos de los factores clave sobre la salud de los ecosistemas locales, tanto en áreas costeras como en la plataforma continental.

Esto se logra mediante tecnologías de sensorización y actividades de investigación, complementadas con la participación de los visitantes. En este modelo, de hecho, se generan y gestionan en tiempo real datos que podrán aportarse a organismos públicos y foros científicos.

El UGPT, como organismo regenerativo con una gestión circular del agua, conducirá a un fortalecimiento de la resiliencia del sistema de la costa ante los efectos del cambio climático y a la transformación de una zona degradada en un espacio atractivo de actividad ambiental y ecoturística, que aporta experiencias con valores y significado.

El UGPT tiene previsto el desarrollo de un hermano gemelo digital, que ha de permitir acelerar el desarrollo de soluciones al interconectarse con otras fuentes de datos y centros de investigación.

METABOLISMO DE LA ENERGÍA, LOS MATERIALES Y EL AGUA

El objetivo básico de los nuevos modelos de economía circular es minimizar el uso de recursos vírgenes importados y de salidas en forma de residuo. Esto implica fomentar la reutilización continua de los elementos, tanto del ciclo natural —como el agua, los alimentos y los materiales— como del ciclo técnico. Visiones como la de la termoeconomía de Nicolas Georgescu-Rogen nos invitan a reflexionar sobre si los recursos pueden ser reutilizados hasta su agotamiento. En un contexto de escasez, es fundamental evitar el enfoque de usar y desechar. En su lugar, debemos priorizar la reducción del consumo, maximizar la reutilización de recursos —técnicos y materiales— y, si esto no es posible, adoptar un ciclo técnico de reciclaje.

En este sentido, la concepción circular del uso de los recursos en el UGPT se visualiza con claridad si analizamos su sistema concibiéndolo como un metabolismo, similar al de un organismo vivo.

El enfoque metabólico sirve para facilitar la descripción y el análisis de los flujos de materiales y energía dentro de cualquier promoción, y permite, en un primer término, cuantificar la eficiencia en el uso de recursos y su grado de reutilización en un determinado contexto económico y social.

El análisis metabólico servirá para identificar las oportunidades de mejora del equilibrio económico-social-medioambiental del entorno del parque, y ensayar escenarios de actuaciones.

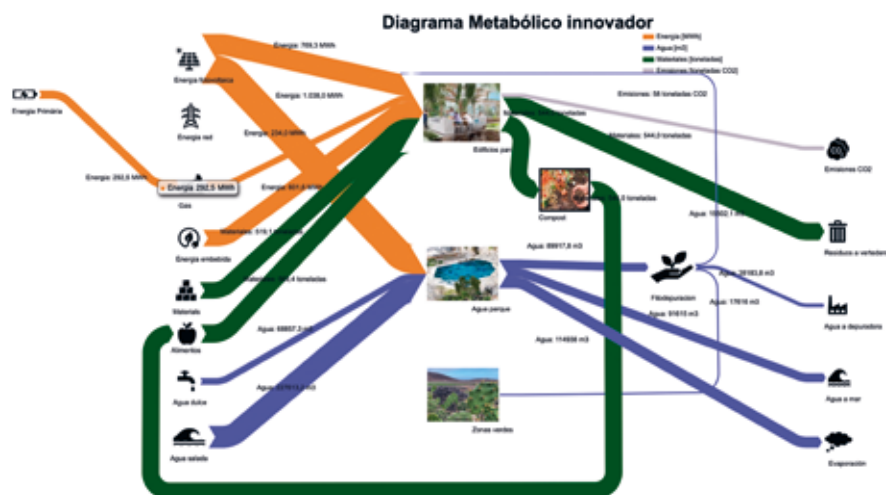
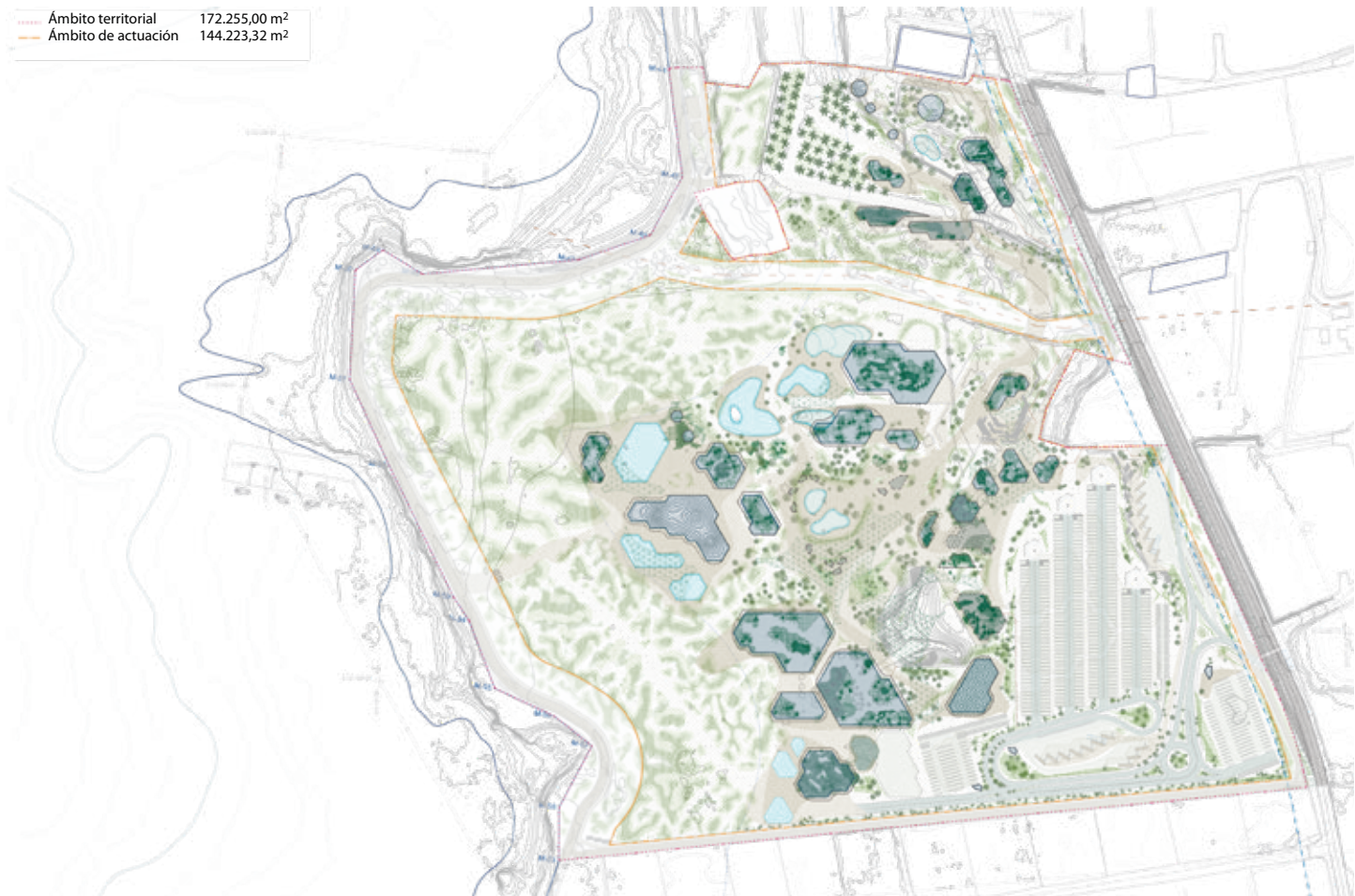


Figura 7. Diagrama del funcionamiento metabólico del Parque de Tenerife.

GARDEN GATE Y CICLO DEL AGUA

En tierra firme, en la zona costera, el Garden Gate está diseñado para ofrecer instalaciones recreativas y educativas que inviten a los visitantes a aprender sobre el océano a través del juego y la diversión, combinando entretenimiento y educación (*edutainment*). Al mismo tiempo, el Garden Gate demuestra cómo la gestión del agua, los recursos, la energía y los residuos puede llevarse a cabo de manera consciente y eficaz de acuerdo con el ODS n.º 12, «Consumo y producción responsables».

Figura 9. El diseño del parque incluye el ciclo del agua como elemento fundamental.



El Garden Gate es la sección terrestre del parque regenerativo, que agrupa las actividades destinadas a los visitantes, tanto para aquellos que bucean y exploran el jardín submarino, como para quienes no bucean y lo visitan de manera virtual. Este espacio les permite descubrir y participar en la cultura de la regeneración, comprendiendo su relevancia y su impacto.

El diseño del Garden Gate integra el conocimiento más avanzado en construcción pasiva y circular, botánica, y uso eficiente de energía y agua, constituyendo un *showroom* de buenas prácticas que busca influir en el territorio y en las empresas encargadas de su gestión y explotación. Así, se posiciona como un «influencer» territorial sobre cómo habitar la costa de manera regenerativa.

El Garden Gate es un ejemplo de cómo podemos habitar el territorio sin causar daño, promoviendo una coexistencia armoniosa y respetuosa con el entorno.

DISEÑO DEL CICLO DEL AGUA E INTEGRACIÓN DE LAS ESPECIES POTENCIALES

Desde el punto de vista del agua, las estrategias diseñadas para el Garden Gate priorizan la reducción y la optimización del consumo, la diversificación en los recursos hídricos y la mejora del estado de las masas de agua y de los ecosistemas acuáticos.



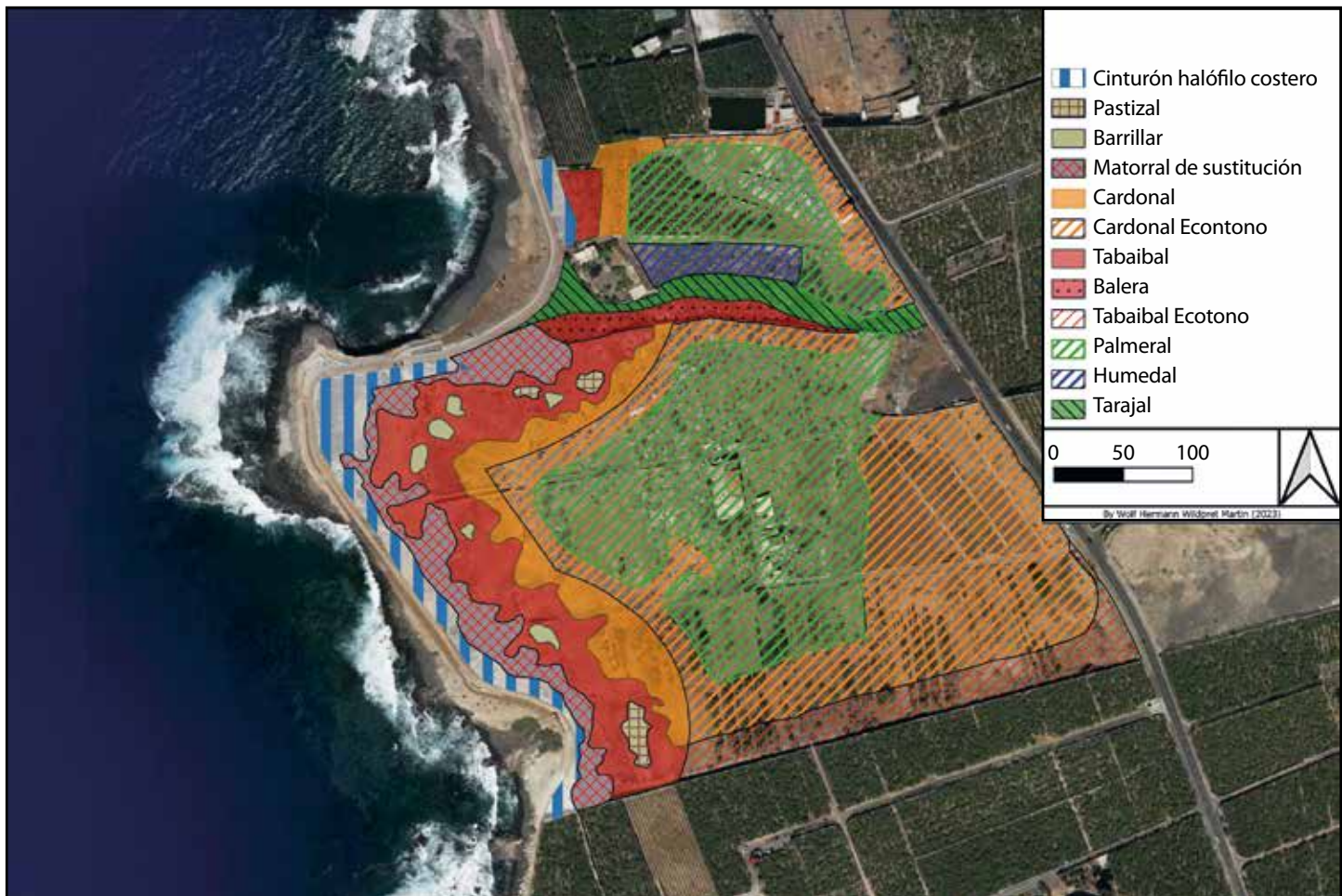
Figura 10. Síntesis de las estrategias sostenibles y regenerativas del agua de UGPT.

También se considera la conectividad ecológica, la adaptación de las infraestructuras hidráulicas a los nuevos escenarios, y la eficiencia energética, incorporando energías renovables para reducir los costes de explotación del UGPT.

En el Garden Gate se integran especies nativas para promover la resiliencia en la zona de regeneración, mejorar el confort humano en las distintas zonas ajardinadas —especialmente en el jardín central que interconecta los distintos ámbitos del Garden Gate— y utilizar la botánica en el tratamiento de aguas residuales, actuando como Solución Basada en la Naturaleza (NBS).

Las medidas se desarrollan desde un enfoque de gestión integral de agua y territorio, potenciando la coordinación con la planificación territorial.

Figura 11. El diseño del paisaje se basa en las especies potenciales y endémicas, que, estando perfectamente adaptadas al lugar, permiten una gestión óptima del agua, al no necesitarse añadir regadíos adicionales.



CAMBIO EN LOS HÁBITOS DE USO DEL AGUA DE LOS VISITANTES

La educación es necesaria para cambiar los hábitos de uso del agua de los visitantes, ayudando a un cambio de cultura, siendo esto un factor importante para una acción verdaderamente *regenerativa*. De lo contrario, sin los cambios apropiados en la mentalidad humana, el uso de tecnologías innovadoras se convierte en una práctica meramente *reconstituyente* durante un corto período de tiempo.

La regeneración a largo plazo solo es posible cuando las tecnologías están respaldadas por cambios sociales, impulsados por un aumento de la conciencia sobre el ciclo del agua. La Aquademy del UGPT es una forma divertida y científica de aprender a prevenir el desperdicio del agua.

En este sentido, la educación a través del ejemplo permite que el mensaje sea integrado con más facilidad. En este sentido, el uso de una estrategia de regeneración botánica de la ecozona, a base de especies potenciales, no solo reduce el uso de agua, sino que reivindica la belleza propia de los sistemas naturales propios de cada lugar. Esta estrategia permite también reducir drásticamente los costes de mantenimiento y de operación del parque: es la fórmula más inteligente.

Figura 12. La arquitectura del parque integra estrategias pasivas con fachadas bioclimáticas, que gestionan el intercambio de energía y humedad con el entorno. En este sentido, los edificios emulan el funcionamiento de las especies vegetales propias del entorno en el que se sitúan.



Figura 13. La estrategia Cloud Architecture: la arquitectura del parque se integra en los ciclos naturales, energéticos, jurídicos, culturales y funcionales del territorio, adaptándose al paisaje. Es decir, es un reflejo y expresión directa de estas solicitudes.



SEA GARDEN: ALMA DEL PARQUE REGENERATIVO

El corazón del parque se encuentra bajo (en) el agua, en el océano.

El Sea Garden representa una filosofía de relación con la naturaleza y con el océano. Una filosofía que respeta y fomenta la capacidad del océano para generar complejidad y sustentar la vida humana, partiendo de un entendimiento profundo del estado de los ciclos del agua y del medio marino.

Figura 14. Los Sea Gardens son «jardines submarinos» que responden de forma inteligente e integrada a las necesidades específicas de regeneración de un ecosistema dañado.



A partir de aquí, el Sea Garden es un entramado de acciones que facilitan la evolución de un pequeño fragmento del océano desde su estado actual hacia un futuro mejorado. Un proceso de adaptación.

Se trata de una estrategia de regeneración marina en la que se restauran diferentes hábitats interconectados para recuperar la funcionalidad de los ecosistemas, logrando aumentar la biodiversidad, mejorar la capacidad de captura de carbono y fomentar la creación de biomasa de especies asociadas a los bosques marinos.

SEA GARDEN Y LA SALUD DE LA COLUMNA DE AGUA: UN PROTOCOLO CIENTÍFICO

El diseño de un Sea Garden está pautado por un protocolo científico, desarrollado por el equipo de UGI bajo la dirección del Dr. Sergio Rossi, con el apoyo del MAF World (Marine Animal Forests), una red de científicos con más de 350 miembros, creada específicamente para aunar el conocimiento existente alrededor de los bosques submarinos, y por tanto para identificar el conocimiento y las tecnologías en relación con el paisajismo subacuático.

Esta estrategia permite adecuar el diseño de cada Sea Garden a las características de la ecozona particular en la que se aplica, y se convierte en una NBS que, por su interacción con la columna de agua, ayuda a su equilibrio y su salud.

El proyecto se inicia por una fase de diagnóstico del estado de salud de una zona específica, y de las características de la columna de agua resultante.

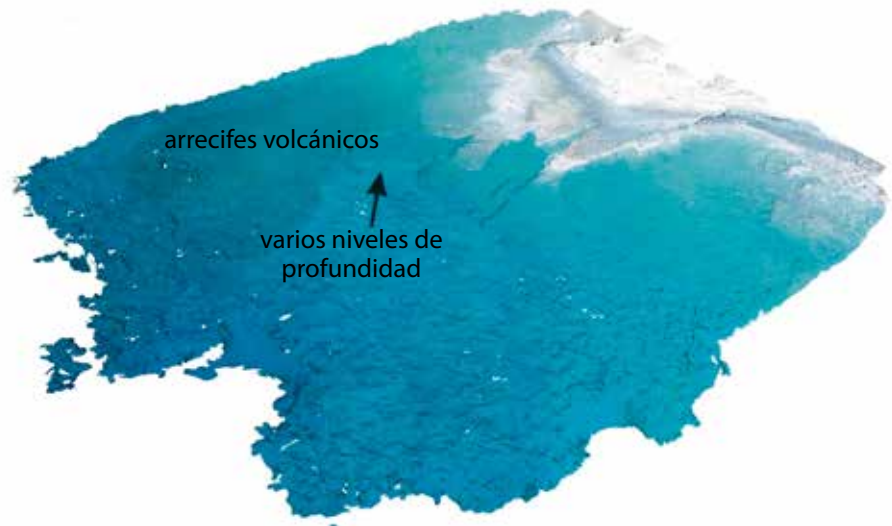


Figura 15. Las primeras fases consisten en la descripción exhaustiva de la línea base del lugar escogido y sus interrelaciones con el entorno próximo y lejano, tanto en sus aspectos morfológicos como en los bioquímicos.

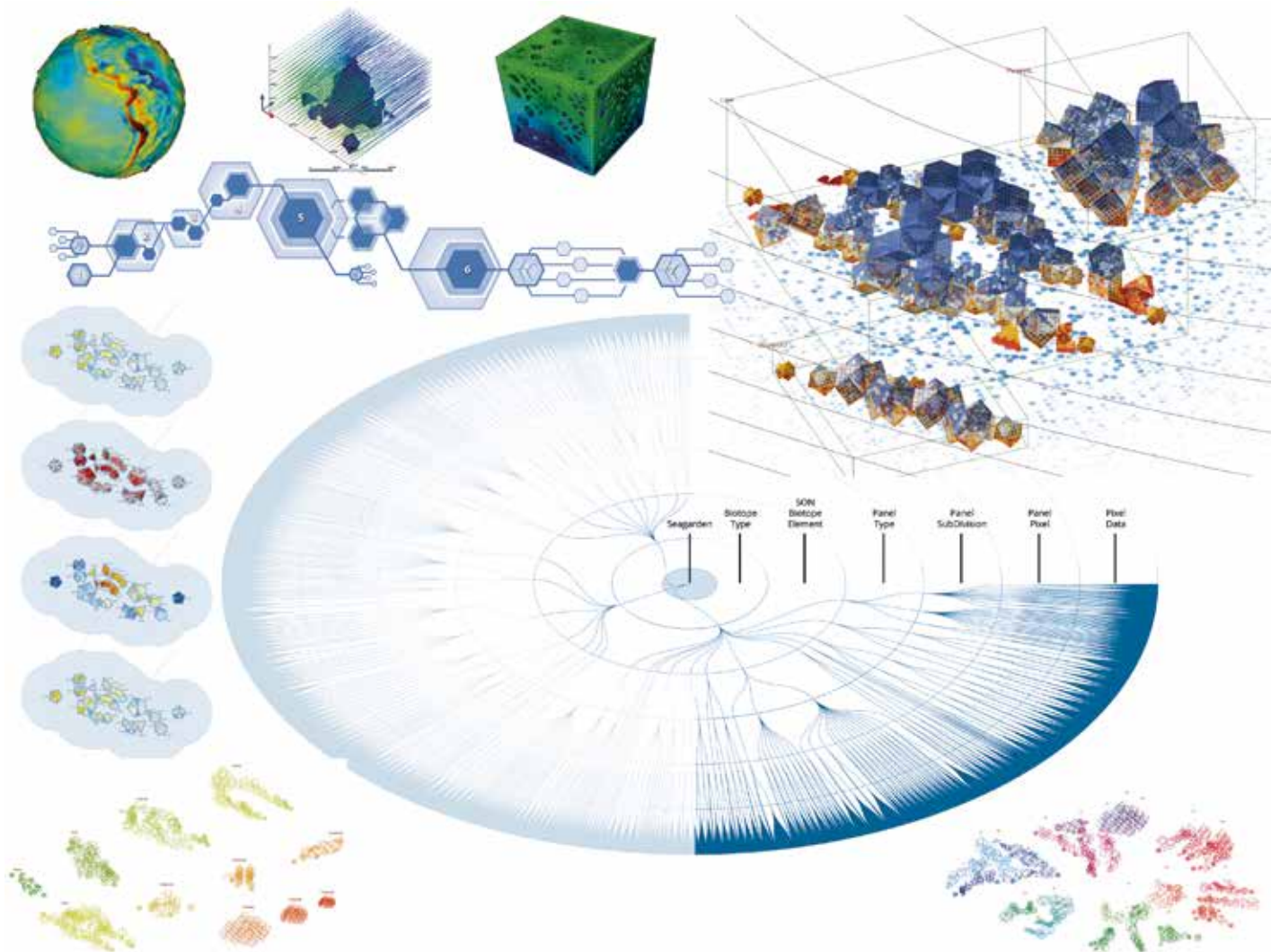
Figura 16. Acupuntura proyectual: localización del Sea Garden de Tenerife.



Figura 17. Reefhopper®, un software experto desarrollado para la articulación del conocimiento científico y el desarrollo de estrategias de regeneración de los fondos marinos.

El Sea Garden se compone de varios elementos: los Smart Enhanced Reefs (SER®), los Floating Reefs (FR), áreas de replantación en sustratos blandos y duros, así como estaciones de monitorización del medio marino (sensores bentónicos, boyas intermedias, etc.).

La composición y proporción de estos elementos se decide a partir del Protocolo Científico de UGI, y se aplica con el apoyo de reefhopper®, un software experto, al diseño paisajístico submarino resultante.



Siguiendo el protocolo científico, se desarrollan las soluciones a medida, adaptadas a cada ecozona, mediante el estudio exhaustivo de las variables locales. Esto permite que las soluciones tecnológicas y científicas se ajusten a las necesidades específicas, garantizando su integración en el ecosistema local.

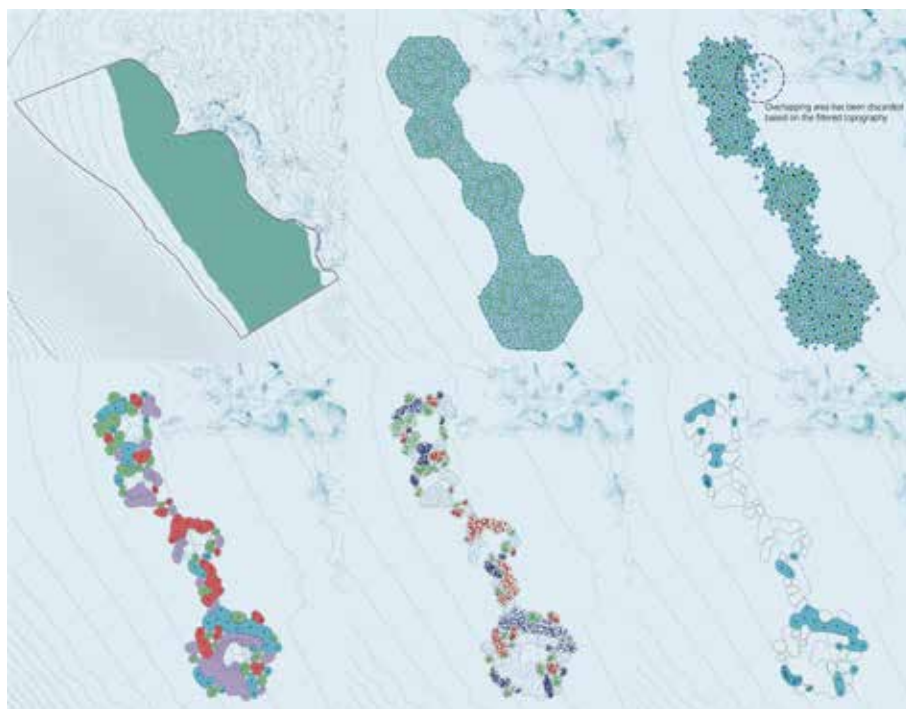


Figura 18. Reefhopper® analiza las bases de datos resultantes de la etapa de diagnóstico, y sugiere configuraciones del Sea Garden adaptadas a los condicionantes locales específicos, con el objeto de dotar de mayor resiliencia y conectividad al ecosistema estudiado.

El desarrollo de la herramienta digital reefhopper®, un software experto cuyo corazón es la traducción algorítmica de los criterios científicos recopilados alrededor de las técnicas restaurativas de las diferentes especies de un ecosistema particular, permite plantear un desarrollo de aprendizaje circular sobre la resiliencia específica proyectable para un paisaje submarino ante las potenciales transformaciones que resultan del cambio climático.

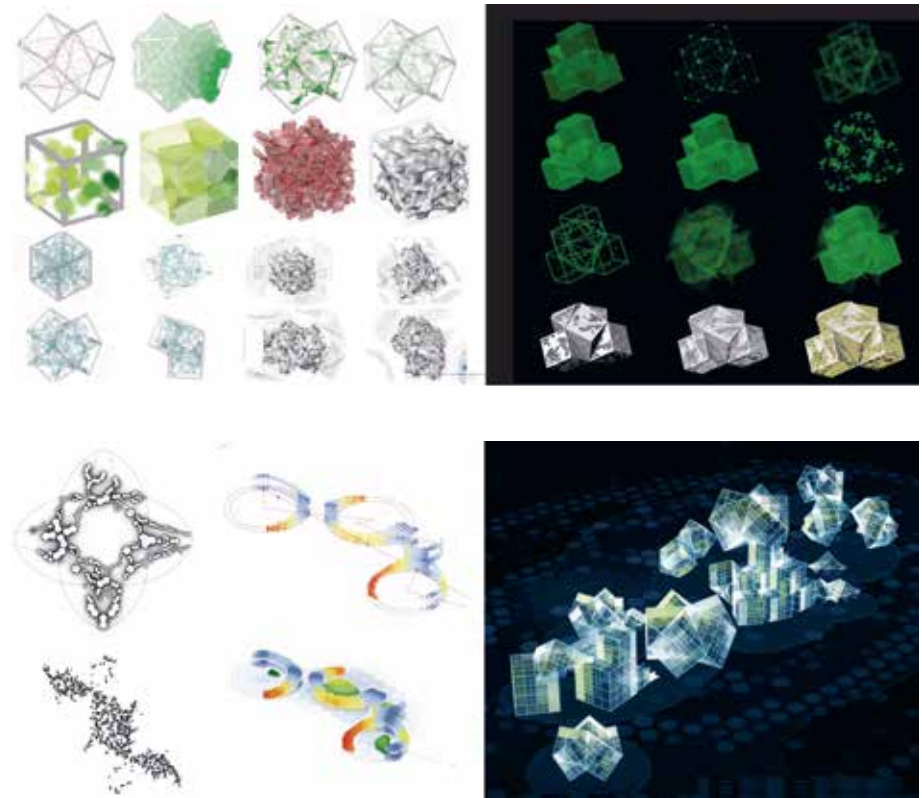
Con la ayuda de estas nuevas herramientas digitales y de su evolución hacia un modelo de inteligencia artificial, podemos concebir la posibilidad de una gestión paisajística regenerativa al servicio del mantenimiento de los servicios ecosistémicos costeros submarinos, contribuyendo a la adaptación al cambio climático a la generación de conocimientos para la terraformación.



EL DISEÑO DE LOS JARDINES SUBMARINOS

Así como los paisajistas intervienen en los territorios terrestres, los jardineros del mar desarrollan los paisajes submarinos cumpliendo con la integración de funciones diversas, desde el aumento de la resiliencia de los servicios ecosistémicos de los fondos marinos, hasta la propuesta de actividades de ocio y de movilización ciudadana.

Los Sea Gardens, diseñados como un filtro de actividad humana frente a las zonas prístinas o protegidas, incorporan auténticas experiencias de buceo en un paisaje submarino hecho a medida.



Figuras 19. Smart Enhanced Reefs (SER®), una nueva generación de arrecifes inteligentes que apoyan la estrategia regenerativa de la vida marina para aumentar la biodiversidad local. Son elementos que permiten la creación de sustratos duros específicos, con funciones de gamificación y experiencias de buceo integradas.

La arquitectura, el paisaje del Sea Garden, se diseña teniendo en cuenta la mirada aportada por buceadores creativos y ecosensibles centrados en ofrecer una experiencia de buceo memorable. Los arrecifes simbióticos se integran perfectamente en el fondo marino, creando los itinerarios y rutas submarinas más diversos: las «pistas de buceo». Los diferentes niveles de las pistas de buceo permiten a los buceadores evolucionar e interactuar dentro y con el entorno, de forma interactiva y por tanto comprometida.

Estas «pistas de buceo», organizan rutas de diferentes niveles, e incluyen actividades de restauración, constituyendo un atractivo diferencial, que permite establecer un flujo de visitantes. Este ciclo de visitantes permite la creación de una comunidad de «jardineros del mar» que se convierten en embajadores de las ideas y valores del parque regenerativo, con el propósito de ayudar a sensibilizar a la sociedad.

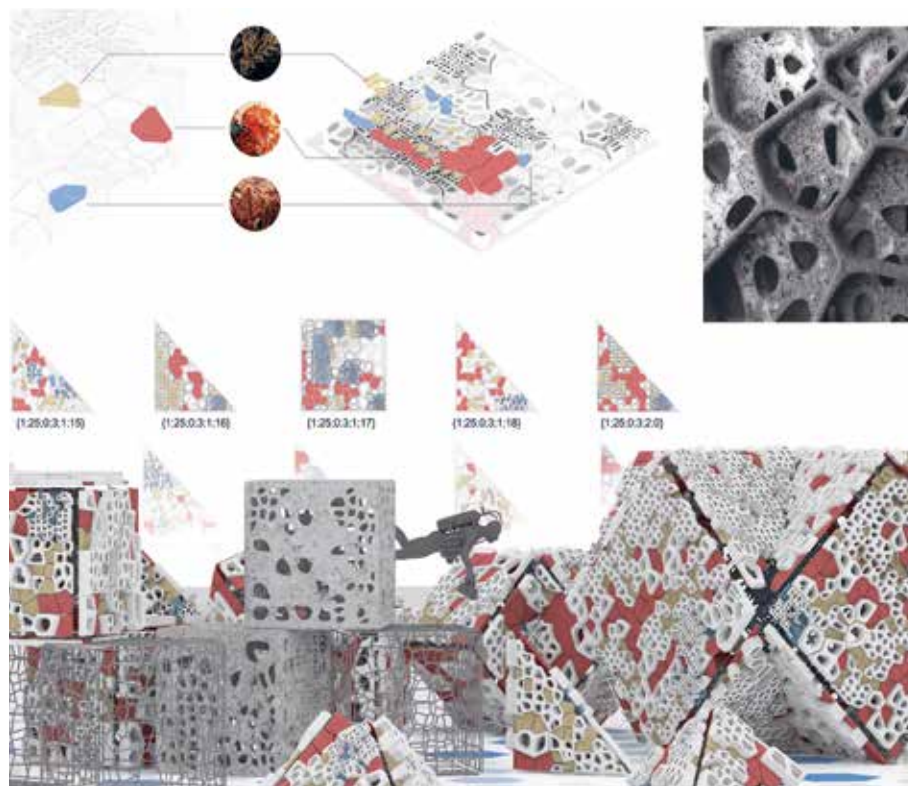


Figura 20. Pistas de buceo gamificadas, que promueven la involucración de los submarinistas en las tareas de restauración y por ende de regeneración de un ecosistema costero.

Adicionalmente, y en alineamiento con los Objetivos de Biodiversidad de Aichi de la Convención sobre la Diversidad Biológica, los paisajes submarinos así concebidos permiten restaurar activamente los diversos biosistemas que, separados entre sí en áreas degradadas, restablecen la conectividad de los hábitats que alguna vez interactuaron como

parte de un ecosistema extenso y coherente. Estos ecosistemas marinos, incluidos los organismos que secuestran carbono, albergan la mayor parte de la biodiversidad en los ecosistemas bentónicos, presentando en conjunto estructuras tridimensionales esenciales para un buen funcionamiento del ecosistema, en el que interactúan diferentes especies.

Se estima que un Sea Garden puede capturar alrededor de 1,4 toneladas de carbono por hectárea durante un año en un área restaurada submarina. Esto es posible gracias a la regeneración de masivos secuestradores de carbono, como esponjas, gorgonias, algas y hierba marina como la *Cymodocea nodosa*. Considerando que la capacidad de captura de carbono de un Sea Garden es de gran significancia y es comparable a la capacidad del ecosistema amazónico (1-1,5 toneladas de C ha⁻¹ año⁻¹), se puede lograr un impacto ambiental netamente positivo mediante la combinación de las estrategias regenerativas en el océano.

Ante la evidencia de un cuerpo unificado de agua a nivel planetario, las formas de habitar el territorio han de incorporar esta conciencia y entender y diseñar adecuadamente su influencia en el ciclo del agua, incluyendo sus costas y fondos marinos.

El desarrollo y promoción de parques regenerativos, planteados como laboratorios de adaptación al cambio climático, es una propuesta que invita a la colaboración y a la integración del conocimiento existente y en desarrollo, para constituir un instrumento a la escala de la gestión del territorio.

Los Sea Gardens nacen como una solución basada en la naturaleza, que atiende a la parte submarina del ciclo del agua, y que representa una oportunidad escalable para hacer frente a los retos de pérdida de biodiversidad costera.

Esto ha de permitir sentar las bases para un futuro de simbiosis positiva con el medio: en el camino de un nuevo pacto con la naturaleza, convirtiéndonos en jardineros submarinos: una escuela para la terraformación.

RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS

Underwater Gardens ha recibido el reconocimiento del Programa Horizonte Europa (Convocatoria HORIZON-MISS-2021-OCEAN- 02-01: European Blue Parks, Proteger y restaurar los ecosistemas marinos y la biodiversidad) y del Programa de Acciones de la Década de los Océanos 2021-2030 de la UNESCO.

El proyecto ha sido calificado como un Lighthouse Project europeo.

Han aportado su conocimiento y revisión: Ekaterina Markelova (PhD), Sergio Rossi (PhD) y Puri Canals (PhD), miembros del equipo de Underwater Gardens.



POST SCRIPTUM: UN SEA GARDEN PARA BARCELONA

Las ciudades son artefactos que ocupan y consumen el territorio, y que de por su actividad diaria impactan en el medio, produciendo contaminación y desequilibrios en los ecosistemas inmediatos y lejanos. En contraposición, hacen esfuerzos para compensar y mitigar estos efectos, sobre todo para conseguir ser lugares atractivos para la vida humana y atraer así el talento que las ha de permitir perpetuarse.

En un escenario de cambio climático, las ciudades han de intensificar su transformación hacia un funcionamiento de simbiosis positiva con el medio, en busca de un nuevo pacto con la naturaleza.

A lo largo de la historia, las ciudades han utilizado los parques y jardines para acercarse a estos objetivos, creando espacios de confluencia entre lo humano y la naturaleza realmente extraordinarios.

En este sentido, siendo Barcelona una ciudad costera, con una larga tradición en innovación y en el desarrollo de soluciones basadas en la naturaleza (NBS), como la recuperación del río Besós, puede volver a ser pionera en la creación de una nueva tipología de equipamiento ciudadano: un gran *central park* submarino.

Un Sea Garden de gran tamaño, que ha de permitir sumarse en el esfuerzo de descarbonización de la actividad de la ciudad, al tiempo que ayudar a la promoción y el desarrollo de la investigación científica marítima aplicada, al aumento de la conciencia ciudadana y su involucración en el mantenimiento de los servicios ecosistémicos, a la mejora de la calidad del agua y a la expansión de nuevas formas de ocio y turismo.

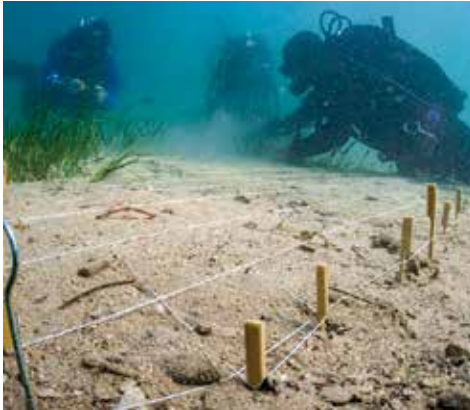
La ciudad respira ahora «economía azul», y apoyándose en el esfuerzo de la Administración, las instituciones públicas y privadas, locales e internacionales, tiene la oportunidad de desarrollar un proyecto colectivo de cooperación e integración, que puede ser el motor de una transformación necesaria para adaptarse a los retos del siglo XXI.

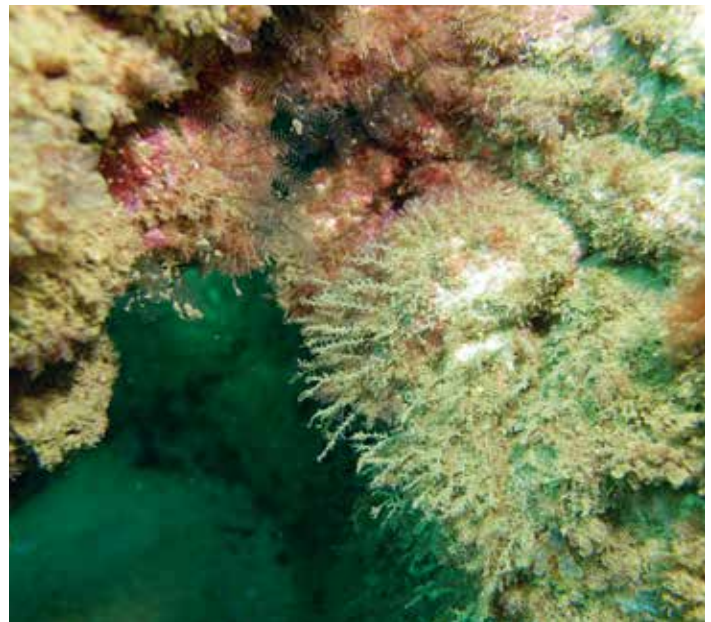
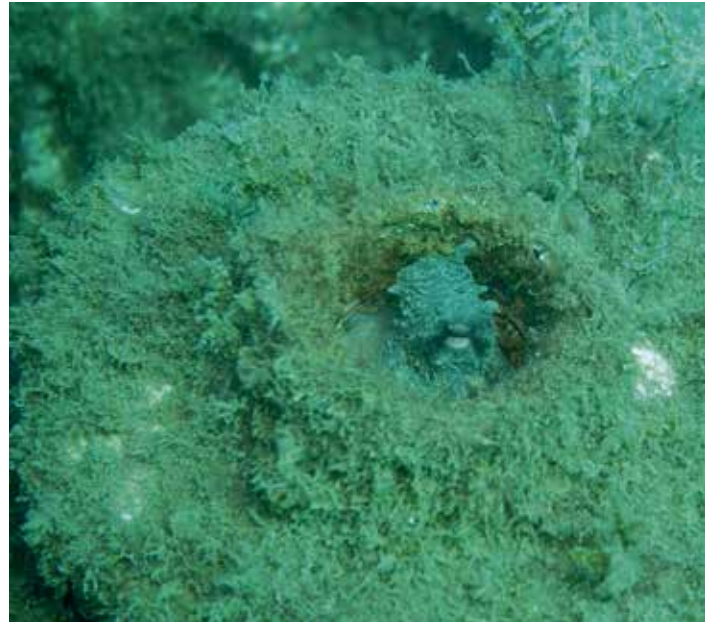
Bajo esta óptica, Underwater Gardens ha podido aportar no solo su visión sistémica, sino también su conocimiento aplicado en la creación de SERs específicos para proyectos semilla, como un nuevo arrecife para el Puerto Olímpico, en el marco de intervenciones promovidas por el Ayuntamiento de Barcelona (B:SM), así como la fase inicial para el Proyecto BCN SOTAMAR, promovido por la Fundación BCN Port Innovation del Puerto de Barcelona, todo ello dentro del marco del legado de la 37 edición de la Copa América celebrada en la ciudad condal.





Un Sea Garden resulta de la correcta combinación de las diferentes técnicas y tecnologías conocidas en relación con el cultivo de las diferentes especies que configuran los bosques marinos.









TRECE

**LA INNOVACIÓN
Y EL SECTOR DEL AGUA**

Carlos Montero Ruano

Planta piloto para reutilización, escala preindustrial. Fuente: Cetaqua.



La innovación es un resultado clave de la ciencia, ya que reúne el conocimiento técnico para generar algo nuevo. El desarrollo de conocimiento es una condición necesaria, pero no suficiente, para que se dé la innovación. Requiere también una nueva manera de ver las cosas, un enfoque diferente y una visión que sale de lo específico y atraviesa distintas disciplinas.

Así, la innovación, la de verdad, significa riesgo, romper normas, replantearse el *status quo* y practicar la prueba y error —muchas pruebas y muchos errores—. Algo que no todo el mundo está dispuesto a hacer. Por eso existen otros tipos de «innovaciones», mucho más abundantes, que se apoyan sobre lo seguro. Se trata de la innovación incremental. Todos saben de dónde parten, adónde van a llegar y los pasos intermedios. En este espacio de riesgo bajo y de alto confort, las métricas funcionan y los resultados... bueno, los resultados se pueden anticipar.

La innovación en el sector del agua y del medio ambiente tiene, sistemáticamente, que lidiar con estos aspectos y moverse entre los resultados predecibles, los disruptivos y el conocimiento difícil de monetizar. Y aunque la fórmula mágica para que todo funcione no es distinta que la de cualquier otra actividad —trabajo, trabajo y más trabajo—, sí hay algunos factores que pueden ayudar a que la innovación genere mejores resultados.

Sin ánimo de ser exhaustivo, podemos plantear algunos de los retos de la innovación, para centrarnos a continuación en los retos técnicos del sector del agua, las barreras, las oportunidades y los ecosistemas e instrumentos.

RETOS DE LA INNOVACIÓN

TALENTO

La innovación, de momento, no la produce la inteligencia artificial generativa; la hacen las personas. Así que se necesitan expertos, pero no solo eso. Juegan la creatividad, la visión diferente, la capacidad de aprender, de lectura y de conversación abiertas, donde no se busca comprobar las propias hipótesis, sino aprender de los demás.

Afortunadamente, nuestro país es un generador de talento. Hay una fuerte cultura universitaria que permite formar a los jóvenes en conocimiento y en estructura de pensamiento científico. Sin embargo, que haya talento no significa que se vaya a dirigir al sistema de innovación y permanezca en el mismo, al menos lo suficiente para generar resultados. La atracción de talento es un reto que comparten todos los sectores productivos y el mundo académico.

La academia tiene dificultades para incorporar y retener talento investigador. Existen barreras burocráticas y presupuestarias. A modo de ejemplo, la media de edad de la plantilla fija del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), el mayor organismo de investigación pública nacional, es de 54 años. Idéntico valor en la plantilla de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC-Barcelona Tech). Esta es una situación que afecta globalmente al sistema académico, que carece de un relevo generacional suficiente. Este puente entre talento sénior y talento joven es débil y debe reforzarse tanto en el ámbito académico como en el empresarial, facilitando el traspaso de conocimiento a las nuevas generaciones y la puesta en valor de ese conocimiento en las sénior.

Se puede hablar también de «fuga de talento», ya que mientras que el 43 % de los españoles que salen de nuestro país lo hace hacia posiciones altamente cualificadas, tan solo el 11 % de los extranjeros que vienen a trabajar a España tienen este mismo tipo de posiciones.

Conviene disponer de instrumentos ágiles y atractivos para retener ese talento que somos capaces de generar

INVERSIÓN

La inversión, tanto pública como privada, es obviamente indispensable. En España, la inversión en I+D (Investigación y Desarrollo) ha sido creciente desde 2014. Sin embargo, su peso sobre el PIB es tan solo del 1,44 %, lejos del objetivo de la Estrategia Española de Ciencia, Tecnología e Innovación 2021-2027 del 2,12 %. También está alejado de la media UE-27, que se sitúa en torno al 2,22 %. Visto de otra forma, la inversión en I+D por habitante es de 407 € en España, en 2022, mientras que la media UE-27 alcanza los 788 € por habitante. Si saltamos de Europa, Corea del Sur lidera el ranking con una inversión del orden del 5 % de su PIB, seguido de EEUU con el 3,5 %. Otros países, como China están en el 2,5 %.

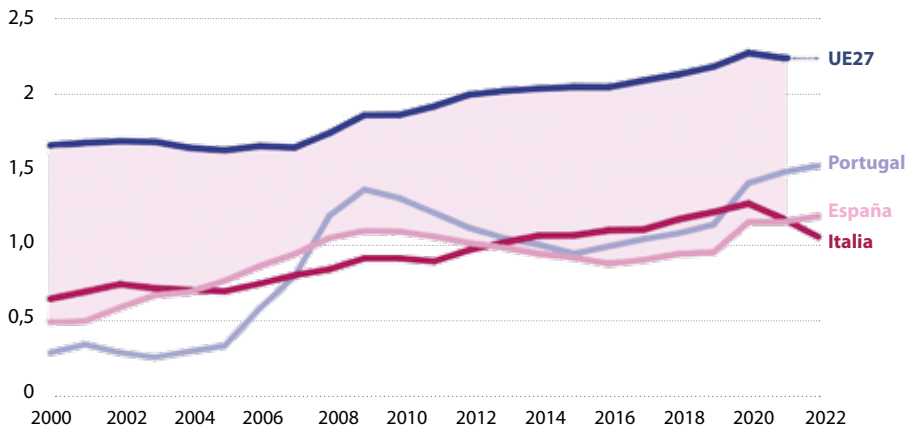


Figura 1. Inversión en I+D sobre PIB (%). Fuente: Informe COTEC, Evolución de la I+D 2023.

La inversión pública y privada tienden a crecer de manera paralela, estando la inversión privada algo por encima de la pública, concretamente supone un 56% del total. Este valor está también claramente por debajo de la media UE-27, donde la inversión privada alcanza el 68%. Así pues, aunque es necesario reclamar el incremento de inversión en I+D por el sector público, nos deberíamos preguntar por qué el sector privado no realiza mayores esfuerzos en innovación. Resulta preocupante pensar que nuestros vecinos y competidores, sí lo están haciendo, por lo que la brecha de competitividad tenderá a agrandarse en el futuro.

Año base 2022 = 100

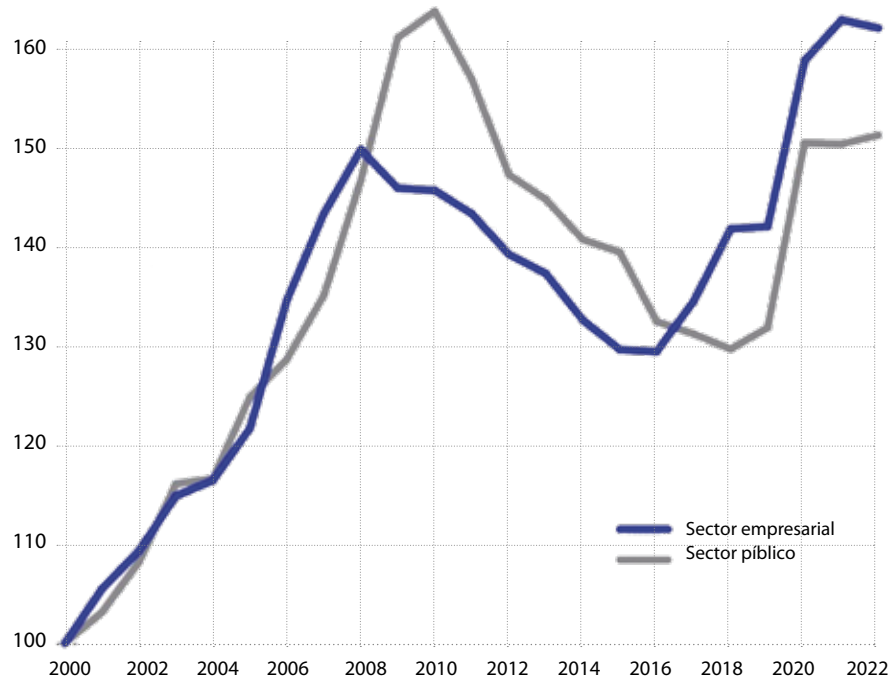


Figura 2. Evolución del gasto en I+D del sector público y empresarial sobre PIB. Fuente: Informe COTEC, Evolución I+D.

A la luz de estos datos, resulta claro que difícilmente alcanzaremos la media de inversión y seguiremos rezagados mientras no haya políticas continuadas de una mayor dedicación de inversión.

TRANSFERENCIA DE CONOCIMIENTO

La pieza fundamental de la innovación es la transferencia. Sin transferencia, no hay innovación. Solo hay conocimiento o ciencia. Este proceso de dar a conocer respuestas y plantear si estas pueden tener una aplicación resulta complejo.

Para una transferencia efectiva, es necesario que los investigadores estén complementados por perfiles con una visión pragmática, de aplicabilidad o de negocio. Hay perfiles mixtos —investigador y visión de negocio—, pero no son frecuentes, por lo que el trabajo en equipo, cuanto más interdisciplinar mejor, es la manera de innovar con eficacia.

Cuando hablamos de transferir conocimiento, pensamos en primer lugar en la necesidad de transferirlo entre colegas, entre investigadores o, como se conoce en el ámbito, entre pares (*peers*). Las publicaciones científicas revisadas por pares, los congresos y seminarios son fuentes naturales de información, donde un sistema de citaciones puede ser de ayuda para identificar los artículos más relevantes o los autores más significativos, que se categorizan por el éxito de sus publicaciones. No entraremos en el espinoso tema de la ética de algunos autores o de los sistemas editoriales que son en algunos casos muy cuestionables.

Un segundo nivel de transferencia es el que ha de ocurrir entre la universidad, o el sistema académico, y la empresa. Si entendemos que el científico tiende a buscar retos intelectuales motivadores, entenderemos que una vez resuelto un problema —aunque sea en un plano conceptual o de laboratorio—, algunos de ellos tienden a buscar un nuevo interrogante que resulte suficientemente complejo como para que puedan dedicarle unos años a darle respuesta. Así, cuando han obtenido una respuesta, su interés por buscarle o dotarle de una aplicación es, en ocasiones, moderado. Ya saben cómo hacerlo, ¿por qué hacerlo? Esto ya no es un reto.

Sería tremendamente injusto dejar aquí la afirmación, puesto que muchos investigadores, profesores y catedráticos dedican una parte principal de su tiempo a promocionar sus resultados hasta que resultan implantados, y no consideran su trabajo finalizado hasta que lo ven hecho una realidad. Para ello, no pocas veces acaban dando un paso más allá, y crean o fomentan la creación de empresas (*spin-off*) desde la universidad. Y afortunadamente cada vez más universidades dan apoyo a sus emprendedores, generando mecanismos de soporte de *spin-off*. Las OTRIs (Oficinas de Transferencia de Resultados de Investigación) son las unidades de transferencia de conocimiento de las universidades. Realizan la labor de contactar con las empresas y ofrecerles los resultados. En ocasiones, emulan modelos americanos, donde las empresas patrocinan a la universidad a cambio de que estas faciliten determinados servicios, como de conexión con el sistema de conocimiento. En definitiva, pretenden ser la ventanilla única donde las empresas puedan plantear sus retos y las OTRIs busquen profesores que deseen trabajar en responderlos. Esta es una aproximación que puede ser útil en algunos casos, pero que en general apenas podrá vehicular una pequeña parte del todo el conocimiento que se genera en la universidad hacia fuera, por su limitación de medios entre otros motivos.

Es laudable que con frecuencia las universidades entiendan que tiene un rol de retorno a la sociedad y que este se produce no solo generando talento, sino también generando un conocimiento que haga que su territorio progrese, en cualquier ámbito —económico, social, ambiental—.

En las últimas décadas han proliferado unas entidades que tienen por misión específica esa transferencia desde el conocimiento a la aplicación. Son los «centros tecnológicos». Estos no tienen una vocación puramente investigadora, su enfoque es hacia proyectos e iniciativas que puedan tener una aplicación. Juegan un papel creciente en los entornos de investigación y cuentan con perfiles que pueden generar un valor. Su éxito depende en gran medida del grado de conexión que tengan con las empresas y de su comprensión de los retos de las mismas. Si identifican qué preguntas tienen las empresas y qué conocimiento existe —estado del arte—, pueden plantear proyectos que construyan los pasos intermedios necesarios.

Centros tecnológicos

Cetaqua-Centro Tecnológico del Agua es una red de centros tecnológicos del agua basada sobre un modelo de colaboración público-privada, con participación del CSIC, cuatro universidades y empresas del Grupo Agbar. Esto le permite mantener una excelencia técnica y conectar de manera efectiva con las necesidades del territorio, particularmente por su presencia en Barcelona, Andalucía, Galicia, Comunitat Valenciana y en Chile.

Su metodología abarca todo el proceso de la innovación: desde identificar oportunidades y necesidades en el entorno, hasta generar un conocimiento científico que permita convertir las ideas en realidades. Se focaliza en cinco ámbitos estratégicos de innovación, desarrollando soluciones efectivas y sostenibles a largo plazo y que mejoran la eficiencia en el uso del agua, promoviendo su reutilización y garantizando una gestión integrada del recurso.

Mantiene un fuerte enfoque colaborativo, lo que le ha permitido posicionarse como un centro de referencia en agua, siendo particularmente exitoso en convocatorias competitivas europeas, que usa como fuente de financiación para escalar y demostrar tecnologías.

Así pues, ante la dificultad que supone la transferencia, vemos diversos instrumentos que mejoran la conexión. Lo cierto es que, como en tantos otros aspectos, importan mucho las conexiones entre personas. Y si estas personas son catedráticos, rectores y directivos, todo es más fácil. Pero se pueden producir en cualquier nivel de las instituciones. Cuando se genera una relación de confianza, donde la empresa sabe bien qué conocimientos y competencias tiene un grupo de investigación o un centro tecnológico, qué pueden

ofrecer. Cuando se identifica a un profesor que tiene la apertura y la voluntad de transferir y desea que su conocimiento acabe en el mercado, se puede diseñar un itinerario para lograrlo. A veces, planificado; otras, simplemente entretelado por proyectos, preguntas y respuestas.

INDUSTRIALIZAR

Industrializar es transformar un prototipo en un producto. Un producto se ha de poder-fabricar de manera repetida, bajo unas especificaciones, cumpliendo normativas y regulaciones, ofreciendo unas características idénticas, ajustándose a un coste predecible... La fabricación de un producto requiere la búsqueda y la integración de partes, generalmente de terceros, el cumplimiento de políticas, la integración tecnológica. Al producto le acompaña el marketing, las ventas, el servicio postventa y el soporte, entre otros. Así pues, pasar de un prototipo funcional a un producto industrial es un cambio de paradigma. El coste del producto pasa a ser un aspecto fundamental, y el escalado en la producción y el modelo de negocio asociado pueden conseguir un negocio viable o un fracaso.

Es difícil encontrar, al menos en el ámbito de las tecnologías del agua, muchas experiencias en el escalado de tecnologías de tratamiento de agua. Dado que hay poco volumen de productos nuevos anualmente, la experiencia y la formalización del conocimiento adquirido son un problema para calcular el tiempo y la inversión que estos resultados necesitan para alcanzar unos estándares. No tanto en las digitales que tienen una dinámica y tiempos propios, mucho más ágiles. El paso de un prototipo a un producto industrial con una exigencia de rendimiento muy bien parametrizada resulta un reto; entre otros motivos, por la naturaleza variable de las aguas.

Industrializar requiere su propio presupuesto. Así como hay numerosos fondos de financiación para la investigación —siempre nos gustaría que hubiera más—, la industrialización corre a cargo de la empresa. Guarda la lógica que cuanto más cerca está un resultado de generar unos beneficios, menos dinero público debe soportarlo y más dinero privado. Pero es habitual infraestimar la inversión necesaria para una industrialización de un resultado de innovación, puesto que el grado de incertidumbre aún es elevado por los problemas técnicos, legales y comerciales (demanda del mercado).

EL MERCADO

Un producto o servicio ha de estar diseñado para cubrir una necesidad —real o aparente— de los clientes. Esta lógica tan sencilla para los bienes de consumo se cubre de preguntas y de confusión cuando nos dirigimos a un sector regulado, con implicaciones sociales y ambientales como el agua.

Por ejemplo, el servicio de abastecimiento de agua potable de un municipio puede tener modelos de gestión diversos: prestación del servicio con medios propios del ayunta-

miento, la creación de una empresa pública —mancomunada o no—, la concesión administrativa temporal a una empresa privada o la creación de una empresa de economía mixta (público-privada). En estos distintos modelos de gestión, nos podemos preguntar quién es el cliente del producto o servicio al que nos dirigimos. En algunos casos, cliente y proveedor serían el mismo. Al mismo tiempo, podemos hablar de *cliente-usuario*, que es el ciudadano, y de *cliente-contratante* que es la administración (ayuntamiento, mancomunidad, agencia de agua o confederación...). También puede ser un cliente privado, desde un pequeño comercio a una gran industria. Si tenemos que pensar en el cliente al que nos dirigimos, este primer aspecto ya supone una dificultad. Cada uno puede valorar el producto o servicio de una forma y puede tener interés o capacidad de pagarlo o no. En ocasiones, no será ni siquiera factible hacer una venta a algunos de estos clientes. En otros, solo es posible mediante un proceso de licitación pública, donde la innovación no juega siempre a favor. La administración puede fomentar la innovación, favoreciendo las propuestas más innovadoras. Pero esto difícilmente sucede, ya que la puntuación económica es predominante y los licitadores se ven obligados a realizar fuertes bajas. Si se prima el precio sobre el valor, la innovación lleva las de perder. El instrumento de Compra Pública Innovadora, que algunas administraciones han empleado en licitaciones, incluido el ámbito de agua, puede ser una ayuda a reconocer el valor de la innovación.

Muchos resultados de la investigación en agua pueden generar beneficios ambientales que resultan difíciles de monetizar. El concepto de *servicios ecosistémicos*, o de huellas ambientales y en concreto la huella hídrica resultan útiles, pero no determinantes para considerar que existe un mercado ambiental como tal.

En cualquier caso, es fundamental que el resultado innovador resuelva una necesidad (*pain*). De hecho, esta debería ser la premisa de todo proyecto tecnológico. No de toda investigación. La investigación básica tiene un sentido y responde a otras preguntas. Pero, si pensamos en el perímetro de la innovación, aquí sí necesitamos empezar con un objetivo, un reto lo más concreto posible. De lo contrario, lo más probable es que dediquemos una cantidad importante de recursos que no ofrecerán un retorno.

Cuando pensamos en las necesidades, rápidamente podemos plantear que las empresas y los usuarios son quienes nos pueden ofrecer respuestas. O bien quien trata con el cliente, quien está «vendiendo» productos diariamente, o quien traza los grandes ejes estratégicos de las compañías, han de conocer el mercado en profundidad. Si bien preguntar al cliente, o al vendedor, es un ejercicio saludable que nos puede dar ese *insight* de cliente —necesidad que detectamos, aunque el cliente no llegue a hacerla explícita—, no siempre cliente o vendedor van a tener una noción concreta de lo que quieren. Habitualmente expresan retos generales que les preocupan, pero que pueden ser difíciles de plasmar en un reto de innovación concreto. Por ejemplo, si preguntamos en el sector del agua, muy probablemente los retos que más preocupan son el precio de la energía o la normativa de la calidad de agua. Son por lo tanto orientaciones, pero no podemos esperar que el cliente nos indique lo que tenemos que hacer y dónde está la innovación disruptiva.

TIEMPO

Un aspecto fundamental de la innovación es el tiempo desde la expresión de la necesidad —o su detección— a tener un producto o servicio que responda a esa necesidad. El *time to market*. Este tiempo a mercado depende de la tecnología y de la combinación entre inversión y demanda. Por ejemplo, actualmente la demanda de soluciones digitales es muy elevada, y la tecnología digital permite avanzar con mucha rapidez. Seguramente es la limitación de datos fiables lo que hace que no dispongamos con mayor celeridad de soluciones, como los gemelos digitales, por nombrar una. Los modelos, tecnologías de comunicación, procesamiento, sensorización y adquisición de datos están ya disponibles para la mayoría de los usos que el mercado puede plantear. Y, de hecho, existen numerosas startups que están dedicando esfuerzos a digitalizar el sector del agua.

Sin embargo, el agua es un bien físico donde la ley de Moore no se aplica. Si pensamos que la tecnología que emplea hoy la inmensa mayoría de depuradoras de agua, que es la de fangos activos, tiene ya 100 años, tenemos una pista de la tasa de adopción de innovación del sector. Desarrollar tecnología de tratamiento es costoso en recursos, pero también en tiempo, donde la experimentación en diversas condiciones es imprescindible para validar y dominar una tecnología, por ejemplo de tratamiento biológico. Este tipo de tecnologías pueden tardar 10 años desde su fase de experimentación en laboratorio a su adopción en el mercado. Invertir a 10 años vista supone pedir prácticamente un salto al vacío.

Así, resulta importante disponer de un portafolio equilibrado de proyectos de innovación que permitan entregar resultados de manera continua, combinando aquellos que pueden dar resultados a corto plazo con aquellos que requieren un largo plazo para desarrollo.

RETOS TÉCNICOS

Hemos planteado una serie de retos que son generales a la innovación. Queremos ser ahora más específicos, mirar al futuro y preguntarnos por cuáles son las necesidades que podemos arriesgarnos a anticipar en el vector del agua.

Los *drivers* a los que responden estos retos tecnológicos son simples: generar eficiencias, reducir riesgos, como por ejemplo respondiendo —o adelantándose— a la regulación y generar nuevas oportunidades.

RECURSOS

El mayor reto del agua es la gestión de sequías e inundaciones. Los modelos climáticos indican de manera consistente que estas variaciones aumentarán, generando periodos aún más largos de sequía con eventos puntuales de precipitaciones intensas. Los fenómenos climáticos extremos obligan a una gestión que ha de ser más resiliente. Las infraestructuras son imprescindibles, pero una gestión flexible, dinámica y en tiempo real puede optimizar el volumen de inversión requerida.

Así, para la gestión de sequía el primer punto de acción es la eficiencia en los procesos y en el transporte del agua. Las fugas son, aún en el siglo XXI, uno de los mayores problemas de la mayoría de las redes de distribución. Para minimizar este problema se requiere tecnología de localización de fugas, metodología para su priorización, sistemas de rehabilitación y una inversión que pocos ayuntamientos están dispuestos a hacer, máxime en una infraestructura enterrada, sin visibilidad.

Pero un índice de fugas bajo, incluso en su óptimo económico, no es en absoluto garantía de disponibilidad. Con el régimen irregular de precipitación y el volumen de embalses disponible, no es la prioridad la construcción de nuevos embalses o el recrecimiento de los existentes, salvo tal vez casos singulares.

Una manera, alineada con la sostenibilidad, de disponer de más recursos es la *regeneración y reutilización* del agua residual. La depuración es ya una realidad extendida en Europa y España. En los núcleos urbanos, las depuradoras realizan un tratamiento que normalmente se divide en una fase primaria o físicoquímica, que se focaliza en eliminar materia no disuelta; y uno secundario, que suele ser biológico, que reduce la materia orgánica disuelta en el agua. En ocasiones, se requiere un tratamiento adicional para reducir nitrógeno o fósforo, que en cantidades elevadas pueden provocar problemas de eutrofización, máxime en zonas sensibles. La regeneración del agua consiste en añadir un proceso adicional para adecuarla a un nuevo uso (reuso). Este uso, puede ser caudal ambiental, riego agrícola, usos urbanos que no requieren calidad de agua potable —por ejemplo, riego de parques y jardines, baldeos, fuentes ornamentales...—. También puede ser retornada al medio como agua prepotable, para su tratamiento de potabilización posterior. Es lo que se llama un esquema de reúso potable indirecto. Su aplicación ha salvado, por ejemplo, el suministro del área metropolitana de Barcelona en el reciente periodo de sequía de 2024, suponiendo hasta una cuarta parte del agua distribuida para 3 millones de personas. Finalmente, algunas geografías han planteado esquemas de reutilización potable directa. California, que fue pionera en reutilización para agua de riego, es una de las regiones que más está apostando por la reutilización potable directa, ante las demandas y los largos periodos de sequía que han sufrido.

La gestión sostenible de los acuíferos resulta una pieza olvidada en la gestión de la sequía. La palabra importante es *sostenible*, porque hacer pozos más profundos y bombear lleva a problemas a medio y largo plazo. La sobreexplotación de acuíferos ha provocado impactos como la desaparición de humedales o la subsidencia del terreno, que además de daños a infraestructuras hacen que el acuífero pierda capacidad de almacenaje. Sin embargo, un uso sostenible se basa en aprovechar la recarga natural e incluso recargar artificialmente los acuíferos y emplearlos como reservas de emergencia.

Finalmente, se pueden aumentar los recursos disponibles mediante la desalación. Es más costosa energéticamente que la reutilización, y tiene mayor impacto ambiental, pero cuando el recurso no es suficiente, la desalación supone la única solución posible.

En el otro lado de la balanza, encontramos la gestión de la demanda. Resulta un parámetro difícil de controlar, ya que los precios están regulados y es un bien básico, por lo que, además de las campañas de concienciación, no hay muchas herramientas para reducir el consumo. Las bajadas de presión y los cortes de suministro horarios son medidas de emergencia que tienen un impacto limitado.

Con respecto a las inundaciones, los sistemas de predicción meteorológica y de alerta temprana se pueden combinar con infraestructuras —como tanques de tormenta o zonas inundables controladas— y una gestión en tiempo real que permita aumentar la resiliencia de las ciudades frente a las inundaciones. Hacia ahí se dirige el concepto de *ciudades esponja*.

DIGITALIZACIÓN

El sector del agua no puede estar ajeno a la tendencia generalizada de la digitalización. Hay mucho recorrido de mejora, y un enorme potencial para optimizar procesos y generar eficiencias. Aunque existen sensores para la medición en tiempo real de muchos de los parámetros fundamentales, disponer de sensores económicos, fiables y de bajo mantenimiento sigue siendo una necesidad. El más básico de todos ellos es, en España, también el más habitual, que es el contador. Si es electrónico se puede llegar a obtener información interesante que puede ayudar a mejorar, por ejemplo, el índice de fugas, detectar consumos anómalos y avisar al propietario de manera temprana. Los sensores de calidad de agua son más complejos, pero aportan información muy valiosa, en algunos casos siendo críticos para garantizar la calidad del agua a los usuarios.

Si saltamos de escala, podemos pensar en la información que se puede capturar con la teledetección, que cada vez resulta más precisa y asequible.

La modelización matemática ha sido una herramienta que ha acompañado la planificación y parte de la operación durante las últimas décadas. Estos modelos se pueden acompañar ahora con otros, como pueden ser los estadísticos. La inteligencia Artificial también tiene un rol importante a jugar y puede ser de ayuda en multitud de aspectos, muchos de ellos por descubrir. La conjunción de sensórica, hibridación de modelos matemáticos y IA nos conduce a la generación de gemelos digitales.

Centro Dinapsis, de control operativo digital y hub de innovación abierta

Dinapsis, es una red de hubs de transformación digital para la gestión del agua, la salud ambiental y la transición ecológica de los territorios, que forma parte de los servicios y centros digitales Hubgrade de Veolia.

Estos centros operativos disponen de un portfolio de servicios digitales, que proporcionan análisis de datos, supervisión, optimización y sistemas predictivos para la gestión del agua, para gestionar de forma sostenible y en tiempo real los



servicios y activos. Su objetivo es garantizar una respuesta operativa ágil y optimizada y el acceso a nuevos servicios digitales a todo tipo de municipios.

Al mismo tiempo, estos centros operativos, también son hubs para la innovación abierta, movilizandoo el ecosistema emprendedor de su área geográfica, puesto que están distribuidos por diversos puntos de la geografía española. Los hubs se definen, por tanto, también como espacios para la cocreación y las alianzas. Este enfoque busca conocer las necesidades reales de las administraciones y la ciudadanía y crear potentes ecosistemas y sinergias con startups, centros de emprendimiento y universidades para desarrollar, escalar y adaptar soluciones digitales innovadoras que den respuesta a los retos de cada territorio.

Actualmente, existen doce hubs Dinapsis, tres de actividad especializada y transversal a todo el ámbito nacional (Smart metering; IoT, recursos hídricos y salud ambiental; y Ciberseguridad) y nueve hubs que operan en un ámbito geográfico determinado, atendiendo problemáticas diversas del territorio en el que se ubican, y actuando como aceleradores de innovación en el ecosistema local.

SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL

El agua es un vector ambiental, y esto ofrece oportunidades de generar impactos que trascienden lo puramente económico. La circularidad de recursos es uno de los retos donde el agua ofrece multitud de oportunidades.

En una geografía que sufre sequía y escasez hídrica, la reutilización debería ser un eje fundamental de sostenibilidad. Si pensamos que desalar es tres veces más costoso energéticamente que reutilizar, deberíamos plantearnos si tiene sentido y podemos permitirnos depurar el agua en línea de costa para verterla al mar. No insistiremos en el tema de regeneración y reutilización, que merece por su trascendencia una dedicación mayor.

Venimos observando cómo los procesos de depuración de agua están cada vez más enfocados a recuperar otros recursos que transporta. El más abundante, el carbono, que proviene de la materia orgánica. La valorización se produce fundamentalmente en forma de biogás, por la vía de la fermentación de los lodos. Este biogás se puede limpiar de impurezas, e incluso enriquecer, para tener un porcentaje mayor de biometano. También se va extendiendo, lentamente, la recuperación de nutrientes, fósforo —que es un recurso estratégico limitado— y nitrógeno, normalmente en forma de sales de amonio o cristalizado en estruvita, que son fertilizantes. También es posible recuperar celulosa. En el caso de aguas industriales, puede haber otras materias valiosas interesantes para recuperar, como metales en las aguas de corta de la industria minera, o subproductos de valor en la industria alimentaria. En los procesos de desalación, las salmueras, que actualmente representan un problema de vertido, pueden ser también aprovechables, por ejemplo para generar desinfectantes para el agua.

La preservación de los sistemas acuáticos y la biodiversidad representa también un desafío, particularmente en zonas donde se sufre una escasez crónica de agua. La creciente sensibilidad ambiental, está haciendo que muchas empresas incluyan la preservación ambiental entre sus valores. Algunas de las que emplean una cantidad importante de agua en su proceso se plantean, en primer lugar, cómo ahorrar agua en sus procesos, y a continuación cómo reducir su huella hídrica; esto es, la cantidad de agua dulce que extraen de su cuenca hidrográfica. La posibilidad de compensar su huella hídrica financiando proyectos que recuperan parte del recurso para todos los usuarios puede impulsar acciones de conservación del recurso que de otra forma no se producirían.

Así, el reto de la sostenibilidad ambiental puede enfocarse como una oportunidad para generar soluciones innovadoras.

CALIDAD DEL AGUA Y TRATAMIENTOS, MONITORIZACIÓN

El agua es un bien material que se puede degradar con facilidad. La capacidad de cubrir un uso por parte del agua viene dada por su cantidad y también por su calidad. La calidad del agua determina su uso. Así, podríamos decir que no hay problemas de cantidad de agua en el planeta, puesto que los océanos contienen del orden de 1.300 millones de km³,

pero es un agua que no sirve para cualquier uso. Por este motivo, y por responsabilidad ambiental, debemos monitorizar la calidad del agua y mantenerla óptima.

Disponemos de una abundante normativa, que es especialmente cuidadosa en lo que se refiere al agua de consumo humano y bastante restrictiva con el agua de uso agrícola. Este segundo aspecto es un problema en países con escasez, ya que dificulta las oportunidades de reutilización. En Europa, lamentablemente, el agua se juzga por su origen y no por su calidad. Así, un agua residual no podría usarse para potable aunque le sometiéramos a un proceso de purificación idóneo, que cumpliera los requisitos más exigentes de calidad. Tendría mucho más sentido una aproximación posibilista, como en California, donde se realizan estudios de monitorización de la calidad del agua durante una década, con todos los actores implicados, para acordar que un determinado tratamiento es capaz de alcanzar garantías de calidad para un uso definido. Ese es el camino que siguió la reutilización para riego en los años setenta. Y es también el que se ha seguido para alcanzar a finales de 2023 la aprobación del reglamento de para el agua de consumo humano a partir de aguas residuales regeneradas (*direct potable reuse*). Sería bueno que en Europa tomáramos nota y aplicáramos una visión pragmática en lugar de restringir las opciones sin estudiarlas.

Aun con todo, la cantidad de nuevos compuestos que el ser humano es capaz de producir es enorme, y esto genera nuevos riesgos potenciales para la salud, si estos productos llegan a entrar en contacto con el agua. Así, entre las grandes preocupaciones actuales están los PFAs (sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas, como por ejemplo el teflón, sustancia antiadherentes, retardantes del fuego, etc.), que se produjeron en abundancia hace décadas y suponen un riesgo para la salud de las personas. Es también el caso de los microplásticos, de medicamentos, drogas y otros productos que es posible llegar a detectar en las aguas residuales e incluso en las prepotables. Estos «contaminantes emergentes» suponen un reto para la parte analítica —es decir, para poder medir correctamente su concentración en el agua, así como para su tratamiento—, ya que suelen ser poco biodegradables (recalcitrantes) y por tanto difíciles de eliminar con procesos tradicionales.

Los reguladores están atentos a la aparición de este tipo de sustancias y a los estudios que puedan indicar riesgos para la salud. De ahí que la legislación del agua esté en continua revisión y mejora, incorporando nuevos parámetros y revisando límites de otros. Sin embargo, las infraestructuras no están, por lo general, preparadas para tratar sustancias diferentes a las que han sido diseñadas. Así que supone un reto poder diseñar nuevos procesos de tratamiento, que suelen ser más intensivos en energía y costosos de implantar.

ASPECTOS SOCIOECONÓMICOS

El agua es un bien público, según recoge la legislación española, y cumple funciones sociales, económicas y ambientales, que han de ser compatibles entre sí. Todas las personas deben tener acceso al agua, a un precio justo y asequible.

Al mismo tiempo, la Directiva Marco del Agua indica el principio de recuperación de costes. Esto es, el ciclo del agua ha de ser autosuficiente económicamente, y por lo tanto la tarifa ha de reflejar el coste del agua. Se trata de una realidad compleja y altamente sensible para la población. Hay una parte social pero también emocional en esta gestión, ya que si miramos objetivamente el impacto de la factura del agua en las familias, supone un gasto menor al de la energía o las comunicaciones, y sin embargo un cambio en la tarifa se suele tolerar peor.

El hecho que la tarifa del agua sea distinta según el municipio no ayuda a mejorar la percepción del consumidor, aunque pueda estar más que justificado por los distintos costes de tratamiento y transporte en distintos municipios —según la calidad del agua de origen, topografía de la ciudad, dispersión de la población, etc.—. La comunicación se convierte en una herramienta imprescindible para hacer partícipe al ciudadano de la realidad del ciclo del agua, si bien no suele ser la prioridad entre sus preocupaciones. Este limitado interés se refleja sin duda en las prioridades de los consistorios, que minusvaloran las partidas necesarias para el mantenimiento de las redes de agua y saneamiento.

BARRERAS

La innovación, si realmente lo es, se encontrará con dificultades. Podemos nombrar algunas:

- *La regulación* que puede vetar determinadas soluciones de circularidad y aprovechamiento, tanto del agua regenerada como de recursos recuperados del agua.
- *Los silos* y la falta de conexiones entre la investigación, las empresas, la administración y la sociedad. No se generan todas las sinergias posibles, y con frecuencia se duplican esfuerzos. Es infrecuente la visión global y el acompañamiento de la innovación en todas sus etapas. Es necesario un mejor flujo de información; esto es, la transferencia de conocimiento.
- Aún persiste en muchas entidades una cultura de evitar el error y de *miedo al fracaso*. La aversión al riesgo es frecuente, en el sector privado y en el público, y solo bajo la presión, de normativas o de la competencia, se producen movimientos. El sector del agua es conservador... pero no lo es más que cualquier otro sector. Aquí sí, los valientes tendrán su recompensa.
- Para que una innovación traiga un retorno, necesita multiplicarse. *La escalabilidad* es imprescindible, y así muchas de las innovaciones tienen un recorrido muy corto y una rentabilidad dudosa, porque son soluciones *ad hoc*, o bien porque no hay un mercado que quiera pagar por ese producto o servicio.
- Otra barrera clásica es *la aversión a lo ajeno*, el «not made in here» o «mi caso es distinto». En ocasiones, son excusas que defienden la mediocridad. El concepto de *open innovation* de Henry Chesbrough es la mejor medicina para estos casos. Es la humildad de reconocer que «ahí fuera» posiblemente haya alguien que lo ha pensado antes que yo, o que puede tener una solución válida, y con quien yo debería colaborar para hacer que sea un éxito. Un éxito para ambos.

ECOSISTEMA E INSTRUMENTOS

Este artículo se focaliza en los retos de la innovación en el agua, pero no querría acabar sin dejar una visión optimista, porque hay elementos que invitan a este optimismo y mecanismos que son una ayuda decisiva para impulsar la innovación.

Existe financiación pública y privada. Es cierto, como hemos visto, que España no es el mejor ejemplo. También que la situación ha mejorado y que existen mecanismos privados y públicos en Europa y en diversas regiones que ofrecen multitud de instrumentos de financiación. Puede resultar complejo, pero también hay consultoras, universidades, centros tecnológicos y organismos de la administración que nos pueden guiar a través de este camino. No vale no intentarlo porque parece difícil. Un ejemplo de oportunidades y de crecimiento en inversión son los PERTES. Es cierto que no es un elemento permanente, que estas ayudas se acabarán, pero una vez más, aprovechemos lo que disponemos hoy.

Hay mucho dinero privado interesado en proyectos emprendedores interesantes. Especialmente si son «verdes». Los bancos necesitan cubrir este tipo de inversiones, aunque sea por imperativo de la taxonomía europea. De esta forma, abundan las incubadoras, aceleradoras, *venture builder*, *corporate venture* y *venture capital*. Cada uno trabaja en un rango de madurez y cumple una función. Estos instrumentos de apoyo a la emprendeduría también tiene especialización temática, y después del boom de las *e-finance*, ha llegado el turno a la *deep-tech* en la que se sitúa buena parte de las *green-tech*. La economía azul es también un sector en auge. No en vano el European Institute of Technology va a lanzar una comunidad de conocimiento de innovación (KIC, en inglés) en ecosistemas y sistemas de agua, marinos y marítimos a inicios del 2025.

Los *sandbox* regulatorios son espacios donde se pueden probar tecnología sin estar sometidos a toda la regulación. Estos entornos de pruebas controladas, permiten objetivar las barreras regulatorias e impulsar cambios que permiten innovaciones llenas de sentido.

Las universidades y los centros tecnológicos son los especialistas en innovación, y la mayoría están volcados en ayudar a las empresas y a la sociedad, son un aliado indispensable para innovar, así que colaborar entre ellos y con ellos es un ingrediente de éxito para la innovación.

La innovación en el sector del agua no es muy distinta a la de otros sectores, aunque hemos visto que tiene algunas peculiaridades. «Que innoven otros» no es una opción sostenible en el tiempo, hay medios disponibles para impulsarla. Así que no temamos los retos, más bien, identifiquemos las necesidades y trabajemos de manera abierta para poner a disposición nuevas soluciones que mejoren la competitividad del sector, el bienestar de los ciudadanos, el progreso de la sociedad y generen un impacto ambiental positivo.

Presa de Alto Tâmega. © Iberdrola.





CATORCE

AGUA Y ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA: CENTRALES HIDROELÉCTRICAS REVERSIBLES. EL CASO DE IBERDROLA

Eduardo Rojo Martínez



Central de Gouvães.
Montaje del distribuidor. © Iberdrola.

La transición hacia la descarbonización de la energía eléctrica es un camino en el que gradualmente habrá que ir dejando atrás tecnologías de generación eléctrica basadas en combustibles fósiles e ir dando paso a energías renovables con cero emisiones a la atmósfera, principalmente energías eólica y solar fotovoltaica. Pero para que ese cambio se produzca es imprescindible el elemento clave que supone el almacenamiento de energía. A día de hoy, las centrales hidroeléctricas reversibles, son el medio de hacerlo a gran escala. El agua es el elemento vehicular, preciado y valioso, que permite a los grupos de las centrales de bombeo almacenar la energía producida en momentos de gran generación solar o eólica para ser utilizada cuando escasee el sol o el viento. Afortunadamente, el uso del agua en circuito cerrado en el ciclo turbinación-bombeo hace que las sequías no afecten a estas centrales hidroeléctricas.

NECESIDAD DE CENTRALES REVERSIBLES

Atendiendo a la mayor flexibilidad requerida en el sistema eléctrico a medio y largo plazo a través del almacenamiento, así como a la integración de las energías renovables existentes y que se prevén desarrollar próximamente, es necesario ampliar el almacenamiento de energía que permita regular los excedentes de producción de las energías renovables no gestionables para maximizar el aprovechamiento de dicha energía y minimizar los vertidos (*curtailment*).

A la vista de los objetivos definidos en la actualización del PNIEC (Plan Nacional Integrado de Energía y Clima) para el período comprendido entre 2023 y 2030, que contempla la implantación masiva de generación renovable no gestionable y el cierre de las centrales térmicas, la ausencia de almacenamiento provocaría una pérdida de gestionabilidad del sistema, lo que puede poner en riesgo la seguridad del suministro. Por ello, el almacenamiento energético resulta un elemento crítico en el sistema eléctrico, y así lo contempla la última revisión del PNIEC donde se prevé la instalación de 22 GW en sistemas de almacenamiento. Especialmente relevante es el papel que juegan las centrales hidráulicas reversibles por su madurez tecnológica, su elevada vida útil y la duración de sus ciclos de almacenamiento.

Las energías fotovoltaica y eólica hacen uso de fuentes de energía primaria no gestionables, no garantizan una estabilidad en el sistema eléctrico en escenarios de elevada penetración, dado que la disponibilidad del recurso no siempre coincide con la demanda, resultando en vertidos en momentos en los que hay una alta producción y baja demanda; por el contrario, se produce la necesidad de otras fuentes de generación cuando el recurso renovable es escaso y la demanda supera dicha producción.

Gracias a la flexibilidad de las centrales reversibles, su operación se adapta de forma rápida a la curva de demanda-producción con efecto diario y, además, por su elevada

capacidad de almacenamiento energético, es posible gestionar la energía de forma diaria, semanal e incluso estacional en el caso de que se opere entre dos grandes embalses.

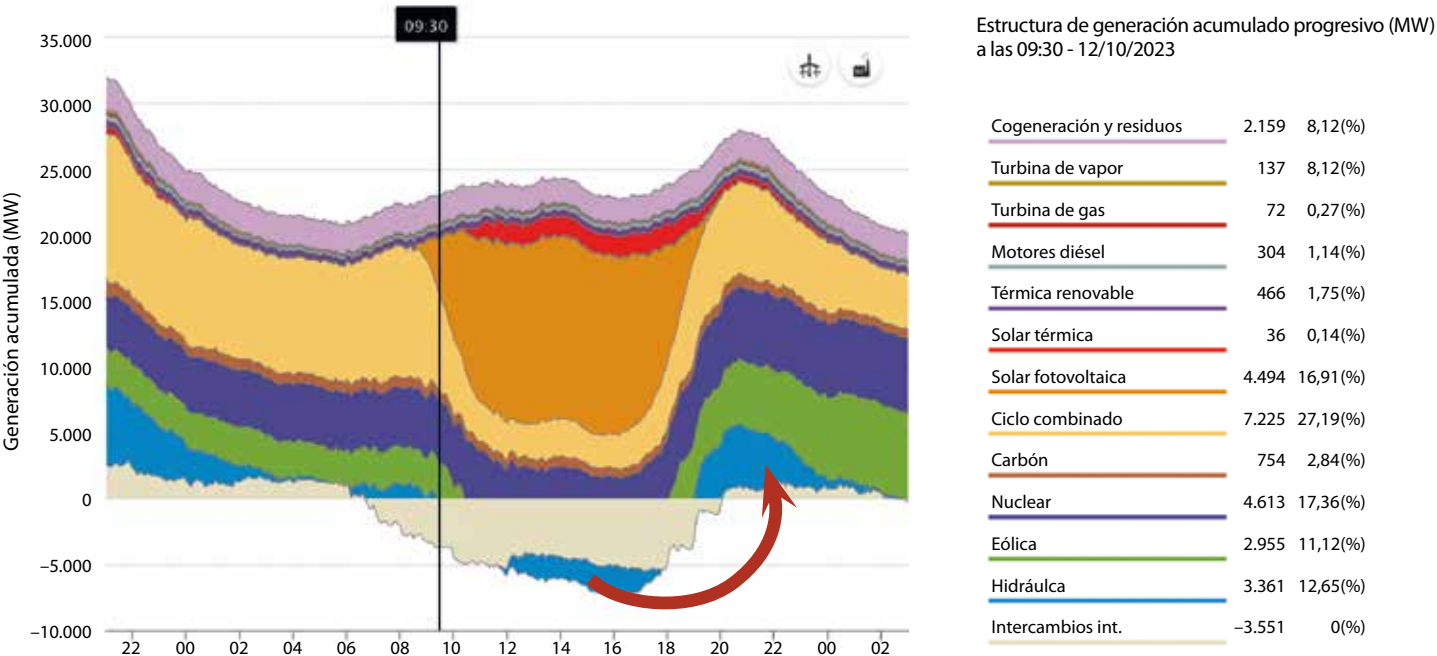


Figura 1. Traslado de la energía bombeada en periodos de baja demanda hacia momentos de baja producción renovable y alta demanda. Fuente: acortar.link/gqo3Ne.

Añadido, a la problemática de la no gestionabilidad del recurso primario, se encuentran las características técnicas de estas fuentes de energías renovables. Las centrales hidroeléctricas reversibles equipadas con grupos generadores de elevada potencia, con gran reserva energética y disponibilidad inmediata de esta, son capaces de amortiguar perturbaciones en la red, como puede ser el desacoplamiento de un gran grupo termoeléctrico de energía base o grandes pérdidas de demanda, asegurando la estabilidad dinámica de la red y actuando así como grandes reservas instantáneas del sistema eléctrico.

Además, una de las cualidades de las centrales hidroeléctricas, tanto convencionales como de bombeo, es su capacidad de arranque autónomo (*black-start*) en caso de producirse un «apagón» en el sistema eléctrico, dada su capacidad de arrancar e inyectar de nuevo

energía en la red, permitiendo a otras centrales de generación poder volver a conectarse y devolver al sistema eléctrico su funcionamiento en equilibrio. Este servicio es, por tanto, un elemento fundamental que garantiza la seguridad de suministro y de funcionamiento de la red. Iberdrola ya cuenta con centrales reversibles —como es el caso de Aldeadávilas II— que aportan este servicio a la red.

LA SEQUÍA Y EL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN CENTRALES REVERSIBLES

El agua siempre ha sido un bien preciado y valioso. En los últimos años se observa una disminución de la pluviometría, pero también una distribución de dichas precipitaciones cada vez más irregular y con eventos extremos. Estos eventos extremos se manifiestan o bien por defecto de precipitaciones, dando lugar a sequías, o bien por exceso, dando lugar a avenidas e inundaciones.

La sequía es uno de los efectos del cambio climático. Los cambios en precipitación, el aumento de temperatura, el agotamiento del agua subterránea y las decisiones humanas están agravando las condiciones de sequía. La sequía no siempre está relacionada con la precipitación; el deshielo más temprano, asociado al incremento de temperaturas, puede provocar que el agua esté disponible antes de que se necesite. Por tanto, la labor de los embalses para almacenar agua durante todos los períodos estacionales del año es fundamental.

El gran temor durante las alteraciones hídricas consecuentes del cambio climático es que los sistemas de gestión de agua no sean resilientes ante sus posibles efectos.

Las centrales hidroeléctricas convencionales, asociadas a un embalse, dependen en general de las aportaciones de los ríos. En el caso de las centrales fluyentes, la dependencia es total con el caudal instantáneo del río, no siendo así en el caso de las centrales que cuentan con embalses de regulación, ya que dependiendo del tamaño de sus embalses pueden independizar las aportaciones de su producción. Pero, ante periodos prolongados de sequía, incluso los grandes embalses de regulación ven tan reducidas sus reservas que pueden llegar a quedar fuertemente condicionadas las producciones de las centrales hidroeléctricas asociadas.

Las centrales de bombeo tienen una característica que las hace resilientes a las sequías: no se produce un uso consuntivo del recurso hídrico durante la operación. Las centrales reversibles hacen uso de exactamente la misma agua para turbinar y para bombear; esto es, para generar energía eléctrica y para almacenarla. Por lo que permiten que el resto de usos del agua no se vean afectados por el aprovechamiento, al no consumirse agua. Las únicas pérdidas que se producen son debidas a la evaporación natural del agua, que tienen lugar en el depósito superior o en el inferior. Estas pérdidas, en general despreciables frente al

volumen utilizado en los ciclos de bombeo, se ven alteradas dependiendo del grado de insolación, de la humedad del aire y de la velocidad del viento, pero que se ven en mayor o menor medida parcialmente compensadas por las propias precipitaciones sobre la superficie de estos depósitos.

Por tanto, en las centrales reversibles de bombeo la hidráulica no es un factor limitante en su operación, siendo relevante únicamente para las reposiciones de las pérdidas mencionadas.

Buena prueba de ello es el desarrollo de proyectos de bombeo que están teniendo lugar en zonas especialmente áridas, como son Marruecos (Abdelmoumen 350 MW, El Menzel 300 MW), Israel (Kokhav Hayarden Pumped Storage Power Station 344 MW) o Emiratos Árabes Unidos (Hatta, 250 MW).

CARACTERÍSTICAS ESENCIALES DEL BOMBEO

El almacenamiento hidráulico de energía mediante centrales reversibles presenta una serie de ventajas de entre las que se pueden destacar las siguientes:

- Papel fundamental para la flexibilidad y *seguridad del suministro eléctrico*.
- Aportan *firmeza a gran escala* frente a las oscilaciones de generación-demanda
- Almacenan energía en periodos de sobreproducción, permitiendo *mayor integración de renovables no gestionables, reduciendo los vertidos* y colaborando en la descarbonización.
- *Vida útil elevada*. Es sin duda una de las grandes diferencias entre este sistema de almacenamiento con respecto a otras tecnologías. La obra civil, con una adecuada conservación y mantenimiento de las infraestructuras, tiene una vida superior a los 100 años, mientras que el equipamiento electromecánico también puede tener una vida larga con un correcto mantenimiento y llegar a los 50 o 60 años, pudiendo incluso alargarse aún más con rehabilitaciones importantes de equipos y componentes.
- *Elevada energía almacenada y horas de almacenamiento*. El almacenamiento hidráulico supone una reserva a gran escala, en el que los aprovechamientos disponen de reservas del orden de GWh y pueden operar durante más de 10 horas a potencias muy elevadas.
- *Tecnología madura*. EL desarrollo importante de los bombeos se produjo en paralelo al desarrollo nuclear en la década de los años 70 y los 80. Por lo tanto, hay una experiencia muy positiva y contrastada en la operación de los grupos reversibles y de la obra civil asociada, con más de medio siglo. Además, los grupos hidroeléctricos son máquinas muy fiables y robustas, lo que se traduce en una alta disponibilidad.

En el mundo hay instalados 179 GW de almacenamiento hidroeléctrico de bombeo, lo que supone a nivel global el 95 % de del almacenamiento eléctrico.¹

¹ 2024 World Hydropower Outlook, IHA (International Hydropower Association).



Potencia hidroeléctrica reversible instalada por regiones	
Región	Potencia instalada (GW)
Asia Oriental y Pacífico	90,5
Europa	54,1
América del Norte y Central	22,3
Asia Central y Meridional	3,4
África	7,7
Sudamérica	1,0
Total	179

- *Incorporación de máquinas síncronas*, necesarias para el correcto funcionamiento del sistema eléctrico (*must-run síncrono*). El sistema eléctrico, para funcionar de manera segura y estable, necesita disponer de determinadas capacidades de los generadores síncronos como son: contribuyen al control de tensión —sobre todo en períodos valle—, al control de frecuencia en régimen estático y transitorio (inercia), aportan potencia de cortocircuito, entre otras, que dadas sus características constructivas son aportadas por los mismos. Esta tecnología por tanto da firmeza y estabilidad a la red eléctrica ante perturbaciones. Además, la energía hidroeléctrica es la única fuente de generación renovable que a gran escala, con la tecnología actual, utiliza máquinas eléctricas síncronas.
- Pueden operar de forma *independiente a la hidráulidad*: el uso del agua es «no consuntivo», por lo que la producción no depende del aporte de agua que llegue por el cauce del río.

- *Mejora la calidad del agua de los embalses* al introducir mayor recirculación del agua. La experiencia y los modelos indican que el mover grandes cantidades de agua entre dos embalses, o entre un embalse y un depósito superior, hace que la estratificación del agua sea más difícil. Lo que redundará en una mejora de la calidad del agua.
- *Desarrollo económico nacional.* Hay participación de empresas nacionales en todas las áreas del proyecto, generando empleo cualificado. En España contamos con excelentes profesionales y empresas dedicadas al mundo de la ingeniería y la construcción, tanto de obra civil como electromecánica. A excepción de las grandes turbinas —empresas principalmente europeas—, el suministro y montaje de equipos también se puede hacer sin salir de nuestras fronteras. Por lo que se estima que un 85-90 % de la inversión total de un proyecto se puede realizar con empresas españolas, un dato muy a tener en cuenta por lo que puede ser el efecto tractor en la economía.
La no dependencia de países fuera de la Unión Europea, especialmente para los equipos electromecánicos, es algo a tener muy en cuenta. En Europa hay fabricantes de turbinas con experiencia contrastada de más de 100 años que son referentes mundiales en el sector.
- Otro aspecto importante a tener en cuenta en los proyectos de centrales reversibles es que ayudan a *fixar población* en zonas que sufren despoblación. Por la propia naturaleza de estos proyectos, suelen estar en zonas rurales donde ha habido un descenso gradual de la población a lo largo de los años. Por lo que contribuyen a generar puestos de empleo en zonas con pocas oportunidades laborales. El impacto local se complementa también con la creación de empresas, generalmente PYMES, al albor de la construcción pero con vocación de continuidad asociadas al mantenimiento de las centrales. Por lo tanto, los proyectos de centrales de bombeo son una fuente de riqueza y de estabilidad en las zonas donde se implantan, teniendo un impacto socioeconómico muy positivo.
- Son proyectos muy intensivos en CAPEX con largos y complejos procesos de tramitación que requieren una fuerte solvencia técnica y económica para su satisfactoria ejecución. A diferencia de otras tecnologías renovables de generación, el bombeo conlleva complejas obras subterráneas de gran magnitud, ejecución de circuitos hidráulicos subterráneos de muy alta presión que requieren una gran experiencia tanto en diseño, construcción y operación de grandes centrales hidroeléctricas reversibles.

INNOVACIÓN EN CENTRALES REVERSIBLES DE BOMBEO

Aunque, como se ha comentado, las tecnologías que componen las centrales de bombeo son maduras y contrastadas con la experiencia de muchos años, existe todavía margen de innovación para mejorar la flexibilidad, el rendimiento, la estabilidad, la producción y el rango de operación de dichas centrales.

- *Velocidad variable.* La velocidad variable permite flexibilizar el modo de funcionamiento en bombeo, con un rango de potencias mayor adaptando la potencia absorbida a las necesidades del sistema eléctrico en cada momento. Por otro lado, variar la velocidad en modo turbinación permite obtener el máximo rendimiento en cada punto de operación, aumentando la eficiencia de los grupos en cargas parciales. Así mismo, optimiza el balance energético del aprovechamiento, ya que mejora el almacenamiento de la potencia en exceso, reduciendo el número de paradas y arranques, extendiendo el rango de operación de la planta cuando los niveles de agua son menores de los nominales. Además, desde el punto de vista eléctrico, mejora la estabilidad de la tensión y la frecuencia del sistema; mientras que, desde el punto de vista mecánico, se reduce la fatiga a la que se ve sometida la máquina hidráulica. En cuanto a las tecnologías utilizadas para este uso, mayoritariamente se están utilizando generadores síncronos con convertidores denominados Full-Converter (FSFC), como es el caso de la reconversión de los grupos que Iberdrola está realizando en la central de Torrejón. Si bien en algunas instalaciones con grupos de potencias mayores se ha optado por máquinas asíncronas doblemente alimentadas (DFIM), ninguna de estas en las centrales de Iberdrola.
- *Cortocircuito hidráulico.* El cortocircuito hidráulico consiste en que en la misma instalación existan diferentes grupos funcionando simultáneamente en modo turbinación y en modo bombeo. El funcionamiento del aprovechamiento de este modo permite ampliar la flexibilidad del aprovechamiento en su conjunto, adaptándose a las necesidades del sistema eléctrico en cada momento, ampliando el rango de operación de la planta, permitiendo regular la energía absorbida en modo bomba y regular el caudal bombeado, así como participar en servicios de control de frecuencia en modo bombeo. Este funcionamiento es utilizado por Iberdrola en aprovechamientos como La Muela o Gouvães, y de igual modo se ha previsto su uso en la futura central de Alcántara II, donde ya se implementado en los estudios iniciales de diseño.
- *Grupos ternarios.* Son aquellos en los cuales en el mismo eje conviven una bomba (simple o multi etapa), un alternador síncrono y una turbina tipo Pelton o Francis. Si bien, este tipo de grupos requiere de mayores dimensiones en caverna y, por tanto, hay un incremento de costes civiles. Esta solución adicionalmente tiene la capacidad de permitir cambios rápidos entre modos de funcionamiento sin perder el sincronismo, así como la posibilidad de implementar el cortocircuito hidráulico en un único grupo, añadiendo control de frecuencia durante el bombeo, de especial interés en redes con baja inercia. Dadas las limitaciones mecánicas que presentan los grupos binarios reversibles para grandes saltos, en algunos casos esta solución se hace indispensable.
- *Servicios de estabilidad de red.* Las centrales hidráulicas participan actualmente en servicios de estabilidad de red, como el ya nombrado arranque autónomo (*black start*). La tecnología y los requisitos normativos avanzan para que este tipo de centrales, dadas sus características técnicas, participen también en otros servicios de red, como son los mercados de energía reactiva, así como en posibles servicios de flexibilidad: como el control rápido

de frecuencia (FFR), su capacidad para realizar arranques y paradas rápidas, así como su eficiencia en las transiciones entre distintos modos de funcionamiento.

- *Extensión de la vida útil.* También hay un campo importante dentro de la innovación que permite mediante técnicas de monitorización, ampliar los rangos de funcionamiento de centrales en operación, permitir un funcionamiento de los grupos con menos solicitaciones y, por tanto, permitir la extensión de la vida útil de las mismas.

PROGRAMA ALMACENAMIENTO HIDRÁULICO DE ENERGÍA Y NUEVO USO DEL AGUA

En los últimos meses, se han llevado a cabo una serie de iniciativas para potenciar la promoción de proyectos de centrales hidroeléctricas reversibles, con el objetivo de aumentar la potencia instalada de almacenamiento en España.

El 28 de diciembre de 2023 se publica en el Boletín Oficial del Estado el Real Decreto-ley 8/2023, de 27 de diciembre, por el que se adoptan una serie de medidas de diversos ámbitos, entre los que se incluye la modificación del texto refundido de la Ley de Aguas, aprobado por RDL 1/2001, de 20 de julio. De tal forma que se modifica el artículo 60 de dicha Ley de Aguas, creándose un nuevo uso, y dando prioridad al uso de «almacenamiento hidráulico de energía» frente al resto de usos industriales.

Por otro lado, la Dirección General del Agua (DGA), se encuentra actualmente trabajando en el desarrollo del Programa Nacional de Almacenamiento Hidráulico de Energía. Este plan plantea la utilización de embalses de titularidad estatal, como depósitos en nuevas instalaciones de almacenamiento hidráulico de energía, con el objetivo de dar la oportunidad a promotores de aprovechar infraestructuras existentes y cumplir los objetivos del PNIEC. Este programa va en línea con la Estrategia de Almacenamiento Energético definida por el Gobierno de España en 2020, que destacaba la utilización del gran potencial de embalses existentes, no solamente de titularidad estatal, para el desarrollo de nuevos bombeos.

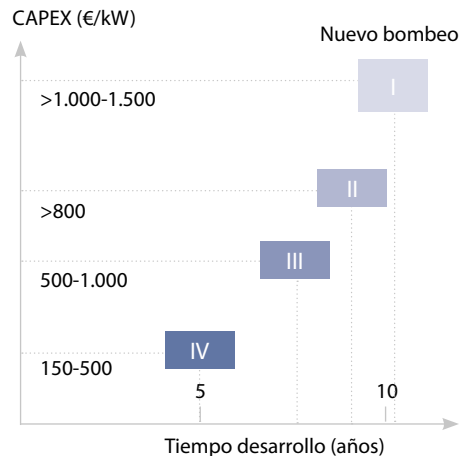
El programa, cuyo desarrollo será de forma escalonada hasta el año 2040, atenderá a los objetivos del PNIEC, de la planificación de la red de transporte, de la planificación hidrológica y de la compatibilidad de usos existentes

Como resultado, el programa específico plantea el desarrollo de 29 proyectos de centrales de bombeo puro y 8 proyectos de centrales de bombeo mixto, con hasta 77 GWh de capacidad de almacenamiento conjunta que, funcionando en regulación diaria, implicaría una potencia de más de 8 GW.

Se espera que los primeros concursos públicos relativos a los proyectos prioritarios sean convocados a finales de 2025, y de forma escalonada vayan convocándose el resto en función de las necesidades del sistema eléctrico y de la finalización de las concesiones que se encuentran en vigor.

TIPOS DE PROYECTOS DE CENTRALES DE BOMBEO

Ratio de inversión y plazo de desarrollo según la
tipología del proyecto



Los proyectos de nuevas centrales reversibles de bombeo pueden diferenciarse según las actuaciones que se requieran para llevarse a cabo:

- *Tipo I. Greenfield, nuevo bombeo.* Estos proyectos parten de una situación en la cual no hay infraestructuras existentes, no existen embalse superior ni inferior ni una central existente, por lo que se parte de cero y por tanto requiere la ejecución de dos depósitos, una nueva central, así como el resto de elementos auxiliares necesarios. Es la tipología que requiere una mayor inversión, dada la magnitud de las actuaciones a llevar a cabo.
- *Tipo II. Creación nuevo depósito superior.* Cuando existe un embalse inferior y próximo a este se encuentra desnivel elevado en el cual sea viable la ejecución de un nuevo depósito superior, el proyecto pertenecería a esta tipología. El impacto de las actuaciones es menor, dado que existe un embalse inferior, pero la complejidad reside en la compatibilidad del nuevo aprovechamiento con el resto de usos existentes, que no solamente deberán ser compatibles con el uso de almacenamiento hidráulico de energía durante su operación, sino que también durante su construcción, dado que podrán verse afectados durante la ejecución de la toma inferior en el embalse existente.
- *Tipo III. Conexión de embalses existentes.* A esta tipología pertenecen aquellos proyectos en los que no es necesaria la construcción de nuevos depósitos, dado que ya existen dos embalses entre los cuales hay un desnivel a una distancia reducida que permite la implantación de un aprovechamiento hidroeléctrico de bombeo. Por tanto, las actuaciones se reducen al circuito hidráulico, central y elementos auxiliares.
- *Tipo IV. Cambio de turbina por turbina reversible.* Cuando existe sumergencia suficiente que permita la sustitución de una turbina existente por una nueva turbina reversible que permita tanto la turbinación como el bombeo, y dos embalses que se encuentren conectados por un aprovechamiento existente, el proyecto en cuestión se encontrará dentro de esta tipología. Las actuaciones necesarias se verían reducidas por tanto a aquellas de ámbito electromecánico, viéndose reducidas las actuaciones civiles a aquellas que hagan posible alojar el nuevo grupo en la ubicación del grupo original.

En el gráfico lateral, se muestra una figura que muestra la intensidad de la inversión y el plazo de ejecución de los proyectos según la tipología previamente descrita.

EL BOMBEO EN IBERDROLA

No solo en España, sino en toda la península ibérica, Iberdrola opera centrales hidroeléctricas de bombeo. Esto incluye áreas próximas a la frontera entre Portugal y España, donde se ubica el Aprovechamiento Hidroeléctrico Gouvães.

Actualmente, Iberdrola se encuentra a la vanguardia en almacenamiento de energía, con una capacidad instalada de 4,5 GW en España y Portugal, utilizando tecnología de bombeo, que es el método más eficiente de almacenamiento energético en la actualidad.

A finales de 2022, se alcanzó el hito de una capacidad de almacenamiento de 101,2 GWh, superando su previsión en más del 10 %. Además, tiene como meta incrementar su capacidad hasta los 119 GWh para el 2026. Entre las centrales hidroeléctricas de bombeo más relevantes de Iberdrola se encuentran La Muela, Villarino y Gouvães.

Iberdrola viene apostando por el bombeo hidroeléctrico desde la década de los años 60 del pasado siglo. Son pues, más de 60 años de experiencia de Iberdrola en esa tecnología, en los que las centrales hidroeléctricas de bombeo se están erigiendo como una herramienta fundamental en la gestión del sistema energético del futuro y para la integración de renovables. Se trata de la tecnología que aporta más flexibilidad al sistema, esencial para la transición energética y la migración hacia un sistema 100 % descarbonizado.



Bombeos de Iberdrola en operación en la península ibérica. © Iberdrola.

Complejo hidroeléctrico Cortes-La Muela.
© Iberdrola.



Centrales de bombeo en operación en Iberdrola		
Central De Bombeo	Potencia (MW)	Año entrada en operación
Bibey	284	1960
Torrejón	65	1966
Villarino	810	1970
Conso	228	1974
Gabriel y Galán - Guijo De Granadilla	162	1982
Aldeávila	420	1986
La Muela I	628	1988
Soutelo	206	1994
La Muela II	854	2015
Gouvães	880	2022
Valparaíso	68	2024
Santiago Jares	50	2024
Valdecañas	390	2027

LA GIGABATERÍA DE LA MUELA

Sin duda, una de las instalaciones más relevantes en Iberdrola, y en el panorama europeo, es el aprovechamiento hidroeléctrico de Cortes - La Muela, ubicado en el término municipal de Cortes de Pallás (Valencia). Por medio de este aprovechamiento, se satisface la demanda de la zona del Levante español a través de un complejo de alta potencia generadora, que tiene una gran capacidad para adaptarse a las fluctuaciones de la demanda y para contribuir a la regulación de la energía generada tanto por las grandes centrales térmicas y nucleares como por los parques eólicos y fotovoltaicos.

El complejo de Cortes - La Muela consta de dos elementos funcionalmente diferentes, pero íntimamente relacionados, que son el Salto de Cortes II y el Salto de Bombeo de La Muela.

El primero es una instalación convencional de generación de energía, que aprovecha el caudal y el desnivel del tramo del río Júcar. El Salto de Cortes II se crea por la construcción de una presa de hormigón cerca del municipio de Cortes de Pallás. Al pie de la presa se encuentra la central hidroeléctrica de Cortes II de 280 MW de potencia, capaz de generar 323 GWh anuales.

El segundo, el Salto de Bombeo de La Muela, es un sistema de acumulación por bombeo puro, que permite trasladar el excedente de la energía producida por las centrales térmicas

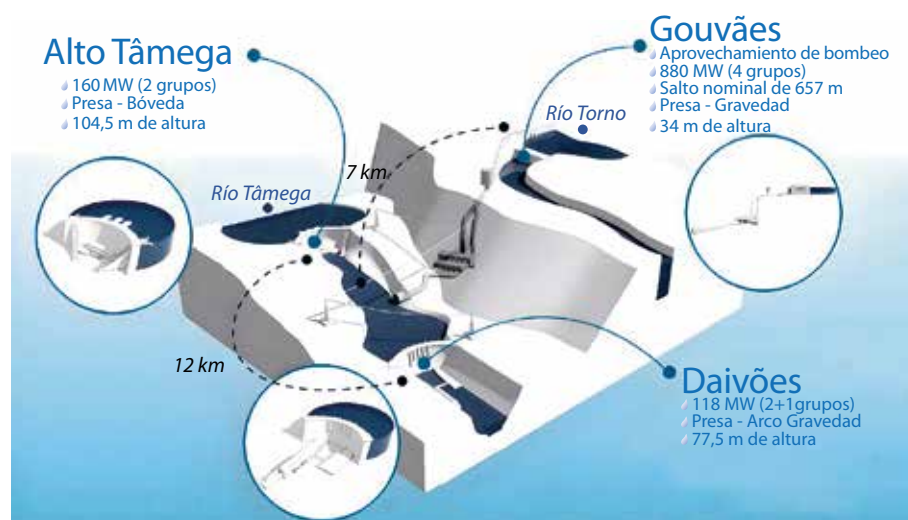
y nucleares y parques eólicos y fotovoltaicos, a las horas de máxima demanda. Al mismo tiempo, constituye una considerable reserva de energía, de disponibilidad inmediata y elevada potencia, para suplir cualquier desacoplamiento de un gran grupo térmico, o las bruscas variaciones de potencia de parques eólicos y fotovoltaicos, y estabilizar la red.

Su construcción se ha llevado a término en dos fases. En el año 1989 entraron en funcionamiento el salto de Cortes II y los tres primeros grupos de La Muela; y, posteriormente, en el año 2015, los cuatro grupos adicionales de La Muela. La Fase I está dotada con tres grupos, y la Fase II con cuatro grupos. Los siete grupos reversibles turbina-bomba alcanzan los 1.293 MW en bombeo y 1.482 MW en generación. El embalse superior se crea por excavación de un gran depósito, cerrado por medio de un dique de escollera. Su capacidad permite el funcionamiento ininterrumpido de la central a plena carga durante 16 horas, entregando a la red durante ese periodo una energía de 23.712 MWh.

EL COMPLEJO HIDROELÉCTRICO DEL TÂMÉGA

El Sistema Electroproductor del Tâmega o Complejo del Tâmega se trata de uno de los mayores proyectos hidroeléctricos realizados en Europa en las últimas tres décadas, con una capacidad instalada de 1.158 megavatios (MW), equivalente al 5 % de la potencia total instalada actualmente en Portugal.

Es un proyecto 100 % *greenfield*; es decir, construido desde cero en una zona sin instalaciones preexistentes. Iberdrola ha liderado todas las fases del proyecto, desde la promoción, la ingeniería conceptual, el desarrollo de la ingeniería de detalle en varias disciplinas, la fiscalización de la construcción y, finalmente, los trabajos de comisionamiento.



Esquema complejo hidroeléctrico del Tâmega. © Iberdrola.

TRES CENTRALES HIDROELÉCTRICAS CON SUS GRANDES PRESAS Y OTRAS INSTALACIONES ASOCIADAS

El Sistema Electroprodutor del Tâmega que entró en operación a partir de 2022 está compuesto por tres aprovechamientos hidroeléctricos:

Central de bombeo de Gouvães

- Es la gran central de bombeo con una potencia instalada de 880 MW, con cuatro grupos reversibles de 220 MW cada uno.
- El embalse superior (presa de Gouvães) tiene una capacidad de casi 14 hm³ y permite turbinar a máxima potencia durante 24 h y almacena una energía de 20 GWh, lo que permite abastecer integralmente al área metropolitana de Oporto durante 24 horas.
- Dentro del embalse superior se ubica la toma superior desde donde arranca un circuito hidráulico de más de 7 km entre el embalse superior y el embalse inferior (Daivões), con un salto bruto de 660 m.
- La caverna de la central está excavada en la roca a más de 300 de profundidad, con un volumen equivalente a 25 piscinas olímpicas.
- La presa de Daivões hace la función de depósito inferior.

Centrales hidroeléctricas de Alto Tâmega y Daivões

- Ambos son aprovechamientos hidroeléctricos convencionales de turbinación con presa y central a pie de presa. Alto Tâmega tiene dos grupos con potencia unitaria de 80 MW, y Daivões, dos grupos con potencia unitaria de 57 MW.
- Alto Tâmega tiene una presa bóveda o de doble curvatura de 104,5 m de altura.
- Daivões es una presa arco gravedad —solo curvatura en planta— de algo más de 78 m de altura, con un volumen de hormigón en masa vibrado. Actúa de depósito inferior de la central de bombeo de Gouvães.

La magnitud de la construcción de este gran proyecto greenfield, con sus centrales, presas y otras instalaciones asociadas —como subestaciones, líneas, accesos o servicios afectados— se puede resumir en la siguiente tabla:

Principales magnitudes del complejo Tâmega	Total
Accesos	55 km
Excavaciones exteriores	3.250.000 m ³
Excavaciones subterráneas	750.000 m ³
Obras subterráneas (túneles o galerías)	12,5 km
Obras subterráneas (pozos)	1.270 m
Hormigón proyectado	31.000 m ³

Hormigón estructural	400.000 m³
Hormigón de presa	550.000 m³
Acero estructural	25.000 t
Acero blindajes circuitos hidráulicos	12.7000 t
Líneas de media-alta tensión	58 km
Cables (fuerza, control, iluminación)	900 km
Principales magnitudes del complejo Tâmega	Total

El almacenamiento de energía es un elemento fundamental para la transición hacia un modelo energético sostenible. El Sistema Electroproductor del Tâmega, con su capacidad de bombeo, permite almacenar energía renovable durante las horas de mayor producción y utilizarla posteriormente cuando la demanda es mayor y no se puede contar con fuentes intermitentes. Es importante destacar que una vez concluido el proyecto permite evitar la emisión de 1,2 millones de toneladas de CO₂ al año.

El desarrollo de nuevas centrales hidroeléctricas de bombeo presenta desafíos ambientales, técnicos y económicos, pero pueden superarse y el ejemplo perfecto es el Sistema Electroproductor del Tâmega.

La construcción del Sistema del Tâmega ha supuesto un importante impulso para la economía portuguesa. En su punto álgido, durante algo más de 3 años, la obra ha contado con cerca de 2.000 trabajadores en la obra, y más de 30.000 personas han participado en el proyecto en diferentes momentos. Se han trabajado casi 23 millones de horas hombre sin accidentes de gravedad, todo gracias a la intensa fiscalización de los trabajos y al control de los técnicos de prevención.

Además, se ha priorizado la contratación de empresas locales, adjudicando más de 1.000 contratos, de los cuales 78 han superado el millón de euros. En total, se han adjudicado más de 900 millones de euros a empresas portuguesas y españolas. En total, se han generado más de 13.500 trabajos entre empleos directos e indirectos.

La transición energética requiere un mix energético adecuado, de forma que podamos disponer de energía libre de emisiones en cualquier momento y ante cualquier circunstancia con la máxima eficiencia. El camino para alcanzarlo pasa por el despliegue de energía eólica y fotovoltaica, pero para poder garantizar la integración de enormes cantidades de energía no gestionable será necesario apoyarse en el almacenamiento hidráulico de energía mediante centrales reversibles. Las centrales de bombeo son, a día de hoy, la única forma de almacenar

energía eléctrica a gran escala. Por tanto, se puede afirmar que las centrales de bombeo se han de convertir, en la columna vertebral del despliegue de las energías renovables, y por ende, de la descarbonización de la generación eléctrica.

España, gracias a su orografía, a las grandes presas existentes con las que ya cuenta (1.200, según SPANCOLD), a la experiencia en operar y mantener centrales hidroeléctricas y al conocimiento y buen hacer de sus ingenierías y empresas constructoras; tiene ante sí un buen número de oportunidades para construir proyectos muy interesantes de centrales reversibles de almacenamiento hidráulico de energía.

Iberdrola ha identificado que existe la posibilidad de construir más de 10 GW nuevos de bombeo en los próximos años con un coste razonable, utilizando embalses ya existentes.

2. SPANCOLD: Comité Nacional Español de Grandes Presas en sus siglas en inglés.

Central de Gouvães. Caverna y montaje cámara espiral © Iberdrola.







QUINCE

DESCARBONIZACIÓN EN EL SECTOR DEL AGUA: OBLIGACIÓN vs OPORTUNIDAD

Enrique Catalina Carmona

Depuradora en Emasagra.



Contexto Global

El cambio climático es uno de los mayores desafíos a los que nos enfrentamos de manera global en el planeta y, en particular en el sector del ciclo integral del agua, supone uno de los grandes retos de este siglo. Las emisiones antrópicas de gases de efecto invernadero (GEI) son la principal causa del cambio climático.

Frenar el cambio climático es una obligación del gobierno recogida en la Ley 7/2021 de cambio climático y transición energética, en ella se recoge la reducción de emisiones de GEI principalmente enfocado al abandono del uso de combustibles fósiles. Esta Ley está amparada en el marco internacional de la Agenda 2030 y el Acuerdo de París firmado en 2015, que establece una arquitectura sólida y universal que tiene como objetivos globales: mantener el incremento de la temperatura media global por debajo de los 2°C respecto a los niveles preindustriales e, incluso si es posible, por debajo de 1,5°C; asegurar la coherencia de los flujos financieros con el nuevo modelo de desarrollo; y aumentar la capacidad de adaptación a los efectos adversos del cambio climático y promover la resiliencia.

La lucha contra el cambio climático y la transición energética conllevan transformaciones tecnológicas y cambios en la industria. Por ello, es necesario ligar la transición energética a la política industrial y a la I+D, estableciendo mecanismos de apoyo a la industria para que la transición tecnológica genere mayor competitividad y un mejor posicionamiento de la misma, y resulte en generación de riqueza y empleo de calidad.

Por otro lado, alcanzar la neutralidad climática requiere de una política firme y coordinada, así como de las inversiones necesarias, para la conservación y la mejora de la biodiversidad, y de los *stocks* de carbono en masas forestales, humedales y en las superficies de usos agropecuarios.

Emasagra, empresa de economía mixta que gestiona el ciclo integral del agua en Granada y 14 municipios de su área metropolitana, ha visto en esto no solo una obligación, sino también una oportunidad de modernización y transformación del modelo económico para minimizar riesgos y costes futuros en un servicio esencial para la ciudadanía. Es un camino compartido a la descarbonización en el que han de involucrarse las administraciones públicas y la sociedad, y que exige una gobernanza para su éxito. Dicha gobernanza será más exitosa con colaboración público privada, como es el caso de Emasagra, empresa con participación del Ayuntamiento de Granada y la empresa Hidralia, cuya matriz, Veolia, comparte la visión estratégica de la compañía.

AGUA Y ENERGÍA: UNA ALIANZA EFICIENTE

Emasagra siempre ha sido consciente de la importancia y la relación del binomio «agua-energía», así como de los impactos del cambio climático sobre el recurso hídrico. Desde los inicios de la gestión del agua en Granada, la preocupación por el aprovechamiento de la energía inherente al recurso hídrico ha estado latente. La central hidroeléctrica situada en la estación de tratamiento de agua potable de Lancha de Genil genera energía desde hace más de 30 años aprovechando la energía potencial del agua. Además, en los años 90 se instaló el primer motor de cogeneración en la ecofactoría BioSur.

La depuración del agua es uno de los procesos que conllevan un mayor consumo de energía en el ciclo integral del agua y que tiene una mayor huella de carbono inherente al propio proceso de degradación de la materia orgánica. Los avances tecnológicos desde entonces nos dan ahora la oportunidad de gestionar el agua de forma mucho más eficiente, y ha sido en este ámbito donde se han dado los grandes avances hacia el autoabastecimiento y la eficiencia energética.

Ya en 2010 se dieron los primeros pasos hacia la eficiencia energética de la ecofactoría BioSur, que es un referente en economía circular y descarbonización, implantando mejoras en la línea de agua principalmente como auditorías energéticas, cambio de equipos por unos más eficientes, automatización de la aireación o instalación de nuevas soplantes de levitación magnética.

En años sucesivos se consiguieron nuevas mejoras en la optimización energética en la ecofactoría y la reducción de las emisiones de GEI gracias a acciones como la calorifugación de los digestores, el uso de dos digestores de los cuatro disponibles y la eliminación de fugas de biogás, duplicando la tubería de evacuación de biogás y aumentando la capacidad de transporte.

También se desarrollaron proyectos de generación de energía en otros procesos del ciclo integral del agua, concretamente en la distribución, ejemplo de ellos son las minicentrales hidráulicas que se implantaron en la red de abastecimiento en el año 2015. A partir de ahí se lleva a cabo la extensión de la descarbonización al resto de procesos del ciclo integral del agua de Emasagra.

Los avances en eficiencia energética, y en la generación de energía renovable a lo largo de estos años, han llevado a Emasagra a ser un referente en resiliencia energética. Cabe destacar la resiliencia que mostró la empresa cuando a principios del año 2022 se desató la Guerra de Rusia contra Ucrania, que dio lugar a una escalada sin precedentes del precio de la energía, principal recurso para el desarrollo de nuestra actividad, ya que con una capacidad de autosuficiencia de 68,40 % el impacto económico fue menor que en el resto de compañías del sector.

La vulnerabilidad que presentan las empresas ante escenarios geopolíticos externos, y el avance del cambio climático, patente principalmente en el recurso hídrico, induce a



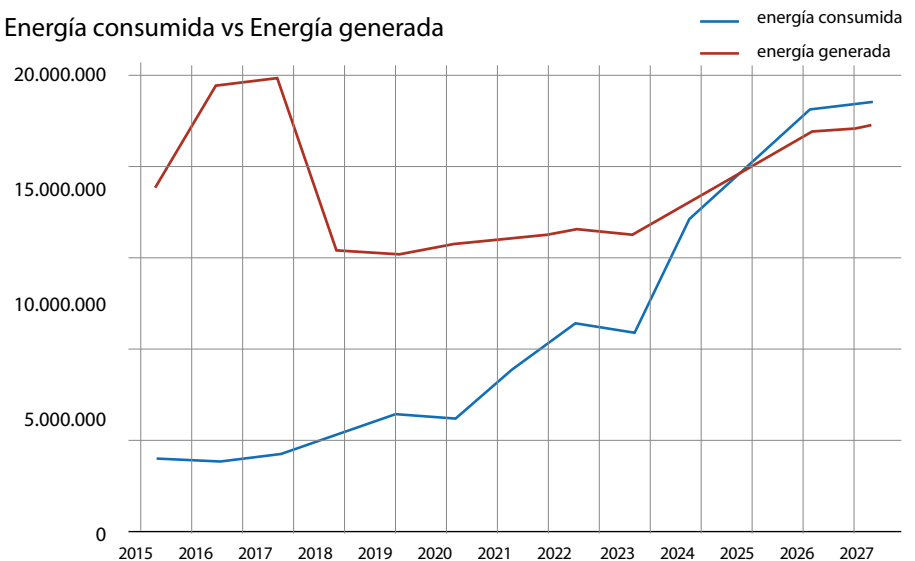
Central Hidroeléctrica de Quéntar (Etap Lancha del Genil).



Emasagra a presentar un canon de inversiones para la descarbonización de la actividad asociado al Plan Estratégico Emasagra Impulsa en 2023.

A lo largo de los años, las necesidades energéticas de la empresa han experimentado una transformación significativa. Paralelamente, la implementación del Plan de Descarbonización ha revolucionado su capacidad de generación energética. Como resultado de estos cambios, se ha logrado una transición notable: de ser una empresa meramente consumidora de energía, se ha convertido en una entidad productora, evolución que refleja su compromiso con la sostenibilidad y también marca un hito importante, posicionándose como un actor proactivo en el panorama energético actual.

Energía consumida vs Energía generada



PONIENDO EN VALOR LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA

Podemos decir que el inicio del compromiso con la descarbonización de la actividad se realizó en 2014, cuando se dio un paso hacia la transformación cultural de Emasagra, y se introduce en la visión de la compañía la necesidad de gestionar el ciclo integral del agua de manera sostenible. El punto de partida fue la creación de un departamento de desarrollo sostenible y establecer la implementación de una hoja de ruta a medio plazo con acciones enmarcadas en los ejes ambiental, social y económico. En este momento nace el compromiso con la neutralidad, una misión como empresa social y medioambientalmente responsable. En el establecimiento de indicadores, se acordó la medición de la huella de carbono (línea base 2014) y de la huella hídrica como parte del desempeño sostenible de la actividad de la empresa.

Para conseguir la neutralidad, la herramienta principal es la transición energética; o sea, cambiar de un sistema energético radicado en los combustibles fósiles a uno de bajas emisiones o sin emisiones de carbono, basado en las fuentes renovables, apoyado por otras herramientas como la digitalización de las redes, la mejora de la eficiencia energética y la innovación tecnológica aplicada a los procesos.

Como hemos indicado, los pasos más relevantes en la descarbonización de Emasagra se dieron en torno a la depuración centrándose en la optimización de los recursos energéticos.

La Huella de Carbono, como indicador primordial de la estrategia de Descarbonización, se ha ido reduciendo respecto a la línea base de 2014, consiguiendo ya en 2015 una reducción del 11% de las emisiones debido al menor consumo eléctrico. Pero es en 2016 cuando se alcanza el primer hito respecto a la neutralidad climática en la transición energética, consiguiendo que la huella correspondiente al Alcance 2 derivada de los consumos energéticos fuese 0 gracias a la contratación de energía con garantía de origen (energía verde) reduciendo en 3.876 Tn nuestra huella de carbono respecto al año 2014.

Con el desarrollo de Plan Estratégico DISS (2017-2021), se obtuvieron los siguientes resultados:

- Consolidación de un modelo de economía circular referente: ecofactoría BioSur.
- Reconocimiento del modelo ecofactoría gracias al premio Momentum for Change de la Organización de la ONU. COP 24.
- Neutralidad climática en los tres alcances (2019).
- Reducciones de consumos energéticos.
- Emasagra logró la autosuficiencia energética de su ecofactoría BioSur.



En 2021 se aprobó un nuevo Plan Estratégico Emasagra Impulsa, que puso el foco en la descarbonización, la innovación y la digitalización como palancas para la lucha contra el cambio climático y además se consiguió el Premio Medio Ambiente de la Junta de Andalucía a la Neutralidad Climática.

Como hemos indicado anteriormente, Emasagra ha aumentado cerca de un 60% la generación de energía renovable desde el año 2014, reduciendo su dependencia energética y evitando unas 4.000 Tn anuales de emisiones al medio en los últimos años. La generación de energía no disminuye la huella directamente, pero revierte directamente en una menor compra de energía en aquella parte que se autoconsume; estas emisiones evitadas se han ido incrementando gracias a la cogeneración y a la energía hidroeléctrica principalmente, pero se espera que la energía fotovoltaica aumente significativamente en los próximos años gracias al Plan de Descarbonización aprobado en diciembre de 2023. De esta forma hablamos actualmente de una autosuficiencia del 135 % para la ecofactoría BioSur, y en torno al 68 % de autoconsumo para Emasagra; es decir, se genera las dos terceras partes de la energía que se consume.

Emisiones evitadas										
Foco	2014 tCO ₂ e	2015 tCO ₂ e	2016 tCO ₂ e	2017 tCO ₂ e	2018 tCO ₂ e	2019 tCO ₂ e	2020 tCO ₂ e	2021 tCO ₂ e	2022 tCO ₂ e	2023 tCO ₂ e
Generación de energía CH	961,00	929,80	1.208,17	599,35	2.213,68	851,12	594,41	241,85	212,96	203,16
Generación de energía FV	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	217,48	293,49	429,98
Compra de energía verde	0,00	2.509,42	5.742,19	6.786,06	3.567,72	2.650,53	2.306,44	1.821,23	1.630,47	1.844,80
Cogeneración	1.223,20	1.320,52	1.117,81	1.510,23	1.442,22	1.286,09	989,91	1.385,25	1.761,46	1.632,35
Total	2.184,20	4.759,75	8.068,17	8.895,65	7.223,61	4.787,74	3.890,76	3.665,81	3.898,38	4.110,29

Respecto a la sede social a lo largo de los años se han llevado a cabo diversas actuaciones para la mejora de la eficiencia energética. En 2022 se realizó un estudio de eficiencia-confort en la sede social de la mano de la Universidad de Granada y la Universidad de Sevilla, con el objetivo de aumentar la eficiencia energética, garantizando el confort de los trabajadores. Actualmente, del estudio se han derivado varias acciones que se están poniendo en marcha.

En 2023 se aprobó un programa de inversiones para la mejora de infraestructuras en busca de la resiliencia de instalaciones, descarbonización y generación de energía verde, por importe de 7,7 MEUR, a ejecutar entre 2023 y 2025. Este programa se consiguió financiar a través de un préstamo sostenible y verde, para lo cual se realizó un Informe de Sustancialidad, basado en la taxonomía europea, que justifica el carácter sostenible de la actividad de Emasagra.

Con la integración de todo el área metropolitana, incluidos los 22 municipios de Aguasvira, en el proceso de depuración, las necesidades energéticas aumentarán de 12 Gwh en 2022 a 18 Gwh en 2027; sin embargo, gracias a la implantación de las infraestructuras incluidas en el canon de descarbonización, las necesidades de compra del recurso serán menores en 2027 (2,3 MM€) que en el año 2022 (2,7 MM€). Por contra, la huella de carbono en nuestra actividad previsiblemente aumentará, y deberá ser compensada para seguir manteniendo nuestro compromiso de neutralidad climática.

Dentro de las acciones que se incluyen en el Plan de Descarbonización, está la renovación de toda la flota de Emasagra por vehículos eléctricos, lo que supondrá la reducción anual de HC en 75 tn CO₂ aproximadamente mediante el cambio de 47 vehículos que consumirán hasta 76.891 Kwh al año, lo que permitirá reducir hasta un 76,4% el consumo de combustible fósil de Emasagra respecto al transporte.

Además esto se acompaña de un Plan de Movilidad al Trabajo de sus trabajadores que contribuye directamente a la reducción de la HC en el alcance 3, mediante la implantación de medidas de distinta naturaleza, como el fomento del uso de vehículos compartidos, bicicletas o trayectos a pie para el acceso a los centros de trabajo. Se promueve así un transporte más sostenible y respetuoso con el medio ambiente que contribuye también a reducir el estrés y aumentar la actividad física de las personas empleadas, favoreciendo condiciones más saludables que redundan en su bienestar general.



Motor de cogeneración.



LA DIGITALIZACIÓN Y LA INNOVACIÓN COMO ACELERADORES DE LA DESCARBONIZACIÓN

La pandemia de COVID19 y la crisis económica posterior pusieron de manifiesto muchas de las necesidades de la sociedad en cuanto a transformación digital, teniendo un impacto muy significativo en la descarbonización. La apuesta de Emasagra por la recuperación verde, que ya se demostraba en su camino hacia la transición energética iniciada en años anteriores, se vio reforzada por este escenario. Estrategias como el teletrabajo, que disminuye los desplazamientos, o la eliminación del uso de papel en pos de la digitalización se han reflejado en una disminución de la huella de carbono.

Pero, para lograr el objetivo de neutralidad, los esfuerzos para descarbonizar y mejorar la eficiencia energética deben ir más allá. La digitalización juega un papel clave en este proceso, es indispensable para la lucha contra el cambio climático y la gestión de las tecnologías limpias. Algunos estudios, como el de BBVA Research, apuntan a una relación en forma de U invertida entre la digitalización y las emisiones de CO₂; en las primeras etapas de la digitalización, las emisiones aumentan, mientras que, una vez se alcanzan ciertos umbrales, las emisiones disminuyen. Es decir, determinados umbrales de digitalización deben ser alcanzados para comenzar a reducir las emisiones. Una vez alcanzado este umbral el efecto directo o puro de la digitalización tiene el potencial de reducir las emisiones hasta un 10 % —si alcanzamos la frontera—, mientras que el efecto total, que incluye ganancias de eficiencia energética y un mayor acceso a las energías renovables, podría estar cerca de un máximo del 45 %.

En este camino para la transformación digital, Emasagra se adhirió en 2022 a la red de centros Dinapsis del Grupo Agbar, incluido en el Hubgrade by Veolia. Esto supone una apuesta clara por la digitalización y la innovación como acelerador de la descarbonización.

Dentro de los servicios digitales implantados y dirigidos a la descarbonización, destaca la plataforma inteligente de control de la aireación Createch y la hipervisión de la ecofactoría BioSur. Ambos servicios se integran, junto al modelado BIM, en el Gemelo Digital de la ecofactoría BioSur, creando un ecosistema tecnológico avanzado para la gestión sostenible de los recursos hídricos. Por otro lado, la planificación centralizada de las operaciones y la telelectura contribuyen significativamente a la descarbonización de la actividad al permitir una gestión más eficiente y precisa de los procesos. La planificación centralizada optimiza la distribución de recursos y reduce los desplazamientos innecesarios, mientras que la telelectura proporciona datos en tiempo real, facilitando la detección temprana de fugas y anomalías, lo que resulta en un menor consumo energético y una reducción de las emisiones de carbono asociadas a la operación y el mantenimiento de las infraestructuras.

Con la vista puesta en 2027 se prevé que el consumo eléctrico de la compañía se sitúe en 18 GWh, un aumento que se debe a la ampliación del negocio de depuración, y se fija como objetivo ampliar su capacidad de generación de energía limpia hasta alcanzar los 20 GWh.

Además de los beneficios en materia medioambiental, este plan conlleva beneficios económicos, al reducir su dependencia energética y aumentar sus ingresos por venta de excedentes de energía.

Por otro lado, las líneas de innovación de la empresa se centran en el control de los procesos de la depuración con objeto de minimizar los recursos necesarios, optimizar los procesos y reducir los residuos se inician proyectos como la búsqueda para la reutilización de material de desbaste, ZeroVision para aplicar la *computer vision* y la inteligencia artificial a los procesos de escurridos para minimizar el consumo de reactivos.

NUEVOS RETOS EN LA GESTIÓN DE LA ENERGÍA

Haciendo una simplificación del camino recorrido podríamos decir que lo primero en lo que se puso foco fue en la eficiencia energética, seguidamente se fijaron objetivos de generación de energía renovable y finalmente se adaptaron los horarios de las tareas que conllevan un consumo energético para adecuarse a la punta de máxima generación.

Actualmente, todas estas iniciativas se están consolidando, pero hay un gran reto que tenemos por delante: gestionar la energía que producimos de la manera más eficiente posible.

Para llevar a cabo una gestión energética en los procesos del ciclo integral del agua es fundamental poder almacenar dicha energía en las diferentes formas que nos permita nuestra actividad sin producir alteración en el servicio.

El objetivo es equilibrar los períodos de sobreproducción energética con los de baja demanda, optimizando el uso de la energía generada. Para lograrlo, se implementarán diversas opciones de almacenamiento de biogás (gasómetros), almacenamiento electroquímico (baterías de litio) y el almacenamiento potencial del agua (minicentrales reversibles de agua). Estas soluciones cubrirán las necesidades energéticas durante la operación, asegurando un suministro constante y eficiente.

La capacidad de almacenamiento en la línea de biogás de las dos estaciones de tratamiento de agua residual equivaldría a 3.500 Kwh/día, mientras que la capacidad de almacenamiento que tendríamos en la minicentral de Cartuja sería aproximadamente de 156 Kwh/día. Adicionalmente, se está planificando la instalación de una batería para almacenar hasta 2.000 kwh/día procedentes de la generación de energía de la planta fotovoltaica de Loaysa. Con todo esto se podrá hacer una gestión de la energía conjugando variables como el precio de venta vs el precio de compra en diferentes horarios según capacidad de almacenamiento, consumo, demanda, etc., siendo siempre el principal objetivo la autosuficiencia eléctrica de la compañía.

LA DESCARBONIZACIÓN COMO UNA CONTRIBUCIÓN A LA SOCIEDAD

No podemos olvidarnos de la relevancia que tiene Emasagra en el contexto global, por lo que trata de ser una empresa tractora de la sostenibilidad en la provincia de Granada. Granada se sitúa en el top 10 de las ciudades más contaminadas de España; por tanto, la necesidad de descarbonización va más allá del ámbito del ciclo integral del agua. En 2015, el Ayuntamiento de Granada firmó el Pacto Europeo de Alcaldes por el Clima y la Energía Sostenible, que obligará a Granada, entre otras medidas, a reducir un 40 % la contaminación de CO₂ en 2030. Por ello, el Ayuntamiento de Granada debe establecer la zona de bajas emisiones, y, como consecuencia, se priorizarán acciones del Plan Estratégico, como la sustitución de la flota de Emasagra por vehículos eléctricos que podrán alimentarse de la energía que Emasagra genere en el futuro, además de un Plan de Movilidad al Trabajo que busca compatibilizar la disminución de la HC del transporte de los trabajadores (alcance 3) con la accesibilidad a nuestros centros de trabajo.

El fomento de la biodiversidad es otro eje principal del Plan Estratégico, que se plasma en acciones como la participación en movimientos como la Huella Verde y en programas de voluntariado destinados a la reforestación de zonas degradadas del área metropolitana. Emasagra en 2022 colaboró con el Ayuntamiento de Granada con el fin de conseguir financiación Next Generation para implementar soluciones basadas en la naturaleza que mitiguen los efectos de las lluvias torrenciales, resultado de los patrones climáticos alterados por el cambio climático.

Además, en el escenario futuro de la descarbonización de Emasagra se contempla la integración en las Comunidades Energéticas Locales con las que la empresa pretende contribuir aportando parte de la energía producida, generando así valor en la sociedad granadina.







DIECISÉIS

AGUA: JUSTICIA POR UN TUBO

Pablo Alcalde Castro





INTRODUCCIÓN

El agua, en su forma más pura y elemental, es la base de la vida. No solo sostiene a todos los ecosistemas, sino que también ha sido un eje central en el desarrollo de las civilizaciones humanas. A lo largo de la historia, su abundancia o escasez ha influido en el surgimiento de ciudades, la prosperidad de imperios y, en muchos casos, el estallido de conflictos. Actualmente, en el siglo XXI, el agua ha adquirido un significado aún más profundo: es un indicador clave de justicia social y ambiental.

El agua es mucho más que un recurso; es un elemento esencial para la vida en todas sus formas, tanto en lo físico como en lo espiritual, y no debe ser vista únicamente desde un enfoque utilitario, sino como parte de la red de interdependencia de la vida misma. La crisis actual de escasez no es una cuestión local ni transitoria, sino que está profundamente arraigada en la forma en que habitamos y explotamos el planeta. Los enfoques fragmentados y utilitaristas han llevado a decisiones que priorizan intereses económicos y geoestratégicos sobre las necesidades humanas fundamentales y la preservación de los ecosistemas. Para enfrentar esta crisis, necesitamos reconfigurar nuestra relación con el agua, reconociendo su valor intrínseco y adoptando una gobernanza que además de respetar los derechos humanos, respete también los límites biofísicos de la Tierra. Esta aproximación holística debe ser la base para acciones más profundas y transformadoras que aseguren una coexistencia respetuosa y sostenible con este recurso vital.



Con el cambio climático transformando drásticamente los patrones de disponibilidad de agua a nivel global, la gestión del agua efectivamente no es un desafío puramente técnico sino una cuestión urgente de justicia ambiental y de derechos humanos, como se reconoce en la Asamblea de Naciones Unidas en 2010, el derecho humano al agua y al saneamiento.

Las sequías prolongadas están agotando los medios de vida de millones de personas, mientras que las inundaciones más intensas y frecuentes devastan infraestructuras, desplazan comunidades y contaminan fuentes de agua potable. Estas alteraciones climáticas están amplificando las desigualdades ya existentes, afectando de manera desproporcionada a las poblaciones más vulnerables y marginadas, como las comunidades indígenas, rurales, de bajos ingresos y falta de oportunidades. Para enfrentar estos desafíos, es necesario reimaginar la gobernanza del agua, integrando principios de equidad y justicia en su gestión, y asegurando que las comunidades más afectadas tengan voz en la toma de decisiones. Adaptarse a los efectos del cambio climático requiere un enfoque integral que combine ciencia, políticas públicas inclusivas y un compromiso con los derechos humanos, para garantizar que el acceso al agua sea equitativo y sostenible para todos.

En este contexto, la ingeniería desempeña un papel esencial. Las soluciones técnicas para la gestión del agua son imprescindibles para enfrentar los desafíos que ya están aquí y los que vendrán en el futuro. Pero la ingeniería del agua no puede ser solo un conjunto de soluciones tecnológicas aisladas. Como profesionales, debemos ser arquitectos de la equidad. La manera en que apoyemos al diseño, planificación y ejecución de proyectos de gestión del agua puede marcar la diferencia entre una comunidad que prospera y otra que sufre.



Aquí exploraremos cómo la ingeniería puede ser una herramienta poderosa para promover el acceso equitativo al agua en un mundo donde las disparidades y la injusticia son cada vez más evidentes. Reflexionaremos sobre la relación entre las decisiones técnicas y las implicaciones sociales, analizando casos donde una buena gobernanza ha ayudado a cerrar brechas de acceso y mejorar la calidad de vida de comunidades vulnerables. Más allá de los planos y las tuberías, la ingeniería del agua se presenta aquí como una disciplina profundamente ética, con el potencial de transformar la vida de millones de personas.

EL PAPEL DE LA INGENIERÍA EN LA COOPERACIÓN INTERNACIONAL Y LA SOCIEDAD

En el ámbito de la cooperación internacional, la ingeniería debe integrar una comprensión profunda de las realidades sociales y ambientales de las comunidades a las que sirve. Con más de 2.200 millones de personas sin acceso a agua potable (OMS/UNICEF 2023), la gestión del agua se presenta como uno de los desafíos más acuciantes de nuestro tiempo. La técnica está en la primera línea de esta crisis global, no solo son la construcción eficiente de infraestructuras, sino el diseño y desarrollo soluciones sostenibles que respeten la dignidad humana y el equilibrio con la naturaleza.

Las universidades y escuelas técnicas juegan un papel importante en la promoción de estos valores. Son el epicentro donde se moldean las futuras generaciones de profesionales, y su responsabilidad va más allá de la simple transmisión de conocimientos técnicos. Desde las instituciones debemos apoyar una dimensión humana en su enseñanza, promoviendo una educación que combine habilidades técnicas con un profundo sentido de responsabilidad social y ética. Como lo planteó el filósofo Martin Heidegger, debemos ir más allá de considerar la tecnología como una herramienta neutra y reflexionar sobre el impacto de nuestras acciones. El principio humanitario por excelencia es «no hacer daño», por eso en nuestros análisis de contexto debemos preguntarnos no solo qué podemos hacer con la tecnología, sino qué debemos hacer, considerando las consecuencias para la comunidad y su entorno.

Una visión antropocéntrica de la ingeniería puede chocar con la cosmovisión de comunidades que entienden a las personas como parte integral de la naturaleza, en lugar de seres separados que dominan el entorno. Entender las relaciones del agua como un sistema complejo interconectado ayuda a entender la dimensión cultural y social, más allá de la provisión del servicio. Este enfoque holístico propone trabajar con la naturaleza en lugar de imponerle un dominio, buscando soluciones que respeten y preserven los ecosistemas en lugar de explotarlos.

Este choque de perspectivas revela la necesidad de una transformación en la forma en que entendemos y aplicamos las soluciones técnicas. Si consideramos a las personas como

parte de la naturaleza, nuestras aproximaciones deben estar en armonía con los sistemas naturales y no simplemente imponerles cambios. Ejes de trabajo como las soluciones basadas en la naturaleza, entre otros enfoques, se han consolidado como alternativas viables para garantizar no solo la sostenibilidad ambiental, sino también el bienestar social. Trabajar con los ecosistemas en lugar doblegarlos ofrece una vía hacia la resiliencia climática, la seguridad hídrica y la salud de las comunidades más vulnerables.

Trabajar estrechamente con comunidades locales permite desarrollar soluciones que sean respetuosas con las prácticas y los conocimientos locales. Esta colaboración no solo enriquece el conocimiento técnico, por las nuevas perspectivas que ofrece, sino que también garantiza que las soluciones sean verdaderamente adaptadas a las necesidades y los contextos específicos. En este sentido, debemos tener una actitud humilde ante otras de las claves del trabajo, la gestión de conocimiento deber ser recíproca entre los diferentes actores que participan, y es una oportunidad de renovar nuestra capacidad de sorpresa ante contextos técnicos complejos con soluciones locales. Un buen ejemplo son los pozos de condensación de vapor en uno de los desiertos más inhóspitos del planeta, en la región de Afar. Fruto de la observación del entorno y los procesos físicos, han incorporado la actividad geotermal de la región para el abastecimiento de agua



En última instancia, se trata de evitar un enfoque reduccionista que se centre exclusivamente en la resolución de problemas técnicos, insuficiente para abordar los desafíos sistémicos y multidimensionales que encontramos en contextos tan frágiles. Es fundamental que se adopte una perspectiva más amplia, orientada al bienestar de las comunidades y a la sostenibilidad ambiental.

Desde las ONGD y la Universidad tenemos la oportunidad de promover las inquietudes del alumnado por un mundo más justo, y canalizarlo a través de diferentes espacios de encuentro, estudios de postgrado y programas internacionales, como los que promueve la UE a través del programa de los Cuerpos de Solidaridad Europeos tanto en su vertiente europea como humanitaria. Formar a los futuros cooperantes como actores clave en la promoción de transformaciones sociales positivas, integrando competencias técnicas avanzadas con un sólido compromiso ético hacia la justicia social y el respeto por los ecosistemas. Solo a través de esta formación holística será posible que la tecnología no solo resuelva problemas inmediatos, sino que también contribuya de manera significativa a la creación de un entorno más equitativo y sostenible a largo plazo.

«TECNOPTIMISMO» ANTE SISTEMAS COMPLEJOS

Enmarcar estos desafíos en una era profundamente influenciada en la capacidad de la tecnología demanda un cambio de paradigma. Desde la inteligencia artificial hasta la biotecnología. Si hemos logrado conectar al mundo a través de internet, nanotecnología médica para curar el cáncer, o secuenciar el genoma humano, ¿por qué no habríamos de poder revertir el cambio climático o solucionar la crisis mundial del agua? Esta visión se ha popularizado, en gran medida, gracias al éxito de la tecnología para enfrentar problemas puntuales con soluciones rápidas y eficientes. Pero aquí surge una pregunta fundamental: ¿hasta qué punto este enfoque está realmente justificado cuando se enfrenta a sistemas tan complejos como el clima, la ecología y las relaciones humanas?

Uno de los mejores ejemplos para analizar los límites de esta aproximación es el problema de la inseguridad hídrica, que implica no solo la falta de acceso a cantidades suficientes de agua potable, sino también la degradación de los ecosistemas acuáticos, las desigualdades socioeconómicas en el acceso al recurso y la limitada capacidad de las comunidades para adaptarse a cambios y crisis relacionados con el agua.

La tecnología debería ofrecernos soluciones para la escasez y la contaminación de este recurso. De hecho, muchos de los contextos donde las organizaciones operamos sufren alto estrés hídrico, operamos plantas desalinizadoras para asegurar el acceso a agua de calidad, implementamos sistemas de riego inteligentes de bajo coste que aumentan la eficiencia, o sensores remotos que para los sistemas de alerta temprana como en el Sahel, o el monitoreo en tiempo real de los niveles freáticos de una región. Pero, como decíamos antes, la tecnología no opera en un vacío. Las innovaciones técnicas están siempre insertas



en sistemas complejos donde convergen factores políticos, sociales y económicos que deben integrarse en el diseño de proyectos.

Las soluciones técnicas sin esta perspectiva no necesariamente resuelven los problemas más profundos que subyacen a la crisis hídrica global. El caso de la presa de las Tres Gargantas en China supuso un costo social y ambiental significativo. Más de un millón de personas fueron desplazadas, y los ecosistemas fluviales sufrieron daños irreversibles. ¿no estamos transfiriendo el problema a otras áreas del sistema?

La creatividad y el ingenio son eficaces para solucionar problemas inmediatos que surgen de la urgencia, pero no tanto para entender las consecuencias a largo plazo de nuestras acciones; en sistemas complejos necesitamos conectar muchas variables. Conocer e integrar las implicaciones a largo plazo en términos de justicia social o estabilidad ecológica en los modelos de servicio requiere herramientas que van mucho más allá de la técnica, pero que hace aún más apasionante nuestro trabajo en el sector.

Antes nos referíamos al principio «no hacer daño», que es un intento de las organizaciones de ayuda humanitaria y cooperación al desarrollo de supervisar el impacto previsto e imprevisto de sus actividades. Este enfoque promueve una intervención responsable, que no solo se enfoca en los resultados inmediatos, sino que también considera las posibles repercusiones a largo plazo sobre las dinámicas sociales, económicas y políticas en las comunidades afectadas. Al integrar este principio, las organizaciones buscan minimizar el riesgo de exacerbar conflictos existentes, perpetuar dependencias o generar desigualdades, y, en su lugar, fortalecer la resiliencia local y contribuir a la paz y la estabilidad a través de enfoques más inclusivos y sostenibles.

La escasez que afrontamos hoy no es el resultado de una insuficiencia de capacidades tecnológicas, sino más bien el producto de un entramado profundamente enraizado de relaciones sociales, políticas y económicas. El crecimiento demográfico, las políticas agrícolas, la contaminación industrial y el cambio climático forman una red de interacciones que va más allá de las soluciones que la ingeniería enfrenta. Sin embargo, seguimos preguntándonos: ¿es realmente la tecnología la solución a esta crisis?

Conceptos como el *ciclo hidrosocial* nos ayudan a replantear la manera en que pensamos el agua. El agua es un medio atravesado por relaciones de poder que permite el control de los territorios y sus habitantes. La escasez y el acceso al agua no son simplemente cuestiones de oferta y demanda, sino expresiones de la organización política y económica responsable de su distribución equitativa. Un enfoque errado en la planificación y el diseño como es el caso de grandes infraestructuras puede exacerbar, en lugar de resolver, las desigualdades que ya existen. La construcción de una gran presa puede resolver el problema del suministro de agua y de energía para una ciudad, pero si esa presa desplaza a comunidades, destruye ecosistemas o aumenta las tensiones políticas en la región, ¿hemos realmente solucionado el problema, o simplemente lo hemos cambiado de forma? A través del ciclo hidrosocial, comprendemos que el agua es un componente de la política y la economía global, moldeada por intereses que perpetúan las inequidades sociales.

Las técnicas deben considerarse en un contexto más amplio, ya que cada tecnología que influye en la vida humana está integrada en redes sociales, políticas y ecosistemas interconectados. Ignorar esta realidad nos lleva a cometer el error de pensar que la tecnología es neutra, cuando en realidad cada innovación es una apuesta que altera las relaciones de poder, redistribuye recursos y redefine quiénes son los ganadores y los perdedores. El «tecnoptimismo» puede alimentar la ilusión de que la tecnología puede «arreglarlo todo», corre el riesgo de desviar nuestra atención de las causas más profundas de los problemas que enfrentamos y darnos una falsa sensación de control del entorno. El control total es una ilusión. Es una ilusión de control de un mundo simplificado, como cuando centramos nuestra atención en las actividades que controlamos pero no el resultado esperado de las mismas, en el propósito de mejora impacto social positivo que debe tener nuestro proyecto. Esta simplificación interfiere con la rica realidad de interacciones y relaciones que constituyen nuestro entorno.

A medida que los cambios en las sociedades humanas y sus ecosistemas se aceleran, se vuelve esencial adoptar una perspectiva que reconozca tanto la certeza del cambio como la incertidumbre inherente a cómo y cuándo ocurrirá. Este es desafío significativo para las organizaciones humanitarias, que se afronta desde el análisis de sistemas dinámicos; no solo para la anticipación y la prevención de desastres, si no en los programas de desarrollo a largo plazo, donde tantas variables entran en juego.



Como resultado, el control se ha convertido en una respuesta predominante al cambio, que debería ser el fin último de los programas, pretendiendo generar impactos positivos en contextos complejos en escalas de tiempo mucho más cortas que las de la evolución natural de las comunidades. Trabajamos en sistemas adaptativos complejos que demandan flexibilidad, es importante integrar una teoría del cambio que reconozca la complejidad inherente y que guíe nuestras intervenciones hacia resultados sostenibles. Debe centrarse en fomentar la capacidad de los actores locales para generar transformaciones desde su propio contexto, respetando los ritmos y dinámicas evolutivas de las comunidades, y priorizando impactos positivos a largo plazo.

Incorporar esta capacidad de escucha, y el conocimiento colectivo, es la base para gestionar nuestras interacciones en contextos que no pueden ser reducidos solo a algoritmos o ecuaciones. Reconocer la complejidad del mundo que nos rodea y abrazar la incertidumbre inherente a estas dinámicas es fundamental para avanzar hacia un futuro en el que podamos coexistir de manera más armoniosa con el entorno.

RELACIONES DE PODER. GÉNERO Y AGUA

El agua, al igual que la vida misma, está intrínsecamente politizada. Su gestión no solo refleja la disponibilidad y la tecnología, sino que también está marcada por relaciones de poder que perpetúan desigualdades, especialmente en términos de género. En los contextos donde trabajamos, las mujeres son las principales responsables del uso del agua para las tareas domésticas y el cuidado familiar. Sin embargo, a menudo carecen de voz y representación en las decisiones comunitarias sobre la gestión de este recurso vital, que típicamente son tomadas por hombres.

Esta desigualdad se manifiesta en múltiples niveles. A nivel doméstico, las mujeres suelen ser quienes realizan el trabajo físico relacionado con la recolección y el uso del agua, lo que puede resultar en una carga considerable que limita su capacidad para participar en otras actividades, como la educación y el empleo. Además, la falta de acceso a información y educación sobre gestión del agua exacerba su exclusión de los espacios de toma de decisiones. Esto no solo limita su capacidad de influir en el uso sostenible del recurso, sino que también perpetúa un ciclo de dependencia y vulnerabilidad.

A nivel internacional, las políticas sobre agua a menudo ignoran las necesidades específicas de mujeres y niñas, lo que resulta en un enfoque poco inclusivo que no aborda las realidades sobre cómo se utiliza el agua en la vida cotidiana de las mujeres. La falta de atención a estas necesidades en la formulación de políticas significa que las soluciones implementadas pueden ser ineficaces o incluso perjudiciales para las mujeres y sus comunidades.

Para abordar estas desigualdades de género en la gestión del agua, es esencial reconocer y transformar las estructuras de poder que las sustentan. Esto implica implementar políticas que no solo consideren a las mujeres como beneficiarias, sino como sujetos de derecho.





que las empoderen para que participen activamente en la toma de decisiones. Fomentar la inclusión de las mujeres en los modelos de gobernanza del agua puede llevar a soluciones más efectivas y sostenibles que reflejen las diversas necesidades de la comunidad.

El liderazgo de las mujeres en la gestión del agua no solo promueve la equidad de género, sino que también contribuye a una gestión más sostenible y equitativa del medio. Su participación activa en la toma de decisiones sobre el agua contribuye al impacto social que la seguridad hídrica persigue, no solo al nivel de la salud pública y los medios de vida, sino que también fortalece el tejido social, promoviendo la colaboración y la cohesión entre los miembros de la comunidad.

SEGURIDAD HÍDRICA: COOPERACIÓN, SOSTENIBILIDAD Y JUSTICIA

Ante lo expuesto, el trabajo en el marco de seguridad hídrica emerge como uno de los desafíos más acuciantes del siglo XXI. Como decíamos al inicio, más del 25 % de la población mundial enfrenta una creciente presión debido a la brecha entre la demanda y la disponibilidad de recursos hídricos que probablemente empeorará en algunas regiones como la cuenca del Mediterráneo, especialmente norte de África y Oriente Medio, y diversas áreas de Asia y América donde la intensificación del cambio climático exacerba fenómenos de desertificación, sequías prolongadas, y migraciones forzadas. Ante este escenario, la seguridad hídrica se ha convertido en un factor estratégico no solo para el desarrollo sostenible, sino también para la estabilidad política y social a nivel global.

ONU Agua define la *seguridad hídrica* como la capacidad de una población de garantizar un acceso sostenible a cantidades adecuadas de agua, de calidad aceptable para mantener los medios de vida, el bienestar humano y el desarrollo socioeconómico, garantizar la protección contra la contaminación transmitida por el agua y los desastres relacionados con el agua, y preservar los ecosistemas en un clima de paz y estabilidad política. Esto implica gestionar de manera efectiva los recursos hídricos, prevenir la contaminación y asegurarse de que el suministro de agua sea resistente a riesgos como sequías, inundaciones o la sobreexplotación. Además, debe estar alineada con los principios de equidad, garantizando que todas las personas, independientemente de su situación económica o geográfica, puedan acceder al agua. Así, la seguridad hídrica no es simplemente una cuestión técnica, sino que tiene profundas implicaciones sociales, económicas y políticas, y está vinculada a la justicia, el bienestar y la paz.





Gracias al reconocimiento del agua como derecho humano, se establece un marco ético y normativo que guía las políticas públicas y las estrategias de cooperación internacional, y facilita abordar el problema de la inseguridad hídrica en toda su dimensión, resaltando la centralidad del agua para la dignidad humana y el bienestar general. No es solo como una cuestión de cantidad, sino también de calidad y accesibilidad, y por tanto, de gestión y buena gobernanza.

El caso de Colombia es paradigmático: con su abundancia de ríos, lagos y cuencas, posee un gran potencial hídrico; aun así, enfrenta serios problemas de inseguridad hídrica en varias regiones, donde la calidad de los cuerpos de agua está comprometida por contaminación por mercurio, derivada de la minería ilegal de oro. Estos problemas de calidad ilustran cómo las relaciones de poder en la gobernanza del agua pueden influir negativamente en la gestión y la preservación de los recursos hídricos. La extracción minera, en estos casos controlada por grupos económicos o actores informales con intereses propios, ejerce presión sobre los georecursos sin mecanismos de rendición de cuentas que permitan monitorear y sancionar adecuadamente las actividades contaminantes, lo que agrava la degradación ambiental y perpetúa la vulnerabilidad de las comunidades afectadas. Las comunidades locales, cuya salud y medios de vida dependen de la calidad del agua, carecen de poder de decisión frente a estos actores, destacando la necesidad de fortalecer la gobernanza inclusiva y participativa que priorice el acceso equitativo y la protección de los ecosistemas.

Pero sin duda, cuando se aborda el impacto de la seguridad hídrica en la salud pública, la contaminación bacteriológica, derivada de un saneamiento deficiente, continúa siendo uno de los principales desafíos. En 2022, aproximadamente 1.700 millones de personas consumían agua contaminada con materia fecal (OMS/UNICEF 2023), lo que incrementa significativamente el riesgo de infecciones por microorganismos patógenos. Este panorama subraya la urgencia de implementar una gestión integral del ciclo del agua que contemple no solo el acceso a fuentes seguras, sino también la adecuada eliminación de desechos, garantizando agua potable libre de riesgos y reduciendo al mínimo la contaminación ambiental.



EXPERIENCIAS

Un ejemplo destacado se encuentra en la cuenca del lago Atitlán, en Guatemala, donde Acción Contra el Hambre implementa el programa RUK'U'X YA', que significa «corazón de agua» en el idioma maya kaqchikel. Este programa está financiado por el Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento (FCAS) de la AECID, que promueve el derecho humano al agua a través del fortalecimiento de la gobernanza del agua.

Junto a las municipalidades y comunidades de la cuenca, se han desarrollado modelos de servicio en colaboración con organizaciones comunitarias, como los Consejos Comunitarios de Desarrollo (COCODES). Estos esfuerzos han dado lugar a la creación y el apoyo de las Oficinas Municipales de Agua y Saneamiento (OMAS). La estrategia se enfoca en mejorar el acceso a los servicios de agua, saneamiento e higiene (WASH) desde una perspectiva que integra las necesidades de las comunidades y los titulares de derechos, así como el fortalecimiento de la gobernanza y los proveedores de servicios.

El reconocimiento institucional ha sido fundamental en este proceso, que aún tiene un camino prometedor en la creación de direcciones de agua. La mejora de estos servicios ha demostrado su impacto positivo en la salud pública, evidenciado por la disminución de enfermedades diarreicas y tasas de desnutrición.







Estas experiencias fomentan espacios de diálogo a niveles departamentales y nacionales, destacando la importancia de la rendición de cuentas en todos los niveles (comunitario, municipal e institucional). Esto permite que se generen experiencias positivas que puedan escalar y replicarse, ya sea a través de iniciativas gubernamentales o de la cooperación internacional.

En otros contextos socioeconómicos, como el sur del Líbano, Acción Contra el Hambre también trabaja para mejorar y sostener los servicios de agua. Un pilar fundamental de esta estrategia es recuperar la confianza en los operadores públicos y la recuperación de infraestructuras hídricas para asegurar la cobertura del servicio, tanto a las comunidades más deprimidas como a los asentamientos de refugiados. Se lleva a cabo un análisis riguroso de las prioridades y los proyectos de agua a gran y mediana escala, considerando criterios como el impacto potencial en la comunidad y la vulnerabilidad de las poblaciones, y se prioriza en función de los criterios de vulnerabilidad, buscando sinergias con los planes regionales y el apoyo de las autoridades locales.

La implementación de estos proyectos se realiza en colaboración con los Water Establishments (WE), garantizando el cumplimiento de plazos y la supervisión de la calidad de las obras. Además, se capacita al personal de los WE para identificar las necesidades de mantenimiento de la red de distribución de agua y se establecen contratos marco con proveedores para agilizar la adquisición de materiales y servicios, y se aseguran que los indicadores de calidad, cantidad y asequibilidad del servicio, que no supere el 3% de los ingresos medios de una familia. Para la política tarifaria del servicio la transparencia, el acceso a la información y los mecanismos de rendición de cuentas son clave.

El compromiso comunitario es igualmente esencial. Se llevan a cabo estudios de percepción para entender las necesidades de la población en relación con el servicio de agua, lo que permite diseñar planes de divulgación personalizados. Estos planes promueven el uso responsable del agua, fomentan la conservación y facilitan la recuperación de costos. También se incentiva la participación activa de la comunidad en la toma de decisiones, generando un sentido de corresponsabilidad en el manejo de los recursos hídricos.

Incluir un eje de incidencia política en la gestión del agua es esencial para influir en los donantes internacionales para asegurar que se prioricen la eficiencia, la equidad y la inclusión en el acceso a servicios de agua y saneamiento. Esta estrategia no solo aborda la necesidad inmediata de acceso al agua, sino que también se convierte en un medio para transformar estructuras de poder que históricamente han marginado a ciertos grupos, especialmente cuando hablamos de refugiados y desplazados internos.

Uno de los aspectos clave en esta estrategia es garantizar la conexión de asentamientos informales a la red pública de agua frente a las respuestas clásicas de emergencia, eficaces pero poco sostenibles. En muchas ciudades del mundo, los asentamientos informales carecen de acceso adecuado a servicios básicos, lo que perpetúa la desigualdad y afecta la salud y el bienestar de sus habitantes. Según el Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos

Humanos (UN-Habitat), aproximadamente 1.000 millones de personas viven en asentamientos informales, donde el acceso al agua potable es limitado o inexistente. Asegurar que estas comunidades sean conectadas a la red pública de agua no solo es un derecho humano, sino también un paso fundamental hacia la dignidad y la inclusión social.

La presión sobre los servicios públicos puede generar tensiones, especialmente en un contexto frágil como el del Líbano, donde más del 20 % de la población es refugiada. Por eso enfoques como el del nexo humanitario son necesarios, explorando la interconexión entre la ayuda humanitaria, el desarrollo y la paz, buscando una respuesta más integrada y sostenible a las crisis. Este enfoque reconoce que las crisis humanitarias a menudo tienen causas profundas que requieren no solo asistencia inmediata, sino también soluciones a largo plazo que aborden factores como la pobreza, la desigualdad y la fragilidad institucional. Al unir esfuerzos humanitarios y de desarrollo, se busca mejorar la resiliencia de las comunidades, mitigar las tensiones por el recurso compartido, y contribuir a la estabilidad en el territorio.

CONCLUSIÓN

En un contexto global afectado por el cambio climático, la dualidad del agua como fuente de conflictos, por su importancia geoestratégica, o de entendimiento, en su dimensión de bien común es fundamental en los proyectos de cooperación. La escasez hídrica y el control del su acceso es un factor determinante en la migración forzada la inestabilidad regional y el incremento de tensiones sociales y políticas, dan lugar a crisis humanitarias que complican los esfuerzos de paz y desarrollo. En el caso de Medio Oriente somos testigos de hasta qué punto el control de acceso puede utilizarse como arma de guerra, como hemos visto en la región en la historia reciente, y hasta límites inimaginables ahora en Gaza.

Ante estos retos, las ONGDs afrontamos una serie de obstáculos estructurales que debemos integrar en nuestras estrategias de apoyo. Las disparidades en las capacidades técnicas y financieras entre los Estados, y la ausencia de marcos regulatorios claros y eficientes, ponen a los países en vías de desarrollo en una posición desfavorable, a menudo siendo los más afectados por la inseguridad hídrica.

Es esencial avanzar hacia modelos de gestión del agua que reconozcan este recurso como un bien común global e integren el Derecho Humano al Agua en las estrategias nacionales e internacionales.

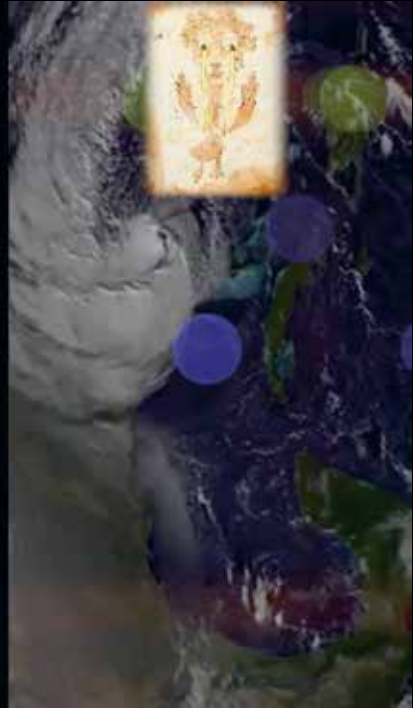
En este contexto, la seguridad hídrica debe ser un principio rector, no solo para la construcción de infraestructuras eficientes, sino también para garantizar el acceso universal al agua, sin dejar nadie atrás, abordando las causas estructurales de la pobreza hídrica y la exclusión de los más desfavorecidos. La creciente tendencia hacia la mercantilización del agua, donde se trata como un bien económico en lugar de un derecho

fundamental, ha exacerbado las desigualdades existentes. Las políticas de privatización, lejos de resolver los problemas de acceso, han intensificado la exclusión de los sectores más vulnerables. Es urgente reexaminar estas políticas bajo los principios de equidad y justicia social.

La seguridad hídrica no puede desvincularse de los principios de sostenibilidad y justicia global, siendo imperativo que las políticas se enfoquen en garantizar su acceso como un derecho humano universal. Garantizar la seguridad hídrica en un mundo en constante cambio requiere una visión integradora que combine ciencia, ética y políticas públicas. La cooperación internacional debe basarse en un compromiso compartido por la equidad y la sostenibilidad, donde el agua sea considerada un derecho humano y un recurso limitado, no una mercancía ni una fuente de competencia. Solo a través de enfoques cooperativos e inclusivos será posible enfrentar los desafíos globales del agua, asegurando que este recurso esencial esté disponible para todos, ahora y en el futuro.

Es imperativo que el Derecho Humano al Agua sirva como un principio orientador en cualquier intervención relacionada con la gestión hídrica. Este enfoque demanda no solo la construcción de infraestructura, sino también el desarrollo de modelos de servicio que aseguren la asequibilidad del agua para las poblaciones más vulnerables. La privatización del agua y la falta de regulación han profundizado las desigualdades, subrayando la necesidad de un equilibrio entre eficiencia técnica y justicia social.

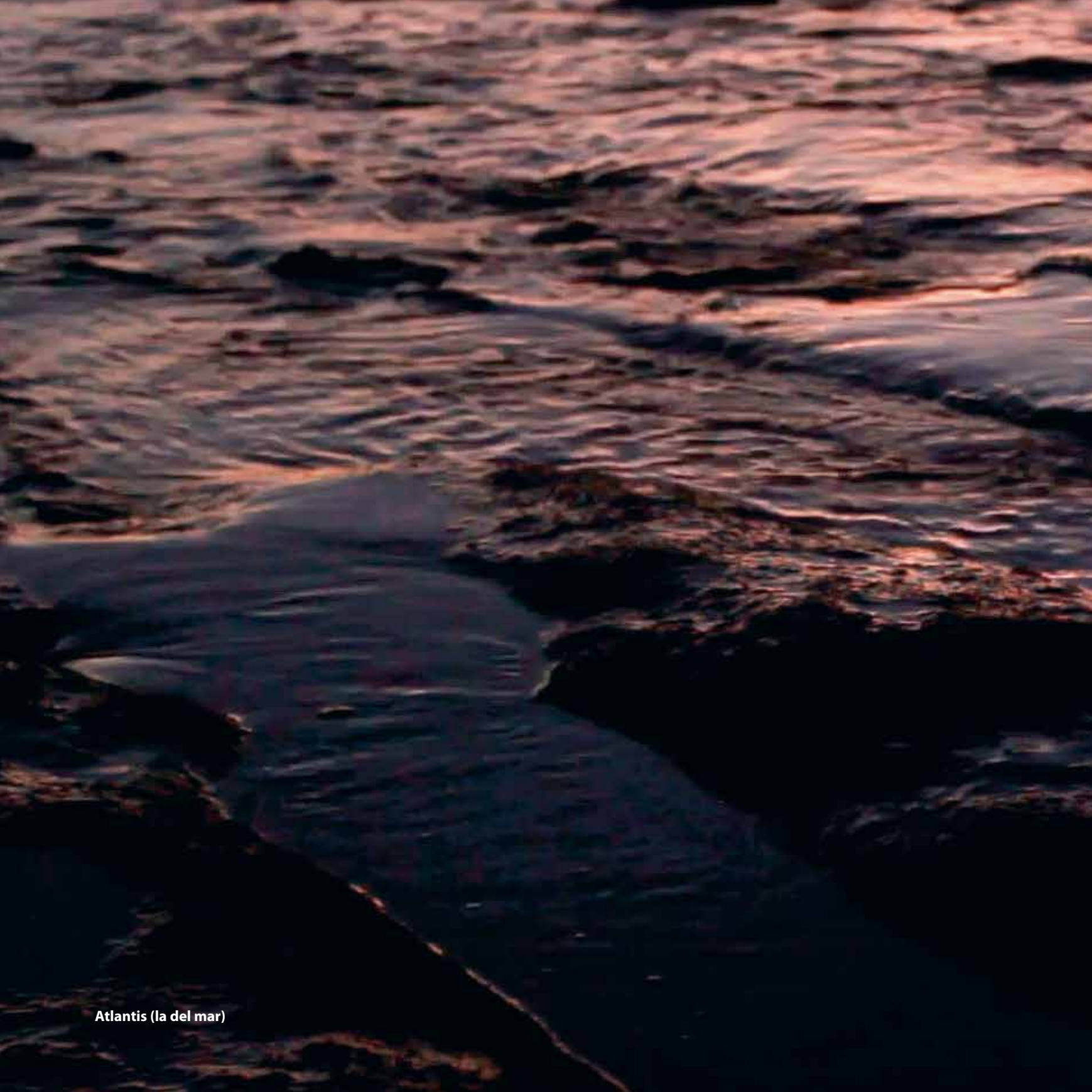
Para garantizar la seguridad hídrica en el futuro, es esencial adoptar una perspectiva que integre ingeniería, ética, políticas públicas y participación comunitaria. El agua, como recurso finito, debe gestionarse en conformidad con los principios de justicia y sostenibilidad. Desde la ingeniería, es crucial reconocer la conexión intrínseca entre el Derecho Humano al Agua y la dignidad humana, diseñando soluciones que aseguren la disponibilidad de este recurso esencial para todas las personas. Al final, nuestra relación con el agua debe ser un reflejo de nuestra humanidad, donde cada gota cuente y cada voz sea escuchada.



DIECISIETE

TELEPATÍA HÚMEDA. AGUA Y ENERGÍA

Juan Pablo Pacheco Bejarano



Atlantis (la del mar)



Cuando los marineros regresan a tierra tras meses en el mar, a menudo tienen la sensación de que el suelo se mece del mismo modo que lo hace la superficie del océano. ¿Qué es lo que genera esa sensación de desequilibrio? La mayor parte de los científicos opina que, cuando se está en el mar durante un periodo prolongado de tiempo, el cerebro genera una modulación dinámica en oposición al movimiento del agua. El resultado es una sensación de estabilidad que nos hace olvidar el movimiento del barco al cabo de unos días. Al volver a puerto, los marineros sienten como si la tierra seca se hubiera convertido en agua, reduciendo el abismo entre el mundo terrestre y el marítimo. Esta experiencia húmeda del espacio, ni completamente húmedo ni completamente seco, abre el portal que me propongo investigar aquí.

Cuando empecé a escribir sentía un vértigo insoportable cada vez que me sentaba delante del ordenador. Tal era la sensación de desequilibrio que pensé que me había desencantado por completo de la escritura; las palabras parecían una jaula congelada para mis intuiciones. Este desencanto dio un giro inesperado cuando, tras una conversación con la poeta colombiana Ramona de Jesús, comprendí que el vértigo que sentía frente a la pantalla era el mismo que el de los marineros que regresan a puerto. De alguna manera, mi tierra empezaba a humedecerse. Entonces, pensé: si escribir es como subirse a un barco durante meses, ¿en qué mares he estado y a qué puertos he regresado?

Lo que sigue es un viaje a través de tres puertos donde mi imaginación ha atracado en los últimos meses, buscando ampliar mi capacidad de intuir formas radicalmente distintas de entender la tecnología. Estos puertos se ven azotados por el vértigo que he sentido al volver a escribir desde los mares de la intuición, mientras intento implicar a mis lectores en esta experiencia vertiginosa y húmeda. Poco a poco empiezo a ver que mi investigación en torno al agua no es más que una respuesta a la llamada de los ríos, lagos y mares en los que me he bañado, que me piden que humedezca mis pensamientos y mis palabras. La razón, seca y estéril, es un proyecto fracasado. La intuición, húmeda y fértil, dará voz a las aguas profundas y lejanas que desean ser escuchadas.

[...]

¹. Gracias a Bruno Alves de Almeida por destacar este fenómeno perspectivo durante nuestra investigación conjunta en el fondo marino durante la residencia PACT Zollverein en Alemania, 2021.

El día que nací, los planetas se alinearon en torno al agua y la tecnología, abriendo un portal eléctrico entre la sal de mi cuerpo y las aguas que lo impregnan. Según la astrología helenística, mi sol está en Cáncer, el cangrejo regido por la luna y el océano, dos cuerpos materiales en constante tensión. Mi luna está en Acuario, el delfín que habita en las ondas de aire eléctrico para dar cabida a la tecnología y a lo no convencional. En el espacio entre el sol y la luna, el día y la hora en que nací se manifiesta un triángulo entre mi cuerpo, el agua y la electricidad. Desde este punto de vista cósmico, no es casualidad que casi todas mis investigaciones de los últimos años hayan ahondado en la relación entre el agua y la tecnología. Todos nuestros pensamientos e intuiciones comparten la misma energía de los átomos y los cuerpos celestes. Somos vehículos y agentes de los profundos enredos entre lo material y lo inefable, entre la materia y la energía. Al llegar a este nuevo puerto donde encuentro mi cuerpo astral, el futuro del agua se revela como el futuro de nuestros cuerpos, del mismo modo que el futuro de nuestros cuerpos se manifiesta en el tiempo del agua. Pensar que la tecnología nos permite desprendernos de nuestra corporalidad no solo es un gravísimo error, sino también una falacia absoluta.

A través de textos, vídeos, sonidos, proyectos web y laboratorios colaborativos, mi trabajo desde 2016 me ha sumergido en las relaciones poéticas y materiales entre el agua y la tecnología, buscando tejer nuevas narrativas para navegar por las olas tecnológicas desde una conciencia ecológica y transhistórica. Desde las palabras que utilizamos para entender el mundo digital –como nube, torrente, transmisión, surfear, navegar– hasta los cables submarinos que permiten el flujo global de información, internet guarda una estrecha relación con las aguas oceánicas en múltiples niveles. Además de ser un contenedor para gran parte de la infraestructura de internet, el océano es también un medio energético que permite el flujo de información a escala planetaria. Debido a su alta salinidad, el fondo marino proporciona un polo a tierra perfecto para la corriente eléctrica que amplifica la señal que fluye a través de los cables submarinos. Nuestros correos electrónicos, videollamadas, imágenes y sonidos no solo están contenidos por el agua del océano, sino que dependen de ella para funcionar. Como comenta Nicole Starosielski, «después de que la corriente atraviesa el cable, se dirige a un lecho oceánico que pone a tierra las corrientes intercontinentales; el océano completa el circuito del cable» (2015, p. 201). La red submarina de internet depende por completo de la conductividad eléctrica del medio acuático, potenciada por la salinidad de los mares. Como saben las culturas amerindias desde tiempos inmemoriales, la sal es un cristal que permite la comunicación entre múltiples formas de vida.

Algunos experimentos recientes de Microsoft también tratan de aprovechar las propiedades físicas del océano, diseñando centros de datos que utilizan las bajas temperaturas del fondo marino para refrigerar los servidores. De este modo, las empresas de Silicon Valley tratan de ahorrar en el coste de la energía utilizada para bajar las altas temperaturas producidas por el tratamiento de datos. A medida que la temperatura global siga aumentando, preveo más y más centros de datos sumergidos en las profundidades oceánicas, calentando aún más los mares para continuar la expansión de la red informática. Una red infinita de catástrofes desencadenadas por la insistencia del progreso tecnológico. Esta forma utilitaria de aprovechar el agua como medio energético, que permite tanto la conductividad eléctrica como la disipación del calor, forman parte de una larga genealogía. El poder del agua ha sido la base de múltiples sistemas tecnológicos que han potenciado la colonización de la modernidad occidental por encima de cualquier otra cosmotecnía, desde el molino hidráulico hasta las presas hidroeléctricas.

A diferencia de estos sistemas extractivos que reducen el agua a una sustancia inerte llena de energía potencial, reconocer el papel del agua como contenedor y medio me permite abordar la telepatía desde una dimensión relacional, sacando a la superficie la cuestión de la proximidad. Humedecer la telepatía es, pues, ver lo que está en medio en lugar de ignorarlo e intentar eliminarlo. Los impulsos eléctricos, una de las muchas formas en que se manifiesta la conciencia planetaria, no pueden separarse de territorios concretos y de sus infraestructuras materiales. Los cables submarinos, los centros de datos, los molinos de viento y las centrales hidroeléctricas son cuerpos ligados al cuerpo de la Tierra y a nuestros propios cuerpos. Downey nos recuerda que «la energía electromagnética es un río de materia ondulante. Esta naturaleza radiante es compartida por los pensamientos, la inteligencia artificial y el vídeo, y explica la vida misma del universo que habitamos» (2013a, p. 265). Mi propuesta es que nos sumerjamos y nademos en esta conciencia, en sus múltiples volúmenes. Esta forma de acercarnos al agua nos permite volver a imaginar cómo la contenemos y cómo nos contiene, y así rescatar la posibilidad de cuidar lo que nos es lejano y diferente.

La reflexión profunda y ampliada con el agua es esencial para volver a imaginar y remodelar nuestra relación con la tecnología. En principio, porque el agua es esencial: es la sustancia que mantiene la vida en constante movimiento y transmutación. El agua nos permite sentir la interconexión entre todo cuerpo orgánico e inorgánico como materia húmeda. Desde la ósmosis que permite el intercambio de disolventes entre células hasta el ciclo del agua que conecta territorios distantes, el agua pone en marcha los meta-

bolismos de intercambio energético y material que conforman la biosfera planetaria. Las relaciones húmedas de los líquidos amnióticos, salivares, lluviosos, tropicales y estancados forman parte de esta dimensión telepática del agua, una tecnología de conexión con la alteridad a distancia. El agua, ya sea líquida, sólida o gaseosa, es un archivo de vida, un sistema de comunicación telepática intercontinental, interplanetario e intertemporal. El agua es una red inteligente, una fuente de conocimiento en constante transformación, que transforma las formaciones geológicas desde las montañas más altas hasta las fosas más profundas del fondo del océano.

El agua también organiza el mundo como un campo voluminoso: arriba y abajo, superficie y profundidad, atrás y adelante, derecha e izquierda, dentro y fuera. En el océano, la configuración de superficie y profundidad está en constante flujo. La una se convierte en la otra en una continua intensidad de movimiento. La profundidad sube a la superficie para volver a bajar; la superficie se sumerge y se convierte en profundidad. En este sentido, el agua nos conecta con otras capas geológicas y con el paso del tiempo: un conector espacial y temporal. La ontología húmeda propuesta por Phillip Steinberg y Kimberly Peters nos invita acertadamente a abrazar la profundidad y el volumen del océano como elementos cruciales para desestabilizar las categorías fijas y sólidas, desde las formas en que estamos implicados con múltiples cuerpos y sistemas (Steinberg y Peters, 2015).

Más que mojado, húmedo se refiere a ese espacio intermedio entre lo sólido y lo líquido. Aunque el artista Roy Ascott hablaba en los años noventa de medios húmedos para referirse a la biotecnología, la humedad de la que yo hablo está más cerca de la que se siente en los trópicos; esa sensación pegajosa en la piel cuando estamos en los bosques tropicales que nos invita a implicarnos con nuestro entorno. Tropicalizar la tecnología es, pues, reconocer el encuentro pegajoso y húmedo entre cuerpos a distancia, una sensación que va más allá del deseo de comprender. La telepatía húmeda es ese encuentro de amor que no percibe, que aprecia pero no domina. Es la escucha del ruido sensorial de nuestro entorno. Cuando nos permitimos entrar en contacto con el agua de forma consciente y presente, se activa una fuente inagotable de información.

En la mayoría de los mitos del génesis, la vida se origina en el agua. En muchas culturas amerindias, y en algunas de las investigaciones más recientes de la ciencia moderna, se considera que el agua es capaz de retener esta memoria vital, como un archivo viviente. Los sabios de las culturas ancestrales de la Amazonia siguen un riguroso calendario ecológico para dialogar con la memoria de los ríos.² Según la época del año y el día, el río cuenta diferentes historias sobre el origen del mundo, el estado de

². Esta reflexión surge de una conversación con Bárbara Santos hace varios años, en la que ella me compartió una entrevista con su amigo Fabio Valencia, sabedor y líder Makuna en la zona del río Pirá Paraná, en la Amazonía colombiana.

sus nacimientos y desembocaduras y cómo organizar el trabajo para el año siguiente. El conocimiento de cada conocedor es específico de su contexto territorial, y al mismo tiempo le permite conectar con los espacios que recorre el agua a nivel planetario. Aunque la experiencia de un conocedor en la Amazonia es radicalmente diferente a la de quienes habitamos el mundo modernizado y urbano, la cosmovisión amerindia nos enseña que el agua no es un material pasivo que hay que explotar o proteger; el agua es un agente activo con el que podemos comulgar. Desde esta perspectiva, mediada por nuestros cuerpos, podemos empezar a dibujar otro tipo de mapas de las formas de marginalidad y pertenencia que emergen de las aguas comunes que compartimos con el planeta y sus múltiples formas de vida (Neimanis, 2017).

La velocidad a la que opera esta telepatía húmeda es diferente de la velocidad de la telepatía digital. En cierto modo, es más lenta y voluminosa, similar al flujo del tiempo al que nos remiten las corrientes de agua. Los ríos, arroyos y océanos no son masas de agua homogéneas, sino que se componen de múltiples corrientes de diferentes temperaturas e intensidades, que convergen constantemente de forma no lineal. En este sentido, acceder al archivo vivo del agua se acerca más a un ejercicio de correspondencias, que recuerda la invitación de Denise Ferreira da Silva a investigar y escribir desde la profundidad, la amplitud, la longitud y el tiempo de los acontecimientos: «las imágenes del pensamiento poético no son lineales (transparentes, abstractas, vidriosas y determinadas), sino fractales (inmanentes, escalares, abundantes e indeterminadas), como la mayor parte de lo que existe en el mundo» (2016). La telepatía húmeda habla desde una perspectiva no lineal y fractal, abarcando la profundidad del océano y la multivalencia de las corrientes de agua.

A diferencia de la idea platónica de que la realidad emana como una sombra del sol, yo creo que la realidad emana de las sombras de las profundidades acuáticas atraídas por el abrazo de la luna. Las profundidades húmedas, presurizadas y oscuras del océano irradian una energía húmeda al mundo, llenándolo de agua y, por tanto, de vida. Esta es la cosmología del inframundo, el lugar de la gran sacerdotisa, de los hongos y sus ciclos infinitos. El origen no es un sol; es una fuerza telepática procedente de las profundidades del mar. Este mar es, sin embargo, tan externo como interno, similar al abismo de Flusser donde las profundidades del océano son indistinguibles de las profundidades de nosotros mismos (Flusser y Bec, 2012, p. 69). La telepatía es ese ejercicio de conocer lo lejano para conocer lo cercano; de vernos reflejados en el mundo como un espejo erótico imposible de colonizar y explotar. Al abandonar este puerto astral y energético, abandono mi barco y salto al mar.





Fotogramas del videoensayo *The Blue Dot* de Juan Pablo Pacheco Bejarano, que especula sobre las redes ecológicas y epistemológicas tejidas en torno a internet. El punto azul representa una señal en tiempo real de la interacción de los usuarios con los servidores digitales, pero también se convierte en una metáfora visual y material del planeta Tierra, los océanos del mundo e internet como tecnología húmeda.



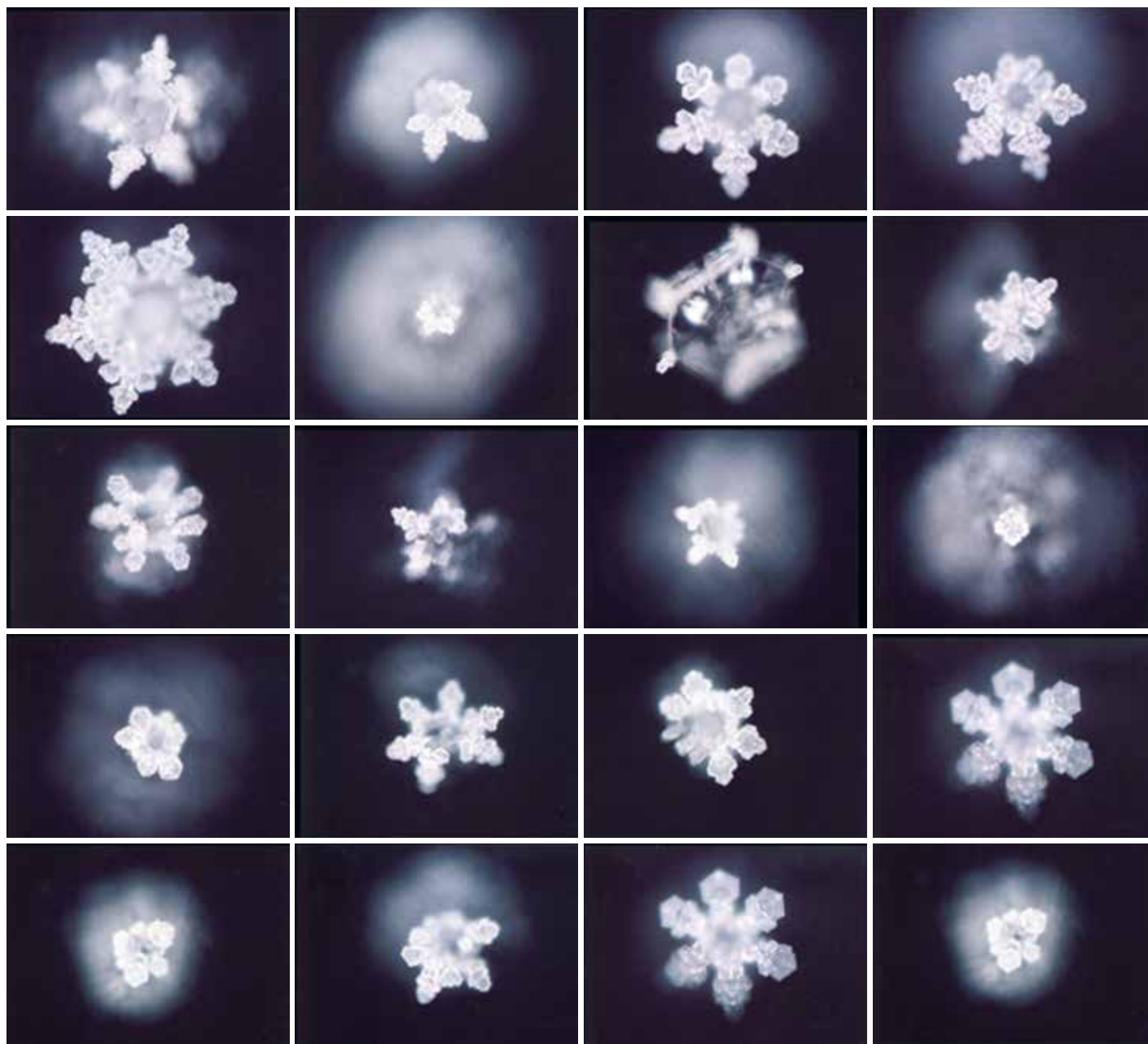




DIECIOCHO

EPÍLOGO. AGUA Y EMOCIÓN

Imma Estrada Palacios



De la misma agua, Emoto observa cómo muestras sometidas a estímulos positivos dan lugar a un mayor número de cristales con geometrías simétricas, complejas y armónicas.

El agua es tan importante como irremplazable. Es la esencia de la vida. Nos rodea y nos constituye¹.

El agua es mucho más que un recurso natural que el planeta nos ofrece. Es símbolo de pureza, de fuerza y adaptabilidad, de cambio permanente² y, en la creencia de antiguas civilizaciones, incluso el vehículo de la memoria de la Tierra.

Sin embargo, su presencia cotidiana en una parte del mundo hace que en algunos momentos pase desapercibida o que, de algún modo, se dé por supuesta. Con este libro hemos querido encender los focos e iluminarla como la protagonista que es. Durante más de trescientas páginas y de la mano de quienes más saben, hemos recordado sus múltiples virtudes —y algunos de sus defectos—, las oportunidades que nos ofrece y los retos que enfrentamos como sociedad para asegurar su mejor versión futura.

Hay otras miradas en el linde entre saber y creencia, como la de Masaru Emoto, mirada que por su belleza e inspiración quisimos que nos acompañara en estas últimas páginas.

Masaru Emoto es un nombre que resuena en los umbrales donde ciencia y espiritualidad se entrelazan. Este investigador japonés, nacido en 1943 en Yokohama, dedicó su vida a explorar la interacción entre el agua y el entorno emocional, llegando a la fascinante y no carente de polémica conclusión de que, más allá de una sustancia física, el mágico H₂O, el agua, es un receptor y espejo sutil de nuestras emociones y nuestros pensamientos.

Sostenía que el agua reacciona ante palabras, sonidos y emociones, reflejándolas en patrones visibles cuando se congela. En sus experimentos, Emoto observó la forma en que las moléculas de agua congelada cristalizaban cuando eran expuestas a palabras —escritas o habladas—, pensamientos, oraciones y música.

Me lo imagino como un alquimista del siglo xx. Él y su equipo seguían un proceso sencillo pero revelador: recogían muestras de agua que luego sometían a estímulos e influencias de muy diversa índole, desde el sonido de una palabra amable hasta las notas estridentes de una sinfonía distorsionada. E incluso tomaban muestras de agua que provenía de emplazamientos singulares del planeta, ya fuera por su propia condición natural o social.

Pasado el tiempo de exposición, congelaban las muestras y observaban los cristales formados bajo un microscopio.

Los resultados eran tan hermosos como inquietantes. Al parecer, el agua que había sido expuesta a estímulos positivos mostraba mayor frecuencia de patrones geométricos hermosos, con múltiples simetrías y formas complejas, como si esas palabras tuvieran el poder de inducir una armonía oculta en las moléculas del agua.

Por el contrario, cuando el agua se exponía a palabras duras, con connotaciones negativas o agresivas, los cristales resultantes eran casi siempre caóticos, irregulares, incompletos, amorfos; sin ningún tipo de armonía o belleza.

¹ «El principio de todas las cosas es el agua; de agua está hecho todo y a agua todo vuelve», Tales de Mileto.

«El agua no es necesaria para la vida: es la vida misma», Antoine de Saint-Exupéry.

² «Nadie se baña dos veces en el mismo río, porque todo cambia en el río y en el que se baña», Heráclito de Éfeso.

Alegría, paz, felicidad, esperanza daban lugar a cristales preciosos. Y se observaban geometrías contrapuestas en expresiones de algún modo enfrentadas como «hagámoslo» y «hazlo» o «puedo» y «no puedo». Curioso.



«Puedo»



«No puedo».

Cristales observados en muestras de agua sometidos al estímulo «puedo» vs «no puedo».
© masaru-emoto.net

Y aunque lo busqué, no supe encontrar si Masaru sometió el agua al efecto de su propio sonido al emanar de una fuente o salir de un grifo, o incluso al efecto del sonido del vocablo que la identifica: *agua*. Pura curiosidad.

Sea como fuere, los cristales de agua congelada se convirtieron en una metáfora visual de la interconexión entre física y emoción y, con ello, la obra de Masaru Emoto resuena como una advertencia casi poética: lo que llevamos dentro, lo que expresamos en palabras y acciones, tiene un impacto más profundo y tangible en nuestro entorno y en nosotros mismos —compuestos mayormente por agua— de lo que logramos imaginar.

Esta teoría, aunque llena de belleza y cierto misterio, fue y es objeto de controversia. Parte de la comunidad científica argumenta que los métodos de Emoto carecen de rigor científico, que sus experimentos no son replicables y que los resultados pueden estar sesgados por un fenómeno conocido como «confirmación de expectativas» —tan inherente, pienso, al ser humano—. Señalan que, si bien la idea es cautivadora, faltan evidencias que puedan sostenerla en los pilares de la ciencia tradicional.

Sin embargo, más allá de la veracidad empírica, su teoría encontró eco en el ámbito de la filosofía y la espiritualidad, llegando a muchos de quienes creen en un mundo donde las emociones no solo habitan en el interior, sino que fluyen y se proyectan al exterior, como ondas en la superficie de un lago.

Así, la teoría de Masaru Emoto sobre la cristalización del agua y las emociones, danza entre la ciencia y la poesía, sigue siendo hoy una invitación a reflexionar sobre la responsabilidad y la oportunidad que tenemos con nuestras palabras y pensamientos.

Masaru falleció en 2014, pero su legado sigue. El tiempo dirá, o no, si estaba en lo cierto. Aunque confieso que casi me parece más bonito pensar que siempre permanecerá en su tesis esta fracción de creencia a la que todos, en algún momento y en la forma que sea, necesitamos recurrir para comprender este maravilloso pero complejo mundo en el que vivimos.

Cierro simplemente compartiendo que los cristales más bellos se observaron con la conjunción de dos palabras: *amor* y *gratitud*. Tomo buena nota. Agua y emoción.



© masaru-emoto.net

Love and gratitude. Masaru Emoto siempre sostuvo en sus acciones de divulgación, libros, conferencias y entrevistas, que los cristales más bellos, como el que la imagen muestra, se formaban cuando amor y gratitud llegaban entrelazadas al agua.

Aquí en la isla, el mar y cuánto mar. Se sale de sí mismo, a cada rato. Dice que sí, que no, que no. Dice que sí, en azul, en espuma, en galope. Dice que no, que no. No puede estarse quieto. Me llamo mar, repite pegando en una piedra sin lograr convencerla.

Antonio Skármeta
El cartero de Neruda

ANEXO

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO: AGUA E INGENIERÍA

Ignacio González-Castelao Martínez-Peñuela

I. PRINCIPALES PROYECCIONES DE CAMBIO A CORTO PLAZO (HASTA MEDIADOS DEL SIGLO XXI) Y LARGO PLAZO (HASTA MEDIADOS DEL SIGLO XXI) RELATIVAS A LA TEMPERATURA, EL CICLO DEL AGUA, LA CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA, LOS OCÉANOS Y LA CRIOSFERA

Resumen de las principales proyecciones de cambio a corto plazo (hasta mediados del siglo XXI) relativas a la temperatura, el ciclo del agua, la circulación atmosférica, los océanos y la criosfera		
Temperatura		
La anomalía de la temperatura media global en superficie para 2016-2035 se sitúa entre 0,3°C y 0,7°C (respecto a 1986-2005).		Nivel de confianza probable/medio.
Aumento de la frecuencia de días y noches cálidos en la mayoría de las regiones.		Es probable.
Disminución de la frecuencia de días y noches fríos en la mayoría de las regiones.		Es probable.
Ciclo del agua		
Aumento de la evaporación en muchas regiones.		Es probable.
Aumento de la humedad específica cerca de la superficie.		Es muy probable.
Aumento de la frecuencia e intensidad de las precipitaciones sobre las zonas terrestres.		Es probable.
Aumento de las precipitaciones medias zonales en latitudes altas y en algunas zonas de latitudes medias.		Es muy probable.
Disminución de las precipitaciones en las zonas subtropicales.		Más probable que improbable.
Referente a las predicciones de los cambios previstos en la humedad del suelo y la escorrentía superficial.		Nivel de confianza bajo.
Circulación atmosférica		
Proyecciones a corto plazo de las trayectorias y la intensidad de las tormentas en el hemisferio Norte.		Nivel de confianza bajo.
Proyecciones a escala de cuenca de los cambios en la intensidad y frecuencia de los ciclones tropicales para todas las cuencas hasta mediados del siglo XXI.		Nivel de confianza bajo.
Océanos		
Aumento de la temperatura media global de la superficie y de la temperatura media vertical de los océanos.		Muy probable
Aumento de la salinidad en las próximas décadas en las zonas tropicales y, sobre todo, subtropicales del Atlántico y disminución de la salinidad en el Pacífico occidental.		Es probable.
Disminución de la salinidad en el Pacífico occidental en las próximas décadas.		Es probable.
Reducción de la circulación meridional de retorno del Atlántico de aquí a 2050.		Es probable.
Criosfera		
En septiembre se producirá una situación Océano Ártico prácticamente sin hielo (una extensión de hielo marino inferior a 106 km² durante al menos cinco años consecutivos) antes de mediados del siglo XXI.		Nivel de confianza probable/medio.
La capa de hielo del mar Ártico seguirá disminuyendo y reduciendo su espesor. El manto de nieve de primavera en latitudes altas y el <i>permafrost</i> cercano a la superficie se reducirán a medida que aumente la temperatura media global de la superficie.		Es muy probable.
Disminución a corto plazo de la extensión y el volumen del hielo del mar Antártico.		Nivel de confianza bajo.

La última columna del cuadro indica el nivel de probabilidad/confianza de las proyecciones. El término «Muy probable» significa una probabilidad del 90-100 %, «Probable» una probabilidad del 66-100 %, y «Más probable que improbable» >50-100 %. El nivel de confianza está relacionado con las pruebas y el nivel de acuerdo (Stocker, y otros, 2013).

Resumen de las principales proyecciones de cambio a largo plazo (a partir de mediados del siglo XXI) para la temperatura, el ciclo del agua, la circulación atmosférica, los océanos y la criosfera	
Temperatura	
A finales del siglo XXI, la media mundial de los cambios en las zonas terrestres será superior a la de los océanos en un factor que probablemente oscilará entre 1,4 y 1,7.	Nivel de confianza muy alto.
El Ártico será la región que experimentará el mayor calentamiento.	Nivel de confianza muy alto.
A medida que aumente la temperatura media mundial, en la mayoría de las zonas continentales se producirán con mayor frecuencia fenómenos extremos de calor y con menor frecuencia fenómenos extremos de frío. Estos cambios son predecibles para episodios definidos como extremos en escalas temporales diarias y estacionales.	Prácticamente seguro.
En la mayoría de las regiones, los episodios de altas temperaturas que actualmente se producen cada 20 años serán más frecuentes a finales del siglo XXI (al menos duplicarán su frecuencia, y en muchas regiones se convertirán en eventos anuales o bianuales), y los actuales episodios de bajas temperaturas cada 20 años serán cada vez menos frecuentes.	Es probable.
Ciclo del agua	
El aumento de la temperatura media global en superficie provocará un aumento de las precipitaciones globales a largo plazo.	Prácticamente seguro.
A medida que aumente la temperatura global, se acentuará el contraste en la precipitación media anual entre las regiones secas y húmedas y el contraste entre las estaciones húmedas y secas en la mayor parte del mundo.	Nivel de confianza alto.
A finales de siglo, muchas regiones áridas y semiáridas de latitudes medias y subtropicales experimentarán menos precipitaciones.	Es probable.
En muchas regiones húmedas de latitudes medias, aumentarán las precipitaciones.	Es probable.
Globalmente y para los fenómenos de precipitación de corta duración, es probable que, a medida que aumenten las temperaturas, se produzcan tormentas individuales más intensas y menos tormentas débiles.	Es probable.
La intensidad de las precipitaciones extremas aumentará con el calentamiento a un ritmo muy superior al de las precipitaciones medias.	Nivel de confianza alto.
En la mayoría de las masas de tierra de latitudes medias y en las regiones tropicales húmedas, se producirán fenómenos de precipitaciones extremas más intensos y frecuentes.	Es muy probable.
A finales de siglo, y en el escenario RCP8.5, se producirán reducciones de la escorrentía anual en zonas del sur de Europa, Oriente Medio y el sur de África y aumentos en latitudes altas del hemisferio norte.	Es probable.
Circulación atmosférica	
En el escenario RCP8.5, es probable que se produzca un desplazamiento hacia los polos de las corrientes de latitud media de entre 1 y 2 grados en ambos hemisferios a finales del siglo XXI (nivel de confianza medio), siendo menor el desplazamiento en el hemisferio norte.	Probable/Nivel de confianza bajo.
Siguen existiendo grandes incertidumbres, y por tanto un bajo nivel de confianza, en las proyecciones de los cambios en las trayectorias de las tormentas, especialmente en la cuenca del Atlántico Norte.	Nivel de confianza bajo.
Océanos	
La tasa media de aumento del nivel medio global del mar durante el siglo XXI superará la tasa observada durante 1971-2010.	Es muy probable.
La subida media mundial del nivel del mar continuará después de 2100.	Prácticamente seguro.
A finales del siglo XXI, el cambio del nivel del mar mostrará un patrón marcadamente regional, que dominará sobre la variabilidad. Es probable que muchas regiones experimenten desviaciones sustanciales respecto al cambio medio mundial.	Es probable.
Aproximadamente el 95 % del océano experimentará un aumento relativo regional del nivel del mar. La mayoría de las regiones que experimenten un descenso del nivel del mar estarán situadas cerca de glaciares y capas de hielo actuales o extinguidos.	Es muy probable.

Los cambios locales del nivel del mar se desviarán más de un 10% y un 25 % de la proyección media mundial en un 30 % y un 9 % de las zonas oceánicas, respectivamente, lo que indica que las variaciones espaciales pueden ser significativas.	Es muy probable.
En el futuro, es muy probable que se produzca un aumento significativo de los valores extremos del nivel del mar y que, al igual que en las observaciones pasadas, este aumento sea principalmente consecuencia de una subida del nivel medio del mar.	Es probable.
Las proyecciones indican que aproximadamente el 70 % de las costas de todo el mundo experimentarán un cambio relativo del nivel del mar del 20 % con respecto al cambio medio global del nivel del mar.	Es muy probable.
Criosfera	
El manto de nieve del hemisferio norte se reducirá globalmente a medida que aumenten las temperaturas durante el próximo siglo.	Es muy probable.
Retroceso de la extensión del permafrost.	Prácticamente seguro.
Las proyecciones reflejan que, a finales del siglo XXI, la superficie con permafrost cerca de la superficie disminuirá entre un 37 % (RCP2.6) y un 81 % (RCP8.5).	Nivel de confianza medio.
Para el año 2100, la proyección RCP2.6 indica la desaparición de entre el 15 % y el 55 % del volumen actual de los glaciares, y la proyección RCP8.5, de entre el 35 % y el 85 %.	Nivel de confianza medio.
La reducción media de la extensión del hielo del mar Ártico para 2081-2100 en comparación con 1986-2005, que oscila entre el 8 % para RCP6.2 y el 34 % para RCP8.5 en febrero, y entre el 43 % para RCP2.6 y el 94 % para RCP8.5 en septiembre.	Nivel de confianza medio.
El escenario RCP8.5 prevé unas condiciones en las que el océano Ártico estará casi libre de hielo a mediados de siglo (extensión del hielo inferior a 106 km2 durante al menos 5 años consecutivos) en septiembre.	Nivel de confianza medio.
En el Antártico, la proyección mediana apunta a una disminución de la extensión del hielo marino que oscila entre el 16 % para el RCP2.6 y el 67 % para el RCP8.5 en febrero y entre el 8 % para el RCP2.6 y el 30 % para el RCP8.5 en septiembre para el periodo 2081-2100 en comparación con el periodo 1986-2005.	Nivel de confianza bajo.
Las proyecciones de la superficie nevada en primavera en el hemisferio norte para finales del siglo XXI oscilan entre una disminución del 7 % [3-10] % (RCP2.6) y del 25 % [18-32] % (RCP8.5).	Bajo nivel de confianza

La última columna del cuadro indica el nivel de probabilidad/confianza de las proyecciones. El término «Prácticamente seguro» significa una probabilidad del 99-100 %, «Muy probable» una probabilidad del 90-100 %, y «Probable» una probabilidad del 66-100 %. En nivel de confianza está relacionado con las pruebas y el nivel de acuerdo (Stocker, y otros, 2013).

II. PRINCIPALES MEDIDAS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA OFERTA Y DE LA DEMANDA

Principales medidas de adaptación al cambio climático desde el punto de vista de la oferta de agua
Mejores conocimientos (sistemas de información y análisis de datos para mejorar la toma de decisiones).
Sistemas de obtención de datos meteorológicos para mejorar las previsiones (satélites, etc.).
Redes de vigilancia para la caracterización y el seguimiento del estado cuantitativo y cualitativo de las masas de agua.
Redes de información hidrológica en tiempo real.
Sistemas de información sobre la calidad sanitaria del agua como medida preventiva para la salud de la población.
Mejor comprensión de los procesos naturales y de cómo pueden mejorar la calidad y cantidad del agua.
Sistemas que permiten mejorar los conocimientos sobre el uso del agua.
Redes de seguimiento de los efectos del cambio climático en las masas de agua (especialmente las que no han sido alteradas por la acción humana directa).

Sistemas de información sobre la calidad del agua potable y de baño.
Sistemas que permiten gestionar las incertidumbres y los riesgos.
Protección y conservación de ecosistemas y masas de agua (permiten una mejora cuantitativa y cualitativa del agua al reducir el pretratamiento).
Protección de las infraestructuras naturales en su origen (prácticas agrícolas sostenibles).
Protección y regeneración de humedales y meandros.
Eliminación de vegetación invasora no autóctona.
Protección estratégica del suelo.
Revegetación (incluida la reforestación y la conversión forestal).
Creación de zonas ribereñas.
Reconexión de ríos y llanuras aluviales.
Restauración de riberas (incluidos los corredores ribereños).
Reducción de las pérdidas de agua.
Sistemas para reducir las pérdidas por evaporación en los embalses.
Sombreado de vías navegables.
Sistemas de detección de fugas en redes de agua.
Mejora del drenaje, el saneamiento y el tratamiento de aguas residuales.
Dotar a los hogares de instalaciones sanitarias básicas.
Aumentar los sistemas de saneamiento mejorados.
Construcción y mejora de las redes de alcantarillado.
Implantación de sistemas de drenaje sostenibles en las ciudades (tejados verdes, aceras drenantes).
Implantar instalaciones de tratamiento de aguas residuales.
Mayor capacidad de almacenamiento y regulación
Espacios verdes de biorretención o infiltración.
Embalses.
Construcción de humedales artificiales (restauración o construcción).
Recarga artificial de acuíferos (balsas de bombeo o infiltración, pavimentos permeables, etc.).
Recogida de aguas pluviales.
Aumento de la capacidad de regulación mediante estanques y depósitos.
Exploración y extracción de aguas subterráneas.
Recursos no convencionales
Captación de la humedad atmosférica.
Desalinización.
Reutilización (de aguas depuradas o aguas de drenaje agrícola).

Extracción de aguas subterráneas confinadas en formaciones geológicas profundas en tierra o en acuíferos marinos.
Aumento de las precipitaciones mediante siembra de nubes.
Transferencias de recursos
Trasvases de agua.
Agua virtual (importación/exportación).
Principales medidas de adaptación al cambio climático desde el punto de vista de la demanda de agua
Campañas de sensibilización sobre el uso sostenible del agua
Fomento de prácticas sostenibles en el uso doméstico del agua.
Promoción de prácticas autóctonas para el uso sostenible del agua.
Reducción de la demanda de riego: mediante modificaciones de los calendarios de cultivo, las combinaciones de cultivos, los métodos de riego y las superficies plantadas.
Prácticas agrícolas sostenibles.
Mejores conocimientos
Sistemas que detectan la necesidad de riego de los cultivos (medición de la humedad del suelo, etc.).
Control de la erosión del suelo.
Cambios en el uso del suelo.
Cultivos altamente profesionalizados.
Aumentar la eficiencia y eficacia del uso sostenible del agua.
Modernización del regadío.
Cultivos de invernadero.
Cultivos resistentes a la sequía, la salinidad y las plagas.
Mejora de los procesos industriales (reciclaje del agua en los procesos industriales, reutilización, etc.).
Medidas para reducir la cantidad de aguas residuales generadas.
Equipamiento doméstico que favorece un menor consumo de agua.
Transferencia/intercambio de derechos de agua para no limitar el desarrollo socioeconómico.
Reducción de las pérdidas de agua.
Reducción de las pérdidas por evaporación en estanques y depósitos descubiertos.
Reducción de las fugas de agua en las redes de distribución de usuarios o industrias.
Avances disruptivos que promueven un menor consumo de agua
Alimentos cultivados en laboratorio.
Medidas que permitan ahorrar en el consumo de agua y que sean sostenibles.

III. MEDIDAS CONTRA LOS RIESGOS DE INUNDACIÓN Y SEQUÍA

Resumen de las medidas contra los riesgos de inundación y sequía contempladas en el informe de la Federación Mundial de Organizaciones de Ingenieros (Estrela & Sancho, 2019)

Medidas contra el riesgo de inundación
Medidas estructurales
Dique y presa contra inundaciones y tanques de tormenta.
Canales de derivación.
Terraplenes y diques.
Modificación del canal.
Drenaje de infraestructuras lineales.
Drenaje sostenible (tejados verdes y pavimentos permeables).
Espacios verdes (biorretención e infiltración).
Conservación y restauración de humedales.
Construcción de humedales artificiales.
Repoblación forestal y conservación de los bosques.
Zonas ribereñas.
Reconexión de ríos y llanuras aluviales.
Establecimiento de desvíos de crecidas.
Restauración hidrológica y medidas en zonas inundables.
Medidas no estructurales o de gestión: prevención, alerta y respuesta
Medidas de adaptación de los bienes potencialmente afectados para mitigar los daños.
Medidas preventivas: ordenación del territorio y urbanismo.
Medidas de alerta: sistemas de alerta de inundaciones.
Medidas de respuesta: protección civil y seguros contra inundaciones.
Medidas para hacer frente a los riesgos de sequía
Gestión integrada de los recursos hídricos y del territorio.
Planes de gestión de la sequía.
Medidas de gestión y control: asignación de recursos, ahorro de agua y transferencia/intercambio temporal de derechos de agua.
Medidas medioambientales.
Sistema de alerta y control de la sequía.
Seguro agrícola.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DOS

EL AGUA ES VIDA

Franc Cortada Hindersin

NACIONES UNIDAS. *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. 2015: acortar.link/tk3hK.

—*La salud de diez millones de peruanos está en riesgo por el envenenamiento del agua con sustancias tóxicas*. 2022 : acortar.link/ceT2ZI.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. *WMO's eight ambitions addressing water*. 2023: acortar.link/5dKXoG.

IPCC: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. 2022: acortar.link/yLIvrk.

OXFAM:

—*Carbon billionaires. The investment emissions of the world's richest people*. 2022: acortar.link/LcRd8z.

—*WATER DILEMMAS: The cascading impacts of water insecurity in a heating world*. 2023: acortar.link/vDShhN.

—*Solo una de cada cuatro de las mayores empresas agroalimentarias dice estar reduciendo el uso y la contaminación del agua*. 2024: acortar.link/vNrGvS

—*Oxfam Intermón denuncia que Israel utiliza el agua como arma de guerra y reduce en un 94% el suministro en Gaza*. 2024: acortar.link/QinzND

OHCHR. *Human rights to safe drinking water and sanitation of indigenous peoples: State of affairs and lessons from ancestral cultures*. A/HRC/51/24. 2022: acortar.link/cKxjnt.

OBSERVATOIRE DES MULTINATIONALES. *Droit à l'eau et industries extractives: la responsabilité des multinationales*. 2016: acortar.link/u6yvkX.

COLUM MC CANN. *Apeirógono*. Ed Seix Barral. 2020.

TRES

LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO: AGUA E INGENIERÍA

Ignacio González-Castelao Martínez-Peñuela

BEVERE, L.; GLOOR, M. *Sigma 2/2020: Natural catastrophes in times of economic accumulation and climate change*. Swiss Re Institute. 2020.

ESTRELA, T.; SANCHO, T. *Best Practice on drought and flood management: Engineer's contribution*. World Federation of Engineers Organizations. 2019.

EUROPEAN COMMISSION. *KnowSDGs Platform*. 2022: acortar.link/fr3P40.

FIELD, C.; BARROS, V.; DOKKEN, D.; MACH, K.; MASTRANDREA, M.; BILIR, T.,... WHITE, L. *IPCC, 2014: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. 2014: acortar.link/vYpUuc.

GLOBAL WATER PARTNERSHIP. *Preparing to Adapt: The Untold Story of Water in Climate Change Adaptation Processes*. 2018.

INTERNATIONAL WATER ASSOCIATION. (n.d.). *World water loss day*: acortar.link/WBphTv.

KINGDOM, B.; LIEMBERGER, R.; MARIN, P. *The Challenge of Reducing Non-Revenue Water (NRW) in Developing Countries. How the Private Sector Can Help: A Look at Performance-Based Service Contracting*. Washington, DC: The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank. 2006.

- LINKE, D.; HINKEL, J. «Economically robust protection against 21st century sea-level rise». *Global Environmental Change*, pp. 67-73. 2019.
- MATA, C. A. «Extreme weather events». *Física y Sociedad*. 2001.
- MEKONNEN, M.; HOEKSTRA, A. *National water footprint accounts: The green, blue and grey water footprint of production and consumption, Value of Water Research Report Series n.º 50*: UNESCO-IHE Institute for Water Education. 2011.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA. *Cambio Climático: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad. Guía resumida del quinto informe de evaluación del IPCC. Grupo de trabajo II*: acortar.link/PBPCIC. 2014.
- MINISTRY FOR ECOLOGICAL TRANSITION AND THE DEMOGRAPHIC CHALLENGE. *National climate change adaptation plan*. 2020: acortar.link/Qm27GF.
- ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL. *La Organización Meteorológica Mundial confirma que en 2023 la temperatura mundial batió todos los récords*. 2024: acortar.link/hIWBTG.
- PÖRTNER, H. O.; ROBERTS, D.; MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; TIGNOR, M.; POLOCZANSKA, E.,... (eds.), N. W. *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. 2019.
- PÖRTNER, H. O.; ROBERTS, D.; TIGNOR, M.; POLOCZANSKA, E.; MINTENBECK, K.; ALEGRÍA, A.,... RAMA, B. *IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press. 2022: acortar.link/crLryM.
- PERLMAN, H.; COOK, J.; HOLE, WOODS; NIEMAN, A. «All of Earth's water in a single sphere!». USGS.GOV. 2016: acortar.link/nXdpTI.
- STOCKER, T.; QIN, D.; PLATTNE, G.-K.; M. T.; ALLEN, S.; BOSCHUNG, J.,... (EDS.), P. M. *IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. 2013.
- UN. *The Ocean Conference* (pág. 7). New York. 2017.
- UNFCCC. *Aggregate effect of the intended nationally determined contributions: an update. United Nations Framework Convention on Climate Change*. New York. 2016.
- UN-Water. *UN-Water Analytical Brief on Unconventional Water Resources*. Geneva. 2020.
- UN-Water. *Portal de datos sobre el ODS 6 de ONU-Agua*. 2024: acortar.link/cRIKkT.
- WORLD RESOURCE INSTITUTE. «Domestic Water Use Grew 600% Over the Past 50 Years». *Blog: Worl Resource Institute*. 2020: acortar.link/t7z81k.
- UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME. *The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-Based Solutions for Water*. Paris: UNESCO. 2018.
- UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME. *The United Nations World Water Development Report 2017. Wastewater: The Untapped Resource*. Paris: UNESCO. 2017.
- WWF. *Living Planetreport 2020 - Bending the curve of biodiversity loss*. Gland, Switzerland. 2020: acortar.link/CDh4eG.

- ECHAIDE, J. I. «Agua como bien común desde una perspectiva crítica del análisis económico del derecho». *Revista Electrónica del Instituto de Investigaciones Ambrosio L. Gioja*. 2017.
- BATISTA-MEDINA, J. A. «Regreso a Dublín: ¿gestionan las comunidades tradicionales el agua como recurso económico?». *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 6, pp. 101-111. 2015.
- ROMERO-PÉREZ, E. «El agua como bien económico». *Revista de Ciencias Jurídicas*. 2007.
- AVENDAÑO, G. A. «Privatización y mercantilización del agua. Reflexión acerca de un bien común». *Revista Ciencias Agropecuarias*, vol. 2, pp. 40-43. 2016.
- ARANA, G. A.; GIRALDO, A. O. M.; DUARTE, L. A. «Las guerras globales por el oro azul en el siglo XXI». *Revista Criterio Libre Jurídico*, vol. 14, n.º 1, pp. 67-73. 2017.
- FUERTE VELÁZQUEZ, D. J.; PÉREZ JUÁREZ, A.; FUERTE VELÁZQUEZ, Y. «Una revisión del agua como un bien económico, social y ecológico». *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*. 2024.
- UNITED NATIONS. *The Human Right to Water and Sanitation*, 2010: [acortar.link/vCGJly](#).
- RAMSAR CONVENTION ON WETLANDS, *The Ramsar Convention Manual: A Guide to the Convention on Wetlands*. 2018: [acortar.link/SWaoCg\]](#).
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, 2014: [acortar.link/vYpUuc](#).
- ÁLVAREZ-VÁZQUEZ, M. Á.; DE UÑA-ÁLVAREZ, E. «Investigación, gestión y valores del agua en el mundo actual», en M. Á. Álvarez-Vázquez; E. De Uña-Álvarez (Eds.). *Perspectivas del agua. Investigación, gestión y valores del agua en el mundo actual*. Dykinson, S.L.; 2019, pp. 13-20.
- OSTROM, E. *Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action*.: Cambridge University Press, 1990.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). *Water, Sanitation and Hygiene*, 2017: [acortar.link/h1ysmK](#).
- CARRILLO QUIROGA, P.; GÓMEZ DE LA FUENTE, M.D.; CHACÓN HERNÁNDEZ, J.C.; SANTOYO CAAMAL, M.L. «Percepción de la conservación del agua en estudiantes universitarios de Tamaulipas», México. Un análisis interdisciplinario.: *Región y sociedad*, vol. 34. 2022.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). *Water for Food Security and Nutrition*. 2017: [acortar.link/IN9si6](#).
- GLEICK, P. *Global Freshwater Resources: Soft-Path Solutions for the 21st Century*. *Science*, 2003, vol. November 28th: [acortar.link/1E5cbd](#).
- VÖRÖSMARTY, C. J.; MCINTYRE, P. B.; GESSNER, M. O.; DUDGEON, D.; PRUSEVICH, A.; GREEN, P... DAVIES, P.M. «Global threats to human water security and river biodiversity», *Nature*, vol. 467, n.º 7315, pp. 555-561. 2010.
- UNESCO. *Water and Education*. 2018.
- FARBER, S.; CONSTANZA, R. Y WILSON, M. A. «Economic and Ecological concepts for valuing ecosystems services». *Ecological Economics*, vol. 41, pp. 375-392. 2002.
- SPANGENBERG, J. H.; SETTELE, J. «Precisely incorrect? Monetising the value of ecosystem services». *Ecological Complexity*, vol. 7, n.º 3, pp. 327-337. 2010.
- DAVIDSON, M. «On the relation between ecosystem services, intrinsic value, existence value and economic valuation». *Ecological Economics*, vol. 95. 2013: [acortar.link/an5fRv](#)
- ALFRANCA, O. «La valoración del agua y la aplicación del método de las preferencias declaradas: valoración contingente vs. experimentos de elección», *Agua y Territorio*, vol. 15, pp. 101-114. 2020.
- ORGANIZACIÓN DE NACIONES UNIDAS. «Informe mundial sobre el desarrollo de los recursos hídricos». *El valor del agua*. 2021.
- SOTELO, M.; SOTELO, I. Y FEBLES, J. M. «Análisis territorial y regional del valor monetario de la “Huella Hídrica” en España, en la actualidad», *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, vol. 42 n.º 2, pp. 575-632. 2022.
- ARIZA RESTREPO, J. L.; RODRÍGUEZ DIAZ, Y. J.; Y OÑATE BARRAZA, H. C. «Índices de calidad y contaminación del agua: una revisión bibliográfica».

Tecnura. Vol 27, n.º 77, pp. 121-140. 2023: [acortar.link/PIK8zQ](https://doi.org/10.1016/j.tecnura.2023.101882).

ROMERO-PEREZ, E. «El agua como bien económico, *Revista de Ciencias Jurídicas*, vol. 113, pp. 115-150. 2007.

SIETE

LA IMPORTANCIA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA GESTIÓN MODERNA INTEGRADA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Xavier Sanchez-Vila
Daniel Fernàndez-Garcia

USGS. «El Ciclo Natural del Agua». 2019: [acortar.link/vIDYFk](https://doi.org/10.1016/j.tecnura.2023.101882).

WIKIPEDIA. *Water distribution on Earth*: [acortar.link/n28iaj](https://doi.org/10.1016/j.tecnura.2023.101882).

PÉREZ CASTRO, C. «Estudi del túnel Llobregat-Anoia de FGC al Delta del Llobregat i la seva interacció amb l'aqüífer: Model geològic i numèric de flux». *UPCommons*. 2021: [acortar.link/ogzWEU](https://doi.org/10.1016/j.tecnura.2023.101882).

OCHO

LA HUELLA HÍDRICA Y LA GESTIÓN SOSTENIBLE DEL AGUA EN EL TEJIDO EMPRESARIAL

Desirée Marín

BAYART, JEAN-BAPTISTE; BULLE, CÉCILE; DESCHÊNES, LOUISE; KOEHLER, ANNETTE; RAINBOW, PAUL; REGA, CARINE; & THOMAS, SAM. «A framework for assessing off-stream freshwater use in LCA». *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 15, n.º 5, p. 439-453. 2010: [acortar.link/gDixfp](https://doi.org/10.1016/j.tecnura.2023.101882).

BANCO MUNDIAL:

—«High and Dry: Climate Change, Water, and the Economy». 2016: [acortar.link/zaxhMi](https://doi.org/10.1016/j.tecnura.2023.101882).

—«World Bank Water Resources Management». 2020: [acortar.link/bv0qZS](https://doi.org/10.1016/j.tecnura.2023.101882).

CHAPAGAIN, A. K.; HOEKSTRA, A. Y. «The Water Needed to Have Dutch Drink Coffee». *Value of Water Research Report Series* n.º 14, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands. 2003: [acortar.link/s88G7S](https://doi.org/10.1016/j.tecnura.2023.101882).

CDP WATER. «CDP Global Water Report 2020». 2020: [acortar.link/2EW1aQ](https://doi.org/10.1016/j.tecnura.2023.101882).

HOEKSTRA, A. Y.; CHAPAGAIN, A. K.; ALDAYA, M. M.; MEKONNEN, M. M. «Manual de evaluación de la huella hídrica. Establecimiento del estándar mundial». *Water Footprint Network*. 2011: [acortar.link/cvYGnW](https://doi.org/10.1016/j.tecnura.2023.101882).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 14046:2014. *Environmental management — Water footprint — Principles, requirements and guidelines*.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (INE). «Encuesta sobre el suministro y saneamiento del agua, 2022»: [acortar.link/wMMEzR](https://doi.org/10.1016/j.tecnura.2023.101882).

MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. (2011). «National Water Footprint accounts: The green, blue and grey water footprint of production and consumption». *Value of Water Research Report Series* n.º 50, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands.

STEPHAN PFISTER, ANNETTE KOEHLER, STEFANIE HELLWEG. «Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA». *Environmental Science & Technology*, vol. 43, n.º 11, p. 4098-4104. 2009: [acortar.link/Y26paX](#).

OCDE. «Managing Water for All: An OECD Perspective on Pricing and Financing». París: OCDE. 2009: [acortar.link/DtOWP9](#).

WULCA. «Water Use in LCA, AWARE: Available Water Remaining method». 2015: [acortar.link/dHi7ng](#).

WORLD ECONOMIC FORUM. «The Global Risks Report 2024». 19ª edición. Ginebra, Suiza: World Economic Forum. 2024: [acortar.link/b30WwP](#).

DIEZ

ESCUCHAR EL AGUA. MEDITACIONES HÍDRICAS Y OTRAS ACUATOPÍAS

Blanca de la Torre

NEIMANIS, ASTRIDA. «Hydrofeminism: Or, On Becoming a Body of Water». *Undutiful Daughters: Mobilizing Future Concepts, Bodies and Subjectivities in Feminist Thought and Practice*. Henriette Gunkel, Chrysanthi Nigianni y Fanny Söderbäck (eds.). Nueva York: Palgrave Macmillan, 2012, pp. 2 y 7. 2012.

FERNÁNDEZ PAN, SONIA. «Humans Are Ecohazards, Machines Too». *Institute for Postnatural Studies, Compost Reader* (2.ª ed). Madrid: Cthulhu Books, pp. 9-18. 2022.

NEIMANIS, ASTRIDA; BEZAN, SARAH. «Hydrofeminism on the Coastline: An Interview with Astrida Neimanis». *Anthropocenes – Human, Inhuman, Posthuman*. 3 (1), 8, pp. 1, 4, 8, 98, 111. 2022: [acortar.link/50wSkO](#).

ELFVING, TARU. «To be like Plankton», *Enfleshed. Ecologies of Entities and Beings*. Kristiina Koskentola y Marjolein van der Loo (eds). Onomatopée Projects, p. 136. 2023.

SHIVA, VANDANA. «Women and the Vanishing Waters». *Staying Alive. Women, Ecology and Survival in India*. Zed Books, pp. 179-217. 1988.

ONCE

CIUDADES DE AGUA

Sonia Freire Trigo

ACKROYD, PETER. *London: The Biography*. London: Vintage, 2001.

AROCA HERNÁNDEZ-ROS, RAFAEL. *La historia secreta de Madrid*. Madrid: Espasa, 2013.

BARTON, NICOLAS. *The Lost Rivers of London*. 2ª edición. Cheltenham(UK): History Press Limited. 1996.

Thames Water: 72 billion litres of sewage pumped into river in two years. BBC. 2023: [acortar.link/uhXsx6](#).

CAMINAR EL AGUA. *Un viaje a pie siguiendo la corriente*. 2020: [acortar.link/GeS29t](#).

MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO (MTERD). *Ejecución del Proyecto de restauración fluvial del río Manzanares en el Pardo*: [acortar.link/cZxuhX](#).

FARRELL, TERRY. *Shaping London. The patterns and forms that make the metropolis*. Chichester (UK): Wiley. 2010.

GARCÍA DE CORTÁZAR, FERNANDO y GONZÁLEZ VESGAS, JOSÉ MANUEL. *Breve historia de España*. Edición electrónica. Madrid: Alianza Editorial. 2022.

GIRARDET, HERBERT. *Creating Regenerative Cities*. Oxon (UK): Routledge. 2015.

- GUERRA CHAVARINO, RAFAEL. «Los viajes de agua de Madrid», pp. 419-465. 2006: [acortar.link/sPHwI3](#)
- HALLIDAY, STEPHEN. *The Great Stink: Sir Joseph Bazalgette and the Cleansing of the Victorian Metropolis*. Cheltenham (UK): The History Press. 2001.
- HARDIN, GARRET. «The tragedy of the commons». *Science*, vol. 162, n.º 3859, pp. 1243-1248. 1968: [acortar.link/x23la2](#).
- CANAL DE ISABEL II, S.F. *Historia del abastecimiento de agua en Madrid*: [acortar.link/J0vNW9](#).
- INWOOD, STEPHEN. *History of London*. London: Macmillan, 2000.
- JACOBS, JANE. *The Economy of Cities*. 1970: [acortar.link/0QezuC](#).
- LANDLAB Y PAISAJE TRANSVERSAL. *Santander, Hábitat Futuro*. Barcelona: Actar. 2023.
- MAZZOLI-GUINTARD, CHRISTINE. «La fundación de Madrid». En: GIL FLORES, D. (ed). *De MaYrit a Madrid: Madrid y los árabes, del siglo IX al siglo XXI*. Madrid: Casa Árabe e Instituto Internacional de Estudios Árabes y del Mundo Musulmán; Barcelona/Madrid: Lunwerk. 2011.
- MEADOWS, DONELLA H; MEADOWS, DENNIS L; RANDERS, JØRGEN; BEHRENS III, WILLIAM W. *The Limits to Growth; A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. New York: Universe Books. 1972.
- MEADOWS, DONELLA H; MEADOWS, DENNIS L; RANDERS, JØRGEN. *Beyond the limits*. Vermont: Chelsea Green. 1992.
- MORRIS, ANTHONY EDWIN JAMES. *Historia de la forma urbana. Desde sus orígenes hasta la revolución industrial*. Bernet, Reynald (trad.); Güell Guix, Xavier (revisión bibliográfica). 5ª edición. Barcelona: Gustavo Gili. 1984.
- PINTO CRESPO, VIRGILIO, GILI RUIZ, RAFAEL, VELASCO MEDINA, FERNANDO. *Proyecto de Investigación Historia del Saneamiento de Madrid*. Madrid: Fundación Canal. 2015: [acortar.link/30pWvx](#).
- ROYAL MUSEUMS GREENWICH, *Pollution in the reiver Thames*. 2015: [acortar.link/kiLZSu](#).
- ROSSI, ALDO. *La arquitectura de la ciudad*. Ferrer Ferrer, Josep Maria, Tarragó, Salvador, y Serra i Cantarell, Francesc (trads.); Romaguera i Ramió, Joaquim y Güell Guix, Xavier (revisión bibliográfica). 9ª edición. Barcelona: Gustavo Gili. 1982.
- SINCLAIR, IAIN. *Swimming to heaven: the lost rivers of London*. London: The Swedenborg Society. 2013.
- THE CONVERSATION. *The curious history of London's public drinking water fountains*. 2023: [acortar.link/iYGsAR](#).
- TOMOROV, LESLEY. *The History of the London Water Industry, 1580–1820*. Baltimore: Johns Hopkins University Press. 2017.

DOCE JARDINES SUBMARINOS: APRENDER A TERRAFORMAR

Marc García-Durán Huet

- GARCÍA-DURÁN HUET, MARC. *Underwater Gardens. Fundamentos*. Ed. JEBA ssl. 2010.
- BRATTON, BENJAMIN. *La terraformación*. Ed. Caja Negra. 2021.
- ZERO WASTE EUROPE. *Achieving the EU's Waste Targets: Zero Waste Cities showcasing how to go above and beyond what is required*. 2020: [acortar.link/rExzu6](#).
- AMIRI. M. C.; DADKHAH A.A. «On reduction in the surface tension of water due to magnetic treatment». *Colloids Surf A*, 278(1): 252-5. 2006: [acortar.link/mJrs4r](#).
- ALAVA, J. J. *et al.* «Projected amplification of food web bioaccumulation of MeHg and PCBs under climate change in the Northeastern Pacific». *Scientific Reports*, v. 8 n.º 1, p. 1-12. 2018: [acortar.link/BT0dYP](#).
- BATHIA, P.; RANGANATHAN, J. «GHG Protocol: The Gold Standard for Accounting for Greenhouse Gas Emissions». *Greenhouse Gas Protocol*. 2011: [acortar.link/cGOdsN](#).

- BENYUS, J. M. «Biomimicry- innovation inspired by nature». *Harper Perennial*. 2002.
- BIANCHI, T. S.; MADHUR ANAND, CHRIS T. BAUCH, DONALD E. CANFIELD, LUC DE MEESTER, KATJA FENNEL, PETER M. GROFFMAN, MICHAEL L. PACE, MAK SAITO, MYRNA J. «Simpson Ideas and perspectives: Biogeochemistry – Its Future Role in Interdisciplinary Frontiers». *Biogeosciences*, n.º 2. 2020: acortar.link/XEuLUq.
- BISWAS, G. *et al.* «Integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) outperforms conventional polyculture with respect to environmental remediation, productivity and economic return in brackishwater ponds». *Aquaculture*, vol. 516, p. 734626. 2020: acortar.link/b5NgdM.
- BUNKER, S. G. «Raw Material and the Global Economy: Oversights and Distortions in Industrial Ecology», *Society & Natural Resources: An International Journal*, v.9, n.º 4, p. 419-429. 1996: acortar.link/ZZjomu.
- BUSINESS AMBITION. *United Nations Global Compact*, (s.f.): cortar.link/pQ28zk.
- CAI R.; YANG H.; HE J. *et al.* «The effects of magnetic fields on water molecular hydrogen bonds». *J Mol Struct.* 2009: acortar.link/7MBNx8.
- CHAO B. F.; WU Y. H.; LI Y. S. «Impact of artificial reservoir water impoundment on global sea level». *Science*, n.º 320, p. 212-214. 2008
- CRAFT, W. *et al.* «Development of a regenerative design model for building retrofits», *Procedia Engineering*, v.180, p. 658-668, 2017: acortar.link/DFBxqN.
- DÍAZ, S. *et al.* IPBES: «Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services». *IPBES secretariat*, Bonn, Germany. 2019: acortar.link/QGe067.
- DOUGLAS E. M.; BELTRAN-PRZEKURAT A.; NIYOGI D.; PIELKE R. A.; VÖRÖSMARTY C. J. «The impact of agricultural intensification and irrigation on land-atmosphere interactions and Indian monsoon precipitation — a mesoscale modeling perspective». *Global Planet Change*, vol. 67, n.º 1-2, p. 117-128. 2009.
- DUDLEY, N.; GONZALES, E.; HALLET, J. G.; KEENLEYSIDE, K.; MUMBA, M. «The UN decade on ecosystem restoration (2021-2030): What can protected areas contribute?». *Parks Journal*, vol. 26, p. 111-117. 2020.
- EASTERBROOK, D. J. «Greenhouse Gases». *Evidence-Based Climate Science: Data Opposing CO2 Emissions as the Primary Source of Global Warming: Second Edition*, p. 163-173. 2016: acortar.link/snr2ca.
- EUROPEAN COMMISSION 2011: COM final. «Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Roadmap to a Resource Efficient Europe», 2011.
- FATEMI, A.; GLAUM, M.; KAISER, S. «ESG performance and firm value : The moderating role of disclosure», *Global Finance Journal*, vol. 38, p. 45-64. 2018: acortar.link/clz33w.
- FROLOV, A. «Investigation of the Possibility of Transformation of Heat Environmental Energy into Electric Energy by Means of a Vortex Process». *The Magazine of New Energy Science and Technology*, vol. 23, n.º 137. 2018.
- GALLAGHER, A.; REES, A.; ROWE, R.; STEVENS, J.; WRIGHT, P. «Microplastics in the Solent estuarine complex, UK: an initial assessment». *Marine Pollution Bulletin*, vol. 102, n.º 2, p. 243-249. 2016.
- GARCÍA-ALONSO J.; LERCARI D.; DEFEO O. «Río de la Plata: A Neotropical Estuarine System in Coasts and Estuaries», *Coasts and Estuaries*, p. 45-56. 2019: acortar.link/tzmWUO.
- GAYBULLAEV B.; CHEN S-C, GAYBULLAEV D. «Changes in water volume of the Aral Sea after 1960». *Appl Water Sci*, vol. 2, p. 285-291. 2012.
- GERASIMENKO, D.; MARKELOVA, E.; MOMOT, R. Refurbishing «Circular Economy» concept in Russia: from industrial policy towards innovation by co-creation». In: *Handbook on Circular Economy*. 2020.
- GRIFFITHS-SATTENSPIEL. B.; WILSON. W. *A River Network Report: The Carbon Footprint of Water*. 2009: acortar.link/PPum1Y.
- GRINEVALD, J. «The biosphere, by Vladimir I». *Synergetic Press*. 1986: acortar.link/RpAiBw.
- GUPTA, J.; VEGELIN, C. «Sustainable development goals and inclusive development». *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*, vol. 16, n.º 3, p. 433-448. 2016: acortar.link/C85xFJ.
- Hart, D.; Poff, L. A. «Special Section on Dam Removal and River Restoration», *BioScience*, vol. 52, n.º 8, p. 653-655. 2012: acortar.link/WTVKwe.

- HICKS, K. A.; MEGHAN L. M.; FUZZEN, EMILY K. McCANN, MARICOR J. ARLOS, LESLIE M. BRAGG, SONYA KLEYWEGT, GERALD R. TETREAULT, MARK E. McMASTER, MARK R. «Servos. Reduction of Intersex in a Wild Fish Population in Response to Major Municipal Wastewater Treatment Plant Upgrades». *Environmental Science & Technology*, vol. 51, n.º 3, p. 1811-1819. 2017: acortar.link/5vUgcR.
- HOFF, H. «Global water resources and their management», *Elsevier*, vol. 1, p. 141-147, 2009: acortar.link/TZgDfp.
- INVESTEU. *European Union*, (s.f.): acortar.link/wI17Ra.
- KARKKAINEN, B. C. «The Great Lakes water resources compact and agreement: Transboundary normativity without international law». *William. Mitchell Law Review*, vol. 39, n.º 3, p. 997-1026. 2012.
- LI, W. C.; TSE, H. F.; FOK, L. «Plastic waste in the marine environment: A review of sources, occurrence and effects». *Science of the Total Environment*, vol. 566, p. 333-349. 2016.
- LI, Z.; MA, J.; GUO, J.; PAERL, H. W.; BROOKES, J. D.; XIAO, Y.; FANG, F.; OUYANG, W.; LUNHUI, L. «Water quality trends in the Three Gorges Reservoir region before and after impoundment (1992–2016)», *Ecohydrology & Hydrobiology*, 19 (3), 317-327. 2019: acortar.link/o0X9ej.
- MANG, P.; REED, B. «Regenerative Development and Design». *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*. 2019: acortar.link/mvLSZ0.
- MARKELOVA, E. *et al.* «Speciation dynamics of oxyanion contaminants (As, Sb, Cr) in argillaceous suspensions during oxic-anoxic cycles». *Applied Geochemistry*, vol. 91, p. 75-88. 2018: acortar.link/UpQUSF.
- MARTINY, A. C.; PHAM, C. T. A.; PRIMEAU, F. W. *et al.* «Strong latitudinal patterns in the elemental ratios of marine plankton and organic matter». *Nat. Geosci.* v. 6, p. 279-283. 2013: acortar.link/a9VLtk.
- MEADOWS, D. H.; MEADOWS, D. L.; RANDERS, J. *et al.* *The Limits to Growth*. Potomac Associates - Universe Books, p. 205. 1972.
- MIKHAYLOV, A.; MOISEEV, N.; ALESHIN, K. *et al.* «Global climate change and greenhouse effect», *Entrepreneurship and Sustainability Issues*, vol. 7, n.º 4, p. 2897–2913. 2020: acortar.link/gOUSJs.
- NEEDHAM, T. P.; GHOSH, U. «Four decades since the ban, old urban wastewater treatment plant remains a dominant source of PCBs to the environment», *Environmental Pollution*, vol. 246, p. 390-397, 2019: acortar.link/uYMI1x.
- O'HIGGINS, G.; H. DEWITT, T.; LAGO, M. «Using the Concepts and Tools of Social Ecological Systems and Ecosystem Services to Advance the Practice of Ecosystem-Based Management», *Ecosystem-Based Management, Ecosystem Services and Aquatic Biodiversity*, p. 3-6. 2020.
- PANG X. F.; DENG B. «The changes of macroscopic features and microscopic structures of water under influence of magnetic field». *Phys B Condensed Matter*, 403 (19–20): 3571-7. 2008: acortar.link/rMidsi.
- PIET, G.; DELACAMARA, G.; KRAAN, M.; RÖCKMANN, G. C. *et al.* «Advancing aquatic ecosystem-based management with full consideration of the social-ecological system. *Ecosystem-based management, ecosystem services and aquatic biodiversity: Theory, tools and applications*, p. 17-38. 2020.
- PÖRTNER, H. O. *et al.* «Summary for Policymakers». *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. 2019.
- RANDERS, J. *et al.* «Achieving the 17 Sustainable Development Goals within 9 planetary boundaries», *Global Sustainability*, vol. 2, n.º 24, p. 1-11. 2019.
- RATUM, A.; SACHARI, A.; WAHJUDI, D. «A Review on Circular Design Guideliness by Ideo and Ellen Macarthur Foundation», *Institut Seni Budaya Indonesia*, vol. 1, n.º 1, p. 61-70. 2019.
- RAVEN J. «The possible roles of algae in restricting the increase in atmospheric CO2 and global temperature», *European Journal of Phycology*, vol. 52, n.º 4, p. 506-522. 2017: acortar.link/3Op2nM.
- REDFIELD, A. C. «The biological control of chemical factors in the environment». *Am. Sci.* v. 46, p. 205-221. 1958.
- ROBINSON, R. S.; BRZEZINSKI, M. A.; BEUCHER, C. P.; HORN, M. G. S.; BEDSOLE, P. «The changing roles of iron and vertical mixing in regulating nitrogen and silicon cycling in the Southern Ocean over the last glacial cycle», *Paleoceanography*, 29, 1179-1195. 2014: acortar.link/IUMm8R.
- RINKEVICH, B. «Climate change and active reef restoration-ways of constructing the “Reefs of Tomorrow”», *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 3, n.º 1, p. 111-127. 2015: acortar.link/gDmISy.

ROCKSTRÖM, J.; STEFFEN, W.; NOONE, K.; PERSSON, Å. *et al.* «The UN Decade of Ocean Science for Sustainable Development». *Front. Mar. Sci.* v. 6, n.º 470. 2019: [acortar.link/Evuc9q](#).

ROST S.; GERTEN D.; BONDEAU A. *et al.* «Agricultural green and blue water consumption and its influence on the global water system». *Wat Res Res*, vol. 44. 2008: [acortar.link/plc4pS](#).

SCHEFFER, M.; FOLKE, C.; SCHELLNHUBER, H.J. *et al.* «A safe operating space for humanity». *Nature*, vol. 461, n.º 7263, p. 472-475. 2009: [acortar.link/yVPt1U](#).

SCHMIDT, G.A. *et al.* «Attribution of the present-day total greenhouse effect», *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, vol. 115, n.º 20, p. 1-6. 2010: [acortar.link/CHW6An](#).

STAHEL, W.R. «Circular economy», *Comment*, vol. 531, p. 435-438. 2016.

STAHEL, W.R. *et al.* «Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet», *Science*, vol. 347, n.º 6223. 2015: [acortar.link/93Rcnf](#)

STUBBS, W.; COCKLIN, C. STUBBS, W. «Conceptualizing a “Sustainability Business Model”». *Organization & Environment*, vol. 21, n.º 2, p. 103-127. 2008: [acortar.link/BybBt3](#).

NANORESONANCE INDUSTRIES. *Technology in harmony with nature*. 2020: [acortar.link/YRYxBx](#).

TRUBETSKOVA, I. «From biosphere to noosphere: Vladimir Vernadsky’s theoretical system as a conceptual framework for universal sustainability education», 2010: [acortar.link/t8nPUg](#).

TSENG, H.; CHIEN-CHEN, C.; JIA-DIANN, L. «Modular design to support green life-cycle engineering». *Expert Systems with Applications*, vol. 34, p. 2524–2537. 2008: [acortar.link/x7oEna](#)

UNDERWATER GARDENS. 2020: [acortar.link/jKyBGR](#).

VILLARRUBIA-GÓMEZ, P.; CORNELL, S.E.; FABRES, J. «Marine plastic pollution as a planetary boundary threat – The drifting piece in the sustainability puzzle», *Marine Policy*, vol. 96, p. 213-220. 2018: [acortar.link/ddGyor](#).

WANG, Y, WEI, H.; LI, Z. «Effect of magnetic field on the physical properties of water». *Results in Physics* 8, 262-267. 2018: [acortar.link/idN77u](#).

WANG Y.; ZHANG B.; GONG Z.; *et al.* «The effect of a static magnetic field on the hydrogen bonding in water using frictional experiments», *J Mol Struct*, 1052(11):102-4. 2013: [acortar.link/NEhnCW](#).

WAHLER T.A.; DIETRICH E. S. «The vanishing Aral Sea: Health consequences of an environmental disaster». *Tidsskrift for Den norske legeförening*, vol. 137, n.º 18. 2017.

UNITED NATIONS. *Water scarcity*. 2014: [acortar.link/uUzcp9](#).

WORLD ECONOMIC FORUM. *The Global Risks Report 2016 11th Edition*, Switzerland. 2016: [acortar.link/rLk2jb](#).

WIERIK, S. A. *et al.* «The need for green and atmospheric water governance», *WIREs Water*, vol. 7, p. 1-20. 2020: [acortar.link/1muH7i](#).

TRECE LA INNOVACIÓN Y EL SECTOR DEL AGUA

Carlos Montero Ruano

MAS, M. *et al.* *Mapa de Talento en España 2023*. COTEC, 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, *Estadística sobre actividades de I+D 2022*, 2023.

AGUA: JUSTICIA POR UN TUBO

Pablo Alcalde Castroz

KARASAKI, S.; GODDARD, J.; COHEN, A.; RAY, I. «Environmental justice and drinking water: A critical review of primary data studies». *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 10. 2023: [acortar.link/TFjyQZ](https://doi.org/10.1002/wat2.1000).

WILL STEFFEN, *et al.* «Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet». *Science*: [acortar.link/93Rcnf](https://doi.org/10.1126/science.1257578).

SILENE. «Agua es Vida: Manifiesto por una visión holística y comprometida del agua». 2014: [acortar.link/qM6xp8](https://doi.org/10.1002/wat2.1000)

HALL, R.; KOPPEN, B.; HOUWELING, E. «The Human Right to Water: The Importance of Domestic and Productive Water Rights». *Science and Engineering Ethics*, 20, 849-868. 2013: [acortar.link/y5vafY](https://doi.org/10.1007/s11367-013-0745-1).

ALAWA, P. «Martin Heidegger on Science and Technology: It's Implication to the Society». *IOSR Journal of Humanities and Social Science*, 12, 01-05, 2013: [acortar.link/RmEQHb](https://doi.org/10.1007/s11367-013-0745-1).

GARDO, ISMAEL, JACQUES, VARET. *A Geothermal Civilization in the Afar Region: Era Boru (Teru woreda, Ethiopia)*. 2020.

SIG SAHEL – ACF. *Programme de surveillance et d'alerte précoce sur le Sahel*: [acortar.link/f1l31S](https://doi.org/10.1007/s11367-013-0745-1).

CARRIÈRE, SIMON D. *et al.* «Long-term groundwater resource observatory for Southwestern Madagascar». *Hydrological Processes*, vol. 35, n.º 3, p. e14108. 2021.

SWYNGEDOUW, ERIK. «The Political Economy and Political Ecology of the Hydro-Social Cycle», *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 142 (1). 2009.

WOLFF, JOSEPHINE. «How is technology changing the world, and how should the world change technology?», *Global Perspectives*, vol. 2, n.º 1, p. 27353. 2021: [acortar.link/bwxfnj](https://doi.org/10.1007/s11367-013-0745-1).

JAN W. VASBINDER, SANDER VAN DER LEEUW, VICTOR GALAZ, *The Illusion of Control*. *Global Perspectives*. 2024: [acortar.link/8MG2dV](https://doi.org/10.1007/s11367-013-0745-1).

THE NEW HUMANITARIAN, *The gender dimensions of water access*. 2026: [acortar.link/n5U46z](https://doi.org/10.1007/s11367-013-0745-1).

United Nations. What is Water Security? Infographic. 2013: [acortar.link/pu1kA4](https://doi.org/10.1007/s11367-013-0745-1).

GÜIZA, L. G.; ARISTIZABAL, J. D. *Mercury and gold mining in Colombia: a failed state*. 2013.

THE WORLD BANK GROUP. *Lack of Water Linked to 10 Percent of the Rise in Global Migration*. 2021: [acortar.link/Gv1pFa](https://doi.org/10.1007/s11367-013-0745-1).

ZEITOUN, MARK; MIRUMACHI, NAHO; WARNER, JEROEN; KIRKEGAARD, MATTHEW; CASCÃO, ANA. *Analysis for water conflict transformation*. *Water International*. 2019.

OXFAM. «Water War Crimes: How Israel has weaponised water in its military campaign in Gaza», *Briefing Paper*: [acortar.link/W89PFt](https://doi.org/10.1007/s11367-013-0745-1).

UNESCO. *Imminent risk of a global water crisis, warns the UN World Water Development Report 2023*: [acortar.link/SSSOeZ](https://doi.org/10.1007/s11367-013-0745-1).

ARARAL, EDUARDO, «The failure of water utilities privatization: Synthesis of evidence, analysis and implications», *Policy and Society*, vol. 27, pp. 221-228. 2009: [acortar.link/9yvjFs](https://doi.org/10.1007/s11367-013-0745-1).

LYONS, A. (2021). «Water Provision, Rights, and Poverty in the Context of Sustainable Development Goals». Leal Filho, W.; Azul, A.M.; Brandli, L.; Lange Salvia, A.; Wall, T. (eds) *Clean Water and Sanitation. Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals*. Springer, Cham. 2021: [acortar.link/1NtGi5](https://doi.org/10.1007/s11367-013-0745-1).



AUTORES



Carlos García Acón

CEO Esteyco

Consejero Director General de Esteyco desde 2008 y Patrono de su Fundación desde 2006.

Es ingeniero de Caminos por la Politécnica de Madrid y MBA por el IESE. En sus inicios participó y dirigió proyectos emblemáticos en la Barcelona de principios del siglo XXI. Es el impulsor, junto con Javier Rui-Wamba, de la evolución de Esteyco en la última década, liderando la transformación y la internacionalización del grupo, con una apuesta clara por la transición desde la ingeniería tradicional hacia una consultoría tecnológica más avanzada y diferenciada. Desde esa premisa, ha apostado por nuevos modelos de estructuración de proyectos y por el desarrollo de nuevos productos y tecnologías para la reducción del coste de la energía, como las disruptivas torres y cimentaciones eólicas prefabricadas de hormigón en el sector eólico, tanto en tierra como en el mar.

Desde la visión y el compromiso de hacer a Esteyco centenario, su principal función es conseguir las condiciones adecuadas para la atracción y la gestión del talento que asegure mantener la calidad y el servicio que han caracterizado a Esteyco durante las últimas cinco décadas.



Ángel Simón Grimaldos

Consejero Delegado del Consejo de Administración de Criteria Caixa

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Desde febrero de 2024, es consejero delegado de CriteriaCaixa, primer holding inversor en España y uno de los principales de Europa, que gestiona el patrimonio empresarial de la Fundación "la Caixa".

Anteriormente, su trayectoria profesional ha estado vinculada al sector del agua y del medio ambiente como presidente del grupo Agbar y de Aigües de Barcelona, entre otras responsabilidades. Inició su carrera como gerente del Área Metropolitana de Barcelona.

Como reconocimiento a su trayectoria, ha recibido diversas condecoraciones, como la Medalla a la Trayectoria Profesional (2023) concedida por la Fundación Caminos del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos; la Medalla de Honor al Empresario del Año (2020) de Foment del Treball Nacional; la Medalla de Honor (2017) y la Medalla al Mérito Profesional (2010) del Colegio de Ingenieros de Caminos; y la Medalla Ildefons Cerdà del Colegio de Ingenieros de Caminos de Cataluña (2008).



Pedro Torres

Artista visual (Brasil, 1982)

Encauza su práctica artística principalmente en el concepto de tiempo, explorando diferentes aspectos del mismo, desde enfoques y perspectivas tanto científicos como filosóficos. A partir de este eje central del tiempo lo conecta con otros ámbitos de nuestra experiencia, como el espacio, la materialidad, la memoria, el lenguaje y también la imagen. Emplea una variedad de medios en su práctica, procurando un equilibrio entre lo estético y lo conceptual. Temas y teorías científicas están muy presentes, así como la necesidad de explorar diferentes medios y procesos e investigar de forma metodológica, intuitiva y poética.



Franc Cortada Hindersin

Director General de Oxfam

Cuenta con más de 25 años de compromiso y dedicación a la lucha por los derechos humanos, la erradicación de la pobreza y el combate contra las injusticias. Siente pasión por su trabajo, es franco, directo, tenaz y difícil de disuadir. Franc tiene la firme convicción de que el cambio es posible y de que podemos habitar un mundo más justo, humano y sostenible.

Franc es Ingeniero de Caminos de formación y cuenta con estudios en los ámbitos desarrollo, exclusión social y diversidad cultural. Sus comienzos en el campo del desarrollo y la acción humanitaria fueron como ingeniero hidráulico en contextos tan diversos como América Latina, los Balcanes o Senegal.

Desde 2012 hasta 2020 fue Director Global de Programas de la confederación Oxfam, con responsabilidad directa sobre el trabajo en más de 70 países y un equipo de más de 8.000 personas. Durante ese periodo, Franc lideró y contribuyó con éxito a algunos de los mayores cambios transformativos en Oxfam Internacional. Anteriormente, trabajó con Oxfam Intermón durante 11 años en diferentes puestos, incluida la dirección de Cooperación Internacional. Siempre ha compaginado su trabajo con la colaboración como profesor en varias universidades, entre ellas la Universidad Politécnica de Cataluña.

En 2023 recibe la Medalla Ildefons Cerdà, en reconocimiento a «su trayectoria de excelencia en el ámbito de la cooperación internacional y su impacto directo en la mejora de la vida de las personas en comunidades vulnerables de todo el mundo».



Ignacio González-Castelao Martínez-Peñuela

Presidente del Comité Técnico Permanente de Agua de la WFEO

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos especializado en el sector del agua. Asimismo, está certificado como auditor interno por el Institute of Internal Auditors.

Es el Presidente del Comité de Agua de la World Federation of Engineering Organizations (WFEO) y miembro del Consejo Ejecutivo. La WFEO fue fundada bajo los auspicios de la UNESCO y reúne a instituciones nacionales de ingeniería de más de cien países, representando a más de 30 millones de ingenieros.

Colabora con múltiples comunidades técnicas, los bancos multilaterales y las organizaciones internacionales para compartir conocimientos y aprendizaje. Ha sido miembro de la Junta Directiva de la Asociación de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos y de la Ingeniería Civil, y de varios comités del Instituto de la Ingeniería de España (IES). También es miembro de distintos comités de ONU-Agua, habiendo participado en varias de sus publicaciones.

Fue Presidente del Comité de Agua del World Council of Civil Engineers. Sus esfuerzos por difundir el conocimiento y el aprendizaje le han llevado a ser seleccionado por el Departamento de Estado de los Estados Unidos de América como Visitante de Liderazgo Internacional (IVLP) y más tarde Secretario General de la Asociación VIA Círculo Jefferson.

Ha trabajado en diferentes empresas de ingeniería y, actualmente, es Gerente Adjunto al Presidente en Aguas de las Cuencas Mediterráneas S.M.E., S.A.



Montserrat Termes Rifé

Profesora Asociada UB (Economía)

Doctora en economía y profesora titular en la Universidad de Barcelona (UB).

Actualmente, forma parte del Departamento de Econometría, Estadística y Economía Aplicada de la UB, donde también es miembro del grupo de investigación consolidado Gobiernos y Mercados, del Instituto de Investigación en Economía Aplicada (IREA) y del Instituto del Agua (IdA) de la Universidad de Barcelona.

Ha colaborado con diversas instituciones y organizaciones en proyectos relacionados con la economía del agua. Es asesora científico-técnica en el CETaqua, Centro Tecnológico del Agua, en proyectos de investigación sobre la socioeconomía del agua. Forma parte del Observatorio Intercolegial del Agua y del Comité de Expertos del Observatorio de la Transición Hídrica de la Cámara de Comercio de Barcelona.

En la actualidad, es la Presidenta del Grupo de Expertos sobre Cambio Climático que debe proponer los presupuestos de carbono para Cataluña.

Ha participado en varios proyectos de investigación sobre la economía de los servicios esenciales, así como en distintos proyectos europeos sobre la economía del agua. Fruto de esta actividad, su contribución académica incluye numerosas publicaciones en revistas científicas y participaciones en congresos nacionales e internacionales.



Judit Montoriol Garriga

Economista principal en el departamento de Economía Española en CaixaBank Research

Doctora en Economía por la Universitat Pompeu Fabra y Máster en Economía por la misma universidad.

Antes de incorporarse a CaixaBank trabajó como economista en el Departamento de Supervisión y Regulación del Banco de la Reserva Federal de Boston, en EE. UU. Posteriormente, fue profesora visitante de la Universitat Autònoma de Barcelona en el Departamento de Empresa.

Ha publicado su investigación en el *Journal of Financial Economics*, el *Journal of Banking and Finance* y el *Journal of Monetary Economics*, entre otros.

En CaixaBank, coordina la elaboración de los Informes Sectoriales (Inmobiliario, Turismo, Agroalimentario y el Observatorio Sectorial).



Rubén Ruiz Arriazu

Director Continuidad Negocio, Grupo Agbar-Veolia (Barcelona, 1978)

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos por la UPC, ha dedicado toda su carrera profesional al mundo del agua y el medio ambiente, en trabajos de ingeniería y operaciones.

Dentro de AGBAR, ha ocupado diferentes posiciones en el ámbito operativo, llegando a ser Director de Operaciones de AGBAR España desde 2018 hasta 2020. También ha sido Director General de Aguas de Barcelona (2020-2023).



Xavier Sanchez-Vila

Catedrático en hidrogeología en la
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos por la UPC con un Máster en Geotechnical Engineering por la University of California at Berkeley.

Con más de 30 años de experiencia docente e investigadora, su trabajo se centra en la hidrogeología estocástica, la recarga gestionada de acuíferos y la modelación de procesos biogeoquímicos en medios porosos. Ha publicado más de 150 artículos científicos en revistas internacionales (índice H=45). Ha dirigido 18 doctorados en los últimos 10 años. Ha sido profesor visitante en UC Berkeley, UC San Diego y el Politecnico di Milano.

Cuenta con diversos premios internacionales, destacando la Darcy Medal 2020 (European Geosciences Union, EGU), 2011 Arthur Ippen Award (IAHR, International Association for Hydro-environment Engineering and Research) y la Distinción ICREA Academia (2011) por la excelencia en la investigación.

Ha sido Presidente del Capítulo Español de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (2000-2003), Chair del Groundwater Hydraulics and Management Committee de la IAHR (2011-2015) y Editor de Water Resources Research (2015-2024). Actualmente, dirige el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la UPC y es Editor de la revista *Hydrology and Earth System Sciences* (HESS).



Daniel Fernández-García

Catedrático en hidrogeología en la
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos con un Ph. D. en Environmental Science and Engineering por la Escuela de Minas de Colorado, EEUU (2003).

Con más de 20 años de experiencia, su trabajo de investigación se centra principalmente en la modelación del flujo y el transporte de solutos en medios porosos, evaluación de recursos mineros y gestión de acuíferos, interacción obra civil y aguas subterráneas, análisis de riesgos, contaminación de acuíferos e ingeniería de remediación, modelos de flujo multifásico, transporte reactivo, geotermia, métodos numéricos, recarga artificial y métodos estocásticos aplicados a la hidrogeología.

Ha publicado más de 90 artículos en revistas internacionales (índice H=37). Ha dirigido 37 tesis de máster y 10 doctorados en los últimos 10 años.

Premio Alfons Bayó (2007) de la AIH-GE (Asociación Internacional de Hidrogeología) para jóvenes investigadores. En 2017 fue ganador del programa inspire de REPSOL por los trabajos de recuperación de petróleo mejorada con flujos caóticos. Es editor asociado de la revista más prestigiosa en hidrogeología, *Water Resources Research*, perteneciente a la American Geophysical Union. Actualmente, es subdirector de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona.



Desirée Marín

Directora de Innovación de Agbar en Catalunya y Profesora Asociada en la UPC

Ingeniera Química y, actualmente, Directora de Innovación de Agbar en Catalunya, uno de los principales grupos de empresas de agua españoles perteneciente al grupo Veolia. Compagina su rol con la docencia en Sostenibilidad y Economía Circular como Profesora asociada en la UPC Barcelonatech.

Estuvo al frente del Área de Investigación en Sostenibilidad de Cetaqua, Centro Tecnológico del Agua, donde se especializó en evaluación de impactos ambientales a través de metodologías de huella de carbono e hídrica y el análisis del ciclo de vida.

Ha participado activamente en el avance de los indicadores de impacto, el desarrollo de herramientas y certificaciones para la mejora de la huella ambiental de productos y organizaciones y la definición de estrategias corporativas de sostenibilidad y modelos de negocio sostenibles.



Claudia Segura Campins

Comisaria y Responsable de Colección del MACBA (Barcelona, 1984)



Ha sido Comisaria de Exposiciones y Colección en el MACBA desde 2019 hasta el año 2024, donde se destaca el comisariado de la colección de arte conceptual de Rafael Tous, donada al museo, así como la primera monográfica de la artista performer María Teresa Hincapié.

Licenciada en Humanidades por la Universidad Pompeu Fabra de Barcelona (2007) y Máster de Teoría del Arte Contemporáneo en Goldsmiths University (Londres, 2008). Fue Directora y Curadora en Jefe de NC-arte en Bogotá (Colombia) donde curó varios proyectos *site-specific* de diferentes artistas (Amalia Pica, Luis Camnitzer, Xavier Le Roy, Nicolás Paris, Nicolás Consuegra, Los Carpinteros, Alia Farid...). También fue coordinadora de proyectos culturales en la Fundación "la Caixa", comisaria externa de la Bienal de Mardin en Turquía, Tutora de la Sala de Arte Joven de Barcelona y del laboratorio Cano en el Museo de la Universidad Nacional de Bogotá.

Ha curado y cocurado proyectos como: *Hay que saberse infinito, retrospectiva de Maria José Arjona* en el MAMBO (Bogotá, 2018), *The border is you, Proyectos LA*, (Los Ángeles, 2017), *Límites Nómadas*, (Bienal de las Fronteras de México, 2015), *Fifty (Pipilotti Rist) from Han Nefkens H+F Collection in collectorspace* (Estambul, 2014), *Copy/Paste – Recodifying the gesture* (Instituto Cervantes de Londres), *Like Tears in Rain* realizada (El Palacio das Artes de Porto), *Producing Urban Order* (Goldsmiths University, Londres).

Realizó la coordinación editorial de la revista *Flora* 2015 de Flora ars+natura, Bogotá. Y es una de las componentes del equipo de investigación: De Vuelta y Vuelta, así como Para abrir Boca.



Blanca de la Torre

Curadora de arte e historiadora



Doctora en Bellas Artes, historiadora del arte, investigadora, comisaria de exposiciones y directora de proyectos, cuya labor se sitúa en la intersección entre las artes visuales, la ecología política y las prácticas creativas sostenibles.

En este momento es comisaria jefe de la Bienal de Helsinki (Finlandia) y directora artística de ISLA. Fue curadora jefe de la 15 Bienal Internacional de Cuenca, Ecuador, y codirectora artística del proyecto *Overview Effect* en el Museo MoCAB de Belgrado y *Con los pies en la T(t)ierra* en el CAAM, Centro Atlántico de Arte Moderno, donde también está al frente del Aula Sostenible.

Del 2009 a 2014, fue comisaria, conservadora y responsable de exposiciones y proyectos de ARTIUM, Centro-Museo Vasco de Arte Contemporáneo (Vitoria-Gasteiz, España). Posteriormente, ha comisariado exposiciones entre los que cabe destacar: MoCAB, Museo de Arte Contemporáneo de Belgrado; Salzburger Kunstverein, Salzburgo; EFA, Elisabeth Foundation Project Space; Centro de las Artes de Monterrey; Museo Carrillo Gil de Ciudad de México; Museo de Arte Contemporáneo de Oaxaca; Museo de Arte Contemporáneo Ex Convento del Carmen Guadalajara; Museo de Arte Contemporáneo de Ciudad Juárez; Museo de Arte Contemporáneo de Sonora; NC-Arte, Bogotá; RAER, Real Academia de España en Roma; LAZNIA Center for Contemporary Art, Gdansk; Sala Alcalá 31; CentroCentro; Fernán Gómez, Madrid; NGMA, National Gallery of Modern Art de Nueva Delhi; MUSAC, Museo de Arte Contemporáneo de Castilla y León, 516 Contemporary Arts Museum de Albuquerque.

Ha publicado más de un centenar de textos especializados en libros, catálogos y revistas y participa regularmente en conferencias y simposios internacionales sobre cultura y sostenibilidad.

Foto: © Ilkka Saastamoinen



Sonia Freire Trigo

University College London



Arquitecta por la Universidad de la Coruña y Doctora en Urbanismo por la University College London, donde trabaja como profesora titular y dirige el programa Máster de Regeneración Urbana.

En su formación académica, también cuenta con el Máster de Planeamiento Urbano y Territorial de la Universidad Politécnica de Madrid y con la titulación de Técnico de Urbanismo por la Escola Galega de Administración Pública.

Sonia ha trabajado como investigadora en proyectos subvencionados por la Comisión Europea, RICS, y RTPI. Sus líneas de investigación se centran principalmente en la gobernanza y la gestión de procesos de regeneración urbana. Ha conseguido una subvención de la British Academy, junto a la Dra. Jessica Ferm (UCL) y la Prof. Niamh Moore Cherry (UDC), para el proyecto *Understanding the Impacts and Outcomes of London's Opportunity Areas*. El objetivo del proyecto, del que es la investigadora principal, es analizar el impacto social y económico de las denominadas «áreas de oportunidad» del Plan de Londres; y establecer una metodología de evaluación adecuada.

Ha publicado en revistas científicas indexadas internacionales, como *Housing Studies*, *Progress in Planning*, o *Regional Studies*; y en revistas nacionales especializadas, como *Crítica Urbana* o la *Revista Ába*.



Marc García-Durán Huet

Fundador y CEO de Underwater Gardens

Arquitecto, urbanista, buceador y emprendedor. Desde 2000 a 2016 ha participado en múltiples proyectos de reconocidas firmas de arquitectura; entre otras, Ted Moudis Associates, Antoni Moragas, Enric Miralles (EMBT), Elías Torres y José Antonio Martínez Lapeña (JAMLET). Tras colaborar con Esteyco, en primer lugar, funda y dirige IMQ arquitectos y, más tarde, GDE arquitectos, focalizándose en proyectos de urbanismo y arquitectura en el 22@.

Después de participar con la ONG Vicente Ferrer en la India, finalmente, en 2016, funda Underwater Gardens International (UGI) con la visión de promover parques regenerativos, como disruptores territoriales dedicados a canalizar la inversión en la regeneración marina y la conciencia ambiental.

También ha compartido su experiencia como conferenciante invitado en, entre otras instituciones, el Instituto de Arquitectura Avanzada (laaC) de Barcelona, la Universidad de Sevilla o la Universidad de Sídney en Australia. Más recientemente, ha sido invitado a explicar el modelo de Underwater Gardens en las diferentes COP de Sharm el-Sheij, Dubái y Cali.



Carlos Montero Ruano

Director de Proyectos Estratégicos del Grupo Agbar

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos y máster en Gestión Integral del Agua por la UPC.

Lleva más de 20 años vinculado al Grupo Agbar, donde inició su trabajo en planificación y proyectos, para ir gradualmente dedicándose a la innovación. Primero, en una empresa mixta; luego, como Director Técnico de Cetaqua - Centro Tecnológico del Agua, fundación que reúne el mundo académico y el empresarial. Tras ser Director General de Agua Industrial, regresó a liderar el área de innovación, como Chief Technology Officer de Agbar y Director General de las cuatro fundaciones Cetaqua. Impulsó la colaboración con las universidades, buscando una orientación de los proyectos de I+D hacia las necesidades del sector. Generó una línea de vigilancia tecnológica, pruebas de concepto, incorporación de tecnologías e inversión en startups, que aceleró la tasa de adopción tecnológica. En otoño del 2023 pasó al área de Operaciones de Agbar, para gestionar los episodios de sequía y otros proyectos singulares.

Colabora con el Colegio de Caminos en la Comisión de Agua, Energía y Medio Ambiente y en la Comisión/Observatorio Intercolegial de agua de Cataluña. Desde su posición actual de Director de Proyectos Estratégicos, continúa impulsando la innovación colaborativa, orientada a creación de valor a nivel europeo.



Eduardo Rojo Martínez

Generación Hidroeléctrica, Iberdrola
(Burgos, 1977)

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos por la Universidad de Cantabria y experto universitario en Dirección y Gestión de Empresas Inmobiliarias y de Construcción por la UNED. Ha participado también en programas de desarrollo de directivos impartidos por ESADE.

Su trayectoria profesional siempre ha estado vinculada a las obras hidráulicas y las centrales hidroeléctricas. Empezó a trabajar en el Departamento de Obras Hidráulicas de IBERINSA (Ibérica de Estudios e Ingeniería, S.A.), incorporándose posteriormente a IBERDROLA, donde lleva ya casi 20 años.

Ha pasado por diferentes responsabilidades dentro de la Dirección de Generación Hidroeléctrica y actualmente ocupa el puesto de Jefe del Departamento de Gestión Técnica Hidroeléctrica. Entre sus responsabilidades figuran: el mantenimiento y la conservación de obra civil, la seguridad de presas, el patrimonio concesional, el centro 24/7 de telecontrol y el estudio de nuevas centrales hidroeléctricas (incluidas las correspondientes a los más de 6 GW de bombeo que Iberdrola tiene en cartera).

Es Vocal del Comité Nacional Español de Grandes Presas (SPANCOLD) donde participa como miembro de diferentes comités técnicos.



Enrique Catalina Carmona

Segundo Tte. Alcalde Concejal-Delegado de Urbanismo, Obras Públicas y Licencias
Excmo. Ayuntamiento de Granada

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos por la escuela de ICCP de Granada. Master en Dirección y Administración de Empresas. Con una experiencia de más de 25 años, ha desarrollado la totalidad de su carrera profesional en la empresa privada ejecutando todo tipo de obras a lo largo del territorio nacional para diferentes administraciones, especialmente obras lineales de Carreteras y Ferrocarril.

Administrador único de la consultora ZOSER Ingeniería SLU, así como Director del Puerto Deportivo de Marina del Este (La Herradura, Granada).

Entre febrero de 2019 y junio de 2023 ocupó el cargo de Director General de Infraestructuras de la Consejería de Fomento, Articulación del Territorio y Vivienda de la Junta de Andalucía. Consejero de la Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía (AOPJA) y de la Agencia Pública de Puertos de Andalucía (APPA), Vicepresidente de la Asociación Española de la Carretera, (AEC), y otros cargos de representación en diferentes organismos.

Desde Junio de 2023 tiene el cargo de 2º Tte. Alcalde Concejal-Delegado de Urbanismo, Obras Públicas y Licencias del Excmo. Ayuntamiento de Granada. Consejero del Patronato de la Alhambra y Generalife, Consejero de EMASAGRA, Consejero de MERCAGRANADA, Consejero de la Agencia Albaicín Granada, representante en el Consejo Andaluz de Ordenación del Territorio y Urbanismo, entre otros.



Pablo Alcalde Castro

Responsable de Agua y Saneamiento,
Acción contra el Hambre

Ingeniero Mecánico por Universidad de Comillas ICAI, con una sólida experiencia en el sector de agua, saneamiento e higiene (WASH).

Desde su época universitaria, ha estado vinculado a la cooperación, tanto técnica en becas de trabajo en Polonia, Alemania y Croacia, como internacional en Ingeniería sin Fronteras, hoy Ongawa. Ha trabajado con diferentes organizaciones: Cruz Roja, Cáritas, Médicos del Mundo y Acción contra el Hambre en diversas regiones del mundo (Balcanes, África Subsahariana, Centro América y Medio Oriente).

En 2005, se unió a Acción contra el Hambre, donde actualmente dirige el Departamento de Agua, Saneamiento e Higiene. También ha colaborado en maestrías especializadas en el sector en diferentes universidades y en iniciativas de Ingeniería para el desarrollo. Junto con la Universidad de Alcalá, fue coordinador técnico del Postgrado Agua, Saneamiento e Higiene en Emergencias y Cooperación Internacional en sus 12 ediciones.



Juan Pablo Pacheco Bejarano

Artista visual y escritor

Artista, escritor y educador afincado en Madrid, que busca convertirse en una antena amplificadora de los poderes curativos del agua. Utilizando un amplio conjunto de herramientas de investigación y creación colaborativas, su investigación se sumerge en infraestructuras tecnológicas y sociales, las ecologías del agua, la telepatía y la fermentación. Sus proyectos abren portales entre lo tangible y lo intangible, lo ancestral y lo emergente, lo digital y lo encuerpado, intentando imaginar tecnologías más allá de la extracción y relacionarse con el agua como un archivo vivo.

Ha trabajado como gestor cultural con Espacio Odeón, Plataforma Bogotá y Escuela de Garaje en Colombia y ha impartido clases en las universidades Javeriana y Andes de Bogotá, y en la Real Academia de las Artes de La Haya.

Su obra se ha expuesto en el Hordaland Kunstsenter (Bergen), Manifesta (Barcelona), Intermediae Matadero y Museo Thyssen Bornemisza (Madrid), Jan van Eyck academie (Maastricht), Porto Design Biennial (Oporto), La MaMa (Nueva York), Kunstenfestivaldesarts (Bruselas), Simposio Internacional de Artes Electrónicas ISEA (Barcelona), Festival Internacional de la Imagen (Manizales), Galería Santa Fe y Museo Miguel Ángel Urrutia (Bogotá), Transmediale (Berlín), Bienal de los Urales (Ekaterimburgo) y Museo Carrillo Gil (Ciudad de México).



Imma Estrada Palacios

Directora Desarrollo Esteyco

Es Doctora Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos (por la Escuela de Barcelona-UPC) y cuenta con casi 25 años de trayectoria profesional en el ámbito de las infraestructuras y la energía, siempre con una mirada multidisciplinar.

Tras una larga trayectoria en Esteyco, que la llevó a abrir y dirigir la filial en Chile de 2012 a las navidades de 2015, hoy es Directora de Organización y Desarrollo. Es socia y miembro del Consejo de Administración, y con ello está altamente involucrada en el presente y el futuro de Esteyco y su Fundación.

Desde la óptica del desarrollo, es responsable de impulsar, definir y dirigir nuevas líneas de negocio relacionadas con la estructuración de proyectos de energías renovables en las que Esteyco toma un rol de promotor. Actividad que, a día de hoy, cuenta con amplio y diverso portfolio de proyectos que implican tecnología eólica —con gran protagonismo de la eólica *offshore*) y solar fotovoltaica, hibridadas a su vez con sistemas de almacenamiento y otras tecnologías incipientes, tales como el H2 verde.

Es Vicepresidenta de la Comisión de Agua, Energía y Medio Ambiente del Colegio de Caminos, Canales y Puertos en Cataluña.

