



CIUDADANÍA Y VALORES  
FUNDACIÓN

**EL BINOMIO AGUA -ENERGÍA.  
¿UN ASUNTO DE MODA O DE INTERÉS REAL?**

***Enrique Cabrera***

**Catedrático de Mecánica de fluidos**

**Universidad Politécnica de Valencia**

Noviembre 2011



La Fundación Ciudadanía y Valores como institución independiente, formada por profesionales de diversas áreas y variados planteamientos ideológicos, pretende a través de su actividad crear un ámbito de investigación y diálogo que contribuya a afrontar los problemas de la sociedad desde un marco de cooperación y concordia que ayude positivamente a la mejora de las personas, la convivencia y el progreso social

Las opiniones expresadas en las publicaciones pertenecen a sus autores, no representan el pensamiento corporativo de la Fundación.

## Sobre el autor

**Enrique Cabrera** Dr. Ingeniero Industrial y Licenciado en Ciencias Físicas es catedrático de Mecánica de Fluidos desde 1981 en la Universidad Politécnica de Valencia. Ha publicado más de 300 artículos técnicos (35 de ellos en revistas del SCI) y 70 artículos de opinión en los principales periódicos nacionales, los más de ellos relacionados con la política del agua. Ha editado 22 libros en el campo de la Ingeniería del Agua (once en inglés), habiendo participado como autor de algún capítulo en otros 50. Evaluador y revisor de proyectos de los programas marco de investigación de la Unión Europea en el área de recursos hídricos y gestión del agua ha sido Presidente de la Comisión de Expertos en Sequía del Ministerio de Medio Ambiente entre 2004 y 2007. Ha sido Ingeniero Municipal de su ciudad natal, Vila-real, entre 1973 y 1979.

## EL BINOMIO AGUA - ENERGÍA. ¿UN ASUNTO DE MODA O DE INTERÉS REAL?

### RESUMEN

La actual coyuntura económica es una excelente ocasión para replantearse la conveniencia de abandonar decisiones rutinarias. Cuando todo va bien, el *business as usual* no se cuestiona, pero con las dificultades, y el momento actual es muy complejo, ya nada es así. Y con frecuencia, además, se constata que lo que se venía haciendo es mejorable. Por ello, aunque el interés por caracterizar mejor el nexo agua – energía precede a la crisis económica mundial (nace con el siglo XXI), las actuales circunstancias son propicias para relanzar el interés del asunto.

El objetivo del nexo agua y energía es caracterizar su interdependencia (mayor de la que en principio se pueda pensar) para, desde ese conocimiento, optimizar el uso de estos dos recursos clave. En un país como España, con una elevada dependencia energética, con sequías recurrentes y en un contexto de cambio climático el asunto merece, cuanto menos, más atención. Sobre todo por parte de las administraciones responsables de gestionarlos eficientemente, toda vez que un análisis profundo del nexo permitirá cuantificar las posibilidades de mejora. Y no parecen escasas.

### 1. INTRODUCCIÓN

Hasta hace una década la única relación agua - energía objeto de interés era el aprovechamiento de la energía de las corrientes de los ríos. Primero con norias y molinos y, a partir del siglo XIX, con turbinas. Interesaba, pues, el agua como fuente de energía. Pero propiciado por el estancamiento de la producción de hidroelectricidad, por el gran consumo energético que el manejo sostenible del agua exige y, finalmente, por la necesidad de generar recursos alternativos (agotadas las fuentes tradicionales, en algunas áreas geográficas hay que recurrir a la reutilización cuando no a la desalación), en los últimos años ha despertado notable interés la relación inversa, o sea, el agua como consumidor de energía.

Las frecuentes sequías y el reto del cambio climático exigen mayores niveles de eficiencia en el uso de estos recursos. El calentamiento global, la evidencia del cambio climático, amenaza con disminuir la disponibilidad de agua en las áreas de mayor estrés hídrico que suelen coincidir con las de mayor demanda. Ello obliga a recurrir a fuentes alternativas energéticamente más exigentes y a elevar el agua subterránea desde mayores profundidades. Y no acaba ahí la interdependencia. De una parte menos agua supone menos hidroelectricidad y de otra más temperatura aumenta el consumo energético doméstico para climatizar las viviendas. Todos los vectores van, pues, en la misma dirección, aumentan el gasto de energía no renovable, propician el cambio climático y, en fin, alimentan un ciclo vicioso que debe ser controlado.

Esta reflexión revisa en primer lugar el notable papel como fuente de energía jugado por el agua, una historia tan antigua como la vida misma, y aún hoy de actualidad. Pero como los mejores aprovechamientos hidroeléctricos ya han sido construidos, hoy los esfuerzos se dirigen a mejorar la eficiencia de las turbinas. Y en segundo lugar, el núcleo de la reflexión, se expone por qué el manejo sostenible del agua comporta un gasto de energía notable, un análisis que, tras el informe

del Departamento de Energía del Estado de California (CEC, 2005b), gana día a día interés. El repaso que se hace evidencia el interés que ha suscitado esta cuestión en el mundo. España, sin embargo, no conoce ninguna iniciativa de la administración al respecto, probablemente porque lastrada por el día a día no encuentra el momento de revisar las políticas actuales y mirar hacia el futuro. Y sin embargo tiene un notable interés tanto por nuestra dependencia energética del exterior como porque hasta ahora la gestión de la demanda del agua (los precios políticos así lo propician) se ha ignorado por completo. Por ello, el margen de ahorro de agua que existe (y de la energía a ella ligada) es importante. Y ello sin olvidar las posibilidades que siempre ofrecen la mejora de los procesos. Por último, y no es una cuestión menor, una mejor comprensión de la relación agua - energía permitiría minimizar el impacto hídrico del cambio climático. Siendo España una de las áreas del planeta a la que las predicciones de los modelos del IPCC le auguran un futuro más sombrío (los recursos hídricos pueden verse reducidos hasta en un 30%), parece conveniente abordar con decisión este asunto.

## **2. EL AGUA FUENTE DE ENERGÍA**

Desde hace varios milenios, el agua se utiliza como fuente de energía. Y así las antiguas norias aprovechaban la velocidad del agua del río para, mientras llenaban sus cangilones, provocar el giro y con él, su elevación. Hablamos del dispositivo más antiguo que ha utilizado el agua como fuente de energía (se remonta al siglo XVIII AC). Y tanto en Roma como en China, dos de los grandes imperios de la antigüedad, las referencias a su utilización son numerosas.

Pronto, pues, el hombre utilizará las corrientes naturales como fuente de energía evidenciando que la Ingeniería del Agua es la más antigua de las ingenierías. Y también muy pronto la relación inversa (transformar energía mecánica en hidráulica) despertó el interés de un hombre que primero necesitó el agua para vivir y, con el paso del tiempo, para hacerlo con mayor confort. La bomba de pistones y el tornillo de Arquímedes, son los primeros ingenios que lo posibilitaron (se conocen desde varios siglos antes del comienzo de nuestra era).

Pero estas máquinas de la antigüedad eran todas volumétricas. Hay que esperar al siglo XVIII para que aparezcan las primeras bombas y turbinas a reacción, cuya diferencia fundamental con las precedentes, es el salto de presión que generan los rodets (positivo en las bombas, negativo en las turbinas). Es Euler quien en 1754 establece las bases de las máquinas que posibilitarán el desarrollo de la hidroelectricidad. Una fuente de energía que España potenciará en el siglo XX hasta casi alcanzar los 20000 Mw de potencia instalada. Pero en España, como en todos los países desarrollados (no así en los emergentes) esta fuente de energía apenas da más de sí.

En el 2006, España, con sus 18,3 Gw instalados, ocupaba el décimo lugar del ranking mundial por detrás de Estados Unidos, China, Canadá, Brasil, Japón, Rusia, India, Noruega y Francia, prueba evidente del gran desarrollo que esta energía ha tenido en nuestro país. De hecho quienes nos preceden en el ranking o son países inmensos o, como Noruega, son ricos en recursos hídricos. O ambas cosas a la vez. En concreto el potencial de China, el mayor del mundo tras la entrada en servicio de la presa de las Tres Gargantas, es cinco veces superior al de España, aunque al gigante asiático su elevada potencia sólo le sirve para cubrir el 16 % de su demanda. En España el peso de la energía de origen hidroeléctrico ha disminuido con el paso del tiempo. En la actualidad se mueve dentro de una amplia horquilla (20 % +30 %), fiel reflejo de nuestra variabilidad climática.

Pero hoy la energía hidroeléctrica casi ha alcanzado su techo. En los países más desarrollados porque las grandes instalaciones están realizadas. Y en los que no lo están porque la sociedad de hoy es más sensible que la de hace unas décadas a las alteraciones medioambientales, en gran medida porque las experiencias negativas no escasean. Ejemplo palmario es la citada presa china de las Tres Gargantas en el río Yangtse. Finalizada hace cinco años (fue en mayo de 2006), su construcción comportó la evacuación de mil ciudades y desplazamiento de un millón de personas.

De cuanto antecede, breve resumen del agua fuente de energía, se concluye que en los próximos años, al menos en los países desarrollados, el interés del mundo hidroeléctrico se dirigirá más a mitigar el impacto ambiental de las centrales existentes y a mejorar sus rendimientos que a promover nuevas instalaciones. Fácil es, pues, anticipar que por lo que a la relación agua - energía se refiere, será el sentido inverso (el agua “consumidor” de energía) al hasta ahora tradicional (el agua fuente de energía) el que mayor atención va a merecer.

### **3. EL AGUA CONSUMIDOR DE ENERGÍA**

El ciclo hidrológico natural del agua, como todo ciclo no alterado por el hombre, es sostenible. La mayor parte de la lluvia se escurre (en una proporción menor se infiltra) alimentando así las corrientes naturales. Y es la gravedad la que genera su movimiento a lo largo de unos ríos que mueren en el mar. Después es la energía solar la que, al evaporar el agua, alimenta las nubes y cierra el ciclo. Pero el hombre quiere disponer de agua de calidad en el grifo de su casa. Y para conseguirlo altera su ciclo natural. Y para hacerlo necesita aportar energía en mayor o menor cantidad dependiendo tanto de las circunstancias de cada núcleo urbano como de la calidad del agua a potabilizar. Una cantidad nada menor porque un metro cúbico pesa una tonelada. Y después, al contaminarla con el uso, hay que devolverle su calidad inicial en unos procesos que, a día de hoy, consumen mucha energía.

Y lo mismo ha sucedido con un regadío que consume las tres cuartas partes de la demanda total de agua. Tradicionalmente todos los campos se han regado “por gravedad” y sólo a finales del siglo XIX comienza a perforarse el territorio en busca de aguas subterráneas. Nacen así los primeros bombeos y con ellos el regadío comienza a vincularse a la energía no natural. La utilización de aguas subterráneas hasta ese momento era posible con el concurso de galerías (o qanats) y no comportaba gasto energético. Pero sólo se alcanzaron a drenar volúmenes discretos de agua subterránea, y su uso en modo alguno fue significativo.

Pero las crecientes necesidades agrícolas (reflejadas en el permanente aumento de la superficie de regadío), han obligado a aumentar la eficiencia hídrica lo que se ha conseguido transformando el riego tradicional en riego localizado a presión que, desde el punto de vista energético, es muy consuntivo. En otras palabras, la eficiencia hídrica ha primado sobre la energética. Si a ello se añade que muchos cultivos continentales se riegan por aspersor, también con una alta demanda de energía, habrá que concluir, y así se verá, que el consumo de energía en el regadío ha dejado de ser testimonial, por lo que la optimización del funcionamiento de estos sistemas es hoy estratégica.

El análisis del nexo agua – energía comienza caracterizando el consumo de energía en cada etapa del ciclo hídrico “artificial” que recorre el agua para comodidad del hombre. Desde su captación hasta su vertido final. Cada etapa tiene un gasto de energía unitario, una huella energética (HEA), expresada en Kwh/m<sup>3</sup>. Hasta ahora este análisis apenas ha suscitado interés, oscurecido tanto por

el enorme destello de las inversiones que requieren las grandes obras hidráulicas como porque el gasto lo asumen una infinidad de usuarios (urbanos, industriales y agrícolas) y pasa desapercibido. Pero claro, la suma de muchos términos menores comporta un total imponente. En California (CEC, 2005b) ese gasto energético supone el 19 % del consumo eléctrico y el 32 % del de gas (Tabla 1). En España, cual se verá, el porcentaje en ningún caso es inferior al 10%.

La Figura 1 sintetiza el triple nexo agua – energía – cambio climático. La HEA global (suma de las unitarias correspondientes a cada etapa del ciclo integral) depende de cada ciudad o sistema de riego, del mismo modo que las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) dependen tanto de la HEA correspondiente como del tipo de energía. La conversión agua – aire, dependiente del mix energético de cada país, permite concretar esta segunda huella.

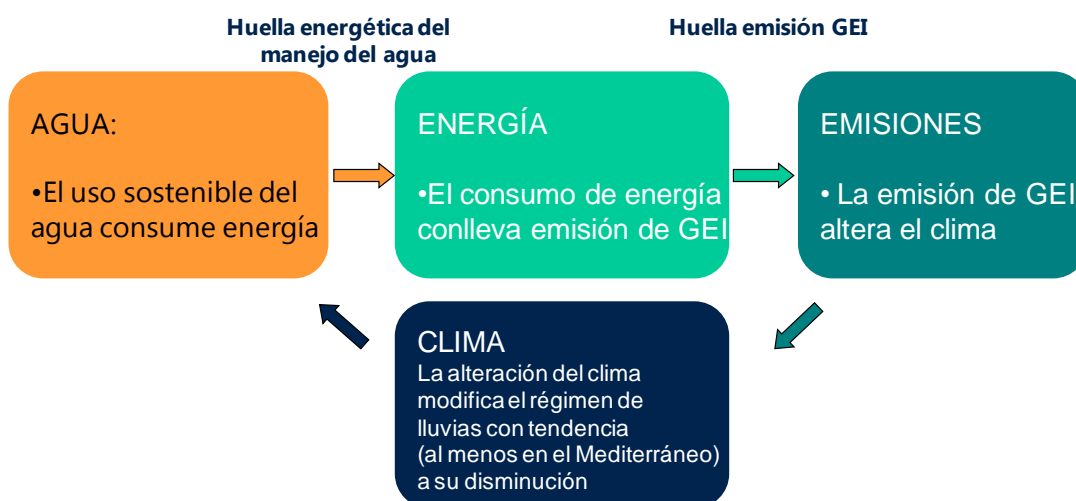


Figura 1.- El bucle agua – energía – cambio climático

El problema que se plantea, la racionalización conjunta del agua y de la energía, está ligado al cambio climático. De una parte porque los más de los modelos desarrollados en el marco del trabajo del IPCC prevén para el área mediterránea una reducción de hasta el 30% de los recursos hídricos (Milly y col., 2008), lo que aconseja implantar cuanto antes políticas de ahorro que mejoren la garantía de suministro en esta zona geográfica. Y de otra porque el ahorro de agua es ahorro de energía y, por tanto, minimiza la emisión de GEI. Por ello la política del agua, pues será la más afectada, debe poner cuanto esté de su parte para no propiciar el cambio climático.

La Figura 2 detalla las horquillas de las HEA calculadas a partir de los ciclos de agua urbanos en California (CEC, 2005b). Las etapas de captación, bombeo y transporte (lo justifica el trasvase de norte a sur del Estado) y la potabilización (debido a la desalación) presentan la mayor amplitud.

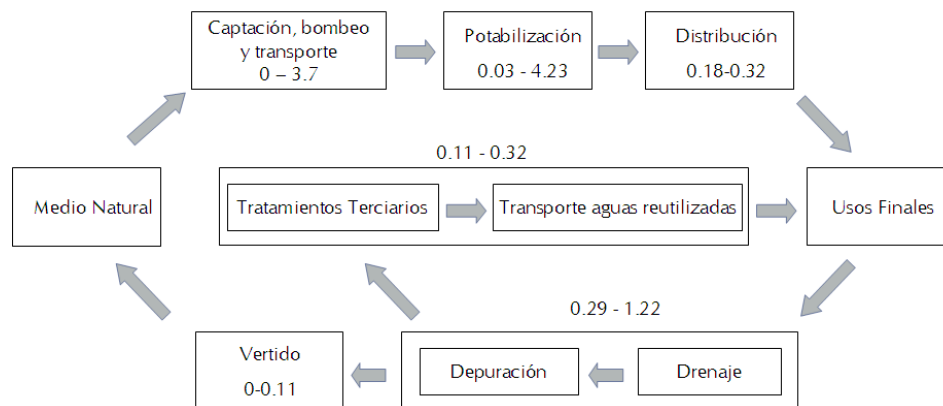


Figura 2.- Horquillas de las HEA unitarias en California (CEC, 2005b)

La figura no incluye, por los muchos matices que admite, la horquilla de los usos finales, pese a que de acuerdo con la Tabla 1 el mayor gasto de energía corresponde a esta fase. Por ello, y aunque siempre se ha procurado mejorar los procesos para ahorrar energía (son notables los habidos en los últimos años en desalación), el ahorro inherente a un uso del agua más racional se ha venido ignorando. Así lo demuestra un estudio (McMahon y col, 2006) al concluir que en una vivienda la mejor relación coste beneficio (inversión frente a Kwh ahorrados) se obtiene utilizando dispositivos de ahorro de agua domésticos. Es superior a cualquier otro programa de eficiencia como, por ejemplo, la sustitución de bombillas convencionales por otras de bajo consumo. Por ello, sólo análisis integrales permiten evaluar los beneficios de las políticas de ahorro de agua.

Las HEA permiten evaluar el ahorro energético derivado de la reparación de las fugas en las redes e instalando en las viviendas aparatos domésticos de bajo consumo. También, y con independencia del ahorro de agua que pueda comportar, permite valorar desde la óptica energética, las ventajas de reutilizar agua frente a usar la procedente de un suministro alternativo. El ahorro supone detraer menos agua del medio natural al tiempo que disminuye el caudal que circula por los circuitos artificiales alternativos, con un notable efecto multiplicador. Aumenta la garantía de suministro, favorece la vida de otros ecosistemas y reduce el consumo energético.

Tabla 1.- Gasto energético ligado al agua en California (CEC, 2005b)

	Electricidad (GWh)	Gas natural (millones de termias)	Diesel (metros cúbicos)
<b>Suministro de agua y depuración</b>			
Urbano	7554	19	?
Agrícola	3188		
<b>Usos finales</b>			
Agrícola	7372	18	333080
Residencial	27887	4220	?
Comercial			
Industrial			
<b>Tratamiento de agua</b>	2012	27	?
<b>TOTAL</b>	48012	4284	333080
<b>Consumo total año 2001</b>	250494	13571	?
<b>Porcentaje de energía en el Estado</b>	19%	32%	?

El análisis coste beneficio de cada alternativa (aumentar el suministro frente a gestionar la demanda) aún es más favorable si se consideran los ciclos de vida de los materiales que cada solución comporta. De hecho, sobredimensionar las obras supone un gasto de energía adicional, el asociado a toda obra. Por ello comienza a ser habitual que estos estudios incluyan los costes de los ciclos de vida de cada posible solución y sus implicaciones energéticas (Filion y col., 2004). Estudios que también permiten clarificar qué opción de aumento de la oferta (reutilización o desalación de agua) es ambientalmente más sostenible (CEC, 2005a). Pero, y en ello hay que insistir, la opción más favorable es siempre gestionar mejor (EPA, 2002).

Cuanto antecede evidencia la necesidad de acoplar las políticas hídrica y energética. No en vano el nexo agua – energía sólo puede realizarse caracterizando primero todo el ciclo del agua. La actual atomización, no exenta de falta de coordinación, de la administración española del agua propicia que muchas etapas del ciclo en la práctica se ignoren entre sí. Por ejemplo, el control de los recursos (captación y transporte en alta) corresponde a la administración estatal o autonómica mientras los ayuntamientos gestionan el agua urbana. Sin un organismo regulador que coordine, estas etapas seguirán desacopladas..

#### **4. AGUA Y ENERGÍA. UN BREVE REPASO AL ESTADO DE LA CUESTION**

Desde 2005, fecha en de la publicación del informe de la Comisión de la Energía de California al que ya nos hemos referido, son incontables las iniciativas, proyectos y conferencias sobre este asunto. Sin ánimo de ser exhaustivos se detalla una pequeña muestra de las más relevantes. De todas se puede obtener información adicional por internet. También se ha procurado que la muestra sea, en lo geográfico, plural para evidenciar que no es una moda de un país concreto. En cualquier caso las más de las referencias, parece lógico que así sea, proceden de los USA.

- 2005.- California Energy Commission, USA  
*California's Water- Energy Relationship. Final staff report.*
- 2005.- Laboratorios Sandia, USA  
*Energy-Water Research and Development Roadmap.*
- 2006.- Department of Energy, USA  
*Energy Demands on Water Resource. Report to Congress on the on the Interdependency of Water and Energy*
- 2008.- Global Water Research Coalition (GWRC),  
*Water and Energy. Report of the GWRC Research Strategy Workshop*
- 2008.- Environmental Agency, UK  
*Greenhouse gas emissions of water supply and demand management options*
- 2008.- Environmental Protection Agency (EPA), USA  
*Summary of EPA Water and Energy Efficiency meeting. Chicago*
- 2008.- Environmental Protection Agency (EPA), USA  
*Ensuring a Sustainable Future: An Energy Management Guidebook for Wastewater and Water Utilities*
- 2008.- Water Services Association of Australia:  
*Energy use in the provision and consumption of urban water in Australia and New Zealand.*
- 2009.- COST Workshop, European Commission  
*The Energy-Water Nexus: Managing the Links between Energy and Water for a Sustainable Future.*

- 2009.- International Water Association (IWA)  
*International Conference in Copenhagen Water & Energy*
- 2009.- UE VII Framework Program: Technologies and systems for urban water cycle services)  
*Increase understanding of urban water-energy relationship and develop tools and techniques to implement urban integrated water and energy resource management*
- 2010.- Ontario Water Conservation Alliance. Canada.  
*The water energy-nexus. Linking Water and Energy in Ontario Policy.*
- 2011.- Lawrence Berkeley National Laboratory, USA  
*Managing water-related energy use in cities. Opportunities, needs and barriers.*
- 2012.- International Water Association (IWA)  
*World Congress on Water, Climate & Energy. Dublin.*

El objetivo final de la relación agua energía en el marco del binomio agua y ciudad (en el riego no es razonable plantearlo) es alcanzar el paradigma que muestra la Figura 3 y que en definitiva es un Ciclo urbano de agua neutro tanto por lo que se refiere al consumo de energía como a la emisión de gases de efecto invernadero. De momento el primer paso ha sido invertir la creciente demanda de energía. En efecto aunque el diagrama de la Figura no está escalado, se observa como las crecientes exigencias ambientales se traducían, con el paso del tiempo, en un mayor consumo energético. Porque, por ejemplo, el tratamiento terciario a las aguas residuales para reutilizarlas, tiene su coste energético.

La primera etapa, pues, de los países más desarrollados ha sido quebrar la línea creciente. Y a corto plazo se persigue, con la mejora de la eficiencia y la optimización del funcionamiento de las instalaciones, el objetivo de reducir la energía un 20%. El margen de mejora concreto está aún por ver, pero las posibilidades son grandes. Y aunque el 2030 queda lejos, difícil será alcanzar un ciclo energético neutro. Pero bueno es marcarse objetivos ambiciosos.

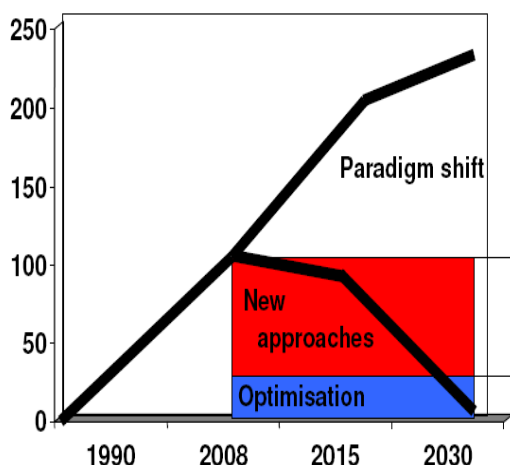


Figura 3.- El paradigma de un ciclo urbano del agua, desde la óptica, energética neutral

Esta primera vía de optimización busca mejorar el rendimiento tanto en el trasiego de agua (mejorando la eficiencia de los muchos bombeos de agua) como en los procesos, particularmente en los de depuración de aguas residuales, cuyas posibilidades para generar energía son notables.

La Figura 4 es portada del manual elaborado por la EPA *An Energy Management Guidebook for Wastewater and Water Utilities* antes citado.

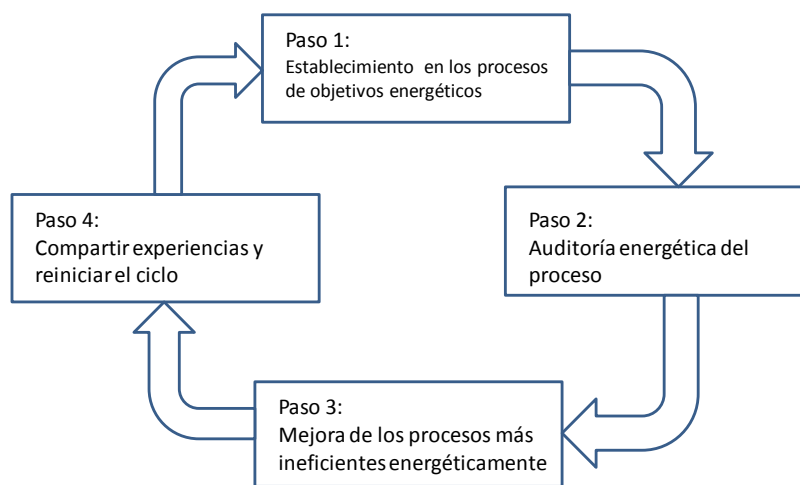


Figura 4.- Proceso de mejora de la eficiencia en un proceso

Un proceso que, cual se ve, consta de cuatro etapas bien diferenciadas:

- Establecer en el uso de la energía objetivos energéticos (benchmarking)
- Realizar una auditoría energética
- Fortalecer los puntos débiles identificados en la auditoría.
- Compartir las experiencias y comenzar de nuevo el proceso para la mejora continua.

Hasta ahora, no sólo en España sino también en todo el mundo, la mejora de la eficiencia se había centrado en el trasiego de agua y ahora, dando por hecho que la eficiencia preside los bombeos (mucho se ha avanzado con el uso de los variadores de frecuencia) el énfasis está puesto en la depuración. Sólo a título de ejemplo se detallan (Tabla 2) algunos de los proyectos que la Global Water Research Coalition (GWRC) se está realizando en el mundo.

Pero hay una segunda línea de trabajo que en España es tanto o más prometedora que la mejora de los procesos. Es el ahorro de agua a través de la gestión de la demanda. Si se deriva menos agua para el uso humano y se la deja seguir su ciclo natural (que no consume energía) el ahorro es doble. Se ahorra en los dos recursos. Y hay claras evidencias de que el margen es notable. En España, como en USA, el simple abandono del *business as usual*, de inmediato ofrece resultados. La Figura 5 muestra el inmediato desacoplamiento del crecimiento económico y del gasto de agua en los USA con la tímida llegada de la gestión de la demanda.

Tabla 2.- Algunos proyectos en marcha de la GWRC

Project	Lead agent
<b>Energy Efficiency in the Water Industry: A Compendium of Tools, Best Practices, and Case Studies</b>	UKWIR
<b>Technology Roadmap 2030 to Optimize Wastewater Treatment in an energy and C-Constrained World</b>	PUB – Singapore
<b>International Toolbox for Water Utility Process Performance Evaluation to Optimize Energy Management and GHG Emissions</b>	Water RF
Energy Management (Phase 1) - Guidebook for Wastewater Operations	WERF
Energy Management (Phase 2) - Demonstration of Application of Guidebook to Manage Energy Consumption	PUB & WERF
Anaerobic Wastewater Treatment Assessment	EAWAG, STOWA, WERF
Green Energy Life Cycle Assessment Tool (GELCAT)	WERF
Guidance Document on Carbon Trading for the Water Utility Sector	WERF

En un mundo globalizado, la gestión de los recursos naturales no debiera escapar a los análisis globales, pues sólo ellos muestran el verdadero potencial económico y ambiental de las políticas de ahorro. Para identificar la mejor solución, hay que plantear los problemas en el marco más general posible. Y así hoy no tiene ningún sentido, como se viene haciendo en España, tratar de mejorar la garantía de suministro ante una eventual sequía únicamente desde la óptica de la oferta, intentando dilucidar qué es lo que más conviene si una desaladora o un trasvase. Y mientras se ignoran alternativas, que reduciendo el problema a un común denominador, muy probablemente serán más ventajosas en lo económico y más convenientes en lo ambiental. Como mejorar la eficiencia, aumentar la reutilización o implantar una política tarifaria que permita mejorar las infraestructuras y, al tiempo, reducir el consumo de agua. Pero hay barreras que impiden este planteamiento. La primera, la falta de coordinación entre las administraciones que gestionan los recursos. La segunda no repercutir a los recursos especiales, particularmente al agua, todos sus costes. Por su importancia se vuelve más delante sobre esta cuestión y para el caso de España. Aquí sólo se trata de evidenciar la conveniencia. Pero es evidente que el tiempo del recorte del gasto, y no sólo económico, también de los recursos naturales, ha llegado.

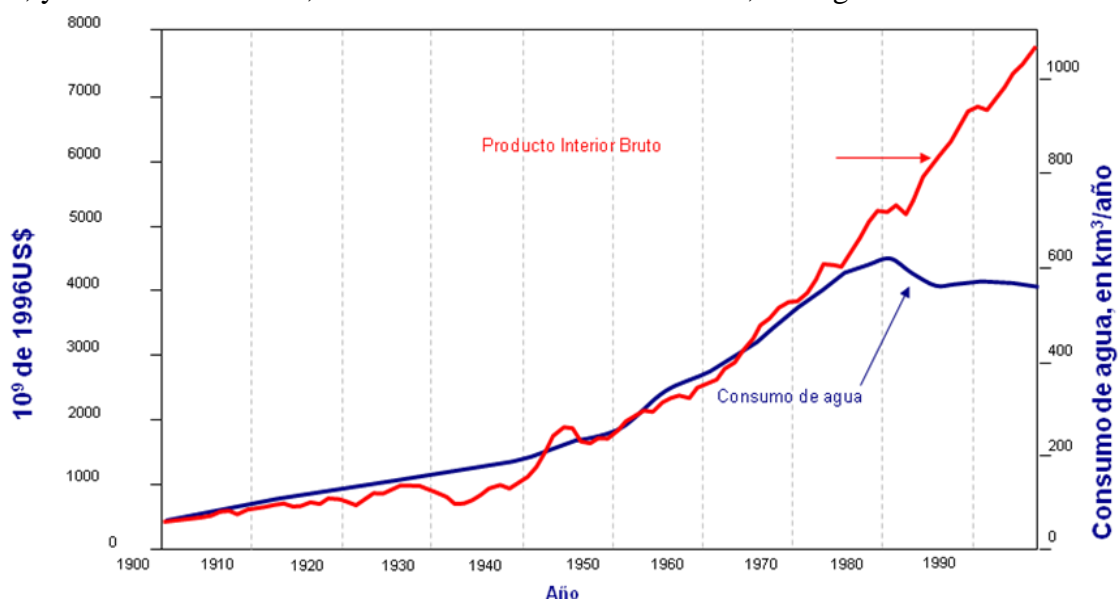


Figura 5.- Evolución del PIB y del gasto de agua en USA en las últimas décadas (Gleick, 2003)

Y así para identificar la mejor solución global y avanzar por la senda de la sostenibilidad, hay que introducir otro ingrediente. El análisis de los ciclos de vida del conjunto. La Figura 6 detalla, desde la óptica del ciclo de vida óptimo de una tubería, los aspectos a considerar. Cuanto más tiempo tarde en sustituirse hay un notable ahorro de toda la energía que demanda la fabricación y reposición de la tubería, pero siempre que esté en buen estado. Porque si fuga mucho, habrá que contabilizar la energía que se invierte en vencer la fricción adicional derivada del envejecimiento de la conducción así como la energía que se pierde en las fugas (Cabrera y col., 2010).

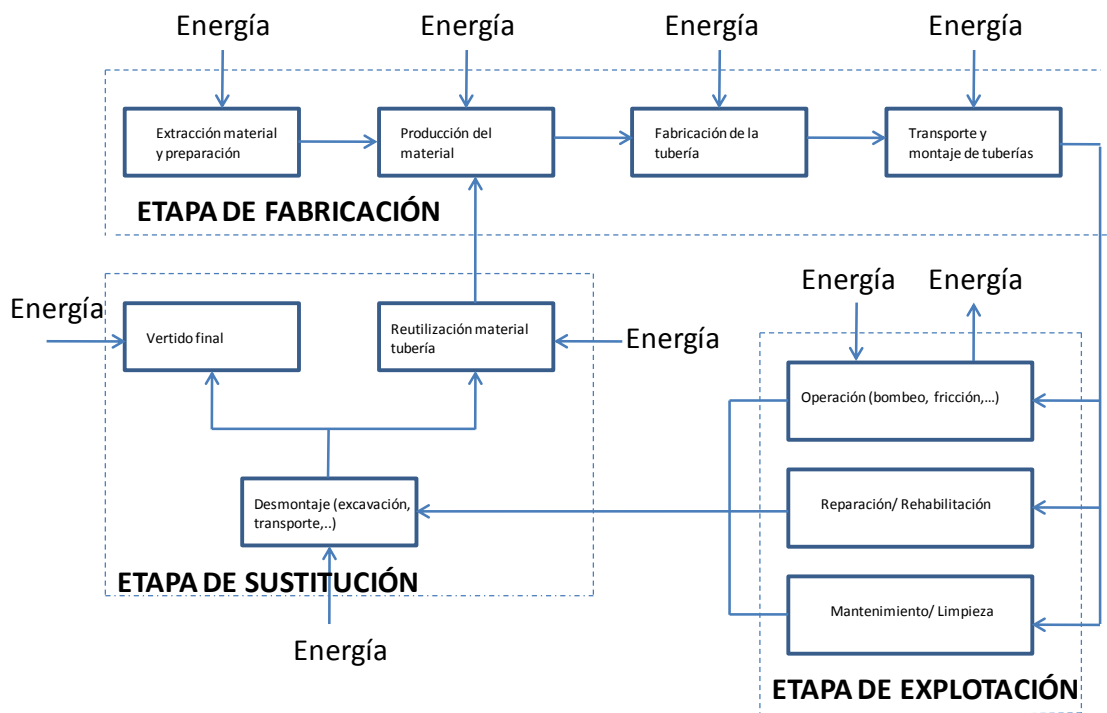


Figura 6.- Análisis, desde la óptica energética, del ciclo de vida de una tubería (Filion y col., 2004) Cual se ve en todas las etapas se consume energía, salvo en la referente a la operación, porque si se trata de una tubería que alimenta una central hidroeléctrica, hay generación de energía. Obviamente, para hacer un balance global debe cuantificarse el gasto energético que comporta cada una de las fases de las diferentes etapas, un asunto que está mereciendo mucha atención. Destacan los estudios desarrollados en la Universidad Carnegie Mellon, centrados en la evaluación ambiental del ciclo de vida de los materiales empleados en las construcciones, de tal manera que con el modelo EIO-LCA (Environmental Input-Output Life-Cycle Assessment) propuesto hace ya algunos años (Hendrickson y col., 1998) y puesto a punto por el Green Design Institute de esa Universidad (CMUGDI, 2008). Así pues, cualquier solución constructiva que se adopte puede ser analizada desde la óptica del modelo EIO-LCA para, de este modo, llegar a una conclusión mucho más sólida que contemple todos los aspectos. Esta, por ejemplo, sería una vía comparativa mucho más adecuada para comparar una solución de trasvase frente a otra de desalación y no tan sólo la huella energética (en Kwh/m<sup>3</sup>) que cada una de ellas conlleva.

En este nuevo contexto es evidente que cualquier solución que promueva el ahorro y la reutilización es, desde una óptica ambiental (y probablemente también desde la económica) la

solución más ventajosa. El ahorro alarga la vida de las instalaciones (son muchas las depuradoras que a los pocos años de entrar en servicio quedan pequeñas y hay que proceder a renovarlas. Pero, sobre todo, el ahorro y la eficiencia minimizan el consumo de estos dos recursos básicos.

Tras el breve repaso del asunto, y del interés que presenta, en lo que sigue nos referimos al estado de la cuestión en España.

## 5. AGUA Y ENERGÍA EN ESPAÑA

Al iniciar este apartado de inmediato conviene responder a la pregunta incluida en el título de esta reflexión. ¿Es el nexo agua – energía un asunto de moda o tiene un interés real que justifique avanzar en estos análisis? La respuesta, lógicamente, debe ligarse al consumo energético ligado al uso del agua. Es decir ¿De qué orden de magnitud en el total del consumo energético hablamos? Y la segunda pregunta que conviene formularse es ¿Irá a más este consumo?

Esta última tiene una respuesta inmediata, el sí. Porque con el paso del tiempo el consumo unitario de energía (kwh/m<sup>3</sup>) seguirá aumentando. De una parte, ya se ha dicho, la conversión del riego tradicional en riego por goteo supone presurizar el agua, y por ello es más necesario gastar energía. En cuanto al uso urbano e industrial, directivas ambientales cada vez más restrictivas exigen mejorar tanto los procesos de potabilización como de depuración (todos muy consuntivos). En cualquier caso, ¿de qué orden de magnitud hablamos?

No habiendo, al respecto, detallados estudios que cubran todo el país, una primera estimación utilizando indicadores unitarios que, obviamente proporcionan un orden de magnitud de la energía consumida, los muestra la Tabla 1. En concreto la Tabla 3 (Corominas, 2101) se ha elaborado a partir de instalaciones españolas.

A partir de estos valores (más los que muestra la figura 2, la Tabla 6 y otros trabajos similares), y de la demanda total de agua en España, 35000 hm<sup>3</sup>/año de acuerdo con los actuales planes de cuenca (MIMAM, 2000), de los cuales el 68 % corresponde al regadío, el 18 % al uso urbano e industrial, se puede estimar el gasto energético ligado al agua en España. En valores absolutos significa que el regadío demanda 23800 hm<sup>3</sup>/año mientras el suministro urbano 6300 hm<sup>3</sup>/año. El resto, un 14% a la refrigeración de centrales productoras de energía, no se incluye en el análisis.

Tabla 3.- Valores unitarios (kwh/m<sup>3</sup>) por usos del agua (Corominas, 2010)

Riego	Aspersión	0,23 kwh/m <sup>3</sup>
	Localizado	0,18 kwh/m <sup>3</sup>
Tratamiento de aguas	Potabilización (ETAP)	0,18 kwh/m <sup>3</sup>
	Depuración (EDAR)	0,3 – 0,5 kwh/m <sup>3</sup>
	Depuración terciaria	0,15 - 0,25 kwh/m <sup>3</sup>
	Desalación de agua salobre	1.4 - 1.8 kwh/m <sup>3</sup>
	Desalación de agua del mar	3,5-4 kwh/m <sup>3</sup>
Transporte y elevación	Bombeo (100 m)	0,42 kwh/m <sup>3</sup>
	Proyecto trasvase del Ebro	3,7 kwh/m <sup>3</sup>

Para concretar ese gasto energético total hay que optar por un indicador energético medio para cada uso. En el caso del uso urbano hay que significar que los usos finales (gasto de energía ligada al agua en las viviendas de los abonados, y que comienza con el bombeo necesario para alcanzar, con la presión debida, la altura necesaria) es una parte muy significativa del consumo total. En

California, por ejemplo, más de la mitad del gasto total energético. En definitiva si al gasto de tratamiento de las aguas (ver tabla 3), se le añade la energía del transporte, distribución y drenaje más los usos finales, la cifra media no se alejará de los 3 kwh/m<sup>3</sup>. Obviamente, si el agua para el abastecimiento procede de una desaladora, el consumo unitario energético superará esta cifra. En cuanto al riego depende mucho de la procedencia del agua y del tipo de riego (ver tabla 3). En una primera estimación podemos hablar de unos 0.25 kwh/m<sup>3</sup> medios para el total del ciclo. Sobre todo porque este valor coincide con el valor de la Tabla 5

Tabla 4.- Demanda de energía eléctrica (estimada) ligada al agua en España

Uso	Gasto de agua	Consumo unitario medio	Energía requerida
Urbano (ciclo completo)	6300 hm <sup>3</sup> /año	3 kwh/m <sup>3</sup>	18900 Gwh
Riego (ciclo completo)	23800 hm <sup>3</sup> /año	0.25 kwh/m <sup>3</sup>	5950 Gwh
<b>TOTAL</b>			<b>24850 Gwh</b>

En definitiva, un valor del orden de 25000 Gwh, algo más del 10% del consumo de energía total. Si este valor se considera relevante, la respuesta a la pregunta que nos planteábamos es afirmativa. En caso contrario, se puede ignorar el nexo. Y todo sin contabilizar la energía generada con gas natural, que en el caso de California (Tabla 1) supera el 30% del gasto total el gasto energético.

Tabla 5.- Evolución del consumo de agua y energía del riego en España (Corominas, 2010)

<b>EVOLUCION DEL CONSUMO DE ENERGIA PARA RIEGO EN ESPAÑA</b>				
<b>AÑO</b>	<b>SUPERF. (MILES HA)</b>	<b>USO DE AGUA (HM3.)</b>	<b>CONSUMO DE AGUA (HM3)</b>	<b>CONSUMO DE ENERGIA (GWH)</b>
1900	1000	9000	5400	0
1930	1350	12150	7594	182
1940	1500	12750	8288	191
1950	1500	12375	8353	309
1970	2200	17600	12320	1056
1980	2700	20925	14648	2093
1990	3200	24000	17400	3480
2000	3410	23870	18499	4893
2007	3760	24440	20163	5866
<b>2007/ 1950</b>	<b>2,5</b>	<b>2,0</b>	<b>2,4</b>	<b>19,0</b>

Con todo en España, además de dos intentos fallidos del CIEMAT y del OPTI, ha habido “voluntariosos” estudios que han cuantificado las huellas energéticas del ciclo del agua para diferentes usos y en distintos marcos geográficos. Todos los resultados obtenidos sugieren que la realidad no debe apartarse de la estimación precedente. Estos son algunos de estos trabajos:

- El pionero trabajo en la Costa Brava de Sala, se realizó en 2002, con una actualización posterior (Sala, 2007). Contempló 29 fuentes de suministro e incluyó las fases de captación - extracción, tratamiento y distribución y 18 plantas depuradoras, considerando las etapas de captación, transporte y tratamiento biológico. Las horquillas calculadas (Tabla 6) presentan un orden de magnitud similar a las del estudio de California (CEC, 2005b).

Tabla 6.- Consumos energéticos ligados al uso del agua en la Costa Brava (Sala, 2007)

<b>ABASTECIMIENTO</b>	
<b>PROCEDENCIA DEL AGUA POTABLE</b>	<b>HORQUILLA DE CONSUMO (KWH/M<sup>3</sup>)</b>

SUPERFICIAL (CORTA DISTANCIA < 10 KM)	0,0002 – 0,37
SUPERFICIAL (LARGA DISTANCIA > 10 KM)	0,15 – 1,74
SUBTERRÁNEA (ACUÍFEROS LOCALES)	0,37 – 0,75
SUBTERRÁNEA (ACUÍFEROS LEJANOS)	0,60 – 1,32
DESALACIÓN (INCLUSO DISTRIBUCIÓN)	4,94 – 5,41
<b>DEPURACIÓN</b>	
<b>TIPO DE PLANTA</b>	<b>HORQUILLA DE CONSUMO (KWH/M<sup>3</sup>)</b>
FANGOS ACTIVADOS CONVENCIONALES	0,43 – 1,09
AIREACIÓN PROLONGADA	0,49 – 1,01
LAGUNAJE CONVENCIONAL	0,05

- El trabajo de Murgui, centrado en el consumo energético de la ciudad de Valencia (Murgui y col., 2009) que, sin considerar los usos finales, establece para esta ciudad un gasto de 1.124 kwh/m<sup>3</sup>. La inclusión de los usos finales (siempre superiores al gasto total del ciclo del agua), llevaría el valor hasta los 2.5 kwh/m<sup>3</sup>, del orden de magnitud que se maneja.
- El estudio de Corominas, centrado en el riego (Corominas, 2010) y que ha servido para establecer el consumo energético unitario medio del riego en 0.25 kwh/m<sup>3</sup>.
- El informe del Observatorio del Agua de la Fundación Botín (Hardy y Garrido, 2010) estima en un 8% la energía ligada al agua. Pero tampoco incluye los usos finales. De haberlo hecho el porcentaje calculado se habría duplicado. Pero lo más novedoso de este estudio es el análisis los biocombustibles, posibles sustitutos de la energía tradicional. Y aconseja mucha prudencia porque biocombustibles y cultivos tradicionales competirían por la misma agua por lo que la solución de un problema podría generar otro peor. Una evidencia más de la conveniencia de realizar análisis globales.
- Un reciente trabajo de la Universidad de Almería (Martínez, 2011) estima en municipios con agua desalada un valor máximo 7.74 kwh/m<sup>3</sup>, (sólo en la etapa fase de abastecimiento y sin incluir los usos finales), prueba de la gran variabilidad espacial de la HEA.
- Recientemente la Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid ha promovido la publicación *Hidroeficiencia*. Está a punto de ver la luz.

A ello, y al calor de asunto de moda, hay que añadir varias conferencias incluida una semana temática en la Expo 2008. Pero las iniciativas oficiales siguen brillando por su ausencia.

## 6. EL CAMINO A SEGUIR EN ESPAÑA Y PRINCIPALES OBSTACULOS A VENCER

No hay duda, pues, que a la vista de todo cuanto antecede el reto final que el trinomio agua, energía y cambio climático contemplado como un todo aconseja racionalizar el uso de dos recursos clave para el bienestar de la Sociedad. Un objetivo con notables beneficios colaterales como la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero, la mejora de la garantía de suministro de agua y el amortiguamiento de los potenciales impactos derivados del cambio climático. Para conseguirlo hay dos vías de actuación, la mejora de los procesos y la mejora de la gestión. La primera, desde siempre contemplada, tiene la ventaja de poder abordarse para cada una de las etapas de manera independiente. No exige la coordinación necesaria entre los responsables de los dos recursos, el actual talón de Aquiles para potenciar este asunto.

Coordinadas las políticas hídrica y energética (una tarea que en la legislatura que acaba podría haber desempeñado la Secretaria de Estado para el Cambio Climático procedería, entre otras, llevar a cabo las acciones que se enumeran:

- Auditar los usos del agua. Al respecto existe un notable déficit pues la Administración no

conoce con la precisión deseable los consumos. No sabe ni el agua que pierden las redes, ni conoce los consumos reales (urbanos o agrícolas y por ello, en los planes de cuenca, las demandas se estiman. Conocer bien los usos es una decisión política. Basta con habilitar los medios humanos y técnicos necesarios.

- Desarrollar buenas métricas de cálculo de las HEA correspondiente a los ciclos de los diferentes usos. Con ellas, y determinados los usos, es inmediato a partir de los ahorros de agua cuantificar los ahorros energéticos.
- Implantar mecanismos económicos y sistemas tarifarios que propicien el uso eficiente del agua y, en consecuencia, de la energía. Este es otro asunto esencial.
- Incluir, en los análisis tanto los ciclos de vida de los materiales los costes ambientales y los energéticos asociados.
- Optar siempre por la solución que presente la mejor relación coste – beneficio. Efectuar análisis globales.
- Educar y sensibilizar a la ciudadanía. Introducir mecanismos económicos y de control no es, pese a su necesidad, plato de buen gusto. El ciudadano debe entender el por qué del esfuerzo que se le pide para, de este modo, apoyar una acción política impopular.

Con todo, una relación de acciones extensa, aunque incompleta, debe ordenarse en el tiempo. Por ello la respuesta a la pregunta ¿por dónde empiezo? es única. Sin duda coordinando todas las administraciones implicadas para que, juntas tracen un Plan de Actuación integrado. Ya hay precedentes. El más notable el del Departamento de Energía (DOE) del Congreso de los Estados Unidos que encargó a los Laboratorios Sandia, en los primeros meses de 2005, la elaboración de una hoja de ruta dirigida a optimizar el uso de agua y energía. Un proceso bien documentado (Hightower, 2005) y que culmina en el citado informe al Congreso USA (DOE, 2006).

El informe concreta el papel del Gobierno Federal en tres acciones:

- Coordinar las administraciones.
- Plantear análisis globales pues lo que conviene desde una óptica puede que no sea lo mejor desde otra óptica alternativa.
- Optimizar las sinergias de las infraestructuras hídricas y energéticas.

La Figura 7 es la imagen que representa las tres acciones. Un puzzle complejo de encajar que, trasladado a nuestro país, sugiere que la Secretaría de Estado de Cambio Climático del Ministerio de Medio Ambiente, no debiera estar tan ligada a una óptica. Sería mejor que colgase de la Presidencia de Gobierno. Así sería más fácil realizar planteamientos en beneficio del todo y no de una de las partes. Porque aunque el trinomio agua, energía, cambio climático es cuestión que afecta de manera muy directa a dos Ministerios (Medio Ambiente e Industria), no sólo a ellos les compete. Por las implicaciones económicas del asunto debiera también involucrarse el Ministerio de Economía y Hacienda.

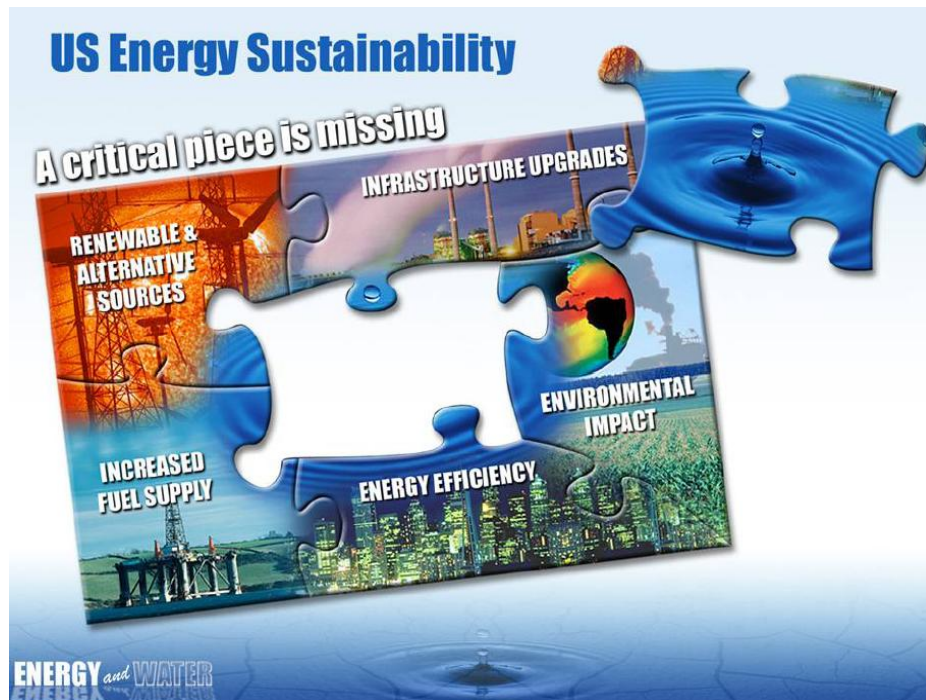


Figura 7.- El complejo puzzle agua – energía – cambio climático (Hightower, 2005)

## 7. CONCLUSIÓN

Aunque tradicionalmente el agua ha sido considerada una fuente de energía, como la mayoría de las centrales hidroeléctricas rentables ya han sido construidas, en el futuro habrá un interés creciente por el agua consumidora de energía porque la demanda de agua sigue creciendo y las exigencias ambientales aumentando.

Para tomar las decisiones que convienen al futuro es necesario coordinar en primer lugar las administraciones. Sólo así se puede plantear el problema con una visión global e integradora. Una condición necesaria pero no suficiente. Porque en segundo lugar se debe tener una información que hoy se desconoce. El esfuerzo previo que al respecto debe hacer la administración del agua es notable. Y conocidos los usos, hay que determinar la HEA y cuantificar las emisiones de GEI, repercutiendo todos los costes, incluidos los ambientales. Con toda esta información, hay que establecer los mecanismos que optimicen el uso eficiente conjunto de ambos recursos y, al tiempo, permitan apostar por las soluciones que mejor relación coste beneficio presenten. Como hasta ahora nadie ha planteado esta visión integrada, el margen de mejora que existe es formidable. Tampoco conviene olvidar la mejora de los procesos, aunque tanto por el recorrido previo de esta línea de trabajo como porque las actuaciones no están tan correlacionadas, en España el margen de mejora es notablemente inferior.

Siendo conscientes de las dificultades que en la práctica entraña el cambio de paradigma (supone introducir en la actual política del agua un giro muy importante) con el paso del tiempo la necesidad de realizarlo, pero también las dificultades de realizarlo, aumentan. Y nadie debiera olvidar el inaplazable reto de la sostenibilidad. Sobre todo en los actuales tiempos de austeridad.

## 8. REFERENCIAS

- Cabrera E., Pardo M.A., Cobacho R., Cabrera E. Jr., 2010  
*Energy audit of water networks*  
 Journal of Water Resources Planning and Management. ASCE. Noviembre 2010. pp 669-677
- CMUGDI (Carnegie Mellon University Green Design Institute), 2008  
*Economic input-output life cycle assessment \_EIO-LCA\_ model*  
<http://www.eiolca.net/> \_ \_Jan. 30, 2008\_.
- CEC (California Energy Comisión), 2005a  
*Life-Cycle Energy Assessment of alternative Water Supply Systems in California. CEC 500 – 2005 – 101*  
 California Energy Comisión. State of California. Julio de 2005
- CEC (California Energy Comisión), 2005b  
*California´s Water- Energy Relationship. Final staff report. CEC 700 – 2005 – 011 SF*  
 California Energy Comisión. State of California. Noviembre de 2005
- Corominas J., 2010  
*Agua y Energía en el riego en la época de la Sostenibilidad.*  
 Ingeniería del Agua. Volumen 17, nº 3.
- DOE (Department of Energy), 2006  
*Energy Demands on Water Resource. Report to Congress on the Interdependency of Water and Energy.*  
 US Department of Energy. Washington DC. USA
- EA (Environment Agency), 2008  
*Greenhouse gas emissions of water supply and demand management options*  
 Science Report – SC070010, Julio 2008. EA. Bristol. UK.
- EPA (Environmental Protection Agency), 2002  
*Cases in water conservation. How efficiency programs helps water utilities save water and avoid costs*  
 United States Environmental Protection Agency Office of Water (4204M) EPA832-B-02-003
- EPA (Environmental Protection Agency), 2008a  
*Ensuring a Sustainable Future: An Energy Management Guidebook for Wastewater and Water Utilities*  
 United States Environmental Protection Agency Office of Water
- EPA (Environmental Protection Agency), 2008b  
*Summary of EPA Water and Energy Efficiency meeting. Chicago*  
 United States Environmental Protection Agency Office of Water
- EU (Official Journal of the European Union), 2009  
*Call for proposals under the 2009 and 2010 work program of the 7th EC Framework Program for Research, Technological Development and Demonstration Activities, WP 2010*  
 European Union, Official Journal of the European Union 30.07.2009. Bruselas.

- Filion Y., MacLean H., Karney B., 2004  
*Life-Cycle Energy Analysis of a Water Distribution System*  
 Journal of Infrastructure Systems ASCE, September 2004 pp 120 – 130
- GWRC (Global Water Research Coalition), 2008  
*Water and Energy. Report of the GWRC Research Strategy Workshop*  
 Global Water Research Coalition. London. United Kingdom
- Hardy L. y Garrido A., 2010  
*Análisis y evaluación de las relaciones entre el agua y la energía en España*  
 Observatorio del agua. Fundación Marcelino Botin. Abril de 2010. Santander.
- Hendrickson C., Horvath A., Joshi S. and Lave L., 1998  
*Economic input-output models for environmental life-cycle assessment.*  
 Environ. Sci. Technol., 32-4, 184A–191A.
- Hightower M., 2005  
*Energy-Water Research and Development Roadmap*  
 Sandia National Laboratories. Albuquerque. New Mexico. USA.
- Martínez, F.J., 2011  
*Estudio de la huella energética del abastecimiento urbano de agua de la provincia de Almería*  
 Universidad de Almería
- Mass C., McCleneghan T., Pleasance G., 2010  
*The water energy-nexus. Linking Water and Energy in Ontario Policy.*  
 Ontario Water Conservation Alliance. Ottawa. Mayo 2010.
- McMahon J.E., Whitehead C.D., Biermayer P., 2006  
*Saving water saves energy*  
 Lawrence Berkeley National Laboratory. Berkeley. California. USA
- Murgui, M., Cabrera, E., Pardo, M. A., y Cabrera, E. Jr., 2009  
*Estimación del consumo de energía ligado al uso del agua en la ciudad de Valencia*  
 Primeras Jornadas Ingeniería del Agua. Fundación Fomento Ingeniería del Agua CEH. Madrid
- Milly P., Betancourt J., Falkenmark M., Hirsch R., Kundzewicz W., Lettenmaier D., Stouffer R., 2008  
*Stationarity Is Dead: Whither Water Management?*  
 Science Vol 319 February 2008 pp 573 – 574
- MIMAM (Ministerio de Medio Ambiente), 2000  
*Libro Blanco del Agua en España.*  
 Ministerio de Medio Ambiente. Madrid
- Sala L., 2007.  
*Balances energéticos del ciclo de agua y experiencias de reutilización planificada en municipios de la Costa Brava.*

Seminario Agua, Energía y Cambio Climático. Universidad Politécnica. Valencia.