

# HIDROELECTRICIDAD, EMBALSES Y CAMBIO CLIMÁTICO

## Antoni Palau

Dirección de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, Endesa  
Crta. Tarragona, Km 89,300, 25191 Magraners (Lleida)  
Antonio.palau@endesa.es

## Clemente Prieto

Departamento de Medio Ambiente y Patrimonio Concesional  
Iberdrola Generación  
Av. San Adrián, 48, 48008 Bilbao

**Resumen:** La energía hidroeléctrica, los embalses y el cambio climático, mantienen unas relaciones con distintos sentidos. La hidroelectricidad requiere embalses y estos producen gases con efecto invernadero. Para frenar el cambio climático, se promueven energías renovables y la hidroelectricidad lo es. Si las previsiones del cambio climático se cumplen, en el área mediterránea, disminuirá la disponibilidad de agua con implicaciones para los embalses. Por otro lado esas previsiones supondrán cambios que, en el caso de los embalses, afectaran a la calidad de sus aguas y a las comunidades naturales. En este artículo se analizan estas relaciones, partiendo de una descripción de las funciones y posibilidades de la hidroelectricidad en el sistema energético español. Se concretan también los posibles efectos del cambio climático sobre los embalses y se analiza su presunta contribución al cambio climático. La conclusión es que no se puede generalizar sobre una contribución neta de los embalses al cambio climático, ni tampoco se puede afirmar que los embalses emiten más CO<sub>2</sub> que los lagos naturales equivalentes o los sistemas terrestres a los que sustituyen. Lo que sí es cierto es que la energía hidroeléctrica está entre las de menor emisión de gases invernadero, cuando se compara con otras fuentes.

## INTRODUCCIÓN

En el título de este artículo se manejan 3 componentes que, según se ordenen y relacionen entre sí, admiten distintas acepciones. Puede plantearse, en primera instancia, si la hidroelectricidad tiene algo que ver, en sí misma y como proceso industrial de producción de energía, con el cambio climático. Dado que el agua es uno de los recursos naturales más vulnerable a cualquier cambio climático, está claro que pueden encontrarse relaciones. En sentido inverso, la reducción de gases con efecto invernadero, pasa por el uso creciente de energía producida con recursos renovables, y la hidroelectricidad lo es.

Los términos “hidroelectricidad” y “embalses” mantienen una interrelación consustancial y directa, que puede también ponerse frente al “cambio climático” y analizar si éste va a afectar a aquellos y viceversa.

Este artículo pretende abordar, con mayor o menor intensidad todas las interacciones posibles entre los tres términos que conforman su título,

si bien va a centrarse en la que, posiblemente, es la visión más controvertida: el presunto efecto de los embalses sobre el cambio climático, a través de la emisión de gases con efecto invernadero. Buena parte del artículo se basa en los trabajos de Palau y Alonso (2008) y posteriores publicaciones Palau *et al.*, (2009).

Los embalses son, como decía Margalef (1983) de las pocas obras de la Humanidad que se ven desde el espacio. Desde hace ya unos años, existen corrientes de opinión dedicadas a difundir los impactos ambientales negativos de este tipo de obras, que incluso finalizan en propuestas de demolición de presas. Sin embargo, hay una realidad incuestionable: el control del agua (y por extensión, la producción de energía y alimento asociados) es la base del estado de bienestar alcanzado por las sociedades “desarrolladas” y deseado por las que aspiran a alcanzarlo. También es cierto que, las opciones de adecuación ambiental de embalses, deja aún mucho margen para explorar, antes de demoler las presas.

Sin entrar en la consistencia científica de los

efectos que se asocian al cambio climático y las notables incertidumbres que aún albergan los modelos utilizados, las previsiones para el Estado Español -según los trabajos del CEDEX (Ruíz, 2009) y salvando diferencias regionales- apuntan para un horizonte del 2100, un aumento de 1°C en la temperatura media y una disminución de un 5% en la precipitación media anual, lo que dará una reducción entre un 5 y un 25% en la disponibilidad de agua. Por otro lado, la demanda de agua va a aumentar, en unos sectores más que en otros; entre un 2 y 9% la urbana y hasta un 23% en la agricultura según los tipos de cultivo. La distribución estacional de las lluvias también va a cambiar, aumentando su torrencialidad. Si esto es así, quizás la existencia de embalses, no venga tan mal y hasta puede que haya que plantearse construir alguno más.

En cuanto a la hidroelectricidad, por su asociación a grandes presas o derivaciones de agua de los ríos, queda al lado de los embalses en lo que a críticas se refiere. Es una curiosa constante a lo largo de la historia reciente de las sociedades humanas "desarrolladas", el bendecir cualquier nueva fuente de energía, para denostarla al cabo de un tiempo a favor de otra más novedosa, supuestamente mejor. Le pasó al carbón, le ha pasado a la energía nuclear, le está pasando a la hidroelectricidad y ya hay claros indicios de que le va a ocurrir lo mismo a la eólica, a favor de la fotovoltaica y la termosolar. Este planteamiento del cambio continuo, es sin duda un motor del progreso, del desarrollo tecnológico y económico, pero no cabe duda que se ha apoyado en un uso de la naturaleza con unos niveles de presión insostenibles. Hasta que esas sociedades "desarrolladas" en base al cambio continuo, no como individuos sino como colectivo, no comprendan los principios de la termodinámica y asuman que tienen una responsabilidad causal directa en la explotación de los recursos naturales -que nunca es ni gratuita ni inocua- lo de la sostenibilidad real y verdadera, no podrá ser más que un producto de mercado.

El papel de la hidroelectricidad es clave en el abastecimiento de la demanda de energía actual, y por ello, antes de analizar las relaciones entre embalses y cambio climático, parece conveniente exponer con algún detalle las características más destacables de esa tecnología de producción eléctrica, el papel que desempeña actualmente, su evolución histórica y sus posibilidades a futuro. Esto servirá para valorar mejor las conclusiones que se obtienen en el artículo, y las que cada lector pueda deducir del mismo.

A continuación se expondrá un breve apunte de los efectos que el cambio climático puede imprimir en los ecosistemas acuáticos continentales, para dedicar después el resto del artículo a tratar la relación inversa; esto es, el papel de los embalses sobre el cambio climático. Una buena revisión de este último enfoque, puede encontrarse en Tremblay *et al.*, 2005 aunque quizás demasiado centrada en los intercambios gaseosos y con apenas referencias a otras formas de procesado de carbono por parte de los embalses.

## LA HIDROELECTRICIDAD COMO ENERGÍA RENOVABLE

Se entiende por "energías renovables" aquéllas que proceden de recursos que son continuamente renovados de forma natural. En la actualidad, las energías renovables utilizadas a nivel mundial son la eólica, la hidráulica, la solar, la procedente de biomasa, la mareomotriz, la procedente de las olas, la procedente de residuos y la geotérmica.

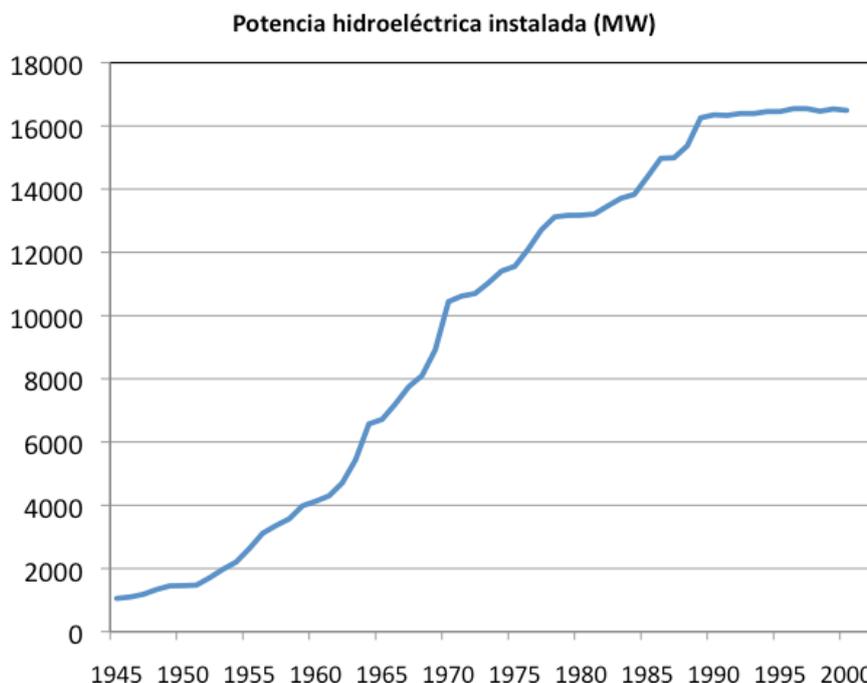
Con diversos matices, casi todas ellas han sido utilizadas por el ser humano desde tiempo inmemorial, si bien su aprovechamiento más o menos masivo y ordenado se viene desarrollando desde hace poco más de 100 años.

Entre las distintas tecnologías energéticas renovables pueden apreciarse diversas características diferenciales, como puede ser la capacidad de regulación, que va desde un mínimo prácticamente nulo en el caso de las energías de origen eólico, solar y de las olas, hasta el máximo casi total de la de origen hidráulico, o la predictibilidad -relacionada en cierta forma con la capacidad de regulación- o el impacto de cada una de ellas sobre el medio natural.

### Aspectos destacables de la energía hidroeléctrica

Respecto al total de energía eléctrica, la de origen hidroeléctrico llegó a suponer en España, en la primera mitad del siglo XX, porcentajes próximos al 100%, tanto en potencia instalada, como en energía producida.

Posteriormente, con la progresiva implantación de otras tecnologías, como las térmicas de carbón y fuel, la energía nuclear y, más recientemente, los ciclos combinados y las nuevas energías renovables, la aportación anual de la hidroelectricidad oscila entre el 7 y el 20% del total producido, dependiendo de la hidraulicidad de cada año según los boletines estadísticos anuales de UNESA (Asociación Española de la Industria Eléctrica) (Figura 1).



**Figura 1.** Potencia hidroeléctrica instalada en España durante la segunda mitad del siglo XX, según UNESA. En los últimos 10 años apenas ha variado, manteniéndose estable alrededor de los 16.700 Mw

Con relación a las energías renovables, la energía hidroeléctrica representa, en España, el 42 % de la potencia instalada (a 2008) y, en media, el 36 % de la producción renovable anual. A nivel mundial, la energía hidroeléctrica representa del orden del 15 % de la potencia renovable instalada.

Un aspecto interesante es el basado en la estimación numérica del impacto ambiental de diversos tipos de energía. Esta estimación se basa en una metodología de cálculo, conocida como "Análisis del Ciclo de Vida" (ACV). Se trata de un método reconocido internacionalmente, regulado por la Norma ISO 14.040, mediante el cual se identifican los impactos ambientales de un producto o proceso a lo largo de todas sus fases. En el caso de las tecnologías de producción de energía, el producto a analizar mediante el ACV sería el Kwh.

Esta labor fue llevada a cabo por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) en 1999, analizando 12 impactos ambientales diferentes: calentamiento global, capa de ozono, lluvia ácida, contaminación de aguas, metales pesados, sustancias cancerígenas, nieblas de invierno, nieblas de verano, residuos industriales, radioactividad, residuos radioactivos y consumo de recursos energéticos. Todo ello,

referido a las fases de obtención, tratamiento y transporte del combustible, y construcción y explotación de la central.

Analizando la aportación de las distintas fases de la vida de cada tecnología eléctrica a cada uno de los 12 impactos considerados, se van asignando los denominados "ecopuntos", de forma que cuanto menor sea el impacto en cuestión, menos serán los ecopuntos asignados. Los ecopuntos obtenidos en el estudio del IDAE fueron los que se muestran en la Tabla 1.

La energía hidroeléctrica está entre las de menor emisión de gases invernadero, cuando se compara con otras fuentes y se analiza a nivel de ciclo de vida. Las tecnologías renovables (termosolar, geotérmica, biomasa, residuos, oleaje y mareomotriz) no evaluadas en el citado estudio pueden asimilarse, a falta de cálculos precisos, a alguna de las citadas, en función de las similitudes existentes en cada caso.

Como ya se ha dicho, el peso relativo de la hidroelectricidad en España, respecto al conjunto de medios de producción de energía eléctrica, ha ido decreciendo a lo largo del tiempo, en la medida en que se han desarrollado nuevas tecnologías, más o menos masivas (casos de la nuclear y las térmicas) o de interés medioambiental (caso de otras renovables).

Tecnología de producción	Ecopuntos	Rango (g CO <sub>2</sub> eq/kWh)	Valor medio
Lignito	1.735	n.d.	–
Petróleo (diésel)	1.398	555-880	717
Carbón (planta moderna)	1.356	959-1.042	1.000
Nuclear	672	n.d.	–
Fotovoltaica	461	12,5-104	58
Gas (ciclo combinado)	267	469-622	545
Eólica	65	7-22	14
Hidráulica (embalses zona templada)	5	8-60	36

**Tabla 1.** Puntuación de ecopuntos en el análisis del ciclo de vida (ACV) de distintas tecnologías de producción de energía eléctrica, según el IDAE y comparación de las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas también al ciclo de vida de distintas formas de generación de energía eléctrica (extraído de varios autores; puede consultarse Tremblay *et al.*, (2005). “n.d.” no disponible

No obstante, esta disminución progresiva es exclusivamente cuantitativa, ya que desde el punto de vista cualitativo la energía de origen hidráulico ha ido incrementando su importancia, tanto en el aspecto medioambiental como en los económicos y técnicos, en relación con el coste, garantía y estabilidad del Sistema Eléctrico Nacional.

En cuanto a los aspectos medioambientales, se ha visto anteriormente que la energía hidroeléctrica es, con mucha diferencia, la de menor impacto ambiental a lo largo de su ciclo de vida total, evitando, durante su fase productiva, emisiones de gases de efecto invernadero en cuantías anuales del orden de 22.400 Ktm de CO<sub>2</sub>, 86 Ktm de SO<sub>2</sub> y 74 Ktm de NO<sub>x</sub>.

En su balance ambiental, hay que incorporar sin duda los aspectos negativos que presenta la implantación de presas y embalses, no necesariamente hidroeléctricos, en el territorio y en el entorno en general, siendo los más destacables y contrastados, la afectación a núcleos de población por inundación de terrenos urbanos, la transformación de hábitats y escenarios naturales por inundación del territorio, la constitución de barreras para la circulación de la fauna, la reducción del transporte de sedimentos aguas abajo y la alteración del régimen de caudales.

No obstante, junto con estos efectos negativos habría que contemplar los de carácter positivo, tanto los asociados a sus propios objetivos (producción de energía, reserva de agua) como los derivados (regulación de avenidas, depuración de aguas, usos lúdicos,...). Por otro lado, es preciso tener en cuenta que todos los efectos indeseables deben ser, en la medida de lo posible, anulados, minimizados o compensados mediante las correspondientes medidas correctoras,

paliativas o compensatorias contempladas en los nuevos proyectos y que para los proyectos existentes, hay margen -como ya se ha dicho- para explorar sus posibilidades de adecuación ambiental. En definitiva, el cuadro final de afecciones debe ser contrastado con las ventajas aportadas por las instalaciones proyectadas, con el enfoque más pluridisciplinar posible, y, en el caso de las centrales hidroeléctricas, sin olvidar -cosa que ocurre con excesiva frecuencia- que la cobertura de la demanda de energía eléctrica está en la base misma de nuestro modelo de sociedad, y que los quizá deseables cambios de ese modelo deben abordarse desde otros aspectos, tales como, por ejemplo, la educación, y no eliminando sus cimientos sin tener otros que los sustituyan con solvencia, ya que eso sería como pretender enseñar a nadar arrojando al aprendiz al océano. Esta es la cuestión sin duda clave: ¿quién causa todos los impactos negativos de un embalse hidroeléctrico, la empresa promotora o la sociedad que demanda energía? La empresa es responsable de realizar la obra hidráulica con la menor afectación ambiental posible y de explotarla con la mayor eficiencia alcanzable, pero la necesidad de la obra y la presión de uso del recurso hídrico es la sociedad quien los imprime. Es la responsabilidad causal directa antes citada en relación con la verdadera sostenibilidad ambiental que se predica en las sociedades “desarrolladas”.

Desde el punto de vista económico, la energía hidroeléctrica permite reducir la factura energética anual del Estado Español entre 700 y 1.700 M€, dado su carácter autóctono y renovable de forma natural, y el alto grado de disponibilidad de nuestros cursos de agua naturales que, en su práctica totalidad, nacen en y discurren por territorio nacional, sin más condicionantes

que los derivados de convenios internacionales, en todo caso asumidos voluntariamente por el Estado Español. Es pertinente recordar que España es un país pobre en términos de energía. Se importa más del 80 % de lo que se consume.

Desde el punto de vista técnico, la energía hidroeléctrica es la responsable del mantenimiento de la frecuencia y la tensión en la red, así como del seguimiento de la curva de carga de forma instantánea, en caso de variaciones rápidas, tanto de la demanda como de la producción de energía. En este sentido, y en una visión histórica rápida, se aprecia que la energía hidroeléctrica ha desempeñado siempre funciones esenciales, e insustituibles, en el Sistema Eléctrico Español.

Inicialmente, hasta más o menos la mitad del siglo XX, con la hidroelectricidad como prácticamente la única fuente masiva de energía eléctrica disponible en España, resultaba evidente el papel esencial desempeñado en el mantenimiento de la frecuencia y potencia de la red, siguiendo de forma instantánea las variaciones de la demanda.

A continuación se incorporaron al Sistema grandes grupos térmicos de carbón y fuel, que pasaron a suplir la parte masiva de la demanda, con pequeñas variaciones de producción a lo largo del día, y manteniendo la energía hidroeléctrica las mismas funciones de la etapa anterior. Se añadió una nueva y esencial función a la hidroelectricidad: la de suministrar de forma rápida la energía detraída del Sistema por un fallo instantáneo de un gran grupo térmico.

Posteriormente, con la incorporación de las centrales nucleares, las nuevas centrales hidroeléctricas de bombeo permitieron el funcionamiento continuo de las nucleares -su forma óptima de funcionamiento- absorbiendo los excedentes de energía producida en horas de valle, mediante el bombeo de agua a un depósito superior, empleando esos recursos para la producción de energía de puntas en horas de mayor demanda y precio. Esta función, unida en determinados casos al bombeo de excedentes de agua producidos por crecidas de origen natural, dio lugar a cuatro tipos de beneficios aportados por las centrales de bombeo en el uso del agua, además de la reposición rápida del servicio en caso de fallo instantáneo de un grupo nuclear:

- Optimización energética, trasladando la turbinación a las horas de mayor demanda.
- Optimización económica, bombeando en horas de precios bajos de la energía, y turbinando en las de precios altos.

- Optimización hidrológica, detrayendo de un curso inferior recursos excedentes en épocas de abundancia o avenidas, almacenándolos en un embalse superior, y trasladando su uso a épocas de escasez hidrológica.
- Uso eficiente del parque nuclear.

Más recientemente se han unido al parque generador las centrales de ciclo combinado, de gas y vapor, que admiten una cierta flexibilidad de funcionamiento, con lo que cooperan en cierta medida en el seguimiento fino de la demanda. No obstante, el papel principal de estas centrales es el suministro masivo de energía, por lo que nuevamente se reafirma el papel de la hidroelectricidad, especialmente en la reposición rápida de fallos instantáneos de grandes grupos nucleares o térmicos, incluidos los de ciclo combinado.

Finalmente, a raíz de la incorporación masiva al Sistema de las energías renovables no garantizadas (la solar con el 11,2 % y la eólica con el 55,5 %, respectivamente, de la potencia renovable instalada en España a 31/12/08), además del posible cero de dichas energías, debido a la falta de viento o de sol, han aparecido nuevas situaciones de desajuste de la producción, consistentes en que ésta supera a la demanda.

Esta circunstancia se dio, por ejemplo, el 2 de Noviembre de 2008 a primera hora de la mañana, día y momento en los que la demanda eléctrica era baja por tratarse de un domingo con temperaturas relativamente templadas. A lo largo de ese día la producción de origen eólico fue aumentando progresivamente hasta unos 7.500 MWh -del orden de 3.200 MWh más que lo previsto para esa hora (7:30 AM)- a medida que la demanda bajaba, lo que obligó al Operador del Sistema a ir desconectando potencia térmica, hasta un total de 2.000 MW, y a activar una potencia neta de bombeo de 2.432 MW, para absorber el excedente que se seguía produciendo. Además, se procedió a reducir la producción eólica en 2.800 MWh (Artaiz, 2008). Una situación similar, de exceso de producción de energía eólica, se ha dado recientemente, el 9 de Abril de 2009. En este último caso, la hidráulica contribuyó de forma menos destacada a absorber el exceso de producción, ya que las circunstancias permitieron incrementar debidamente el saldo exportador de intercambios internacionales.

### Perspectivas de futuro

En el ámbito europeo, el objetivo planteado por la Unión Europea es conseguir que el

año 2020 el 20% de la energía total consumida proceda de fuentes renovables, incluida la gran hidráulica. Coloquialmente, esta propuesta se conoce como "objetivo 20-20-20"; en este objetivo se incluye también la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en un 20% respecto a los niveles de 1990.

En España, la administración está elaborando una nueva Ley sobre eficiencia energética y energías renovables, aún en fase de borradores iniciales. Se supone que a últimos de 2009 estará finalizada esa Ley, para hacer coincidir su publicación con la Presidencia Española de la Unión Europea, que tendrá lugar en el primer semestre de 2010. De hecho, el primer "gran eje" inspirador de la Presidencia Española se orientará, entre otras cosas, a afianzar "el liderazgo europeo en la respuesta global al cambio climático y al desafío energético", según el informe presentado en su momento por el Ministro de Asuntos Exteriores al Consejo de Ministros.

Por su parte, UNESA (2008) ha estimado el potencial desarrollo de la energía hidroeléctrica en España, cuantificando su límite técnico en 69.600 GWh/año. Evidentemente, esta cifra resulta espectacular, ya que supondría multiplicar por más de 2 los valores de energía hidroeléctrica producible actualmente, y es preciso tener en cuenta que su puesta en práctica pasaría por su sometimiento a importantes consideraciones de carácter social y económico que la reducirían drásticamente, con toda probabilidad.

En cualquier caso, la viabilidad económica de esas proyecciones presenta una incertidumbre muy elevada, en el complicado escenario económico internacional de hoy en día y las cifras indicadas sirven para poner de manifiesto que, desde un punto de vista estrictamente técnico, existe un gran potencial de incremento de la energía hidroeléctrica en España.

---

## CAMBIO CLIMÁTICO Y EMBALSES

---

Teniendo en cuenta que el clima está en una dinámica de cambios continuos, bien identificables a escala geológica y poco o nada a escala humana, es obvio que su evolución ha tenido efectos sobre los ecosistemas acuáticos, y por ello nada impide que los presuntos cambios que ahora se vaticinan, afecten a los embalses.

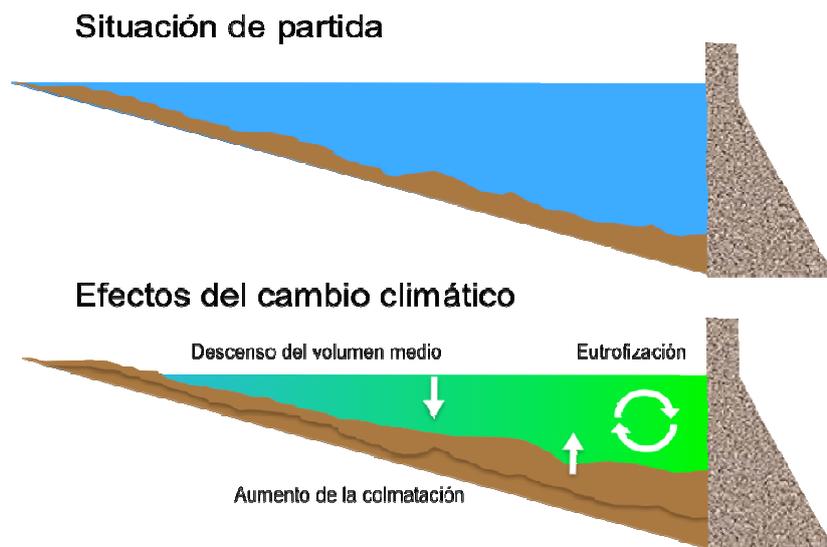
Desde hace 50 millones de años hacia aquí, la temperatura media de la Tierra se ha ido enfriando como consecuencia de los efectos que a escala astronómica han tenido los cambios de

inclinación de su eje o los que ha experimentado su trayectoria de rotación y traslación (Ciclos de Milankovitch) generando ciclos de cambios climáticos a diferentes escalas temporales (100.000 años, 41.000 años, 23.000 años) a los que habría que sumar ciclos de cambios menores propiciados por la actividad solar.

El agua en la Tierra es la que es, unos  $52 \times 10^6$  Km<sup>3</sup>, y si se produce algún cambio en las condiciones que rigen su distribución entre los distintos compartimentos existentes (mares y océanos, polos, continentes, acuíferos, atmósfera), el sistema se reajusta en favor de unos y en perjuicio de otros de esos compartimentos. Hace unos 20.000 años, el nivel de los océanos era unos 120 m más bajo que el actual pero en los últimos 10.000 años, apenas ha sufrido variaciones (Camerlenghi, 2009), lo que pone de manifiesto, de entrada, las extraordinarias incertidumbres que debe suponer proyectar previsiones de cambio climático a futuro a una escala de 10 o incluso 100 años.

A partir de testigos extraídos de sedimentos lacustres, se pueden identificar cambios en el clima que se remontan hacia el pasado, sobre más o menos decenios, centenares o milenios de años, en función de la profundidad de sedimento explorado y mediante análisis paleolimnológicos se pueden extraer conclusiones acerca de como era el clima en la zona, que vegetación existía o que estado trófico tenía la masa de agua. En los embalses, con un periodo de vida mucho más corto que los lagos y totalmente centrado en las últimas décadas, también es posible analizar los sedimentos e identificar acontecimientos pasados, pero con perfiles un tanto más desorganizados que en el caso de los lagos, debido a la explotación del volumen de agua embalsado, y fundamentalmente asociados a episodios de crecidas y estiajes, que son los que determinan cambios en las tasas de sedimentación.

Lo que se dice que va a suponer el presunto cambio climático anunciado en la actualidad, en países del área mediterránea como España, es la ya citada reducción de la precipitación media anual y el aumento de la torrencialidad en la distribución temporal de las lluvias. La cantidad y la distribución temporal del agua, son factores clave en la organización de los ecosistemas acuáticos continentales (ríos, lagos, embalses y acuíferos), de manera que las posibilidades de que impriman cambios sobre dichos sistemas son evidentes y sus efectos bien conocidos (Marcé *et al.*, 2009).



**Figura 2.** Con las previsiones de cambio climático, los embalses van a tender hacia condiciones crecientes de eutrofización, con menos volumen de agua, menor reserva hipolimnética de oxígeno disuelto y más disponibilidad interna de nutrientes

Una menor precipitación media se traducirá en una menor capacidad de dilución y en tiempos de residencia del agua mayores en los embalses. Por otro lado, el volumen medio embalsado podrá ser más bajo. Por su parte el aumento de la torrencialidad favorecerá un incremento de la erosión y por tanto del transporte de sedimentos que llegarán a los cursos de agua y quedarán retenidos en los embalses. Dentro de estos, con niveles medios más bajos, los sedimentos podrán llegar con más facilidad y en mayor cantidad, hasta las inmediaciones de la presa, lo que determinará una pérdida de volumen hipolimnético (Figura 2).

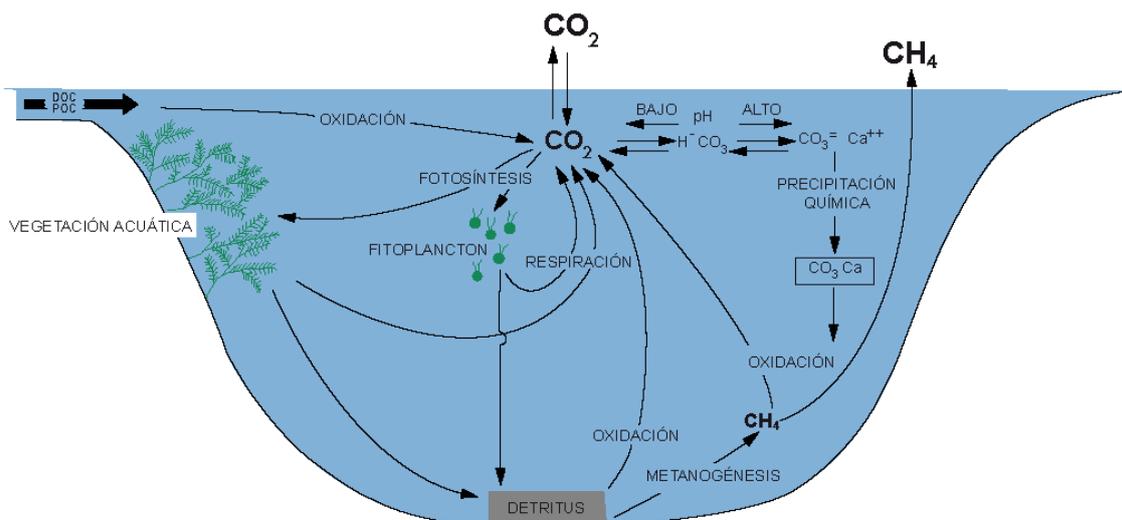
En definitiva, menos capacidad de dilución, mayor disponibilidad de nutrientes, tiempos de residencia del agua mayores, mayor calentamiento del agua embalsada, estratificación térmica más intensa y persistente, menores profundidades medias, más colmatación, más reciclado interno de nutrientes y menor volumen hipolimnético, son todos los ingredientes adecuados para fomentar la tendencia hacia la eutrofización de los embalses; es decir, aumentar su productividad algal por encima de lo deseable, con cambios en negativo tanto en la calidad del agua como en las comunidades naturales (aguas sin oxígeno disuelto en profundidad, malos olores por formación de compuestos gaseosos reducidos, limitación de los usos del agua, situaciones de insalubridad, pérdidas de biodiversidad, etc.).

## EMBALSES Y CAMBIO CLIMÁTICO

### Las vías de participación de los embalses en el cambio climático

Todos los seres vivos respiran y los ecosistemas, al estar formados en parte por seres vivos también lo hacen. Por tanto, es obvio que participan del intercambio de gases con la atmósfera y entre estos, de los que tienen efecto invernadero. En condiciones naturales, la actividad fotosintética y la respiración mantienen el equilibrio de carbono en el medio terrestre, mientras que en los ecosistemas acuáticos hay que contar además con los procesos de precipitación química y decantación, de compuestos carbonatados.

Los embalses producen, sin duda, gases con efecto invernadero, pero también los captan, los acumulan y pueden enlentecer mucho, o incluso evitar, el retorno de una parte de los elementos que forman esos gases a la atmósfera. Es una cuestión de balances, y como en todos los balances, el resultado depende absolutamente de qué términos se hacen intervenir. Para los que persiguen denigrar a los embalses, la parte del balance que interesa es la del intercambio agua-atmósfera, y mejor si se trata de embalses eutróficos -que lo son porque la sociedad del bienestar les hace serlo- ya que estos son más proclives a emitir más gases con efecto invernadero.



**Figura 3.** En los ecosistemas acuáticos, las formas químicas más importantes para el ciclo del carbono son el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el metano ( $\text{CH}_4$ ) y el sistema carbonato-carbonatos ( $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ ). Además de la fotosíntesis y la respiración, en los ecosistemas acuáticos hay que tener en cuenta la precipitación o solubilización de carbonatos, y su mayor capacidad potencial de producción de metano a partir de la oxidación anaerobia de materia orgánica (Palau y Alonso, 2008)

Afortunadamente, y sin negar la incidencia que los embalses tienen sobre los ecosistemas acuáticos, hay autores fuera de toda sospecha (Margalef, 1983) que destacan con lógica aplastante la condición de los embalses como sistemas que regulan y retardan flujos de agua, favoreciendo una disminución de las tasas de renovación en el ecosistema, lo cual va en el mismo sentido en el que se manifiesta la Sucesión Ecológica y la evolución natural de los ecosistemas. Esta menor tasa de renovación, hace de los embalses sistemas propensos a favorecer acumulaciones, fundamentalmente de sedimentos y materia orgánica, que quedan retenidos y con el tiempo pueden quedar, al menos en parte, definitivamente fuera del alcance de los ciclos biogeoquímicos anuales.

La participación de los embalses en el cambio climático es a través del ciclo biogeoquímico del carbono (Figura 3), con cuatro compartimentos y dos interfases implicadas:

- Compartimentos: Atmósfera, agua, sedimentos y seres vivos.
- Interfases: Agua-atmósfera y agua-sedimento.

El balance completo de la participación neta de un embalse en el cambio climático hay que entenderlo a esos cuatro compartimentos y sus dos interfases. Pero además, en la medida en que los embalses son sistemas artificiales que sustituyen

a otro sistema natural por inundación, una vez conocido el resultado del balance, lo adecuado es compararlo con el de ese ecosistema natural original, para concretar si su sustitución por el embalse representa o no, una contribución neta al cambio climático.

Hay un consenso en que los ecosistemas terrestres fijan carbono atmosférico. Lo que ocurre es que lo hacen con un balance muy al límite. En el caso de los bosques mediterráneos se habla de una capacidad de captación de  $50 \text{ tn CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  pero a menudo se omite que ese mismo bosque emite del orden de  $45 \text{ tn CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  con lo que su balance neto es la fijación de unas  $5 \text{ tn CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  ( $\approx 1.400 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ). Tampoco se tiene en cuenta en ese balance, por la complejidad metodológica, lo que respira toda la vida heterótrofa que alberga el bosque y tampoco la respiración bacteriana asociada a la materia orgánica que el bosque exporta. Además, parece ser que las emisiones de metano en suelos forestales, consideradas habitualmente bajas o despreciables, pueden no serlo tanto bajo determinadas condiciones (Megonigal y Guenther, 2008).

Cuando se hacen bien los números se puede llegar a situaciones aparentemente extrañas para quienes se han habituado a vivir entre los dogmas. Así, un campo agrícola abandonado produce más oxígeno y fija más  $\text{CO}_2$  por unidad de superficie, que la selva tropical (Margalef, 1992),

donde la respiración de los organismos heterótrofos es enorme.

Queda aún un aspecto a considerar en el balance de carbono de los embalses y que ya se ha insinuado en un apartado anterior. Los embalses interfieren en el flujo de carbono que transportan los ríos, procedente del lavado de los ecosistemas terrestres. De esta forma, la parte de carbono (tanto orgánico como inorgánico) que los ecosistemas terrestres expulsan y que por tanto no terminan de procesar, acaba llegando a algún embalse donde con tiempos de residencia del agua mayores que en los ríos, si puede procesarse todo ese carbono, contribuyendo al balance y las eventuales emisiones de gases con efecto invernadero del embalse. Es decir, una parte y no poco importante, del carbono que procesa un embalse, no ha sido generada por él. Le viene de su cuenca tributaria, la cual disfruta, a través de este proceso, de unos balances de carbono más favorables al quitarse de encima una parte de materia orgánica carbonatada cuya emisión de gases invernadero no se produce dentro del balance de las masas forestales sino de los embalses.

De la ecología trófica general se sabe que los ecosistemas terrestres son fundamentalmente exportadores de producción, mientras que los acuáticos -a gran escala en el caso de mares y océanos, y a una escala muy modesta en los ecosistemas acuáticos epicontinentales- tienen todos los mecanismos para actuar como sumideros de carbono, tanto del que captan de la atmósfera como del que reciben de los continentes. Esa es una de sus principales funciones dentro de la biosfera.

### **Los gases con efecto invernadero en los embalses**

No todos los embalses procesan del mismo modo el carbono, ni tampoco en todos los momentos de su vida esos embalses mantienen los mismos procesos activados con relación al carbono.

Básicamente el procesado del carbono en un embalse depende del estado de conservación, los usos y las actividades de su cuenca tributaria y la localización del embalse dentro de la cuenca (tramos de cabecera, tramos bajos,...) que determinarán la cantidad y forma de las entradas de carbono y de nutrientes. También depende de la morfología del vaso de embalse, que junto con el tipo de explotación del volumen de agua y

las características físico-químicas de ésta, determinan la vocación trófica que tendrá el embalse sobre el eje oligotrofia-eutrofia.

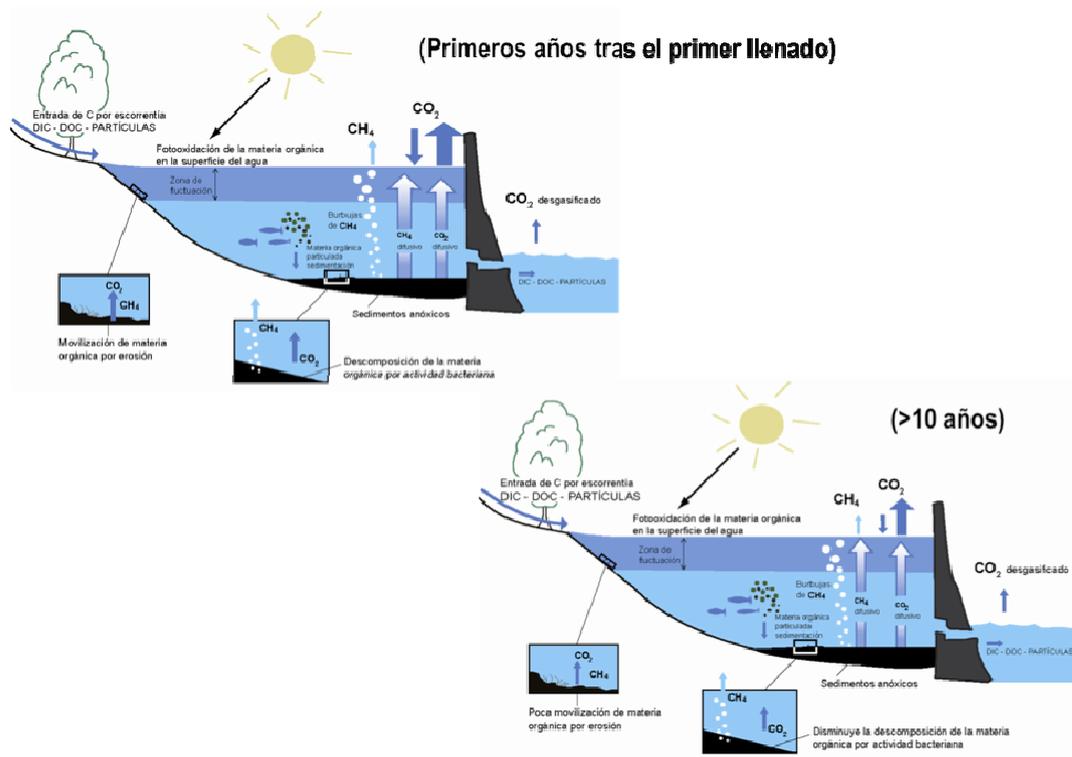
Con el fin de sintetizar el funcionamiento de los embalses en relación al cambio climático, puede decirse que existen dos tipologías extremas de embalse y dos momentos diferenciables dentro del ciclo de vida de ellas. Como tipologías están los embalses tropicales y los embalses boreales, estos últimos bastante asimilables a buena parte de los embalses templados; y como momentos del ciclo de vida del embalse, están los primeros años tras la primera inundación -lo que se conoce como el periodo de maduración- y los años posteriores.

La Figura 4 muestra el intercambio agua-aire, de gases con efecto invernadero para embalses boreales y templados, durante los primeros años de inundación y en los años siguientes. Por su parte la Figura 5 hace lo propio pero para los embalses tropicales.

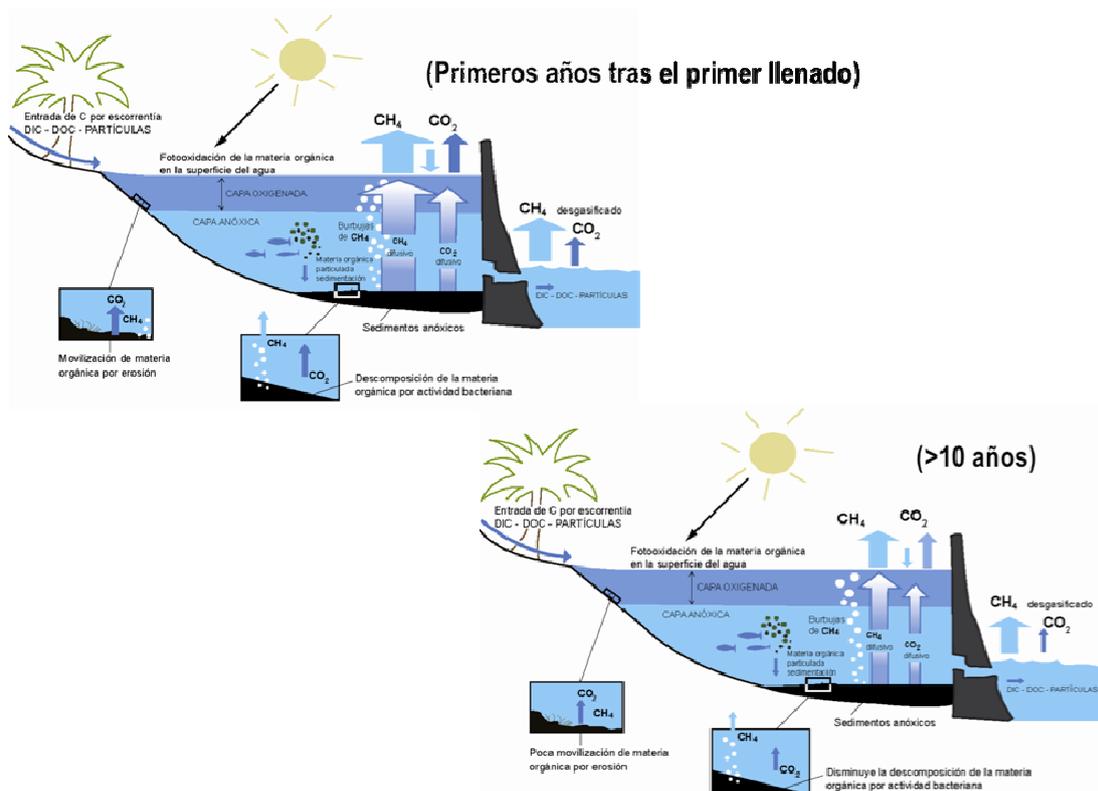
Además de las entradas procedentes de los tributarios (escorrentía), un embalse tiene como fuentes de carbono, la movilización por lavado (erosión) de la franja árida de oscilación del nivel de agua y el que se descompone en el fondo y sobre los sedimentos (hipolimnion) a partir de la materia orgánica que estos contienen y de la materia orgánica particulada producida en las capas de agua superficiales (plancton) que va sedimentando.

Durante los primeros años de llenado, en cualquier embalse, se debe descomponer toda la carga de materia orgánica que queda cubierta por el agua, a expensas de una actividad química y bacteriana que utiliza el oxígeno disuelto en el agua. A mayor carga de materia orgánica para descomponer, mayor consumo de oxígeno disuelto y mayor reducción de su concentración en el agua. En tanto la descomposición de materia orgánica sea por vía aerobia, el producto resultante será el  $\text{CO}_2$ .

Si el agua del embalse no se encuentra térmicamente estratificada; es decir, se mantiene a lo largo de toda la columna con muy poca diferencia de temperatura entre la superficie y el fondo, existe una gran reserva de oxígeno disuelto que, además se puede ir restituyendo desde la atmósfera o redistribuyendo a partir de la producción fotosintética algal del propio embalse. Esta situación de columna de agua mezclada se produce, en la zona templada, en primavera y otoño, y también en invierno, si no se forma hielo en la superficie del embalse.



**Figura 4.** Emisiones de gases con efecto invernadero, en embalses boreales y templados durante el periodo de maduración (primeros años tras el primer llenado) y después de éste (>10 años). Modificado de (Palau y Alonso, 2008)



**Figura 5.** Emisiones de gases con efecto invernadero, en embalses tropicales durante el periodo de maduración (primeros años tras el primer llenado) y después de éste (>10 años). Modificado de (Palau y Alonso, 2008)

Por el contrario si la masa de agua embalsada está estratificada térmicamente (verano en los embalses boreales y templados, y todo el año en los tropicales) se establece un gradiente de temperatura que es a su vez un gradiente de densidad para el agua, de forma que las aguas de fondo, más frías y por tanto más densas y pesadas, no pueden mezclarse con las superficiales. Se forma lo que se conoce como un metalimnion o termoclina, que separa verticalmente dos compartimentos en el embalse: el epilimnion (en superficie) y el hipolimnion (en fondo).

Inicialmente ambos compartimentos tienen disponibilidad de oxígeno disuelto, pero mientras el epilimnion tiene medios para reponer cualquier consumo de oxígeno (a partir de la atmósfera y de la actividad fotosintética), el hipolimnion no.

Con el primer llenado de un embalse, en tanto el embalse no esté estratificado, se puede ir descomponiendo la materia orgánica inundada (vegetación, humus,...) sin demasiados problemas; en el momento en que el embalse se estratifique, el agua del hipolimnion empieza a perder oxígeno disuelto y si la cantidad de materia orgánica es suficientemente importante, puede llegar a quedarse sin, entrando en una situación de anoxia que pone en marcha procesos anaerobios de descomposición de la materia orgánica, cuyo producto final es el metano ( $\text{CH}_4^+$ ), un gas unas 21 veces más activo que el  $\text{CO}_2$  en términos de efecto invernadero.

Los embalses boreales y templados (Figura 4) tienen unos periodos de maduración mucho más rápidos (5-8 años) que los tropicales, pero sobre todo, al no estar permanentemente estratificados como estos últimos, y no recibir -habitualmente- tanta carga de materia orgánica una vez transcurrida su maduración, acaban emitiendo unas cantidades de  $\text{CO}_2$  comparables a lagos de similares características y estado trófico, con muy poco  $\text{CH}_4^+$  que, además, se oxida con facilidad en su difusión desde el sedimento a la superficie, de manera que la emisión de este gas no suele ir más allá del 1 % de lo que se produce (Margalef, 1983).

Por el contrario, los embalses tropicales siempre o casi siempre estratificados, disponen de menos capacidad de oxigenación de sus aguas, tienen el agua a más temperatura -lo que reduce la solubilidad del oxígeno disuelto y propicia una mayor actividad bacteriana- y reciben mayor carga de materia orgánica a lo largo de su vida (toda la que exporta su cuenca tributaria), de manera que acaban con anoxia persistente y con una producción notable de  $\text{CO}_2$  y también

de  $\text{CH}_4^+$ . Al acabar su proceso de maduración, las emisiones revierten, pero se mantienen comparativamente altas con relación a los embalses boreales y templados.

A modo de referencia, una vez finalizado el periodo de maduración, los embalses tropicales emiten en promedio (Rosa *et al.*, 1997; 1999) unos  $3.630 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$  mientras que los boreales y templados emiten de forma parecida a los lagos geográficamente correspondientes, alrededor de  $1.130 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$  (Duchemin *et al.*, 1999; Tremblay *et al.*, 2005).

De acuerdo con todo lo expuesto, el balance de carbono de un embalse depende, en gran medida, de su estado trófico; es decir de la cantidad de materia orgánica que debe procesar. En general un sistema oligotrófico, es un sistema poco productivo y que funciona con un ciclo de carbono muy cerrado, sin apenas intercambios del agua con la atmósfera y los sedimentos, mientras que en sistemas eutróficos, muy productivos, el sistema tiende a externalizar los excedentes de carbono que le toca procesar, tanto hacia la atmósfera (gases) como hacia los sedimentos (materia orgánica e inorgánica carbonatada).

Tanto los lagos como los embalses, cuanto más elevado sea su estado trófico, mayor cantidad de  $\text{CO}_2$  atmosférico fijan. Sin embargo, el balance final neto depende de otras características que determinan la potencialidad de retornar el carbono fijado a la atmósfera. Entre ellas, las más importantes serían el grado de oxidación de los sedimentos y la reserva alcalina. Si los sedimentos que se van enriqueciendo en carbono permanecen anóxicos, éste quedaría inmovilizado o pasaría a  $\text{CH}_4^+$ , aunque esta última ruta sólo se produce de forma eficiente cuando no hay  $\text{SH}_2$ , el cual inhibe la actividad metanogénica. Por otro lado, si hay suficiente calcio en el agua, los incrementos de pH ligados a la fotosíntesis favorecen la precipitación de  $\text{CaCO}_3$ , el cual es muy poco soluble. Consecuentemente el modelo de embalse con mayor capacidad para secuestrar carbono sería aquel con aguas eutróficas, profundas, y de elevada mineralización, tanto por calcio como por sulfatos; estos últimos por ser precursores del  $\text{SH}_2$ . Por otro lado, los eutróficos y poco profundos, particularmente si son de aguas débilmente mineralizadas, devolverían el carbono fijado a la atmósfera en forma de  $\text{CO}_2$  y/o  $\text{CH}_4$ , y el balance neto relacionado con la producción-respiración-descomposición tendería a ser nulo.

Los sedimentos -su composición y su estructura- juegan, por tanto, un papel impor-

tante en el balance de carbono de los embalses, tanto durante el proceso de maduración como en el resto de su ciclo de vida. Ocurre además que los embalses, nacen condenados a irse rellenando de sedimentos de forma más rápida que los lagos al no encontrarse en equilibrio hidromorfológico con su cuenca tributaria. Los arrastres que les llegan desde el río tributario van depositándose en el fondo del vaso de embalse y van enterrando la materia orgánica, y por lo tanto el carbono, tanto la de origen alóctono como la sintetizada en el propio embalse. Una parte importante de estos materiales, tanto mayor cuanto más alta sea la tasa de aterramiento del embalse, va quedando enterrada en el sedimento, sin posibilidad de retornar al agua, bien sea adsorbida a carbonatos precipitados o acumulada en distintos estadios de descomposición (lípidos, carbohidratos, proteínas, aminoácidos, ácidos grasos, pigmentos...).

## CONCLUSIONES

La hidroelectricidad es una energía renovable clave en el abastecimiento de la demanda, por su, hoy por hoy insustituible capacidad operativa a la hora de permitir ajustar la producción de energía a la demanda a una escala temporal prácticamente inmediata (minutos), así como por las garantías de estabilidad que ofrece en el mantenimiento de la calidad de la energía suministrada y su papel de apoyo a los sistemas de producción de energía poco o nada regulables, bien sea por el propio proceso productivo (centrales térmicas, nucleares,) o por la dependencia de factores imprevisibles (aerogeneradores, paneles solares,). Mediante las centrales hidroeléctricas de bombeo, se posibilita además la acumulación de energía en forma de volumen y salto de agua, durante las horas con excedentes de producción de cualquier origen, para su aprovechamiento eficiente en horas de máxima demanda.

La hidroelectricidad, a gran escala, se produce a partir de embalses, cuya construcción y explotación comportan afectaciones a los ecosistemas naturales, exactamente igual que lo hace cualquier otra gran obra o intervención humana (cultivos agrícolas, ganadería, vías de comunicación, pesquerías, ). Se trata de decidir si esas afectaciones son todas responsabilidad de la empresa que tiene como negocio producir energía a partir del agua, o si existe una responsabilidad social en quien genera la demanda de esa energía. El sentido común conduce a pensar que a las empresas productoras de energía se les debe exigir

la máxima eficiencia y la mínima afectación ambiental, en los medios que utilicen para extraer energía de la naturaleza, del mismo modo que a la sociedad se le debe exigir que no despilfarre ni un kWh de energía y que sea consciente que es ella y no la empresa de energía la única responsable de la presión de explotación que el uso de la energía imprime a los ecosistemas naturales.

Los embalses, van a experimentar efectos derivados del cambio climático, como lo han hecho todos los ecosistemas a lo largo de la historia de la Tierra. Con las actuales previsiones, lo más probable es que los embalses tiendan a niveles de eutrofia crecientes.

En cuanto a la contribución de los embalses al cambio climático, ésta se vehicula a través del ciclo biogeoquímico del carbono. En este ciclo hay inevitablemente emisiones de compuestos gaseosos de carbono, que tienen efecto invernadero ( $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4^+$ ). Sin embargo esas emisiones no son más que una parte, y a menudo cuantitativamente pequeña, del carbono que procesan los embalses.

La mayor parte del flujo de carbono que pasa por un embalse proviene de su cuenca tributaria, incorporándose al ecosistema acuático en forma de carbono orgánico particulado (arrastres de hojarasca, pequeños organismos,) o como carbono inorgánico disuelto ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,...). En la medida en que los embalses aumentan el tiempo de residencia del agua con respecto al tramo de río que sustituyen, se convierten en obligados procesadores de todo el carbono alóctono que reciben, además del propio que producen.

En los embalses se producen flujos de carbono en las dos interfases aire-agua y agua-sedimento, y el balance global de estos intercambios depende en gran medida del estado trófico del embalse y de otros factores (características físico-químicas del agua y los sedimentos, gestión del embalse,...).

Lo habitual es que los embalses de la zona templada, emitan cantidades reducidas de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera y poco o nada de metano, y lo habitual también es que retengan bastante más carbono del que emiten, en los sedimentos, con lo que su contribución neta al cambio climático es negativa.

Teniendo en cuenta que los balances siempre hay que hacerlos en sistemas o procesos lo más cerrados posible, para evitar incertidumbres, en el caso de los embalses quizás lo adecuado sería hacer balances de carbono incorporando todo el ciclo de este elemento en su cuenca tributaria, dado que, como ya se ha dicho, una parte muy

importante del carbono que procesan los embalses, les viene de su cuenca.

Con los años, los embalses de la zona boreal y templada, tienden a presentar emisiones netas de gases con efecto invernadero, muy equiparables a las de lagos de similares características y si se comparan los balances del embalse con el ecosistema terrestre al que reemplazaron, no siempre el balance es peor (Palau y Alonso, 2008).

La conclusión es que no se puede generalizar sobre una contribución neta de los embalses al cambio climático, ni tampoco se puede afirmar que los embalses emiten más CO<sub>2</sub> que los lagos naturales equivalentes. Lo que sí es cierto es que la energía hidroeléctrica está entre las de menor emisión de gases invernadero, cuando se compara con otras fuentes.

En el análisis de la presunta contribución de los embalses al cambio climático hay, finalmente, un aspecto que no se puede obviar: todo el carbono que interviene en el balance de un embalse, es carbono actual; es decir, es un carbono que ha sido recientemente fijado en su cuenca o en su propia masa de agua y por tanto no puede suponer un incremento neto de los gases invernadero en la atmósfera. Es un retorno, no un incremento. Sólo al caso de los embalses que transforman una parte del dióxido de carbono fijado en metano, y que lo emiten en cantidades importantes, se le puede atribuir una contribución al efecto invernadero, al ser el CH<sub>4</sub><sup>+</sup> un compuesto mucho más activo que el CO<sub>2</sub> en la interferencia de la irradiación de calor terrestre. Todo ello siempre que el ecosistema terrestre al que hubieran sustituido tales embalses, no produjera emisiones similares reales de gases con efecto invernadero..

## REFERENCIAS

- Artaiz, C., (2008). Influencia de la generación intermitente en la evaluación de la cobertura de la demanda y de la reserva de operación en la Península Ibérica a largo plazo. Red Eléctrica de España, Jornadas Técnicas de CIGRÉ, Madrid.
- Camerlenghi, A., (2009). Els gels àrtics i l'escalfament global. ICREA, Universidad de Barcelona, Ponencia presentada al Simposi: Aigua i Canvi Climàtic, Institut de l'Aigua (UB), Barcelona.
- Duchemin, E., R. Canuel, P. Ferland y M. Lucotte, (1999). Étude sur la production et l'émission de gaz à effet de serre par les réservoirs hydroélectriques de l'entreprise et de lacs naturels (Volet 2). Université du Québec a Montreal, 47 pp.
- Marcé, R., J. Armengol y J. Dolz, (2009). Els efectes als embassaments i la seva rellevància en la quantitat i la qualitat de l'aigua per la garantia del recurs. En Aigua i Canvi Climàtic, Agència Catalana de l'Aigua, Generalitat de Catalunya, 221–238.
- Margalef, R., (1983). Limnología. Ed. Omega, Barcelona, 1010 pp.
- Margalef, R., (1992). Planeta azul, planeta verde. Ed. Biblioteca Scientific American, Barcelona, 265 pp.
- Megonigal, J.P. y A.B. Guenther, (2008). Methane emissions from upland forest soils and vegetation. *Tree Physiology*, 28, 491–498.
- Palau, A. y M. Alonso, (2008). Embalses y cambio climático. Monografías de Endesa, Dirección de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, Endesa, Lleida, 47 pp.
- Palau, A., M. Alonso, A. Meseguer, E. Rosico y D. Corregidor, (2009). Análisis del ciclo del carbono en embalses y sus efectos en el cambio climático. Aplicación al embalse de Susqueda (río Ter, NE España). Ponencia presentada a las Jornadas Técnicas sobre el Agua, Centro de Estudios Hidrográficos, Ingeniería del agua (en prensa).
- Rosa, L.P., B.M. Sikar, E.M. Sikar y M.A. Santos, (1997). A model for CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> emission mean life in reservoir base on data from Amazonian hydroplan. En *Hydropower plants and greenhouse gas emissions*, L.P. Rosa y M.A. Santos (Eds.), COPPE.
- Rosa, L.P., B. Matvienko, M.A. Santos y E.M. Sikar, (1999). Relatório Eletrobrás/Fundação Coppetec. Inventário das emissões de gases de efeito estufa derivadas de hidrelétricas. COPPE Report to Eletrobrás.
- Ruíz, J.M., (2009) Previsiones del cambio climático en relación con los recursos hídricos en España. Centro de Estudios y Experimentación. Ponencia presentada al Simposi: Aigua i Canvi Climàtic, Institut de l'Aigua (UB), Barcelona.
- Tremblay, A., L. Varfalvy, C. Roehm y M. Garneau, (2005). Greenhouse Gas Emissions: Fluxes and Processes, Hydroelectric Reservoirs and natural Environments. Envi-

ronmental Science Series, Springer, New York, 732 pp.

UNESA (2008). Potencial de la Generación Hidroeléctrica. Documento inédito, Unesa y Universidad de Zaragoza, Madrid.