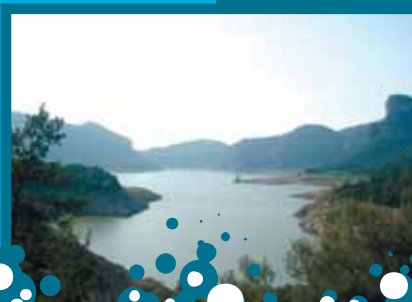


EMBALSES Y CAMBIO CLIMÁTICO



Dirección de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (ENDESA)

EMBALSES Y CAMBIO CLIMÁTICO

Noviembre 2008

Autores:

Antoni Palau¹ y Miguel Alonso²

¹ Dirección de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. ENDESA.

² URS (United Research Services España, S.L.)

ÍNDICE

PRÓLOGO	5
----------------	---

I. INTRODUCCIÓN

1. <i>ALGUNOS ASPECTOS GENERALES SOBRE EL CLIMA</i>	8
2. <i>EL CAMBIO CLIMÁTICO CONTEMPORÁNEO</i>	11
3. <i>LOS GASES DE EFECTO INVERNADERO N₂O, CO₂ y CH₄</i>	12
4. <i>EL CALENTAMIENTO GLOBAL Y EL OSCURECIMIENTO GLOBAL</i>	13

II. LA HIDROELECTRICIDAD EN EL BALANCE ENERGÉTICO GLOBAL

1. <i>INTRODUCCIÓN</i>	15
2. <i>LA PRODUCCIÓN Y EL CONSUMO DE ENERGÍA EN ESPAÑA</i>	15
3. <i>LA HIDROELECTRICIDAD EN EL ABASTECIMIENTO DE LA DEMANDA DE ENERGÍA</i>	16
4. <i>LA HIDROELECTRICIDAD Y OTRAS FUENTES ENERGÉTICAS EN TÉRMINOS DE BALANCE DE CO₂</i>	18

III. ECOSISTEMAS ACUÁTICOS Y GASES EFECTO INVERNADERO

1. <i>EL CARBONO</i>	21
2. <i>EL NITRÓGENO</i>	22
3. <i>LOS EMBALSES Y LOS GASES CON EFECTO INVERNADERO</i>	22

IV. CASO DE ESTUDIO: EL EMBALSE DE SUSQUEDA (Rio Ter, Girona)

1. <i>INTRODUCCIÓN</i>	32
2. <i>PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO</i>	33
3. <i>MÉTODOS DE CAMPO</i>	34
4. <i>MÉTODOS ANALÍTICOS</i>	36
5. <i>RESULTADOS</i>	36
6. <i>BALANCE FINAL</i>	41
7. <i>DISCUSIÓN DE RESULTADOS</i>	42

V. ALGUNAS CUESTIONES FINALES CLAVE...	47
---	----

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	49
--------------------------------	----

PRÓLOGO

El objeto de la presente publicación es analizar el papel de los embalses en la dinámica de los gases de efecto invernadero, con objeto de poner de manifiesto en qué medida su existencia interviene en el cambio climático. El análisis se lleva a cabo describiendo su metabolismo como sistemas acuáticos. Para ilustrarlo se presenta el caso-estudio del embalse de Susqueda (río Ter), enfocado a conocer su balance de carbono.

Previamente, se expone una revisión conceptual del estado de la cuestión del cambio climático, empezando por abordar el concepto de clima y su variabilidad natural.

Se aporta una breve exposición de los factores y procesos que han intervenido e intervienen, en la evolución del clima de la Tierra, a nivel global y a nivel regional, a escala geológica o contemporánea.

A continuación, se dedica un capítulo, a tratar el papel de la hidroelectricidad en el balance energético global, con el fin de contextualizar, en el ámbito de España, las relaciones existentes entre energía disponible, los embalses como productores de una energía regulable y los usos y demandas de energía de la sociedad actual.

También se expone un breve análisis comparado de como se comporta la energía hidroeléctrica, frente a otras tecnologías de generación de energía eléctrica, con relación al cambio climático.

INTRODUCCIÓN



1. ALGUNOS ASPECTOS GENERALES SOBRE EL CLIMA

El clima es quizá el factor que mayor importancia ha tenido, y tiene, en la evolución biológica y en la historia de la humanidad, y siempre ha sido un factor decisivo para la supervivencia y la economía de las culturas que pueblan el planeta Tierra. Aunque de una forma general se sabe lo que significa "clima", es decir, algo que tiene que ver con la insolación, la temperatura del aire, los vientos, el grado de humedad atmosférica y las precipitaciones, parece útil fijar el concepto para disipar dudas sobre lo que se quiere expresar en realidad cuando se habla de "cambio climático" ya que, incluso como ejemplo de una incorrecta utilización de nuestro lenguaje, hay quien usa "clima" para referirse a "tiempo" o "temperie". Una definición muy precisa y acertada la ofrece Inocencio Font Tullot¹, uno de nuestros más brillantes meteorólogos: "Clima es la síntesis del conjunto fluctuante de las condiciones atmosféricas, en un área determinada, correspondiente a un periodo suficientemente largo, para que ésta sea geográficamente representativa". Esta definición incorpora conceptos que deberían entenderse como clave en la actual percepción social del cambio climático:

- La notable variabilidad de los parámetros que se utilizan para definir el clima.
- La dependencia espacial.
- El requerimiento de periodos de tiempo muy largos para poder inferir representatividad o significación en su análisis.

El reconocimiento de regularidades en cuanto al clima en distintas áreas de la superficie terrestre ha dado lugar a clasificaciones basadas en combinaciones de los diferentes elementos climáticos, que básicamente vienen definidas por la circulación atmosférica y marina, la latitud y la altitud, a las que se les ha dado expresión geográfica. Es decir, se dispone de mapas climáticos. Pero éstos poseen importantes imprecisiones en las interfases y sólo ayudan a entender procesos que dependen del clima a una determinada escala espacial y temporal, como por ejemplo la organización de la vegetación. A corto plazo, el agricultor sigue invocando al cielo.

A las numerosas dificultades de entender el clima con la precisión necesaria como para poder organizar adecuadamente nuestra economía, se añade la circunstancia de que el clima cambia con el tiempo. A lo largo de la historia del planeta se han venido registrando variaciones climáticas importantísimas ligadas a la deriva continental y a los efectos que ésta iba teniendo en la configuración de la hidrosfera y en su circulación. Las tierras que hoy constituyen

la península ibérica han viajado por el Polo Sur hace unos 500 millones de años y hace unos 300 millones de años por zonas ecuatoriales. Y es en el Cenozoico, con la configuración geográfica de la Tierra establecida más o menos como hoy la conocemos, y particularmente con el istmo de Panamá cerrado, cuando se definen los casquetes polares y se inician las glaciaciones, fenómeno climático que sólo se había registrado con anterioridad en el Pérmico. A lo largo del Pleistoceno se han sucedido cuatro periodos glaciares, cuya máxima expresión cubrió de hielo una tercera parte de los continentes y tornó en ártico el clima de los territorios templados, el último de los cuales finalizó hace tan sólo unos 10.000 años. Sin embargo el concepto clásico de las "cuatro glaciaciones" encierra mayor complejidad; en realidad, en el transcurso de las mencionadas glaciaciones se han descrito treinta o más pulsos intermedios de avance y retirada glacial, cada uno de ellos mantenido durante unos 43.000 años y, dentro de éstos, otros menores de entre 24.000 y 19.000 años de duración. Todavía, superpuestos a estos pulsos se registran aún pequeños cambios climáticos como el ocurrido entre los siglos X al XIV denominado "periodo templado medieval", más caliente que el actual, al que siguió la "Pequeña Edad de Hielo" de los siglos XVI y XVII, que no por sutil fue poco trascendente en nuestra historia (figura 1).

El carácter periódico de las glaciaciones del Pleistoceno ha suscitado numerosas investigaciones por el evidente interés que tiene para la humanidad el situar el presente en el intervalo temporal de otro posible ciclo interglacial. Es decir, averiguar si se va hacia una quinta glaciación y, de ser así, si nos encontramos aún en la fase de calentamiento o iríamos ya a la de enfriamiento. Se han desarrollado varias teorías que si bien gozan de fundamento científico, podrían explicar el pasado, pero nunca se tendría la certidumbre de su fiabilidad predictiva. Según la serie de los ciclos de Milankovitch nos encontraríamos al final del actual periodo cálido interglacial, por lo que la Tierra debería irse enfriando. La teoría de Milankovitch se basa en que la órbita terrestre varía de un estado casi circular a una elipse pronunciada cada 90.000 o 100.000 años, lo que hace variar la intensidad de la luz solar recibida por la Tierra. Además, a esta variación se superpone la precesión y los cambios del ángulo de inclinación del eje de rotación de la Tierra con el plano de la órbita, que poseen un ciclo de 43.000 años; cuando éste ángulo es mayor, se acentúa la magnitud del cambio estacional de invierno a verano. Este intervalo cuadra con la duración de los mencionados pulsos intermedios de avance y retirada glacial, pero la periodicidad de las fluctuaciones es irregular, de forma que deben existir otros factores implicados más o menos complejos. Ewing² señala un

¹ Inocencio Font Tullot, activísimo y prolífico meteorólogo español, que se inició en el observatorio de Izaña. Posteriormente trabajó en importantes proyectos meteorológicos internacionales hasta que en 1974 tomó el cargo de Director del Servicio Meteorológico Nacional. Es autor de "Climatología de España y Portugal" (1983) y de la "Historia del Clima en España" (1988).

² William Maurice Ewing, geólogo estadounidense profesor de la universidad de Columbia, propuso en la década de los 50, una teoría acerca de las posibles causas de las glaciaciones, así como la hipótesis de que las eras glaciales periódicas constituyen tan sólo una etapa reciente de la historia geológica y climática de la Tierra.

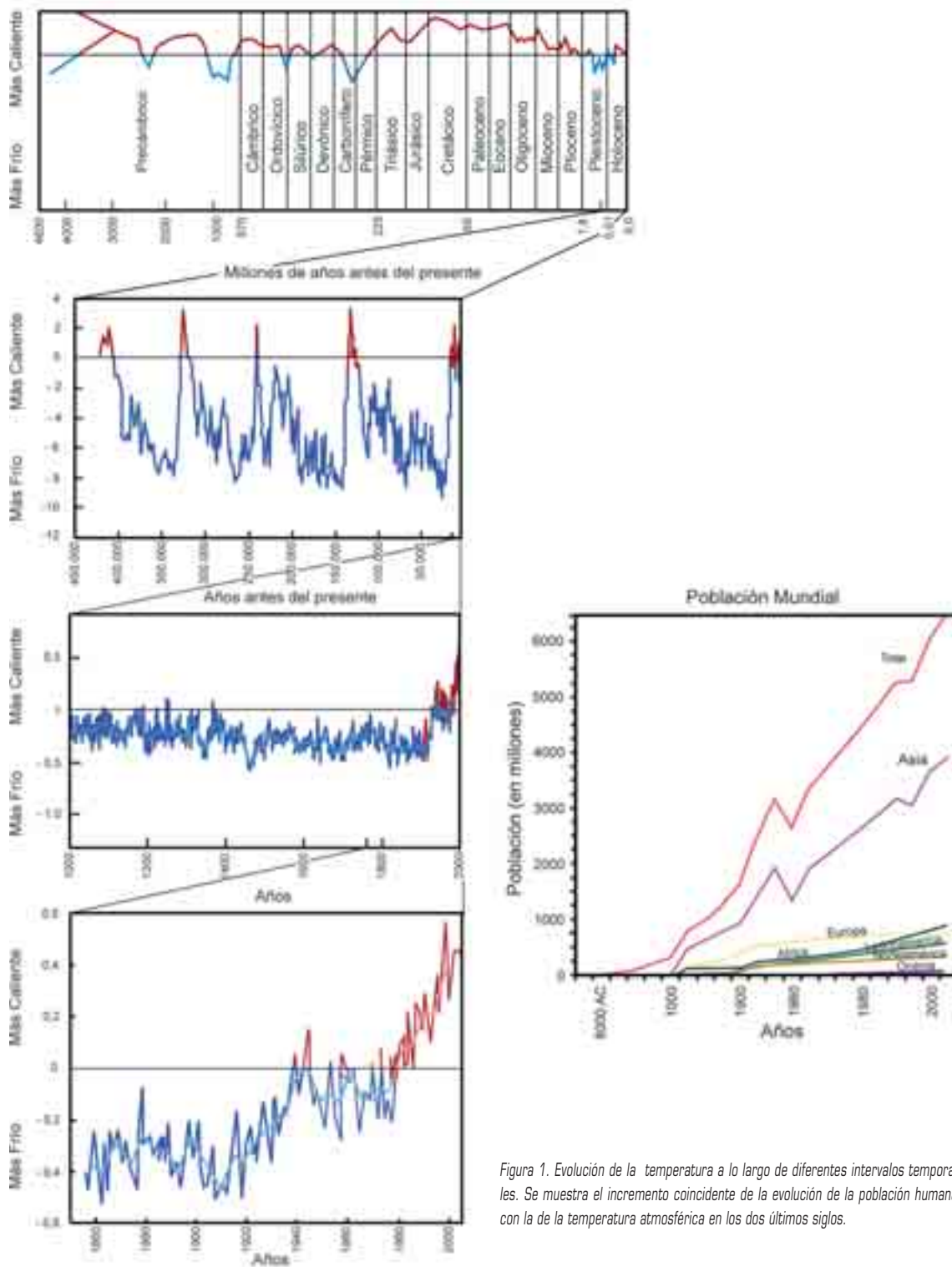


Figura 1. Evolución de la temperatura a lo largo de diferentes intervalos temporales. Se muestra el incremento coincidente de la evolución de la población humana con la de la temperatura atmosférica en los dos últimos siglos.

mecanismo de tipo cibernético de manifestaciones cíclicas basado en relaciones entre la atmósfera y la hidrosfera. Partiendo de un Océano Ártico sin hielo en un periodo interglacial, la temperatura podría ser fría, aunque algo menos que en la actualidad, pero la evaporación sería muy importante, lo que daría lugar a intensas nevadas que irían acumulando agua sólida, formando glaciares continentales e incrementando el albedo. El descenso del nivel del mar asociado a este proceso aislaría la cuenca polar del Atlántico lo que

haría bajar las temperaturas, mantener sólida el agua y disminuir las precipitaciones, determinando de nuevo el retroceso de los glaciares y la vuelta a las condiciones interglaciares.

A otra escala, tanto de tiempo como de importancia, actúan sobre el clima otros factores como la actividad del sol y la de los volcanes. La actividad solar podría haberse incrementado en los últimos 200-300 años provocando a su vez un incremento de la radiación térmica que llega a la Tierra. Las manchas solares, que son partes

de la superficie del Sol más frías y ligadas a una mayor actividad magnética, aumentan y disminuyen con una periodicidad, de unos 11 años, que oscila entre 9 y 14 años en forma de ciclos primarios y de unos 80 años como ciclos secundarios. Sin embargo, la reducción de la energía emitida por las manchas solares es compensada por la intensificación de las áreas brillantes que las rodean, las fáculas, de forma que cuanto mayor sea la superficie ocupada por manchas la actividad solar suele ser más intensa. Recientemente, en enero de 2008, el satélite europeo y estadounidense SOHO ha detectado la aparición de una mancha solar nueva que se interpreta como indicadora del inicio de un nuevo ciclo solar, que provocará un aumento gradual de las manchas solares y de las tormentas solares de tipo magnético, asociadas a su presencia que en los próximos años, alcanzará un máximo de actividad entre 2011 y 2013. La relación entre el clima y las manchas solares es un tema en discusión. Hay científicos que atribuyen el cambio climático a los ciclos de actividad solar, mas que a la concentración de CO₂ en la atmosfera. Sin entrar en valorar si existe o no una relación causal, el hecho es que la radiación solar total ha ido en aumento en los últimos siglos (figura 2) y que el Mínimo de Maunder, que da nombre a un período de casi 50 años sin apenas manchas solares (1645-1715) coincidió con la época más fría de lo que se conoce como la "Pequeña Edad de Hielo", con inviernos muy fríos al menos en el Hemisfério Norte.

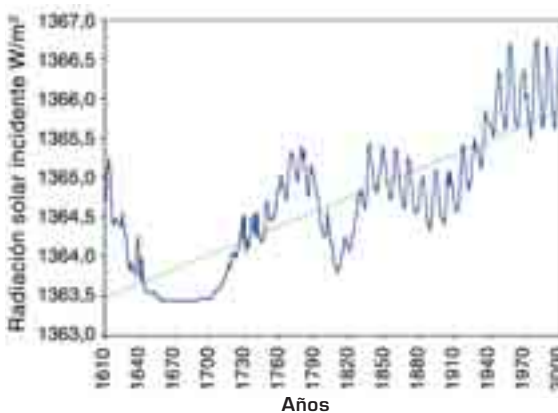


Figura 2. Evolución de la radiación solar interceptada por la Tierra, en los últimos siglos ha ido en aumento en los últimos siglos (datos de Lean, 2004).

Por su parte, las partículas expelidas por los volcanes pueden alcanzar la estratosfera en cantidad suficiente como para interceptar la energía radiante y provocar un enfriamiento.

Otro factor importante que afecta al clima, tanto más cuando constituye el núcleo de la presente publicación, son los gases de efecto invernadero. Este efecto toma el nombre de las construcciones transparentes que se fabrican con objeto de que mantengan en su interior una atmósfera más caliente utilizando únicamente la luz solar. La radiación electromagnética de onda corta procedente del sol es capaz de introducirse en el invernadero atravesando las superficies de vidrio o plástico, pero la radiación infrarroja refle-

jada, de longitud de onda más larga, tiene más dificultad para salir, de lo que resulta un incremento térmico en el interior. A escala de la atmósfera el funcionamiento es comparable: gases que normalmente la componen, como el vapor de agua, el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el ozono, y también contaminantes como el óxido nitroso (N₂O) y los CFC, atrapan la radiación infrarroja que la hidrosfera y la litosfera, calentadas por la radiación solar, devuelven al espacio. En ausencia de estos gases, la atmósfera constituida sólo por nitrógeno y oxígeno, que son los gases mayoritarios, no protegería a la Tierra de unas oscilaciones térmicas tan violentas, y de un frío extremo, lo que haría imposible la vida tal y como hoy la conocemos.

¿Pero qué efectos han tenido y tienen los cambios de clima?. Decisivos, tanto en la historia de la biosfera como, en particular, en la de la humanidad. El clima ha dirigido el complicado y dinámico rompecabezas de la evolución de las especies y de su distribución en el planeta. Muchas de las grandes extinciones hay que atribuir las a cambios climáticos súbitos, algunos tan remotos como el del final del Mesozoico, cuando un repentino enfriamiento del clima provocado por el impacto de un colosal meteorito acabó con los dinosaurios y algunas plantas, en favor de los mamíferos y las fanerógamas. Las glaciaciones del Pleistoceno tuvieron un efecto catastrófico, particularmente en los continentes con las cordilleras orientadas en la dirección de los paralelos, que impedían el desplazamiento de las poblaciones hacia el sur a medida que el frío avanzaba. El mar pudo descender hasta 120 m por debajo del nivel actual. El calentamiento del clima en el periodo boreal fue determinante en el nacimiento del Neolítico, particularmente en la península ibérica, donde el descenso de la pluviosidad diezmo los rebaños de rumiantes salvajes y el Hombre tuvo que evolucionar culturalmente mejorando su capacidad de intervención en el entorno. Posteriormente, grandes civilizaciones han ido naciendo y desapareciendo zarandeadas por los cambios climáticos, como las del Norte de África, la del Valle del Indo y las Mesopotámicas. La Pequeña Edad de Hielo en los siglos XVI y XVII arruinó el comercio de la lana y de la industria textil en ambas Castillas, a la vez que propició el resurgimiento de Cataluña. Y ya en nuestros días todos tenemos presente las notables consecuencias que en la economía española y en la salud y el bienestar de sus habitantes, han tenido los ciclos pluri- anuales húmedos y secos, fríos y cálidos, de las últimas décadas.

2. EL CAMBIO CLIMÁTICO CONTEMPORANEO

Si bien la sociedad es consciente de las tendencias naturales a los cambios climáticos, lo que hoy le preocupa es si sus actividades económicas modifican la manifestación de esos cambios de forma que puedan sorprenderla sin haber dispuesto del tiempo suficiente y de los mecanismos necesarios para adaptarse. Y dentro del deno-

minado cambio climático, el aspecto más tangible sería el conocido como "calentamiento global", que surgiría supuestamente como consecuencia directa del tipo de desarrollo económico, en continuo crecimiento desde los inicios del siglo XX, basado en la quema de carbón, petróleo y gas natural. En la reacción de combustión de estos productos se libera mayoritariamente anhídrido carbónico (CO_2), el cual es uno de los gases que participan en el efecto invernadero. A la conclusión de que el incremento de CO_2 atmosférico actual tiene este origen, se ha llegado a través de técnicas de discriminación isotópica; se reconoce porque carece de C^{14} , cuya vida media se encuentra entre 5.500 y 6.000 años, y por lo tanto se encuentra prácticamente extinguido en el material fósil. Por otro lado, la estación de medida del CO_2 atmosférico que lleva recogiendo datos desde el año 1958 en Mauna-Loa (Trópico de Cáncer, Hawaii) muestra un incremento continuo hasta la actualidad que corre paralelo al del consumo mundial de combustibles fósiles.

Existen, además, otras actividades culturales como la deforestación, la desecación de zonas húmedas y otras prácticas agrícolas que liberan CO_2 . En conjunto se considera que a través de todas las vías mencionadas, el CO_2 producido es el doble del que queda retenido en la atmósfera. El sumidero de esta mitad de CO_2 podría ser el océano, y quizá la vegetación. Pero aunque a largo plazo esto pudiera ser posible, la velocidad a la que el CO_2 se está produciendo provoca inequívocamente el que éste se vaya acumulando en la atmósfera. El CH_4 , por su parte, también registra incrementos notables, del orden del 1% anual, que se atribuyen al incremento de la ganadería y a la creación de ambientes acuáticos anaerobios como podrían ser los campos de arroz.

Entre 1856 y 2000 se ha registrado un ascenso global de la temperatura entre 0,4 y 0,8°C. Pero es desde 1975 cuando el incremento térmico se ajusta mejor al de CO_2 . El IPCC ("Intergovernmental Panel on Climate Change") ha asumido la tarea de modelar la evolución de la temperatura del futuro en diferentes escenarios que resultan de considerar si la sociedad preferirá decantarse por la economía o el medio ambiente y, en cada caso, si las actuaciones deberían llevarse a cabo a nivel global o regional. Las estimaciones sobre las consecuencias climáticas de los diferentes escenarios muestran incrementos significativos de la temperatura de 2 a 4,5 °C en 2100 y elevaciones del nivel del mar entre 31y 49 cm.

Sin cuestionar los datos irrefutables del aumento del CO_2 atmosférico, y también del de la temperatura, otros puntos de vista discuten el valor predictivo de los modelos empleados por el IPCC. Estos analizan básicamente hasta qué punto se conoce el verdadero efecto del CO_2 sobre la temperatura, si pueden existir otros factores implicados en el aumento de la temperatura que no se han considerado, y cuales son realmente las consecuencias, cualitativas y cuantitativas, del posible incremento térmico. Cuestiones realmente complicadas de encarar desde un punto de vista científico, dada la

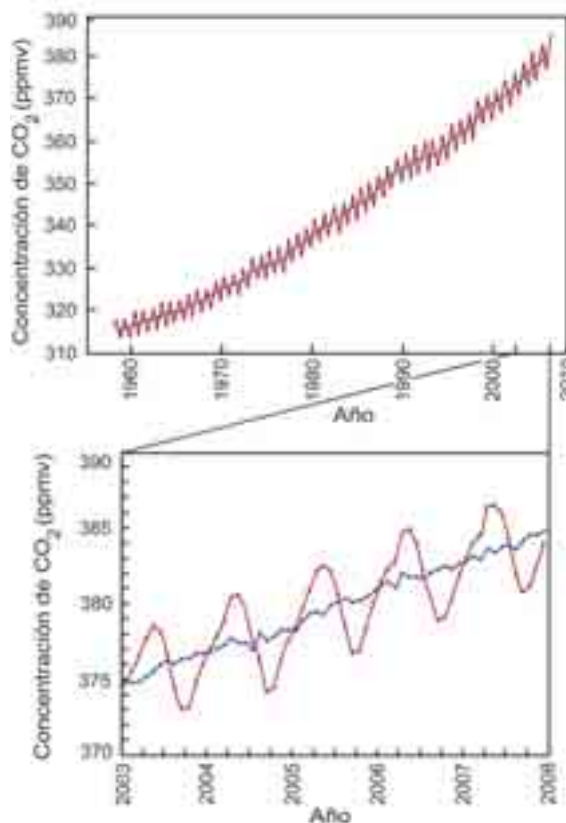


Figura 3. Incremento mantenido de la concentración de CO_2 en la atmósfera en los últimos cincuenta años. Se aprecia la oscilación anual atribuible a la estacionalidad de la actividad fotosintética en el hemisferio norte (mínimos estivales). Datos del observatorio de Mauna-Loa (Hawaii)

enorme complejidad de los procesos físicos, químicos y cibernéticos que tienen lugar en las envolturas fluidas de la Tierra. Se da el caso de que la temperatura y la evolución de la población humana siguen patrones temporales similares (ver figura 1), sin embargo, las relaciones entre el mundo físico y biológico no siempre son causales ni fáciles de establecer.

Es clásico y divertido un ejemplo que critica el uso de las correlaciones para establecer relaciones simplistas causa-efecto. Un estudio realizado entre 1970 y 1980 podría permitir atribuir el descenso de la natalidad en Polonia a la reducción de las poblaciones de cigüeña cuando, en realidad, los procesos implicados en esta coincidencia tenían mucha más enjundia socioeconómica y medioambiental: la industrialización del país y, como consecuencia de ella, la incorporación de la mujer al trabajo por un lado, y la degradación del hábitat de las cigüeñas, por otro.

3. LOS GASES DE EFECTO INVERNADERO N_2O , CO_2 y CH_4

El óxido nitroso (N_2O) está presente en la atmósfera con una concentración de unas 300 ppbv y últimamente se está incrementando en un 2% anual. Se trata de un gas que contribuye en muy pequeña cantidad al efecto invernadero por su escasa concentración en la

atmósfera, aunque tiene 310 veces mayor potencial térmico que el CO_2 . El óxido nitroso se produce como intermediario en el proceso de desnitrificación, el cual tiene lugar en ambientes anaerobios con disponibilidad suficiente de materia orgánica oxidable y nitrato, pero también por la quema de biomasa y de combustibles fósiles. Los sumideros del óxido nitroso son la fijación llevada a cabo por organismos nitrificantes, los cuales lo pueden tomar como alternativa al nitrógeno, y la reacción con el oxígeno atómico en la estratosfera, que constituiría el mecanismo más importante de retirada de este gas de la atmósfera.

El dióxido de carbono (CO_2) y el metano (CH_4) son los gases de carbono más estables. El CO_2 es el más abundante en la atmósfera aunque se encuentra sólo en una proporción del 0,038% en la actualidad. El CH_4 sólo se considera un gas traza pero es 20 veces más efectivo para el efecto invernadero que el CO_2 . El CO_2 atmosférico está en equilibrio con el bicarbonato presente en la hidrosfera, el cual constituye el reservorio más importante de carbono del planeta. El sentido de paso de uno a otro sistema viene regulado por la presión del CO_2 en la atmósfera y por la concentración de bicarbonato en el agua. Pero aparte de estos aspectos puramente físicos, el ciclo biogeoquímico del carbono incluye complejos procesos de oxidorreducción en los que participa la vida. Tanto el bicarbonato como el CO_2 son reducidos a moléculas orgánicas por los organismos fotosintetizadores utilizando la energía del sol, lo que constituye la forma de entrada del carbono en la biosfera. Posteriormente, las moléculas orgánicas van siendo oxidadas mediante el oxígeno u otros aceptores terminales de electrones. El retorno a la forma oxidada inicial, es decir, al CO_2 , puede seguir rutas más o menos largas y tortuosas en función de la complejidad de los ecosistemas por los que fluya el carbono y de la existencia de otros mecanismos implicados, que podrían llegar a incluir procesos geológicos. Existe desde el CO_2 que es fijado por las plantas y devuelto rápidamente a la atmósfera o al agua por respiración o por descomposición de

la materia orgánica producida en los ecosistemas, hasta el que permanece aún almacenado como madera, carbón, petróleo, gas natural, o incluso rocas calizas, fijado en épocas remotas. Consecuentemente, cuando se hace referencia a las emisiones, conviene diferenciar entre las de este CO_2 de origen "fósil" y el emitido en los procesos que forman parte del ciclo actual del carbono (Figura 4).

El metano (CH_4) es producido en depósitos orgánicos por bacterias anaeróbicas que acoplan la oxidación de compuestos reducidos como el hidrógeno y el acetato, a la reducción del dióxido de carbono a metano. Desaparece de la atmósfera mediante su reacción con el radical hidroxilo y puede estar implicado en la formación de monóxido de carbono y de ozono troposférico.

La concentración de CO_2 y CH_4 en la atmósfera se ha visto sometida a variaciones temporales muy importantes. En sus inicios la atmósfera era bastante diferente a la actual. Era reductora, es decir, anaerobia, y contenía CH_4 , NH_3 , H_2S y vapor de agua. Evidencia de tal predominancia reductora son las rocas ferruginosas con más de tres mil millones de años de antigüedad, del Precámbrico, en las que el hierro se encuentra en forma ferrosa. El oxígeno que empezó a aparecer posteriormente como consecuencia de la actividad biológica autótrofa fue gastándose inicialmente en oxidar las moléculas reducidas, y después se fue acumulando en la atmósfera como un gas residual hasta que alcanzó la concentración actual hace ya unos mil millones de años. A medida que aumentaba el oxígeno en detrimento del CO_2 el planeta se fue enfriando. Por su parte, el CO_2 de origen natural que queda en la atmósfera, proviene de la respiración de la biosfera y de emisiones desde volcanes y géiseres. No se dispone de información precisa acerca de cómo ha ido variando la concentración de CO_2 en la atmósfera en tiempos remotos; probablemente, hace dos mil millones de años se encontraba en una proporción relativa del orden del 75%, muy superior a la actual (0,038%). Pero sí se tienen registros de que

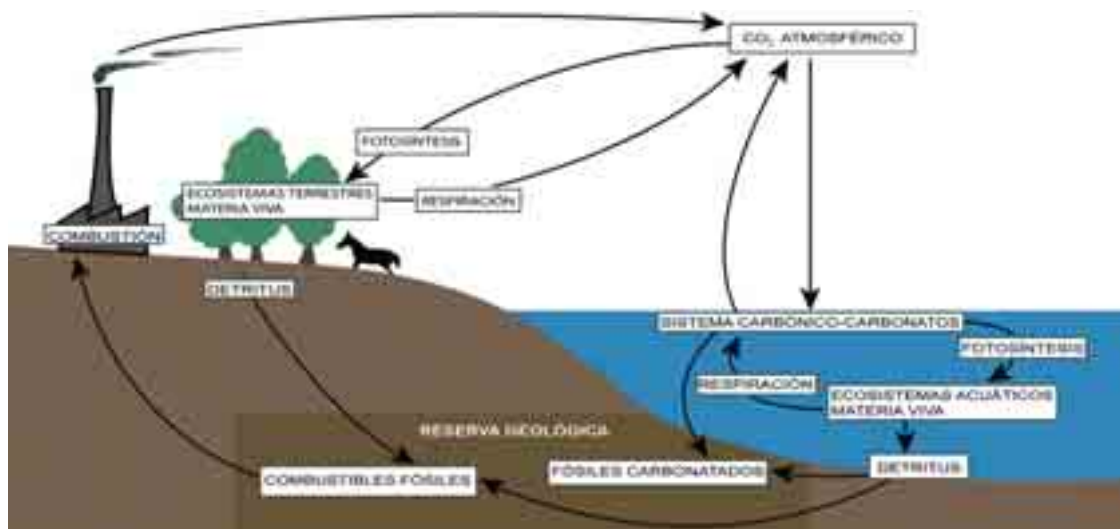


Figura 4. Esquema simplificado del ciclo del carbono a escala planetaria.

durante los periodos interglaciares el incremento de temperatura iba acompañado de un incremento significativo de CO₂, consecuencia lógica si se tiene en cuenta que el agua de la hidrosfera, al estar más caliente, dispone de menor capacidad para disolver los gases.

El papel de los sistemas acuáticos ha sido decisivo en los cambios de la composición atmosférica. El oxígeno, del que ya se ha hablado, proviene de la fotosíntesis, y los primeros organismos que comenzaron a utilizar esta forma de incorporación del carbono hace más de tres mil quinientos millones de años, fueron organismos que podrían asimilarse a las actuales cianobacterias, las cuales poblaban mares poco profundos, probablemente muy eutróficos.

4. EL CALENTAMIENTO GLOBAL Y EL OSCURECIMIENTO GLOBAL

Los grandes temas globales son, en las últimas décadas, el motor de políticas, inversiones, negocios, etc. especialmente si sus potenciales efectos pueden ser catastróficos. Algunos han conseguido alcanzar un gran éxito (agujero en la capa de ozono, calentamiento global) mientras que otros parece que se han quedado por el camino (riesgo nuclear en la Guerra Fría, el impacto de meteoritos,...), con independencia de que puedan resurgir en cualquier momento.

Actualmente el referente es el calentamiento global y su enorme éxito probablemente se basa en tres aspectos: el primero es que es muy difícil de cuantificar y predecir, de modo que caben una infinidad de hipótesis y teorías, capaces de satisfacer todas las opiniones posibles. El segundo, derivado en parte del anterior y de más calado social, es que cualquier acontecimiento meteorológico puede explicarse por el presunto calentamiento global: que si ahora llueve menos, o ahora llueve más, que si hace más calor que antes o todo lo contrario, que si los inviernos ya no son tan fríos,... El tercero, es que su manifestación se pronostica a medio o largo plazo (50 años o más) de manera que a ninguno de sus agoreros será fácil pedirle explicaciones.

No obstante, cada vez hay más voces escépticas frente a los efectos del cambio climático, e incluso frente a su presunta relación significativa y directa con las actividades humanas. Se impone, por tanto, pensar en otro gran tema global y lo cierto es que, con toda su lógica, el llamado "oscurecimiento global" puede ir ganando adeptos.

En efecto, las emisiones contaminantes de las actividades humanas de combustión, no sólo incorporan a la atmósfera gases con efecto invernadero tal y como ya se ha expuesto. También emiten partículas diversas (cenizas, hollines,...) que interceptan parte de la radiación solar incidente en la superficie terrestre. Parece ser que hay medidas en determinadas partes del mundo donde dicha radiación ha disminuido de forma cuantificable, como también lo ha hecho la tasa de evaporación, a pesar del calentamiento global.

La hipótesis que se baraja es que las partículas contaminantes en suspensión bloquean la penetración de la radiación solar y convierten las nubes en espejos gigantes. A más partículas en suspensión, más núcleos de condensación para formar gotas de agua, menor tamaño medio de dichas gotas, mayor densidad de las nubes y mayor efecto pantalla (espejo) de estas, frente a la radiación solar. Hay algunos científicos que indican que la radiación solar recibida en la superficie de la Tierra se ha reducido entre un 6 y un 30% según las zonas.

Estas nubes "espejo" pueden alterar, según los impulsores de la teoría, la distribución de las lluvias en el planeta, en la medida en que provocan el enfriamiento de los océanos, tal y como según ellos ocurrió en los años 70 y 80 en el hemisferio norte. Menos evaporación, más sequía.

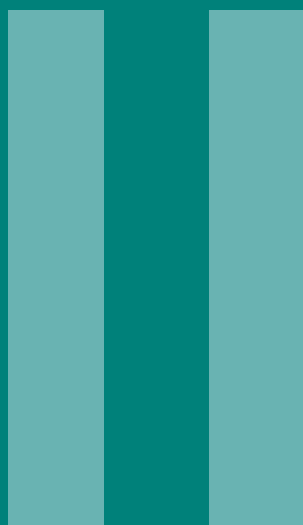
De acuerdo con lo expuesto, el oscurecimiento global, actúa en sentido contrario al calentamiento global. El primero enfría y el segundo calienta. A partir de aquí, la paradoja está servida: si se evita la contaminación de partículas de la atmósfera, se disminuirá el efecto del oscurecimiento global, y con ello se potenciará el efecto del calentamiento global. Dicho de otra forma, gracias al oscurecimiento global, los efectos del calentamiento global han sido hasta ahora reducidos, pero si se reducen las causas del oscurecimiento global, cosa que se está haciendo (filtros de partículas en centrales térmicas y motores de explosión), el calentamiento global no tendrá freno y sus efectos serán aún más devastadores que los previstos, pues los actuales modelos utilizados para las predicciones, no contemplan esta circunstancia. Ya se habla de aumentos de la temperatura media de la Tierra de unos 10°C para finales del siglo XXI.

Una primera opción es dejar, de forma inmediata, de eliminar las partículas emitidas a la atmósfera, por los procesos de combustión, con el fin de mantener activos los efectos del oscurecimiento global y así retrasar, o al menos atenuar el apocalíptico calentamiento global.

Es raro, no obstante, que los defensores del oscurecimiento global, no valoren cómo las partículas en suspensión contribuyen al efecto invernadero, donde sin duda también intervienen. Por otro lado, cabe suponer que una alta densidad de partículas en suspensión "protectoras" en la atmósfera, afectaría a los procesos respiratorios de muchas formas de vida, entre otras cosas.

El que hipótesis y teorías se muevan entre paradojas tan simples y evidentes, suele significar que existen lagunas de conocimiento enormes, en particular, sobre los procesos de regulación que intervienen en la naturaleza y en el funcionamiento de los ecosistemas naturales. Así, puestos a elucubrar, si lo del oscurecimiento global es relevante, quizás una parte del cambio climático actual se deba a la drástica reducción de la gran concentración de partículas en suspensión existente en la atmósfera de finales del siglo XIX, que tuvo su origen en el uso masivo del carbón como combustible.

**LA HIDROELECTRICIDAD
EN EL BALANCE
ENERGÉTICO GLOBAL**



1. INTRODUCCIÓN

Además de un reservorio de agua que puede destinarse a diferentes usos y un ecosistema acuático complejo, los embalses guardan una relación muy importante con la producción de energía, en este caso la hidroeléctrica. Antes del análisis de cómo y en qué medida intervienen en el efecto invernadero, se expone el papel de la producción hidroeléctrica en el balance energético global, lo que, además de contextualizar la importancia de este tipo de energía y, por extensión, de los embalses que permiten producirla, quizá pueda contribuir a clarificar el papel clave que desempeña la hidroelectricidad en la organización energética de países como España, hídrica y energéticamente muy dependientes.

2. LA PRODUCCIÓN Y EL CONSUMO DE ENERGÍA EN ESPAÑA

España es un país pobre en términos de energía. Se importa más del 80% de lo que se consume. Este es un dato probablemente muy poco conocido y, sin embargo, clave para entender la actual gestión energética española, así como para concienciar a la sociedad de la importancia del ahorro energético. En concreto, en el año 2005, se importaron $139,5 \times 10^6$ toneladas equivalentes de petróleo (tep), un 7,7% más que en 2004, lo que supuso el 85,1% de la energía consumida. La figura 5 muestra la distribución de la potencia instalada y la producción de energía eléctrica por tecnologías, para el año 2007, según el informe del balance eléctrico anual de Red Eléctrica Española.

Tabla 1. Evolución anual de la potencia total instalada en España (Gw) en la última década para la producción de energía eléctrica, en régimen ordinario.

Potencia Instalada (Gw)	
1998	43,522
1999	43,662
2000	44,079
2001	44,181
2002	46,255
2003	61,223
2004	68,425
2005	73,970
2006	78,754
2007	85,959

La potencia instalada para la producción de energía, se ha duplicado en los últimos 10 años (tabla 1), a expensas de las instalaciones de producción de energía eólica y, sobre todo, de las centrales de ciclo combinado que empiezan a entrar en marcha en el año 2003.

Por el contrario, la potencia instalada en las centrales hidráulicas en régimen ordinario (centrales de más de 10 Mw), apenas ha

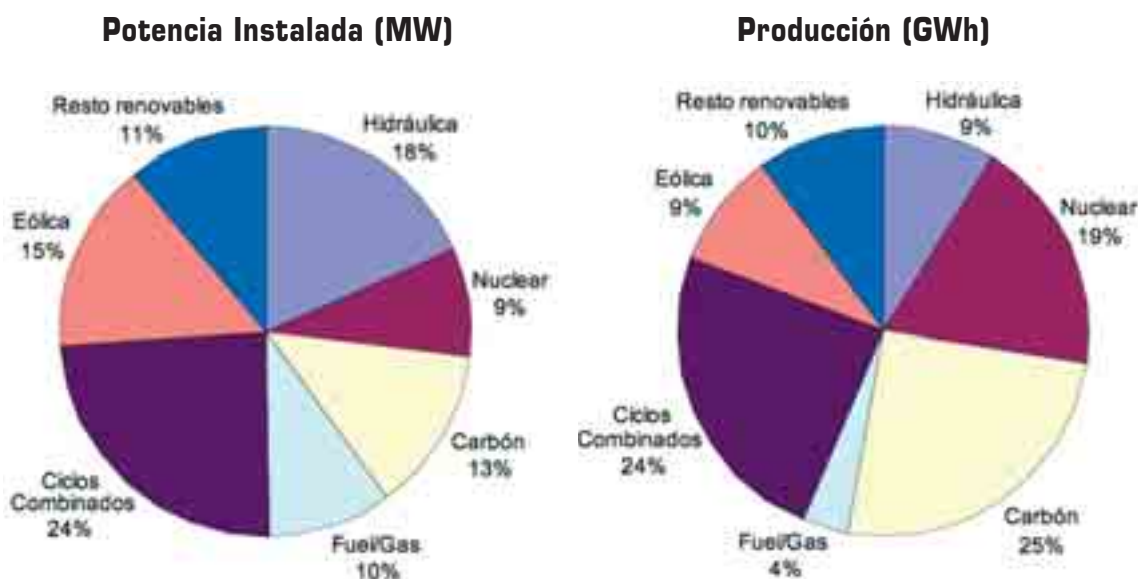


Figura 5. Potencia instalada (MW) y producción de energía eléctrica (GWh) por tecnologías, en España para el año 2007. La denominación "Resto renovables" se refiere a minihidráulica, solar y biomasa.

variado en los últimos 10 años, como consecuencia de que no se han llevado a cabo nuevos aprovechamientos de entidad. En los últimos 5 años, por ejemplo, se ha mantenido estable en 16.658 Mw. Ello ha supuesto una reducción notable del porcentaje de participación de la hidroelectricidad, en el global de potencia de producción eléctrica, desde un 37,8% en el año 2000 a un 19,4% en el 2007.

Los nuevos proyectos de centrales hidroeléctricas de bombeo van a suponer en los próximos años un aumento de potencia de unos 3.000 Mw, de los cuales 1.200 Mw son proyectos ya en ejecución.

La producción neta de energía eléctrica, en régimen ordinario y en régimen especial, ha seguido la evolución que se muestra en la figura 6. En el régimen especial está la producción de energía de fuentes renovables (eólica, solar, minihidráulica y biomasa básicamente), mientras que en el régimen ordinario está el resto de sistemas de producción de energía, incluida la gran hidráulica. El

patrón de evolución temporal de la producción total conjunta viene, lógicamente, marcado por la tendencia de la curva de demanda.

La demanda crece año tras año, situándose en una tasa media de incremento anual del 4,5% para los 12 últimos años. En 2006 y 2007 se ha situado alrededor del 4,0% una vez ya incorporadas las correcciones de los efectos de la laboralidad y la temperatura. En estos dos mismos años, la demanda doméstica ha pasado de representar el 38,63% del total (2006) al 41,53% en el 2007. Hay que tener en cuenta que una parte del consumo energético, y también de su incremento temporal, es consustancial al crecimiento económico.

En España, el consumo por habitante y año, aún está por debajo del de otros países. Así el consumo de energía en términos globales (electricidad, combustibles fósiles,...) en España se sitúa en unas 3,2 tep/habitante y año. En Estados Unidos el consumo expresado en los mismos términos es de 7,8 tep, mientras que en Japón es de 4,1 tep y en el conjunto de la Unión Europea se llega a las 3,6 tep.

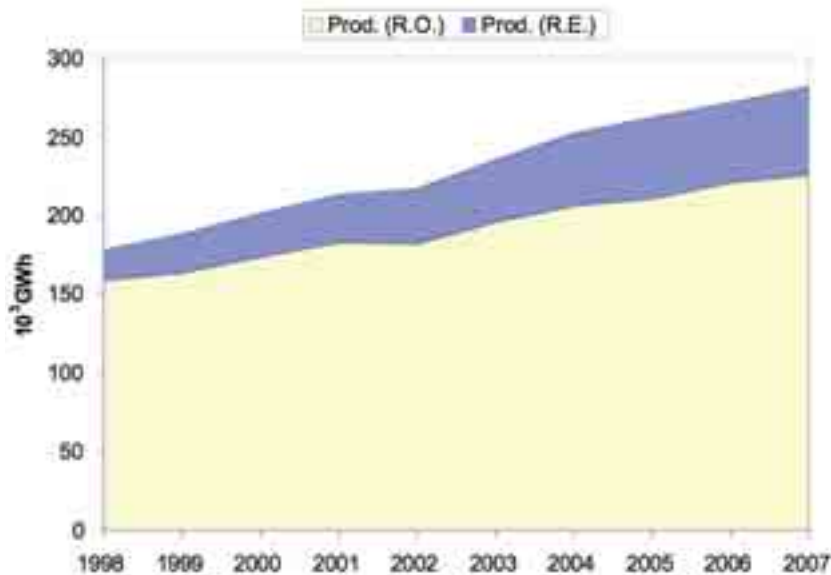


Figura 6. Evolución temporal de la producción de energía eléctrica en España, en régimen ordinario (R.O.) y en régimen especial (R.E.)

3. LA HIDROELECTRICIDAD EN EL ABASTECIMIENTO DE LA DEMANDA DE ENERGÍA

La hidroelectricidad juega un papel clave en la satisfacción de la demanda de energía debido a su versatilidad. En efecto, no todas las fuentes de energía poseen una capacidad de modulación comparable. Hay fuentes que por su proceso de producción y acoplamiento a la red de transporte y distribución, permiten (o pueden soportar) pocas posibilidades de variación temporal. Es el caso de las centrales térmicas y las nucleares, que funcionan de forma continuada, con escaso margen de variación en su producción, como consecuencia de su proceso industrial. Otras fuentes de energía

por el contrario, aportan una producción notablemente variable, como consecuencia de depender de procesos naturales no controlables; tal es el caso de la energía eólica y de las pequeñas centrales hidroeléctricas fluyentes, respectivamente dependientes de la disponibilidad de viento y de agua.

Por su parte la distribución temporal de la demanda de potencia, bien sea a escala anual o a escala diaria, es absolutamente independiente de los procesos de producción de energía y de la disponibilidad de recursos naturales energéticos. El patrón temporal que marca la demanda es la evolución del consumo.

Para poder abastecer la demanda a partir de la producción, por tanto, se hace necesaria la existencia de procesos de producción

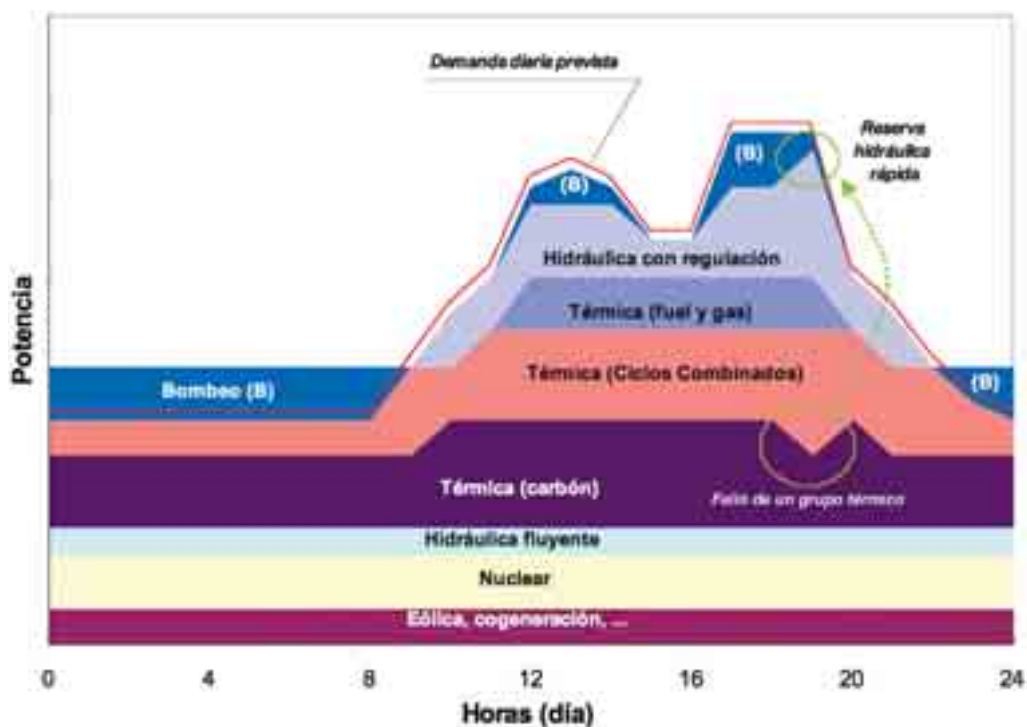


Figura 7. Distribución de las diferentes fuentes de energía para abastecer la curva de demanda de potencia media horaria de un día cualquiera.

de energía regulables, que puedan aportar más cuanto más se necesita y viceversa, mediante un ajuste lo más preciso (eficiente) posible entre, demanda y producción.

La figura 7 muestra una curva diaria típica de demanda de energía eléctrica. Hay un período con una baja demanda durante las horas centrales de la noche (de 2 a 6 horas), seguido de una primera punta de demanda entre las 11 y las 13 horas de la mañana, y otra punta más alta y duradera entre las 16 y las 21 horas. Estas diferencias horarias en las necesidades de energía responden, lógicamente, a los hábitos sociales (horarios de trabajo, actividades domésticas e industriales,...).

La curva diaria de demanda se establece de un día para otro mediante un modelo de previsión basado en los datos históricos y las tendencias de variación.

Para abastecer la curva diaria de demanda, el ente gestor del mercado eléctrico, da entrada en primer lugar a los procesos productivos menos modulables (nuclear) o menos regulables (eólica, hidráulica fluyente,...).

A continuación entra la producción térmica (carbón, fuel, gas, ciclos combinados), con una capacidad de regulación muy limitada.

La única fuente de energía que puede acabar de ajustar la producción a la curva de demanda, es la hidráulica convencional (con regulación). Mediante las centrales hidráulicas convencionales,

asociadas a grandes embalses, y el apoyo de las centrales hidráulicas reversibles (turbina-bomba), se consigue un ajuste preciso de la producción de energía eléctrica a la curva diaria de demanda. Por ejemplo, en una eventual situación de fallo en un grupo térmico o nuclear, de nuevo la única fuente de energía que puede compensar de forma suficientemente rápida la caída de producción es la hidráulica con regulación (convencional o de bombeo).

La producción hidroeléctrica con regulación es, además, la única que puede compensar las oscilaciones de producción que a lo largo de un día, pueden tener las fuentes de energías renovables dependientes de procesos naturales, como es el caso de la eólica (muy importante en España), la solar o la hidráulica fluyente. Una caída del parque eólico por falta de viento, o una entrada en la red por disponibilidad de él, se compensa de forma precisa con la entrada o salida de red, respectivamente, de las centrales hidráulicas. Esta función reguladora de las centrales hidroeléctricas aporta también calidad al suministro de energía en la medida que permite mantener una frecuencia (hercios) constante compensando las fluctuaciones que registra la red en función del consumo.

Las centrales hidráulicas de bombeo, introducen capacidades adicionales en la gestión de la producción eléctrica. Se trata de instalaciones formadas por dos embalses situados a distinta altitud y conectados entre sí por una central hidroeléctrica que puede actuar como bomba o como turbina según convenga. Cuando el consumo

de energía es mínimo (durante la noche) y existen excedentes de producción, estos pueden utilizarse para bombear agua al embalse superior, con lo cual se aumenta la reserva de energía potencial. En las horas centrales del día, cuando la demanda aumenta, el agua acumulada durante la noche, puede turbinarse en las mismas centrales hidráulicas, optimizando las garantías de producción y el buen ajuste a la curva de demanda. Estas centrales son también un sistema complementario imprescindible cuando la potencia instalada de fuentes renovables es importante, como ocurre con la eólica en España, y se quieren optimizar los recursos energéticos. Así, en periodos con viento y baja demanda de energía eléctrica, la producción eólica puede utilizarse también para los bombeos.

4. LA HIDROELECTRICIDAD Y OTRAS FUENTES ENERGÉTICAS EN TÉRMINOS DE BALANCE DE CO₂

La generación hidroeléctrica es, junto con la eólica, la fotovoltaica y la nuclear, una de las fuentes de energía que menos CO₂ emiten hacia la atmósfera. Sin embargo, en la evaluación de las emisiones es preciso tener en cuenta no sólo el proceso productivo en sí mismo sino otros aspectos como el ciclo de vida completo de las instalaciones industriales (fabricación, construcción, mantenimiento, demolición, etc). En el caso de la hidroelectricidad, tiene particular importancia el tipo de aprovechamiento hidráulico (fluyente, con un gran embalse, etc.), así como las características hidromorfológicas y biológicas de la masa de agua implicada. Por otro lado, en los aprovechamientos hidroeléctricos que explotan

grandes embalses es preciso tener en cuenta los tipos de comunidades naturales que sustituyen y su potencial capacidad como sumideros de carbono.

Los rendimientos en la obtención de energía según la tecnología considerada, es un dato relevante. Así, una central termonuclear llega a rendimientos del 33%, que alcanzan el 38,5 % en una central térmica convencional y llegan al 90% en los aprovechamientos hidroeléctricos.

En términos comparativos, por cada Gwh hidroeléctrico se evita quemar 223t de petróleo o 248 hm³ de gas natural o 319 t de carbón o 25 kg de uranio natural.

La tabla 2 recoge las emisiones de gases con efecto invernadero asimilables al ciclo de vida de distintas tecnologías de producción de energía eléctrica. La producción hidroeléctrica se sitúa algo por encima de la eólica con unas emisiones próximas a la fotovoltaica y muy por debajo de los ciclos combinados con gas natural, los cuales representan la opción con menos emisiones entre las tecnologías que utilizan combustibles fósiles.

Hay que tener en cuenta que cada GWh producido mediante una central hidráulica, supone evitar la emisión a la atmósfera de entre 450 y 1.000 toneladas de CO₂, comparativamente hablando con el conjunto de centrales eléctricas que utilizan combustibles fósiles (fuel y carbón respectivamente).

Con relación a los ecosistemas acuáticos continentales y la producción de energía de fuentes renovables, existen en Europa dos Directivas que es necesario compatibilizar. Por un lado la Direc-

Tabla 2. Emisiones de gases con efecto invernadero durante el ciclo de vida de diferentes tecnologías de generación de energía eléctrica. Tomado de varios autores.

Tipo de planta	Rango (g CO ₂ eq/kWh)	Valor medio
Carbón (planta moderna)	959-1.042	1.000
Ciclo combinado (gas sintético del carbón)	763-833	798
Diesel	555-880	717
Ciclo combinado (gas natural)	469-622	545
Fotovoltaica	12,5-104	58
Hidroeléctrica (embalses boreales)	8-60	36
Eólica	7-22	14

tiva Marco del Agua (2000/60/CE), cuyo objetivo es alcanzar, en 2015, el "Buen Estado Ecológico" (o Buen Potencial Ecológico, si se trata de una masa de agua muy modificada) en el conjunto de sistemas acuáticos continentales. Por otro lado la Directiva de Renovables (2001/77/CE) de promoción de la electricidad generada a partir de fuentes de energía renovable que se concreta en conseguir que para el 2010 el 12% de la energía primaria (sin transformar) que se consume (consumo nacional bruto), proceda de fuentes renovables y que, para el mismo año y en el caso de España, el 29,4% de la electricidad total generada proceda de fuentes de energía renovables.

En el año 2007, se ha alcanzado el 7% de participación de las energías renovables, en el consumo primario, con una tasa media de incremento anual del 0,5%. A este ritmo, en el año 2010, se llegaría a un 8,5%, lejos del objetivo del 12%.

Resulta obvio que en el cumplimiento de la Directiva de Renovables juega un papel significativo el desarrollo de la energía hidroeléctrica, la cual condiciona en muchos casos la calidad ecológica de las masas de agua implicadas. Será preciso aplicar las mejores estrategias y tecnologías disponibles para lograr los objetivos propuestos en ambas Directivas.

ECOSISTEMAS ACUÁTICOS Y GASES EFECTO INVERNADERO



1. EL CARBONO

El carbono entra en los sistemas acuáticos mediante la disolución del CO_2 atmosférico y como componente de la materia orgánica e inorgánica, tanto particulada como disuelta que procede de sus cuencas (figura 8).

La cantidad de CO_2 atmosférico que se disuelve depende de la presión parcial de este gas en la atmósfera y de su concentración en el agua (como CO_2 y como bicarbonato básicamente), las cuales deben acabar en equilibrio, y también de la temperatura y el pH.

En función del pH del agua, y a medida que este aumenta, el CO_2 que se disuelve puede estar como gas, como ácido carbónico, como bicarbonato o como carbonato. Si hay calcio, tiende a formarse CaCO_3 , el cual es muy poco soluble y precipita químicamente, lo que supone un sumidero de carbono.

A través de la fotosíntesis, el CO_2 y el HCO_3^- pasan a formar parte de la vegetación acuática, ya sea ésta en forma de fitoplancton, macrófitos o fitobentos. A partir de aquí el ciclo puede ser más o menos complejo.

Una parte del carbono asimilado se libera rápidamente en forma de CO_2 por respiración de la propia vegetación mientras que el resto pasa a circular por la red trófica: zooplancton, zoobentos, peces, aves, bacterias..., y también va retornando al agua a través de la respiración de cada compartimento, pudiendo ser reutilizado por

los autótrofos; si supera la presión parcial del CO_2 atmosférico, abandona la masa de agua.

Parte del carbono asimilado puede también quedar depositado en forma mineral o químicamente reducido en los sedimentos anaerobios, y pasar alguna fracción a metano mediante la reducción del dióxido de carbono siempre que se produzcan las condiciones adecuadas. El metano puede ser nuevamente oxidado a anhídrido carbónico dentro del agua y seguir la ruta de éste, o ser liberado a la atmósfera. El ciclo biogeoquímico del carbono varía en función de las rutas metabólicas dominantes. Los sistemas dominados por la autotrofia son aquellos en los que la principal fuente de carbono es inorgánica (CO_2 o materia inorgánica, ya sea particulada o disuelta).

En general, la ruta dominante que sigue el carbono en los ecosistemas acuáticos, es la de la autotrofia en la que el CO_2 atmosférico que pasa al agua va siendo fijado por los organismos fotosintetizadores. Si el sistema es oligotrófico, el ciclo del carbono en la masa de agua es cerrado y apenas existe intercambio con la atmósfera y los sedimentos. Pero si el sistema es eutrófico, aumenta su papel como secuestrador de CO_2 atmosférico debido a que el ciclo del carbono se abre al sedimento (figura 9).

Por su parte los sistemas heterótrofos serían aquellos en los que es mayoritaria la entrada de carbono en forma orgánica. En ellos domina la respiración, ya sea de animales o bacterias y, por lo tanto, desprenden CO_2 .

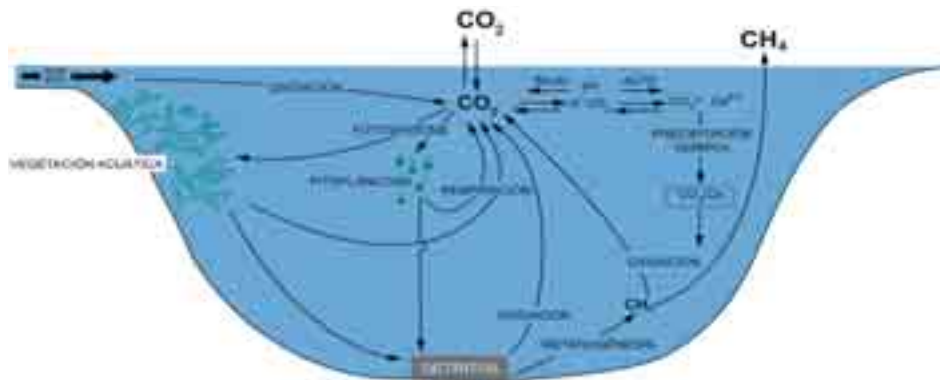


Figura 8. Ciclo del carbono en los ecosistemas acuáticos

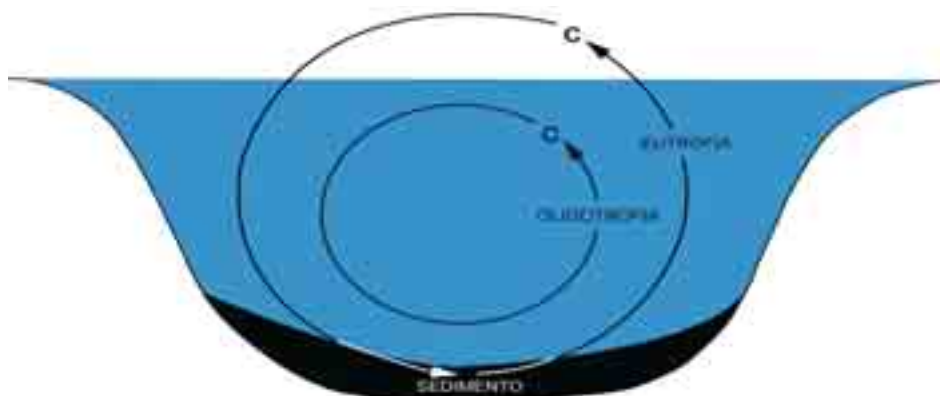


Figura 9. Ciclo del carbono en sistemas acuáticos oligotróficos (cerrado) y eutróficos (abierto).

2. EL NITRÓGENO

El ciclo del nitrógeno en los ecosistemas acuáticos es muy complejo y se encuentra regulado por el potencial de oxido-reducción existente en los diferentes compartimentos de la masa de agua. En presencia de luz, los autótrofos en general son capaces de asimilar el nitrógeno en todas sus formas, desde el nitrógeno molecular hasta el nitrato, y lo incorporan a la red trófica. En la fase de descomposición, el nitrógeno contenido en los organismos va siendo oxidado mediante acción bacteriana. Si hay oxígeno, lo que corresponde a un potencial de oxido-reducción elevado, actúan las denominadas bacterias nitrificantes, que son aerobias y acaban dando nitrato. Sin embargo, si se agota el oxígeno, el proceso de descomposición de la materia orgánica continua por vía fermentativa y aparecen, entre otras, las bacterias desnitrificantes que utilizan moléculas oxidadas de nitrógeno como aceptores terminales de electrones. Es decir, en vez de oxígeno "respiran" nitrito y nitrato y, como producto de este metabolismo, se desprende N_2 y N_2O , los cuales pueden ser liberados a la atmósfera, o incorporados de nuevo por organismos fijadores de nitrógeno como las cianobacterias en el agua o las bacterias de los nódulos radicales de muchas plantas (leguminosas, alisos, etc.) en los suelos terrestres.

3. LOS EMBALSES Y LOS GASES CON EFECTO INVERNADERO

El cambio de río a embalse

Los ríos incorporan carbono orgánico disuelto y particulado a partir de los sistemas terrestres que drenan, y lo van procesando a lo largo de su recorrido. Por su parte, los embalses son ríos modificados en los que se incrementan artificialmente la sección hidráulica

y el tiempo de residencia del agua, lo que conlleva cambios sustanciales en su funcionamiento como ecosistemas al pasar de una organización horizontal a otra vertical. Sobre el metabolismo del carbono su comportamiento varía y, en muchos casos, se asemejan más a los sistemas fluviales que a los lacustres. Como sistemas en los que la componente heterotrófica tiene mucho peso, los ríos tienden más a desprender gases con efecto invernadero que a secuestrarlos; mientras que los embalses, en función de que su comportamiento sea más bien fluvial o lacustre pueden presentar una respuesta más variable. Otra característica exclusiva de los embalses es que vierten aguas hipolimnéticas, más frías y sometidas a mayor presión hidrostática, y por lo tanto con mayor capacidad para mantener gases en disolución (N_2O , CO_2 y CH_4), que río abajo salen son más o menos rápidamente liberados a la atmósfera.

Además, los embalses inundan ecosistemas terrestres, lo que significa que al menos en las etapas iniciales de su historia, disponen de una gran cantidad de materia orgánica que van metabolizando por vía detritica. En general, esta primera fase, que podría denominarse heterotrófica, dura alrededor de una década y se distingue porque las emisiones de CO_2 y de CH_4 son más elevadas. Pasado este periodo el embalse alcanza su situación de equilibrio y rebaja la emisión de gases con efecto invernadero a las tasas propias de otros sistemas acuáticos naturales equivalentes.

Pero en términos de balance de carbono con efecto invernadero, en los embalses hay que analizar también cómo interfiere la sustitución del ecosistema terrestre por el acuático. Por un lado, el cambio de río a embalse supone, sin tener en cuenta ya el metabolismo de la materia orgánica anegada, un cambio de sistema acuático tanto en lo hidromorfológico, como en lo físico-químico y en lo biológico. Por otro lado resulta interesante comparar el nuevo sistema acuático



Embalse de Cavallers. Río Noguera de Tor (Lleida).



Embalse de Cala. Río Ribera de Cala (Sevilla).

formado con los ecosistemas terrestres preexistentes inundados.

Cuando el río se embalsa pasa de ser un sistema turbulento, generalmente bien oxigenado y mezclado, a un sistema mucho más estático y con tendencia a estratificarse. Por su parte, las comunidades biológicas, que en las aguas corrientes se desarrollan sobre los sustratos sumergidos, más o menos adheridas a éstos, en las aguas embalsadas están constituidas casi exclusivamente por plancton. Este escenario, el de embalse, es más favorable al secuestro de CO_2 que el de río, porque el atomizado fitoplancton con su gran capacidad reactiva, en este caso fijadora de carbono, cuando sedimenta lo transporta hacia fondos en los que, si son anóxicos, puede quedar retirado del ciclo. También el carbono alóctono podría tener el mismo destino. En los ríos, por el contrario, existe gran disponibilidad de oxígeno, y tanto la materia orgánica generada en su seno como la que recibe de la cuenca, es más fácilmente oxidada a CO_2 que es devuelto a la atmósfera.

El balance de gases con efecto invernadero en lagos y embalses.

Para tener una idea de las emisiones de CO_2 procedentes de lagos y embalses se incluyen algunos datos obtenidos de la literatura especializada (tabla 3).

Estos datos, aunque muestran una gran variabilidad entre diferentes masas de agua, acotan las emisiones de gases con efecto invernadero en un orden de magnitud entre 100 y 10.000 $\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, que serían equivalentes a 10 y 100 $\text{g C m}^{-2} \text{ año}^{-1}$. Tremblay *et al.*, (2005) dan valores de emisiones de CH_4 mucho más modestas: $0,6 \pm 13 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ para lagos y $8,8 \pm 12 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ para embalses, ambos situados en clima boreal. Para estas mismas masas de agua, estos autores midieron emisiones de $-1,3$ a $3,1 \text{ mg N}_2\text{O m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, que son consistentes en orden de magnitud con las encontradas en lagos de regiones templadas, de

$0,01$ a $0,9 \text{ mg N}_2\text{O m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ (Mengis *et al.*, 1997), y las encontradas en los Grandes Lagos de los Estados Unidos, de $3,5 \text{ mg N}_2\text{O m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ (Leman & Leman, 1981). Todo parece indicar que la emisión de CO_2 y N_2O en los embalses es menor o igual que en los lagos, mientras que la emisión de CH_4 es mayor en los embalses que en los lagos.

Por otro lado, lo que supone en términos de balance de CO_2 la sustitución de comunidades naturales terrestres por la lámina de agua embalsada, es una posible pérdida neta de capacidad de sumidero a considerar, ya que estas comunidades fijan en todos los casos (tabla 4). Debido a esto, cuando se analiza el efecto de un embalse determinado en los gases con efecto invernadero, sería preciso considerar las tasas de emisión neta de CO_2 inherentes a su condición de sistema acuático heterotrófico, los cambios en la tasa de fijación que se producen con relación al sistema terrestre al que sustituye, y también habría que tener en cuenta todo el carbono detrítico que es capaz de retener en su sedimento, procedente de su cuenca tributaria y que, en algún momento estuvo como CO_2 atmosférico. Por tanto, las grandes partidas que intervienen en el balance serían:

$$\text{CEI} = f(\text{En}, \Delta\text{Fec}, \text{CDTs})$$

donde:

- **CEI** es la contribución del embalse al efecto invernadero, en carbono.
- **En** es la emisión neta de la masa de agua (balance respiración – producción).
- **Fec** es la variación de la capacidad de fijación respecto al ecosistema terrestre sustituido (puede ser positiva o negativa).
- **CDTs** es la fracción detrítica total, orgánica y mineral, del carbono aportado por la cuenca que queda retenida en el sedimento del embalse.

Tabla 3. Datos sobre emisiones de CO₂ en lagos y embalses de varios países

Tipo de masa de agua	Tasa de emisión media de CO ₂	
	(mg CO ₂ m ⁻² día ⁻¹)	(g C m ⁻² año ⁻¹)
Embalses hidroeléctricos (Duchemin <i>et al.</i> , 1995)		
Canadá	500-1.000	49,8-99,5
Embalses y lagos (Canadá, Duchemin <i>et al.</i> , 1999)		
Manic reservoirs	1.170 (±470)	116,5
Manic Reference Lake	1.010 (±405)	100,5
Gouin Reservoir	1.165 (±685)	116,0
Gouin Reference Lake	1.700 (±950)	169,2
Embalses hidroeléctricos Amazonas (Brasil, Rosa <i>et al.</i> , 1997)		
Curúá-Una	134,3	13,4
Embalses del Brasil (Rosa <i>et al.</i> , 1999)		
Tucuruí Reservoir	8.475	843,6
Samuel Reservoir	6.719	668,8
Xingó Reservoir	6.048	602,1
Miranda Reservoir	4.388	436,8
Segredo Reservoir	3.891	387,3
Serra da Mesa Reservoir	2.695	268,3
Três Marias Reservoir	2.654	264,2
Itaipú Reservoir	1.138	113,3
Embalses y lagos (sudeste de Estados Unidos, Therrien <i>et al.</i> , 2005)		
Embalses (n=259)	664 (±1.091)	66,13 (±108,7)
Lagos (n=31)	874 (±2.214)	87 (±220,5)
Embalses y lagos (Canadá, Tremblay <i>et al.</i> , 2005)		
Embalses (n=56)	1.508 (±1.471)	150,2 (±108,7)
Lagos (n=43)	1.013 (±1.095)	100,9 (±220,5)



Embalse de Baserca. Río Noguera Ribagorzana (Lleida).

Tabla 4. Tasas de fijación media de CO₂ por diferentes tipos de comunidades vegetales terrestres, expresadas a nivel diario y como carbono a nivel anual.

Tipo de comunidad	Tasa de fijación media de CO ₂	
	(mg CO ₂ m ⁻² día ⁻¹)	(g C m ⁻² año ⁻¹)
Estepa árida	502	50
Campos de cultivo de secano	804-1.205	80-120
Campos de cultivo de regadío	1.004-1.406	100-140
Matorral Mediterráneo	804-1.004	80-100
Matorral húmedo	1.506	150
Bosque mediterráneo	1.406	140
Bosque húmedo	2.511	250

Los gases con efecto invernadero según el tipo de embalse

No todos los embalses se comportan de la misma manera en lo que al balance de gases con efecto invernadero se refiere. Influyen factores como el clima, la localización en la cuenca, las características hidromorfológicas y el estado trófico. Además es también importante tener en cuenta su gestión hidráulica.

De acuerdo con el clima, los embalses situados en las zonas boreal y semiárida, funcionan de manera similar (figuras 10 y 11). Desprenden cantidades más o menos elevadas de CO₂ y CH₄ durante la década que sigue a la primera inundación y, posteriormente, las tasas de emisión de estos gases son ya muy bajas. Domina siempre el CO₂ sobre el CH₄. Los embalses tropicales poseen mayor aporte de materia orgánica particulada procedente del exterior lo que incrementa el poder reductor de los sedimentos y favorece la emisión de CH₄ frente a la de CO₂. Además en estos embalses, las emisiones netas de gases con efecto invernadero son mayores que en los precedentes, y la fase heterotrófica que sigue al llenado supera los 10 años e incluso puede mantenerse a perpetuidad como consecuencia de la alta carga de materia orgánica por unidad de superficie que queda cubierta por el agua (figuras 12 y 13).

En cualquier caso, todo el carbono implicado en los mencionados balances pertenece al ciclo actual del carbono, de forma que desde el punto de vista ambiental no tiene el mismo significado que el carbono procedente de combustibles fósiles. Es esta una apreciación relevante que no conviene perder de vista.



Embalse de Chocón. Rio Limay (Neuquén, Argentina).

Alimenta a la mayor central hidroeléctrica de Argentina. Tiene 20.200 Hm³ de capacidad y 816 km² de superficie.

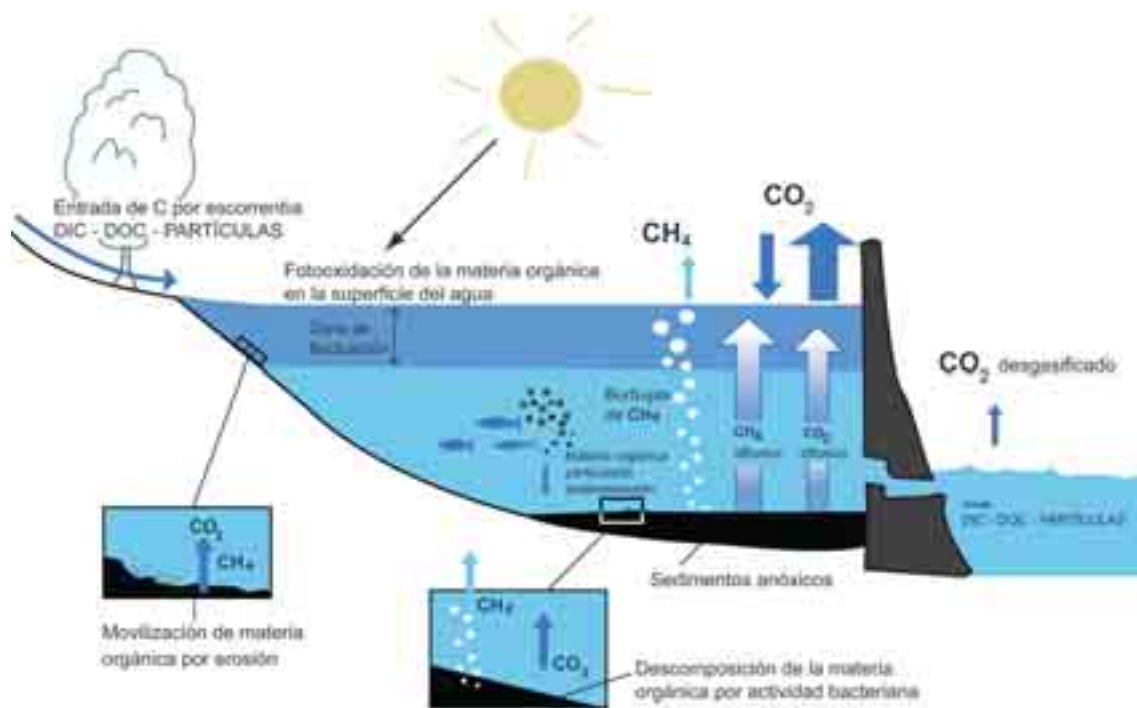


Figura 10. Procesos más importantes relacionados con el ciclo del carbono en embalses boreales poco después de su llenado.

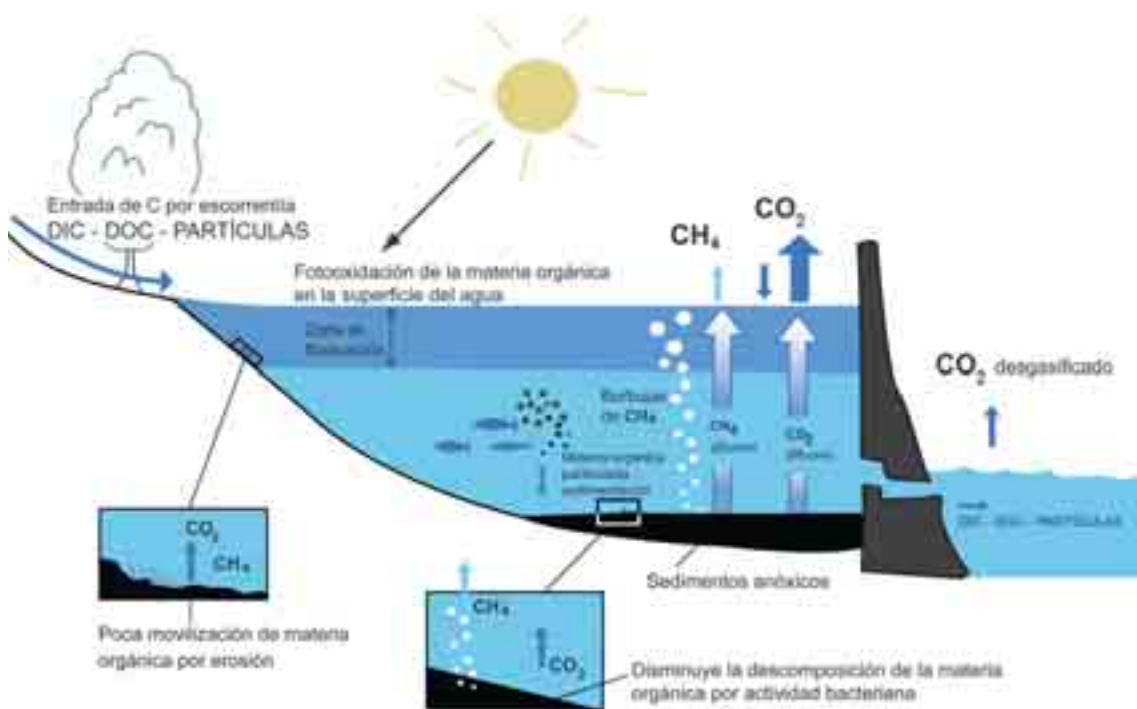


Figura 11. Procesos más importantes relacionados con el ciclo del carbono en embalses boreales después de varios años de funcionamiento.

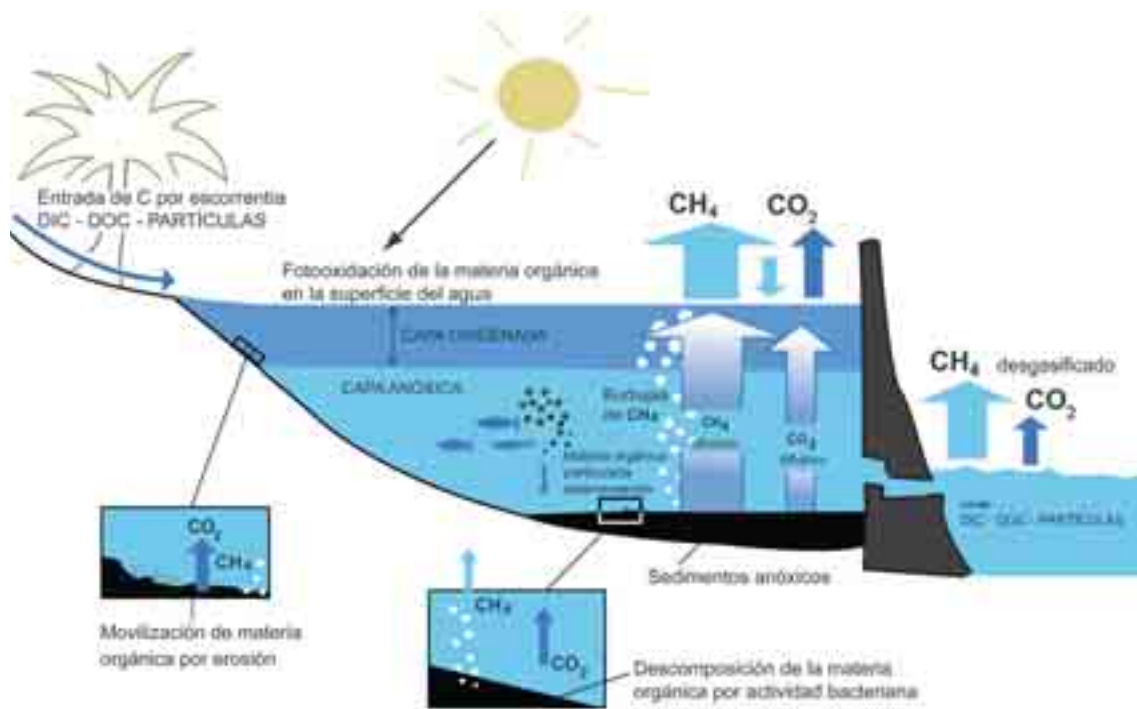


Figura 12. Procesos más importantes relacionados con el ciclo del carbono en embalses tropicales poco después de su llenado.

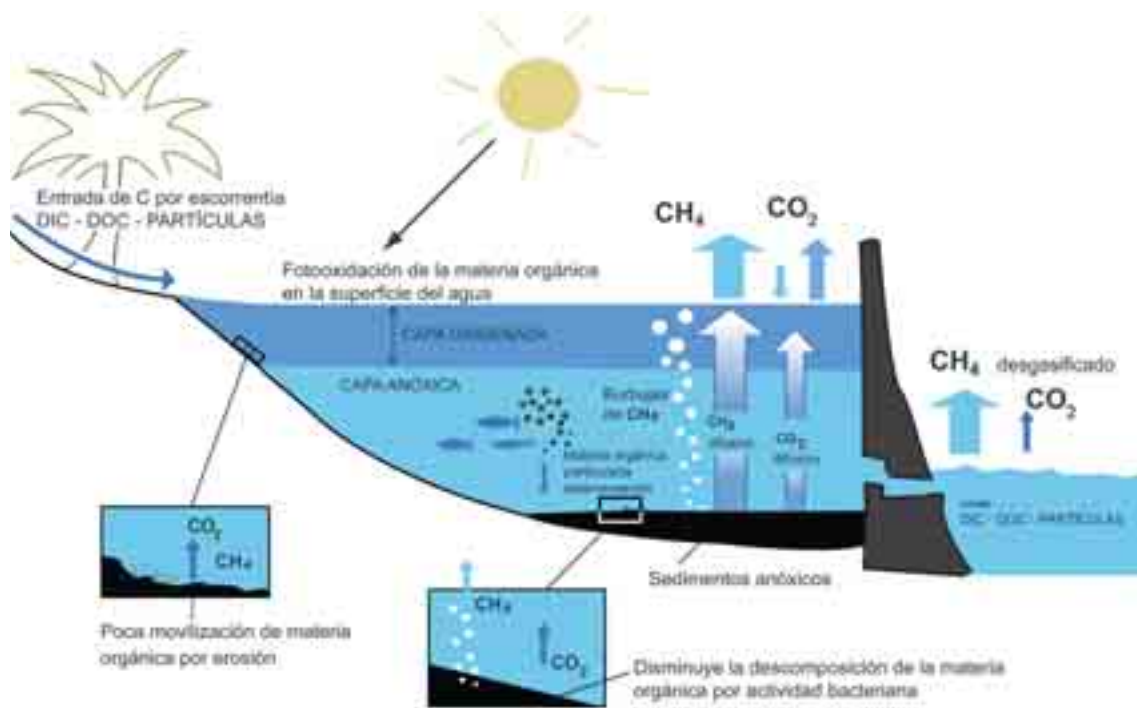


Figura 13. Procesos más importantes relacionados con el ciclo del carbono en embalses tropicales después de varios años de funcionamiento.

La localización del embalse en la cuenca determina la carga de material orgánico alóctono que le puede llegar. Los embalses situados en las cabeceras de los ríos poseen además cuencas vertientes de poca extensión y teóricamente tendrían menos carbono que oxidar; sin embargo en zonas muy forestadas la aportación de biomasa al embalse puede ser importante y dar lugar a turbas con mayor capacidad relativa de emisión de CH₄ respecto al CO₂, es decir con mayor potencial relativo de efecto invernadero. A medida que los embalses ocupan tramos más bajos aumenta la probabilidad de aportes externos de materia orgánica disuelta y particulada, no sólo procedente de las comunidades naturales sino también de actividades culturales, lo que incrementaría su metabolismo heterotrófico y su potencial de emisión de gases con efecto invernadero.

El régimen hidrológico, combinado con el volumen del embalse, determinan la tasa de renovación de agua. A medida que ésta disminuye se favorece el crecimiento del fitoplancton y, consecuentemente, el régimen autotrófico, lo que implicaría una tendencia a la fijación del CO₂ por la masa de agua embalsada. Y, según la morfometría, se pueden definir dos escenarios extremos. Uno lo conformarían los embalses encajados, con taludes de gran pendiente, y por lo tanto con poca superficie relativa sometida a fluctuaciones, y otro los embalses de taludes tendidos en los que pequeñas bajadas de cota dejan al descubierto extensas superficies. En el primer caso, el oleaje que bate el litoral va transportando el material orgánico

sedimentado hacia la columna de agua y después al fondo, el cual constituye una trampa de carbono cuando predominan condiciones reductoras. En el segundo caso, el material orgánico de las zonas poco profundas va siendo reciclado *in situ*, con la consiguiente emisión de gases con efecto invernadero. Esta última morfología de vaso de embalse conlleva, no obstante, una mayor vocación de eutrofia.

El estado trófico equivale a la capacidad biogénica del ecosistema acuático y viene regulado por la carga de nutrimento, particularmente de fósforo, que la masa de agua recibe y que se considera el factor limitante de la producción biológica. Los limnólogos sitúan los lagos y los embalses a lo largo de una escala que va de la oligotrofia a la eutrofia, es decir, de aguas poco productivas a muy productivas. En el seno de las primeras hay poca vida, lo que se traduce en pocos cambios biogeoquímicos. Las eutróficas, es decir, las bien alimentadas, pueden llegar a ser extremadamente reactivas y registrar un gran dinamismo en sus características fisicoquímicas, particularmente en las relacionadas con aquellos parámetros implicados en los fenómenos biológicos. En los lagos, la comunidad biológica se encuentra más o menos diversificada y, en su grado máximo de complejidad posee elementos como vegetación acuática litoral y sumergida, zoobentos, peces, zooplancton y fitoplancton, de forma que el grado trófico se manifestará en el mayor desarrollo de aquellos elementos más favorecidos por las características de la



Acumulación de arrastres diversos en la presa de Sabiñanigo (Río Gallego, Huesca).



Embalse de Negatín Río Guadiana Menor (Granada).

masa de agua. En general, en lagos no muy profundos, la eutrofia se manifiesta en un mayor desarrollo de los macrófitos sumergidos. En los embalses, por su permanente estado de inmadurez, la materia y la energía fluyen básicamente por el plancton, preferentemente por el fitoplancton, y por las bacterias heterótrofas que se encuentran tanto en el plancton como en el bentos.

Los embalses eutróficos poseen una gran turbidez debida a las algas en suspensión, aguas verdes, y tendencia a la segregación vertical de parámetros: mucho oxígeno, pH alto y poco fósforo en

superficie, y poco oxígeno, pH bajo y más fósforo en las aguas profundas. Tanto los lagos como los embalses, cuanto más elevado sea su estado trófico, mayor cantidad de 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 CH_4 , aunque esta última ruta sólo



Embalse de Cárdena. Río Cárdena (Zamora).

se produce de forma eficiente cuando no hay 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 Ca CO_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 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 CO_2 y/o CH_4 , y el balance neto relacionado con la producción-respiración-descomposición tendería a ser nulo.

La gestión hidráulica también influye en la tasa de renovación del agua del embalse, en las fluctuaciones de cota y en la selección de la profundidad de procedencia de las aguas salientes. Cuanto menor sea el tiempo que el agua pasa retenida en el embalse, menor será la actividad autotrófica y aumentará la tendencia a la emisión de CO_2 ; por otro lado, también será menor la posibilidad de retención de carbono por sedimentación de materia orgánica e inorgánica. Las fluctuaciones de cota suponen cambios de profundidad; cuando ésta disminuye, zonas anóxicas reciben más fácilmente oxígeno disuelto y pueden establecerse condiciones oxidantes e, incluso, algunas áreas inundadas pueden desecarse, con la consiguiente oxidación hasta CO_2 del carbono orgánico acumulado. Por último, las sueltas de agua en los embalses suelen llevarse a cabo desde niveles profundos, donde las aguas son más ricas en carbono orgánico disuelto y particulado de origen detrítico, que al pasar



Embalse de Mediano. Río Cinca (Huesca). Depositos de sedimentos a la vista, con el embalse casi vacío.

a condiciones más oxidantes río abajo liberan CO_2 a la atmósfera. También pueden salir CO_2 , CH_4 y N_2O de estas aguas profundas por desgasificación, como ya se ha comentado anteriormente.

Finalmente los embalses, a diferencia de los lagos, situados éstos en cuencas hidrogeomorfológicamente en equilibrio, nacen condenados a irse rellenando de sedimentos. Los arrastres que llegan con el río tributario van depositándose en el fondo del vaso y enterrando la materia orgánica sedimentada (y por lo tanto el carbono), tanto de origen alóctono como sintetizada en el propio embalse, que raramente volverá a movilizarse, con un resultado neto de retención. De este modo, la tasa de aterramiento es un último e importante factor a tener en cuenta en el balance de carbono de las masas de agua embalsada.



Embalse de Linsoles. Río Ésera (Huesca).

**CASO DE ESTUDIO:
EL EMBALSE DE SUSQUEDA
(RÍO TER, GIRONA)**

IV

1. INTRODUCCIÓN

Aunque el papel de los embalses en los gases con efecto invernadero tiene poca importancia en España, ya que su superficie de lámina de agua constituye tan sólo un 0,61 % de la totalidad del área continental del país, lo cierto es que España es el país europeo con más cantidad y diversidad de embalses, lo que justifica el interés del ejercicio que se llevó a cabo en el embalse de Susqueda para conocer su balance de carbono y que, posteriormente, ha motivado la preparación de la presente publicación.

Entre los años 2002 y 2003 ENDESA llevó a cabo un estudio del balance de carbono en el embalse de Susqueda a lo largo de un ciclo anual. Este embalse se encuentra en el tramo medio del río Ter, entre los embalses de Sau y el Pasteral, en la provincia de Girona (figura 14).

El embalse de Susqueda es de tamaño medio, eutrófico y de aguas medianamente mineralizadas. En la tabla 5 se resumen las principales características del embalse durante el periodo del estudio.

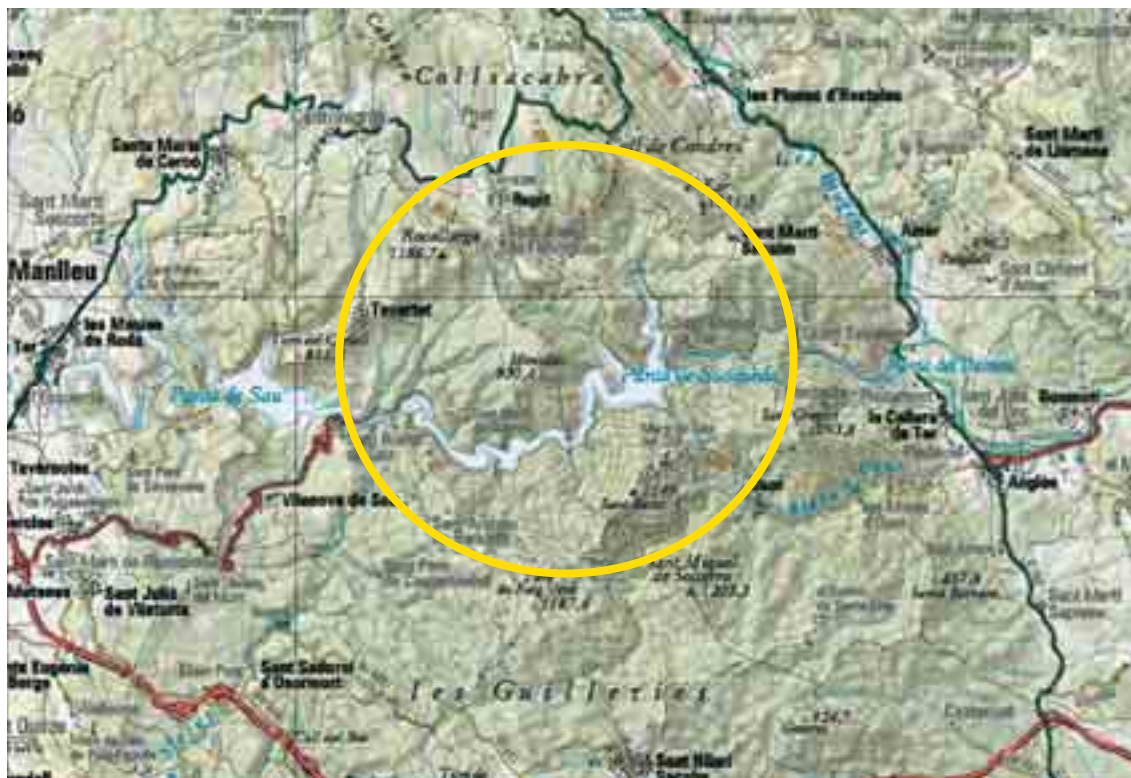


Figura 14. Mapa de localización general del sistema de embalses de Sau, Susqueda y Pasteral (río Ter, Girona).



Embalse de Susqueda.
Vista de la presa con las torres de toma.

2. PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

Las emisiones de gases procedentes de sistemas acuáticos pueden estimarse por varios métodos. Científicos canadienses llevan midiendo emisiones de gases con efecto invernadero en sistemas acuáticos desde 1993 mediante cámaras flotantes

que se disponen en la superficie del agua y recogen los gases. Éstos se miden *in situ* o en laboratorio por cromatografía de infrarrojos. Naturalmente, estos métodos requieren la realización de un gran número de medidas, tanto en el espacio como en el tiempo, para obtener resultados representativos.

Tabla 5. Características hidromorfológicas y físico-químicas del embalse de Susqueda, a lo largo del intervalo de 309 días en el que se llevó a cabo el estudio.

Características hidromorfológicas	Abril 2002	Marzo 2003
Volumen de embalse a cota máxima (hm ³)	233	
Volumen embalsado (hm ³)	86,46	215,12
Nivel de embalse (ms.n.m)	316,64	348,20
Cota máxima de explotación (ms.n.m)	351	
Profundidad máxima (m)	56	>95
Entradas durante el periodo de estudio en hm ³	376,46	
Salidas durante el periodo de estudio en hm ³	305,73	
Características físico-químicas		
Características térmicas	Estratificación estival. Masa de agua fría profunda durante todo el año	
Transparencia del agua (disco de Secchi) en m	0,6-6,47	
Conductividad eléctrica (µS/cm)	373-756	
pH (und)	7-9	
Alcalinidad (meq/L)	1,76-2,93	
Oxígeno disuelto	Hipoxia o anoxia permanentes en aguas profundas	

En el proyecto realizado por ENDESA se optó por utilizar un modelo de "caja negra", midiendo o estimando los flujos de carbono en las entradas y en las salidas del embalse. Se trabaja con el supuesto de que la cantidad entrante equivale a la saliente, que incluye la cantidad de carbono almacenado en el sedimento, más la almacenada en la masa de agua del mismo embalse por aumento de volumen durante del período de estudio.

Las **entradas** son:

- **CT_{en}** = carbono total del agua de entrada al embalse procedente del embalse de Sau (medido).
- **CT_{ed}** = carbono total de las entradas difusas de la cuenca directa al embalse (estimado).

Las **salidas** son:

- **CT_{sal}** = carbono total del agua de salida del embalse hacia el río Ter (medido).
- **CT_{sed}** = carbono acumulado en el sedimento del embalse (esti-

mado a partir de las medidas obtenidas en la capa superficial del sedimento).

El **intercambio** de CO₂ agua-aire:

- **CO₂** = intercambio neto de CO₂ entre el agua y el aire (calculado a partir de la diferencia de concentración de CO₂ en el agua y en la atmósfera).

La cantidad **almacenada** es:

- **CT_{alm}** = carbono total almacenado en el agua del embalse (calculado a partir de la diferencia entre volumen final e inicial del embalse para el periodo de estudio, multiplicado por la concentración de carbono de salida).

El **balance** se puede expresar como:

$$CT_{en} + CT_{ed} = CT_{sal} + CT_{sed} + \Delta CT_{alm} + \Delta CO_2$$

Las formas de carbono que se han medido o estimado son:

- En el agua de entrada y salida del embalse:
 - Carbono inorgánico disuelto (DIC) a partir de alcalinidad y pH.
 - Carbono orgánico: disuelto (DOC) y particulado (POC).
- En las trampas de sedimento: Carbono particulado orgánico (POC) y particulado inorgánico (PIC).
- En la interfase agua-aire: intercambio de CO₂.
- En el sedimento: Carbono particulado orgánico e inorgánico particulado (POC y PIC).

El carbono inorgánico disuelto (DIC), corresponde en realidad en este estudio a carbono inorgánico total, ya que los análisis de la alcalinidad por acidimetría se efectuaron sin filtrar las muestras. De esta forma, se asume que la alcalinidad resultante corresponde a la suma de DIC más PIC (carbonatos).

En el esquema adjunto (figura 15) se muestra el modelo de "caja negra" que se ha utilizado para determinar el balance de carbono en el embalse de Susqueda, junto con las hipótesis de partida que son las siguientes:

- (1) $(CT_{en} + CT_{ed}) > (CT_{sal} + CT_{alm})$ y $CT_{sed} \uparrow \Rightarrow$ heterotrofia con incorporación de Carbono.
- (2) $(CT_{en} + CT_{ed}) > (CT_{sal} + CT_{alm})$ y $CT_{sed} \downarrow \Rightarrow$ heterotrofia y emisión de CO₂.
- (3) $(CT_{en} + CT_{ed}) \leq (CT_{sal} + CT_{alm})$ y $CT_{sed} \uparrow \Rightarrow$ autotrofia con fijación de CO₂.
- (4) $(CT_{en} + CT_{ed}) \leq (CT_{sal} + CT_{alm})$ y $CT_{sed} \downarrow \Rightarrow$ autotrofia y exportación de Carbono, u oligotrófico.
- (5) $(CT_{en} + CT_{ed}) = (CT_{sal} + CT_{alm})$ y sin cambios en $CT_{sed} \Rightarrow$ Sistema inerte o autotrofia con la fijación de CO₂ ajustada a la oxidación del $CT_{en} + CT_{ed}$; en cualquier caso sin emisión neta de CO₂.

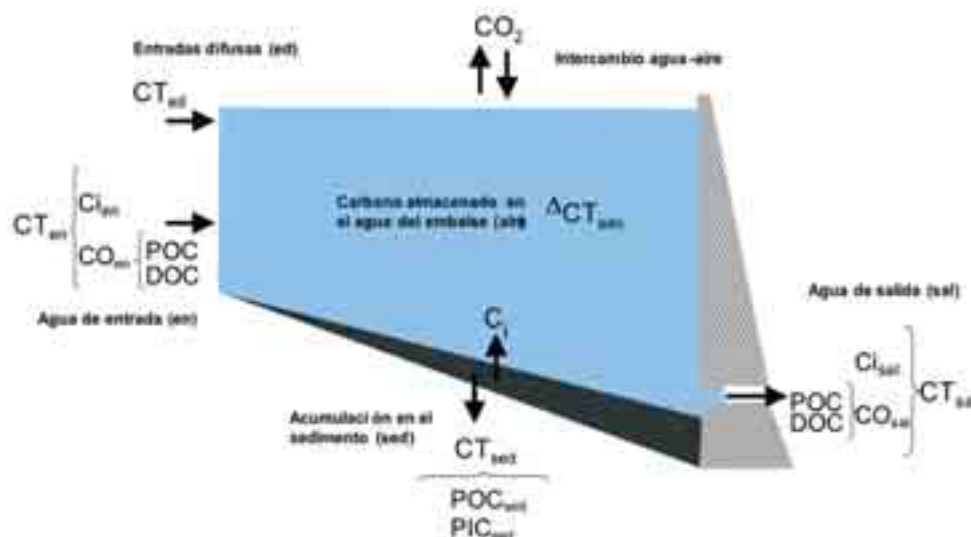


Figura 15. Esquema ilustrativo del modelo de caja negra para determinar el balance de carbono en el embalse de Susqueda. (CT: carbono total; CO: carbono orgánico; CI: carbono inorgánico; POC: carbono orgánico particulado; DOC: carbono orgánico disuelto; PIC: carbono inorgánico particulado).

3. MÉTODOS DE CAMPO

Campañas y estaciones de muestreo

A lo largo de un ciclo anual se llevaron a cabo seis muestreos limnológicos: abril, julio, septiembre y noviembre del 2002, y enero y marzo del 2003.

Se establecieron cuatro puntos de muestreo (figura 16): entrada al embalse desde la presa de Sau, salida del embalse hacia el Pastoral, zona fluvial del embalse (cola) y zona lacustre del embalse (presa).

No se analizó carbono en el agua de entrada al embalse a través de los tributarios puesto que su aportación se ha podido obtener con suficiente fiabilidad a partir de datos ya disponibles. Estos tributarios constituyen una aportación inferior a la del Ter a través de Sau. La superficie total de la cuenca de Susqueda es de 1.850 km² mientras que la subcuenca tiene sólo 286 km², lo que representa

un 18% de toda la cuenca. La subcuenca de Susqueda se caracteriza por sus bosques densos con una baja presión antrópica. Según la tipificación de la Agència Catalana de l'Aigua (2002) los arroyos que vierten por la margen izquierda pertenecen al ecotipo "Montaña Mediterránea Calcárea" (conductividades de alrededor de 500 $\mu S/cm$) mientras que los que vierten por la margen derecha pertenecen al ecotipo "Montaña Mediterránea Silíceo" (conductividades de alrededor de 100 $\mu S/cm$). Ambos ecotipos se caracterizan por una baja aportación hídrica anual (<40 hm³).

Medidas y observaciones

- En el embalse (zonas de cola y presa):
 - Perfiles verticales (medidas metro a metro) de temperatura, conductividad eléctrica, pH, potencial redox, turbidez y oxígeno disuelto.
 - Medidas de profundidad de visión del Disco de Secchi.



Figura 16. Localización orientativa de los puntos de muestreo.

- Toma de muestras de agua para análisis de alcalinidad a distintos niveles: superficie, profundidad de visión del Disco de Secchi (DS), 2, 7DS, termoclina, hipolimnion y fondo.
- Toma de muestra de agua de las trampas de sedimentación para análisis del material sedimentado (carbono orgánico e inorgánico particulado y sólidos no disueltos) durante el período de tiempo transcurrido entre dos campañas consecutivas.
- Extracción de muestras de sedimento mediante un equipo tomamuestras "Phleger Corer", con tubo de 3 cm de diámetro y 60 cm de largo, en la estación de presa para su posterior datación y determinación del contenido en carbono orgánico e inorgánico. En una campaña inicial se tomaron muestras de sedimento en cola y presa con un draga tipo Ekman para una caracterización preliminar del sedimento (color, olor, textura, presencia de gases, etc.).
- En las entradas y salidas:
 - Medidas "in situ" de temperatura, conductividad, pH, potencial redox, turbidez y oxígeno disuelto en el agua.
 - Toma de muestras de agua para análisis de alcalinidad y carbono orgánico.

Instalación de las trampas de sedimentación

Se instalaron dos trampas de sedimentación en cada punto de muestreo del embalse (presa y cola): una fija para calcular el material sedimentado a lo largo de todo el ciclo de estudio y otra de la que se recogía el material sedimentado entre dos campañas consecutivas (cada dos meses).

Las trampas consistían en un tubo de PVC opaco de 1 m de largo y 9 cm de diámetro, cerrado por el extremo inferior, anclado a unos 5 m del fondo y mantenido vertical por unos flotadores sumergidos, situados a unos 15 m por encima de la trampa, y atados a una boya superficial mediante una guía cuya longitud permitiese cubrir la carrera de oscilación de la cota de embalse.

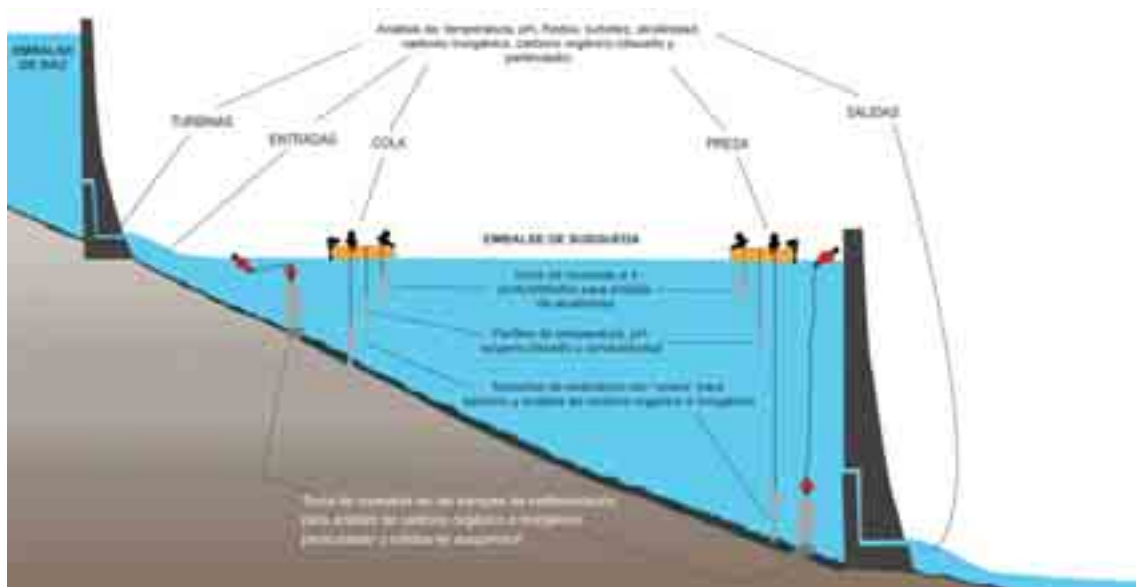


Figura 17. Trabajos de campo realizados en el embalse de Susqueda

4. MÉTODOS ANALÍTICOS

A continuación (tabla 6) se describen los métodos de ensayo a los que fueron sometidas las muestras.

En el core recogido en la parte más profunda del embalse se

estimaron los procesos de sedimentación por datación mediante técnicas radiométricas absolutas (^{210}Pb , ^{226}Ra y ^{137}Cs) y medida de la cantidad de carbono orgánico e inorgánico acumulado en toda la historia del embalse.

Tabla 6. Métodos de ensayo adaptados en los análisis de las muestras tomadas en el embalse de Susqueda.

Muestras	Parámetro	Método
Agua	Alcalinidad	Acidimetría. Procedimiento NAQUADAT 10101
	Carbono orgánico total	Oxidación catalítica. Detección con analizador IR. EPA 9060.
	Carbono orgánico disuelto	Oxidación catalítica. Detección con analizador IR, previa filtración en fibra de vidrio. EPA 9060.
Material sedimentado	Carbono total	Filtración en filtro GF/C. El residuo seco se oxida en presencia de oxígeno y un catalizador de óxido de cobalto. Cuantificación del CO_2 mediante analizador IR.
	Carbono orgánico particulado	Filtración en filtro GF/C El residuo se somete previamente a un tratamiento con HCl para eliminar el carbono orgánico. Analizador DHROMANN 190 equipado con módulo de sólidos MOD. 183.
Sedimento	Carbono orgánico total	Oxidación catalítica. Detección con analizador IR.
	Carbono inorgánico total	Ataque con ácido perclórico y valoración potenciométrica.

5. RESULTADOS

Carbono en el agua de entrada desde Sau (CT_{en}) y salida del embalse (CT_{sal})

Todas las formas de carbono que se midieron tanto a la entrada del embalse como a la salida mostraron pocas variaciones a lo largo del ciclo de estudio. Por su parte, el patrón temporal del POC es muy similar al que se describe en relación con las

trampas de sedimentación (tabla 7).

Sumando las medias anuales ponderadas (por el tiempo transcurrido entre campañas) de todas las formas de carbono en el agua de entrada y en el agua de salida, se obtiene que durante el ciclo de estudio, la concentración media de carbono del agua procedente de Sau (agua de entrada: 39,04 mg/L) fue superior a la de salida hacia el Pasteral (agua de salida: 36,36 mg/L).

Tabla 7. Concentración de carbono inorgánico disuelto (DIC), orgánico (DOC) y orgánico particulado (POC) en las aguas de entrada y salida del embalse de Susqueda.

Carbono (g C m^{-3})		29 abr	22 jul	10 sep	14 nov	14 gen	4 mar	Media anual ponderada
Entrada	DIC	34,94	32,90	33,41	36,20	36,13	37,14	35,08
	DOC	3,59	3,67	3,40	2,93	3,42	4,28	3,48
	POC	0,85	0,30	0,16	0,39	0,73	0,66	0,47
Salida	DIC	34,68	31,45	30,89	29,95	31,61	33,74	31,90
	DOC	3,18	4,07	4,90	3,44	3,33	3,56	3,83
	POC	0,72	1,06	0,43	0,18	0,77	0,70	0,64

Carbono procedente de la subcuenca del embalse (CTed)

Durante el período de estudio se produjo un incremento del volumen de agua embalsada de 128,67 hm³, de los cuales 70,73 procedían de Sau y 57,94 de la subcuenca de Susqueda. La carga de carbono de la subcuenca se ha estimado a partir de datos existentes en la riera Major (Butturini, 1997; Martí i Sabaté, 1996), cuya aportación de agua supone aproximadamente el 50% del total anual, y asumiendo que sus concentraciones de carbono son similares a las del resto de los tributarios. Como según los trabajos citados, la concentración media en esta riera es de 18,1 mgC/L, la carga total se estima en 1.048,7 t.

Carbono incorporado en el agua (CTalm)

Se calculó el carbono incorporado en el agua del embalse mediante el producto de la diferencia entre el volumen final y el inicial (128,67 hm³) y la concentración media de salida (36,36 mg/L). La cantidad de carbono resultante se estimó en 4.678 t.

Carbono acumulado en las trampas de sedimentación

La sedimentación anual de carbono orgánico (POC) e inorgánico (PIC) se calculó a partir del material sedimentado en las trampas que se mantuvieron durante los 309 días de duración del estudio (figura 18).

En la zona de cola del embalse, la tasa de sedimentación anual de carbono fue cuatro veces mayor que en la zona de la presa;

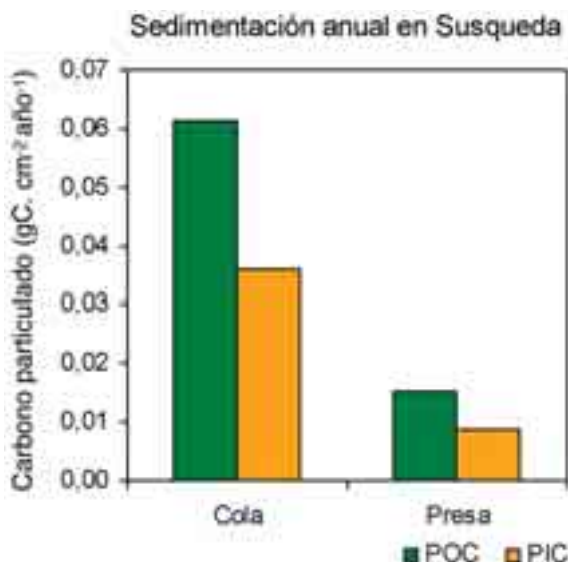


Figura 18. Carbono particulado orgánico (POC) e inorgánico (PIC) sedimentado en las trampas, a lo largo de todo el período de estudio.

además, en ambas zonas la tasa de sedimentación de POC fue mayor que la de PIC.

A partir de los datos de las trampas cuyo contenido se retiraba cada dos meses, se determinó la evolución de la tasa de sedimentación de carbono, que en la zona de cola siguió el patrón del caudal de entrada del agua procedente de Sau, y en la de la presa, el patrón de estratificación térmica del embalse.

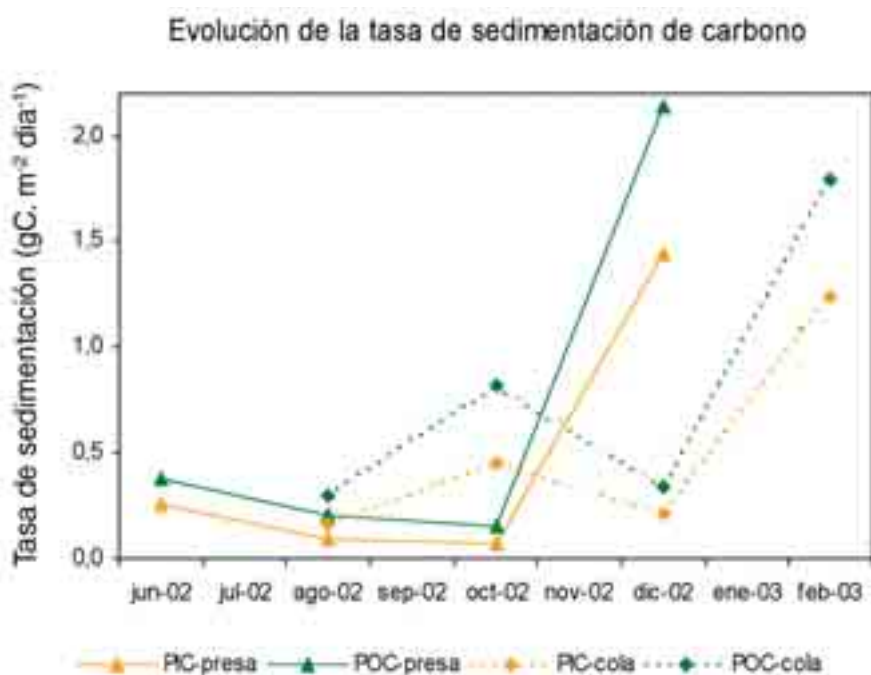


Figura 19. Evolución de la tasa diaria de sedimentación de carbono orgánico (POC) e inorgánico (PIC) en las trampas de sedimentación instaladas en las zonas de cola y presa del embalse de Susqueda, que se retiraban bimensualmente.

En la figura 19 y en la tabla 8 se observa que durante los meses de estratificación térmica, la sedimentación se mantuvo en valores bajos. Cuando se inicia la mezcla del embalse, la tasa de sedimentación aumenta en la zona de cola, que pierde antes la estabilidad vertical, y se dispara después en la presa. En febrero volvió a aumentar significativamente la tasa de sedimentación en la zona de cola.

Esta evolución, que parece contradictoria al asociar las mayores tasas de sedimentación a los momentos de mezcla vertical de la columna de agua y viceversa, pone de relieve la importancia del comportamiento hidrodinámico de la masa de agua embalsada

en cada momento. Así, en la zona de la presa, la mayor tasa de sedimentación se dio en diciembre, con bajos caudales entrantes y salientes tanto antes como durante los muestreos (tabla 8); es decir, en condiciones de menor estabilidad térmica (mezcla vertical de la columna de agua), pero mayor estabilidad hidrodinámica (menor flujo de agua atravesando el embalse). En la zona de cola, bajo unas condiciones hidrodinámicas mucho más complejas por la influencia de las aguas entrantes, la tasa de sedimentación debe guardar aún más relación con los pulsos de caudales entrantes. De este modo, los mayores caudales entrantes a partir de enero, bien pudieron determinar cargas mayores de sedimentos en las trampas instaladas en la zona de cola.

Tabla 8. Tasa diaria de deposición de carbono orgánico (POC) e inorgánico (PIC) en las trampas de sedimentación instaladas en las zonas de cola y presa del embalse de Susqueda.

Carbono (g C m ⁻² día ⁻¹)	inicio	29 abr	22 jul	10 sep	14 nov	14 gen
	final	22 jul	10 sep	14 nov	14 gen	4 mar
Presa	POC	0,38	0,21	0,15	2,14	-
	PIC	0,26	0,09	0,07	1,45	-
Cola	POC	-	0,29	0,81	0,34	1,79
	PIC	-	0,17	0,46	0,21	1,24

Caudal entrada (m ³ /s)	20,16	12,15	11,89	6,73	17,73
Vol. entrada (hm ³)	148,09	52,50	66,81	35,52	73,55
Vol. salida (hm ³)	67,55	49,36	74,10	47,41	67,31

Cabe indicar que en el embalse de Susqueda, por la morfología encajada de su cubeta y unas aguas entrantes habitualmente frías por su procedencia del fondo del embalse de Sau, es bastante frecuente la formación de corrientes de turbidez, como de hecho pudo medirse en febrero, con la detección en la zona de cola, de una masa de agua turbia (15 NTU) que circulaba en profundidad, generada a partir de

un aumento de los caudales turbinados desde el embalse de Sau. El carbono total que sedimenta en un año (tabla 9), calculado a partir de los datos de las trampas colocadas en la zona de presa, se comparará posteriormente con los datos de acumulación de carbono en el sedimento del fondo del embalse, recogido con el muestreador "core".

Tabla 9. Carbono orgánico e inorgánico sedimentado en un año en la zona de presa del embalse de Susqueda, obtenido de los datos de las trampas de sedimentación.

Carbono que sedimenta en la zona de la presa	Carbono	
	orgánico	inorgánico
Tasa de sedimentación del carbono (trampas bimensuales) (g C cm ⁻² año ⁻¹)	0,0211	0,0138
Tasa de sedimentación del carbono (trampa anual) (g C cm ⁻² año ⁻¹)	0,0151	0,0874

Carbono incorporado en el sedimento (Ctsed)

Se ha tomado como estima del carbono incorporado en el sedimento a lo largo de un intervalo de la vida del embalse de Susqueda, el contenido en la columna obtenida con un "core" en la zona de la presa. En la tabla 10 se exponen los resultados de la datación

del mencionado "core", junto con el contenido en carbono de las distintas secciones (cortes) en que se subdividió la muestra vertical (columna) de sedimentos. Se indica la correspondencia entre la profundidad del sedimento y el año de deposición, además de la tasa de sedimentación calculada para cada sección.

Tabla 10. Edad del sedimento a diferentes profundidades en el embalse de Susqueda, obtenida mediante datación radiométrica absoluta, junto con la tasa de sedimentación, el contenido de carbono y la tasa de acumulación de carbono en los sedimentos correspondientes a cada intervalo temporal.

Prof (cm)	Año	Tasa de sedimentación		Contenido de carbono		Tasa de acumulación de carbono	
		(cm año ⁻¹)	(g C cm ⁻² año ⁻¹)	orgánico (% C sms)	inorgánico	orgánico (g C cm ⁻² año ⁻¹)	inorgánico
1,3	2002	1,17	0,29	7,20	1,85	0,0209	0,0054
3,5	2000	1,06	0,27	6,90	1,61	0,0186	0,0043
5,5	1998	1,00	0,28	6,80	1,55	0,0190	0,0043
7,5	1996	1,00	0,26	7,00	1,80	0,0182	0,0047
9,5	1994	0,80	0,19	6,91	1,43	0,0131	0,0027
11,5	1991	0,57	0,23	6,60	1,55	0,0152	0,0036
13,5	1987	0,50	0,19	6,30	1,38	0,0120	0,0026

La tasa de sedimentación media de Susqueda se cifró en 0,84 cm/año, con un máximo de 1,17 cm/año en la capa más reciente (superficial) y de 0,50 cm/año en la capa más antigua (profunda). En el embalse de Sau, Armengol et al. (1984) calcularon, a través de un "core" de 46,5 cm, la tasa de sedimentación, correlacionando la concentración de fósforo apatito con la aportación mensual de agua que entraba en el embalse. Las tasas de sedimentación resultantes fueron de 1,5 cm/año en periodos secos y 3-4,5 cm/año en periodos lluviosos.

Los embalses ejercen de decantadores de sedimentos, por consiguiente, era de esperar que la tasa de sedimentación del embalse de Susqueda fuera inferior a la de Sau, al estar situado este último aguas arriba.

Como las secciones del sedimento más recientes tienen un mayor contenido de carbono orgánico e inorgánico, se consideró la tasa de acumulación de carbono de la capa más superficial del sedimento,

la cual incluye los dos últimos años. Además, con los datos de las trampas anuales se introdujo una corrección en la extrapolación del resultado del core a todo el embalse, considerando que la zona de cola tiene una tasa de sedimentación cuatro veces superior a la de la presa, según los resultados obtenidos.

Para conocer el volumen total de la capa de sedimento se efectuó el producto entre las tasas de sedimentación y la superficie del fondo de embalse potencialmente ocupado por sedimentos, es decir, aquella cuya pendiente es inferior al 14% (Hakanson, 1981). Mediante el análisis de cartografía de detalle de las zonas de presa (1:10.000) y cola (1:50.000) anterior a la inundación del embalse, se obtuvo una superficie de sedimentos de 113,66 ha. Las tasas de acumulación en la cola (estimadas) y en la presa (del "core") se han asignado respectivamente al 50% de la superficie total del sedimento de acuerdo con la organización hidrodinámica aparente del embalse (tabla 11).

Tabla 11. Tasas de acumulación de carbono particulado orgánico (POC), inorgánico (PIC) y total en el embalse de Susqueda.

	Presa (core)	Cola (estimado)	Embalse
Tasa de sedimentación de POC (g C cm ⁻² año ⁻¹)	0,0209	0,0847	
Tasa de sedimentación de PIC (g C cm ⁻² año ⁻¹)	0,0054	0,0220	
Carbono total (t C año⁻¹)	149,2	606,4	755,6
Carbono total (t C en 309 días)	126,3	513,4	639,6

Si se comparan las tasas de acumulación obtenidas mediante el "core" con las obtenidas a partir de las trampas de sedimentación en la zona de la presa, se observa que éstas últimas son ligeramente inferiores en lo que respecta al carbono orgánico y superiores en lo que respecta al carbono inorgánico (tabla 12).

Los datos obtenidos a partir del "core" parecen los más adecuados para realizar el balance final de carbono, ya que éstos son una estima del carbono que realmente se ha acumulado en el sedimento.

En cambio, los datos procedentes de las trampas de sedimentación son una estima del carbono que potencialmente podría ir a parar al sedimento, pero que todavía puede estar sometido a diferentes procesos biológicos y fisico-químicos, además de eventuales situaciones de resuspensión o acumulación de material carbonatado a partir de procesos físicos, según la organización hidrodinámica de la masa de agua en cada momento.

Tabla 12. Comparación entre las tasas de incorporación de carbono al sedimento estimadas a través de las trampas de sedimentación y del core.

Incorporación de carbono en el sedimento de la presa	Carbono	
	orgánico	inorgánico
Tasa de acumulación en sedimento superf. ("core") (g C cm ⁻² año ⁻¹)	0,0209	0,0054
Tasa de sedimentación del carbono (trampa anual) (g C cm ⁻² año ⁻¹)	0,0151	0,0874

Intercambio de CO₂ entre agua y aire

El flujo difusivo de CO₂ desde del agua hacia la atmósfera, o viceversa, se calculó de acuerdo con la expresión siguiente:

$$\text{Flujo} = D_G \times \frac{(C \cdot \text{CO}_2)_a \cdot (C \cdot \text{CO}_2)_w}{Z}$$

donde:

- **D_G** es la difusividad molecular del CO₂ en el agua, corregida por la temperatura del agua (Broecker & Peng, 1982);
- **(C·CO₂)_a** es la concentración de carbono (peso-volumen) de CO₂ en el aire, calculada como función de la presión atmosférica a la altitud donde se encuentra el embalse, la temperatura del aire y la proporción de CO₂ en el aire;
- **(C·CO₂)_w** es la concentración de carbono (peso-volumen) de CO₂ en la capa correspondiente al epilimnion en verano (entre los 1,5 y 5 m superficiales) o en la capa más superficial en invierno (5-6 m superficiales). Se calculó a partir del carbono

inorgánico disuelto obtenido mediante los datos de alcalinidad, temperatura del agua y pH (Stumm & Morgan, 1996);

- **Z** es la capa de agua límite, que se estimó en función de la velocidad media del viento durante el muestreo, a partir de las expresiones de cálculo de Broecker & Peng (1982), y aplicando una relación polinomial entre ambas variables.

Los datos meteorológicos (temperatura del aire, presión atmosférica y velocidad del viento) para el cálculo del intercambio de CO₂ entre agua y aire, proceden de la estación meteorológica de la Universitat de Barcelona situada en el Club Náutico de Sau (coordenadas: N 41° 58' 32,15"; E 2° 23' 54,44").

La evolución del intercambio de CO₂ entre agua y aire muestra que en los meses más productivos hay más incorporación de CO₂ hacia el agua (valores generalmente negativos de abril a septiembre) mientras que en los menos productivos (valores positivos de noviembre a enero) se produce emisión de CO₂ hacia la atmósfera (tabla 13).

Tabla 13. Intercambio de CO₂ en diferentes épocas en el embalse de Susqueda.

Intercambio CO ₂		29 abr	22 jul	10 sep	14 nov	14 gen	4 mar
Cola	(mg C m ⁻² día ⁻¹)	-80,9	-78,3	-21,2	59,8	106,7	173,5
	(μmol C m ⁻² día ⁻¹)	-6.742	-6.527	-1.766	4.983	8.890	14.461
Presa	(mg C m ⁻² día ⁻¹)	-104,5	8,5	-26,5	81,2	512,5	222,0
	(μmol C m ⁻² día ⁻¹)	-8.711	711	-2.211	6.768	42.708	18.503
Superficie	(ha)	317	432	438	434	430	451
		Cola		Presa		Embalse	
Intercambio neto de CO ₂ (t C en 309 días)		11,0		74,9		85,9 (emisión)	

El mes más productivo de todo el período de estudio fue abril, con valores de incorporación de CO₂ de -104,5 mg C m⁻² día⁻¹ en la zona de la presa; mientras que en enero se calculó, en la misma zona, el flujo más elevado de CO₂ hacia la atmósfera (512,5 mg C m⁻² día⁻¹).

Los flujos de intercambio de CO₂ se extrapolaron a la superficie total del embalse en cada campaña de muestreo. Los valores obtenidos en las zonas de cola y presa se asignaron respectivamente al 50% de la superficie total de la lámina de agua; la suma de ambos a lo largo del período de estudio permitió obtener el intercambio neto de CO₂ (tabla 13).

6. BALANCE FINAL

Los resultados de los cálculos para el balance de carbono en el embalse de Susqueda durante el período de estudio se presentan en la tabla 14.

Si se suman las entradas y las salidas, tal como se relaciona a continuación para el balance final de carbono (tabla 15) se tiene que, con las aproximaciones realizadas, las entradas (15.632,1 t) y salidas (16.444,7 t) no son del todo equivalentes. Por una parte, los errores asociados a las medidas locales y estimaciones

Tabla 14. Datos para el cálculo del balance de carbono (en t) en el embalse de Susqueda en un período de 309 días.

PERÍODO	Inicio	Final
Período del estudio	Del 29 de abril del 2002	al 4 de marzo del 2003
Días transcurridos	309	
EMBALSE DE SUSQUEDA	Inicio	Final
Volumen (hm ³)	86,45	215,12
Incremento de volumen (hm ³)	128,67	
AGUA DEL TER	Entrada	Salida
Volumen de agua (hm ³)	376,46	305,73
Diferencia entre entradas y salida (hm ³)	70,3	
AGUA DE LOS TRIBUTARIOS	Entrada	
Entradas de la cuenca directa del embalse (hm ³)	57,94	
CARBONO EN EL AGUA DEL TER	Entrada	Salida
Carga de DIC en el agua (t)	13.068,0	9.684,9
Carga de DOC en el agua (t)	1.329,6	1.167,5
Carga de POC en el agua (t)	185,8	190,9
Cargas de C total en el agua (t)	14.583,4	11.043,2
Concentración de C total en el agua (mg/L)	39,04	36,36
CARBONO EN EL AGUA DE LOS TRIBUTARIOS	Entrada	
Cargas de C total en el agua (t)	1.048,7	
CARBONO ALMACENADO		Salida
C total incorporado en el agua del embalse (t)		4.678,0
INTERCAMBIO DE CO ₂ AGUA-AIRE		Salida
Emisión de CO ₂ (t C)		85,9
CARBONO EN EL SEDIMENTO		Salida
POC incorporado en el sedimento (t)		507,9
PIC incorporado en el sedimento (t)		131,7
C total incorporado en el sedimento (t)		639,6

Tabla 15. Balance de carbono en el embalse de Susqueda en el periodo de estudio (309 días).

		Entradas (t)	Salidas (t)	Acumulados (t)
CT_{en}	Entrada de Sau	14.583,4		
CT_{ed}	Entrada de los tributarios	1.048,7		
CT_{sal}	Salida hacia el Pasteral		11.043,2	
CT_{sed}	Incorporación en el sedimento			639,6
$C_{deCO_2 atm}$	Emisión hacia la atmósfera		85,9	
ΔCT_{agua}	Almacenado en el embalse			4.679,0
	Total	15.632,1	16.444,7	

parciales se pueden ver ampliados en las extrapolaciones finales, por ejemplo, al pasar de tasas diarias en un punto concreto a tasas anuales para todo el embalse.

En segundo lugar, la incorporación de carbono en el sedimento es poco importante (639,6 t), pero todavía lo es menos la emisión hacia la atmósfera (85,9 t), en comparación con las entradas y salidas de carbono por el agua. La emisión de CO_2 puede estar subestimada. El intercambio agua-aire está calculado a partir de medidas in situ durante las horas de luz, por consiguiente se subestiman los procesos de respiración durante las horas en las que no hay luz suficiente para la fotosíntesis.

7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Balance de carbono

Durante el periodo de estudio, la cantidad de carbono que Susqueda recibe de Sau (14.583 t) más las entradas por la cuenca directa al embalse (1.049 t) suman 15.632 t; mientras que la cantidad de

carbono almacenada en el agua (4.679 t) más la que se exporta hacia el Pasteral (11.043 t) equivalen 15.722 t.

El modelo de funcionamiento de Susqueda se ajusta a:

$$(CT_{en} + CT_{ed} = 15.632 \text{ t}) \leq (CT_{sal} + \Delta CT_{alm} = 15.722 \text{ t}) \text{ y } CT_{sed} = 640 \text{ t} \Rightarrow \text{embalse autotrófico con fijación de } CO_2$$

La mayor parte del carbono que entra en el embalse procedente de la cuenca es exportado aguas abajo. En el sedimento se acumulan unas 640 t, de las que la fracción orgánica (508 t) es notablemente mayor que la inorgánica (132 t). Se produce una emisión neta de carbono en forma de CO_2 hacia la atmósfera del orden de 86 t. Hay por lo tanto retención neta de carbono, pero el que se acumula en el sedimento y el que se emite hacia la atmósfera son comparativamente muy inferiores a la cantidad de carbono que entra al embalse con el caudal de aportación (15.632 t).

De todas las formas de carbono, el DIC es el que contribuye mayormente en la carga de entrada (13.068 t) y de salida (9.685 t) en el agua del Ter. El POC tiene menor contribución, con una carga de



Figura 20. Balance de carbono en el embalse de Susqueda durante el periodo de estudio 309 días. (CT: carbono total; CO: carbono orgánico; Cl: carbono inorgánico; POC: carbono orgánico particulado; DOC: carbono orgánico disuelto; PIC: carbono inorgánico particulado).

186 t en el agua de entrada y 191 t en el agua de salida. Cabe destacar que el carbono disuelto en el agua de entrada (DIC y DOC) es mayor que en la de salida, mientras que el carbono particulado (POC) es ligeramente inferior. Esto indicaría que el sistema está exportando material orgánico particulado, que podría provenir de la cuenca propia del embalse o incluso podría ser material fijado por el mismo embalse.

Emisión de CO₂ hacia la atmósfera

El carbono en forma de CO₂ emitido a la atmósfera (86 t en el periodo de duración del estudio) por el embalse de Susqueda, expresado como tasa, arroja las cifras de la tabla 16.

Tabla 16. Emisión de CO₂ a la atmósfera durante el periodo de estudio.

Tasa de emisión media de CO ₂	mg CO ₂ m ⁻² día ⁻¹	g C m ⁻² año ⁻¹
Presa de Susqueda	398	39,6
Zona de Cola de Susqueda	48	4,9

En la zona de cola la producción primaria es mayor que en la presa, por lo que el flujo neto de CO₂ hacia la atmósfera es menor. En cualquier caso, las tasas de emisión obtenidas en Susqueda son bajas en el contexto general de los embalses (tabla 3), lo que se atribuye a que también debe recibir una carga orgánica menor al poseer una cuenca relativamente poco extensa y otro embalse inmediatamente aguas arriba, el de Sau, donde se lleva a cabo una digestión previa del carbono detrítico procedente de toda la cuenca tributaria.

Fijación de carbono en los sedimentos

El carbono total retenido en los sedimentos es del orden de 640 t en 309 días, lo que supone 756 t por año; cantidad, que repartida en las 113,66 ha de fondo del embalse, representa 665 g/m².año. Esta cifra, convertida a materia orgánica seca procedente del seston (unos 1.663 g/m².año), es muy superior al rango normal de sedimentación en lagos (entre 60 y 200 g/m².año).

Contribución del embalse al efecto invernadero

A nivel de intercambio gaseoso, Susqueda contribuye al efecto invernadero con una modesta emisión de CO₂, y es preciso tener en cuenta que ésta, forma parte del ciclo actual del carbono, es decir de la respiración de los ecosistemas de su cuenca. Susqueda, sin embargo, retiene carbono en el sedimento, y la cantidad que fija (665 g/m².año) es muy superior a la que potencialmente podría retener el bosque y el matorral mediterráneo (entre 140 y 80 g/m².año; tabla 4), actualmente inundado, lo que significa que la construcción del embalse ha incrementado notablemente la capacidad del territorio que ocupa, como sumidero de carbono.

En términos globales, la contribución del embalse de Susqueda al efecto invernadero puede concretarse del siguiente modo (valores redondeados a la unidad):

- Emisión neta (En) de la masa de agua = +102 t/año
- Variación de la capacidad máxima de fijación respecto al ecosistema terrestre sustituido (Fec) = - 597 t/año
- Carbono aportado por la cuenca, retenido en el sedimento (CDTs) = -756 t/año.

De estas cifras se deduce que el Embalse de Susqueda:

- a) Emite algo de carbono en forma de CO₂ a la atmósfera.
- b) Retiene en su sedimento una parte del carbono que recibe de su cuenca (cuenca propia y embalse de Sau) y esta retención es unas 7,5 veces superior a lo que emite a la atmósfera.
- c) Fija más carbono (hasta casi 5 veces) que el que podría fijar el ecosistema terrestre mediterráneo original, anterior a la inundación del vaso de embalse.

Con los datos obtenidos, cabe concluir que el embalse de Susqueda actúa como un sumidero neto de carbono tanto en términos absolutos, como comparados con el ecosistema terrestre al que, por inundación, sustituyó.

**ALGUNAS
CUESTIONES FINALES CLAVE...**



Entre 1993 y 1999 se han realizado estudios comparados de las emisiones de gases con efecto invernadero, en embalses de climas boreales (Finlandia, Canadá) y de zonas tropicales húmedas (Guayana Francesa, Brasil). Con los resultados de estos estudios, y en su justa medida con los obtenidos en el caso del embalse de Susqueda, se puede dar respuesta a algunas cuestiones que habitualmente forman parte de los debates en torno al papel de los embalses en el cambio climático:

¿Es cierto que los embalses emiten más gases con efecto invernadero que los ecosistemas naturales a los que reemplazan?

En climas boreales, los bosques tienen un papel limitado como sumideros de carbono, si se tienen en cuenta los incendios forestales y el lixiviado de carbono desde suelos y cubierta forestal hacia los cursos y masas de agua, donde el carbono es degradado y emitido hacia la atmósfera. Además, los suelos boreales fijan poco carbono.

En climas tropicales húmedos, los bosques pueden ser sumideros aún más limitados que los boreales, dado que el carbono es rápidamente reciclado y reutilizado por la densa biomasa existente. En estos ambientes, las lluvias estacionales pueden inundar de forma duradera (hasta 6 meses) amplias áreas de bosque, con bastante calado (2-18 m), que se comportan como embalses tropicales en lo que a emisión de CH₄ se refiere.

La creación de un embalse no reduce el stock de carbono de una cuenca, pero sí que lo almacena en un compartimiento más estanco y estable que los suelos forestales, como lo es el sedimento.

Una forma de explicar de manera sesgada el balance de gases invernadero de los embalses es, precisamente, olvidando las emisiones de los ecosistemas previos a la inundación. Desafortunadamente, este tipo de planteamientos aún siguen utilizándose a conveniencia, pero lo cierto es que dicho balance no se enfoca correctamente si sólo se tienen en cuenta las emisiones brutas de los embalses y no las de las superficies de los ecosistemas terrestres a los que, por inundación, esos embalses sustituyen.

¿Es cierto que los embalses producen más emisiones que los lagos naturales y los ríos?

En climas boreales las emisiones de CO₂ y CH₄ de lagos naturales son similares a las de los embalses cuando estos ya han pasado el proceso de maduración inicial asociado a la fase de inundación, y que ocurre habitualmente durante los primeros 6-10 años. En esta fase inicial, las emisiones de los embalses pueden ser altas debido a la descomposición de la materia orgánica más degradable (hojarasca, humus,...) cubierta por las aguas. De ahí la importancia de tener en cuenta el estado de maduración de los embalses, a la hora de estudiar su comportamiento en términos de emisiones de gases con efecto invernadero.

En climas tropicales húmedos las emisiones de metano de los ríos y las llanuras inundables, son similares a las de los embalses.

Con los conocimientos actuales, ¿qué se puede decir acerca de las emisiones netas de los embalses?

Existe una notable variabilidad de resultados dependientes de varios factores (características tróficas del embalse, persistencia de la estratificación térmica, tiempo de residencia del agua, superficie de lámina de agua, morfología de la cubeta, grado de anoxia, etc.), pero en general puede concluirse que para los embalses hidroeléctricos boreales de tipo medio (63 km²/Twh), el factor de emisión de gases con efecto invernadero por unidad de energía producida es de unas 11 kt CO₂ equivalente/Twh (Gagnon, 2002), lo que representa del orden de un 1% de las emisiones equivalentes de una central térmica de carbón y un 3% de una de gas natural. El embalse de Susqueda, con unos 24 km²/Twh, apenas llega a las 2 kt CO₂ equivalente/Twh.

En el caso de los embalses tropicales, para una superficie de lámina de agua comparable, la emisión neta puede ser de hasta el 10% de la de una central térmica de carbón y, en casos extremos, de grandes embalses permanentemente anóxicos con producción de metano, es posible que su emisión neta sea del mismo orden que la de dichas centrales térmicas, siempre por unidad de energía producida. Cabe finalizar recordando que todo el carbono que procesan los embalses pertenece a ciclos biogeoquímicos actuales, en los que los embalses son un compartimiento más. El papel de este carbono en el cambio climático, en términos de balance atmosférico, no es comparable al que procede del uso de los combustibles fósiles.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- Agència Catalana de l'Aigua (2002). Regionalització del sistema fluvial a les Conques Internes de Catalunya. Departament de Medi Ambient, Generalitat de Catalunya. 92 pp.
- Armengol, J., Crespo, M. & Morguí, J.P. (1984). Phosphorus compounds in the sediment of the Sau reservoir (Barcelona, NE Spain) throughout its twenty-year existence. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 22: 1536-1540.
- Broecker, W.S. & Peng, T.H. (1982). Tracers in the sea. Lamont-Doherty Geological Observatory, New York. 690 pp.
- Butturini, A. (1997). Contribution of the boundary zones on nutrient dynamics in a stream with Mediterranean regime. Tesis doctoral. Departament d'Ecologia, Universitat de Barcelona.
- Duchemin, E., Lucotte, M. & Canuel, R. (1995). Production of the greenhouse gases CH₄ and CO₂ by hydroelectric reservoirs of the Boreal region. *Global Biogeochemical Cycles*, 9(4): 529-540.
- Duchemin, E., Canuel, R., Ferland, P. & Lucotte, M. (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.
- Gagnon, L. (2002). The International Rivers Network Statement on GHG emissions from reservoirs, a use of misleading science. International Hydropower Association. Sutton (UK). 9 pp.
- Hakanson, L. (1981). A manual of lake morphometry. Springer-Verlag, Berlin. 78 pp.
- Lean, J. (2004). Solar Irradiance Reconstruction. IGBP PAGES/World Data Center for paleoclimatology. Data Contribution Series 2004-35. NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder (CO). USA.
- Leman, E. & Leman, D. (1981). Nitrous oxide concentrations in fresh waters of the Great Lakes basin. *Limnol. Oceanogr.*, 26: 867-879.
- Martí, E. & Sabater, F. (1996). High variability in temporal and spatial nutrient retention in Mediterranean streams. *Ecology*, 77: 854-869.
- Mengis, M., Gachter, R. & Wehrli, B. (1997). Sources and Sinks of nitrous oxide (N₂O) in deep lakes. *Biogeochemistry*, 38: 281-301.
- Rosa, L.P., Sikar, B.M., Sikar, E.M., & Santos, M.A. (1997). A model for CH₄ and CO₂ emission mean life in reservoir based on data from an Amazonian hydroplan. In: Hydropower plants and greenhouse gas emissions, Rosa, L.P. & Santos, M.A. (eds.). COPPE.
- Rosa, L.P., Matvienko, B., Santos, M.A. & Sikar, E. (1999). Relatório Eletrobrás/Fundação Coppetec. Inventário das emissões de gases de efeito estufa derivadas de hidrelétricas. COPPE report to Eletrobras.
- Stumm, W. & Morgan, J.J. (1996). Aquatic Chemistry. Chemical equilibria in natural waters. 3rd Edition. John Wiley & Sons Inc, N.Y.
- Therrien, J., Tremblay, A. & Jacques, R. (2005). Emissions from Semiarid Reservoirs and Natural Aquatic Ecosystems. In: Tremblay, A., Varfalvy, L., Roehm, C. & Garneau, M. (2005). Greenhouse Gas Emissions: Fluxes and Processes, Hydroelectric Reservoirs and natural Environments. Environmental Science Series. Springer. New York. 233-250 pp.
- Tremblay, A., Therrien, J., Hamlin, B., Wichmann, E. & LeDrew, L. (2005). GHG Emissions from Boreal Reservoirs and Natural Aquatic Ecosystems. In: Tremblay, A., Varfalvy, L., Roehm, C. & Garneau, M. (2005). Greenhouse Gas Emissions: Fluxes and Processes, Hydroelectric Reservoirs and natural Environments. Environmental Science Series. Springer. New York. 209-231 pp.
- Tremblay, A., Varfalvy, L., Roehm, C. & Garneau, M. (2005). Greenhouse Gas Emissions: Fluxes and Processes, Hydroelectric Reservoirs and natural Environments. Environmental Science Series. Springer. New York. 732 pp.

COORDINACIÓN EDITORIAL:

Dirección de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (ENDESA)

DISEÑO E IMPRESIÓN:

OFF-7 S.A.

FOTOGRAFÍA:

ENDESA

Impreso en el mes de noviembre de 2008

Depósito legal L-1133-08

Queda prohibida la reproducción total o parcial de textos e imágenes que aparecen en esta publicación.



Dirección de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (ENDESA)