

El oxígeno y la evolución funcional de los organismos

por Miquel Riera-Codina

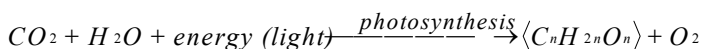
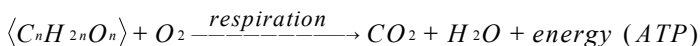
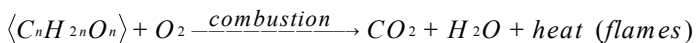
Artículo basado en la publicación:

- **Título:** *El oxígeno y la evolución.*
- **Autor:** *Miquel Riera Codina*
- **Revista:** *Mundo Científico (Saberes) 238 (Octubre), 66-71 (2002)*

Hombres y animales vivimos gracias al oxígeno del aire. Este gas es considerado fuente de vida. Sin embargo la atmósfera primitiva no contenía oxígeno. ¿Cómo y cuándo apareció este gas en la superficie de la Tierra?. ¿Qué influencia tuvo en la evolución de los animales?. En este artículo se exponen algunos aspectos que parecen indicar que el oxígeno pudo tener un papel relevante como inductor de la evolución a organismos cada vez más complejos, en modo similar posiblemente a cómo el uso del petróleo ha facilitado el desarrollo de sociedades humanas tecnológicamente complejas.

En el siglo XVIII, Lavoisier y Laplace consideraron que la vida era como una combustión, es decir que del mismo modo que la madera al oxidarse con el aire desprende calor los animales oxidan la materia orgánica para obtener energía tanto calorífica como para crecer y moverse. Este proceso es muy lento y precisa de muchas reacciones metabólicas que en conjunto constituye lo que denominamos metabolismo aeróbico.

La organización compleja de un organismo vivo requiere de energía para poderse mantener (segundo principio de la termodinámica). Esta energía la obtienen todos los animales metazoos de la respiración aeróbica (ver recuadro). Su evolución a formas cada vez más complejas ha implicado pues la obtención de sistemas energéticos progresivamente más eficientes.



En éste artículo vamos a exponer el papel que ha jugado el oxígeno (O₂) en el desarrollo de organismos funcionalmente cada vez más complejos.

Los primeros organismos vivos se desarrollaron sin O₂

La respiración y por tanto la vida no podía desarrollarse en la antigüedad tal y como la conocemos hoy en día ya que la atmósfera de la Tierra primitiva no tenía oxígeno. De hecho la presencia de éste gas es un hecho relativamente reciente, hace de 1500 a 2000 millones de años. ¿Qué influencia tuvo, pues, el oxígeno en el desarrollo de los organismos?. ¿Por qué no pudieron formarse células complejas y capaces de asociarse en forma de organismos pluricelulares antes de la aparición del oxígeno?. Antes de nada notemos que resulta difícil asimilar períodos de tiempo tan grandes como los que vamos a manejar, por ello puede ser práctico utilizar una escala de tiempo relativa más próxima a nuestra vida cotidiana. Así, consideremos que toda la historia del Universo se ha desarrollado en un año, por ejemplo del 1 de Enero al 31 de Diciembre. Partiendo de ésta relación, que representará nuestro calendario de referencia, el uno de Enero se habría formado el Universo y no sería hasta el 14 de Septiembre (hace unos 4600 millones de años) que se formaría la Tierra. Por entonces la atmósfera era rica en nitrógeno, hidrógeno, dióxido de carbono, metano y vapor de agua entre otros,

pero no contenía oxígeno.

Cronología	Acontecimiento	Tendencia funcional
1 Enero	Formación del Universo	
14 Septiembre	Formación de la Tierra	<i>Evolución abiótica (química)</i>
15 Octubre	Aparición de las primeras células: procariontas	<i>Desarrollo del metabolismo anaeróbico</i>
1 Noviembre	Primeras bacterias fotosintetizadoras no productoras de O ₂	
12 Noviembre	Primeros organismos que producen O ₂ por fotosíntesis	
1 Diciembre	Atmosfera se vuelve rica en O ₂ oxidación de la corteza y formación de la capa de ozono	<i>Desarrollo del metabolismo aeróbico</i>
8 Diciembre	Primeras células eucariotas	<i>Consolidación del metabolismo aeróbico</i>
16 Diciembre	Aparecen los primeros fósiles pluricelulares (celenterados, anélidos y moluscos)	<i>Desarrollo de tejidos y órganos</i>
19 Diciembre	Aparecen los primeros vertebrados (peces primitivos)	<i>Desarrollo de sistemas para coordinar el funcionamiento de los tejidos y órganos</i>
22-24 Diciembre	Animales colonizan los continentes: primeros anfibios, reptiles e insectos voladores	<i>Desarrollo de sistemas reguladores evolucionados: sistema nervioso centralizado en un encéfalo</i>
26 Diciembre	Aparecen los primeros mamíferos y aves	<i>Gran desarrollo del encéfalo como sistema coordinador centralizado y adquisición de funciones superiores</i>
29 Diciembre	Los primeros primates	<i>Desarrollo de funciones superiores cerebrales</i>
31 Diciembre 22h 30'	Los primeros humanos	<i>Desarrollo cultural</i>
31 Diciembre 23h 46'	Trabajan la piedra	
31 Diciembre 23h 46'	Utilización del fuego	
31 Diciembre 23h 59' 20''	Finaliza la última glaciación	
31 Diciembre 23h 59' 35''	El primer poblado	
31 Diciembre 23h 59' 56''	Nacimiento de Cristo	
31 Diciembre 23h 59' 59''	Renacimiento. Desarrollo del método científico y de la industria moderna	<i>Aparición y desarrollo del agujero de ozono</i>

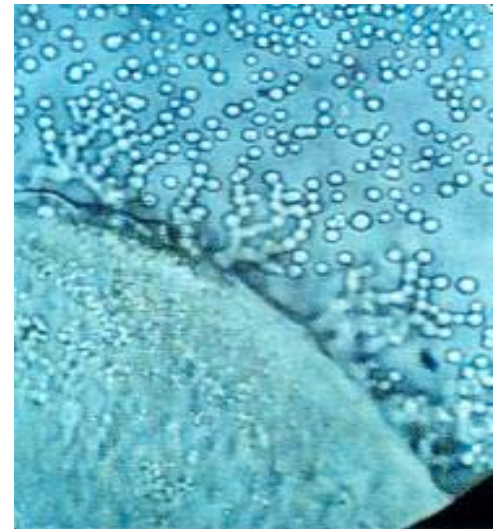




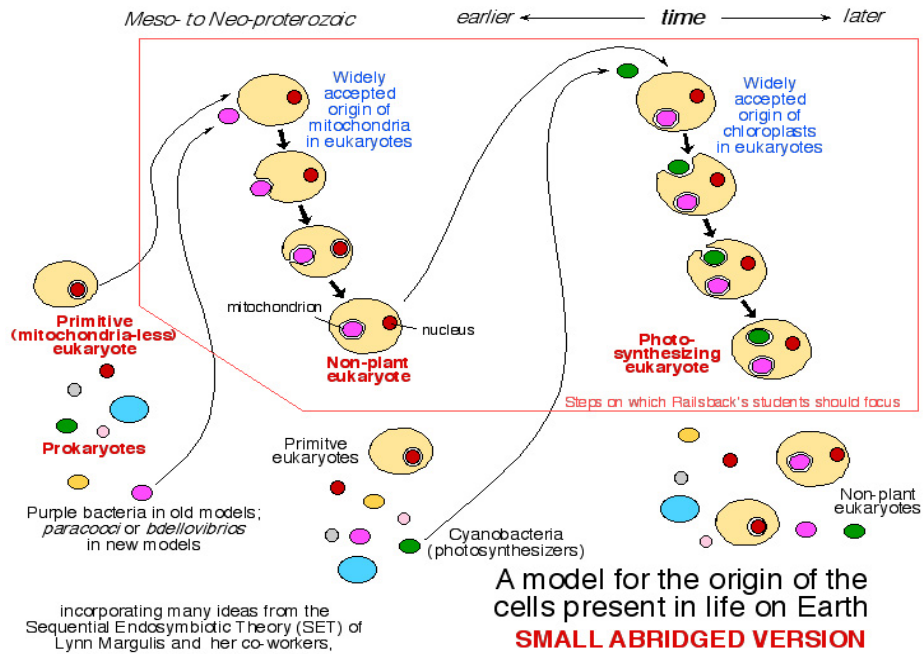
A diferencia de lo que se suele presentar en las películas de cine, es de suponer que el paisaje tuviera un aspecto bien distinto al de las actuales zonas áridas, debía tener una apariencia grisácea y con poco colorido porque las rocas no se oxidaban al entrar en contacto con la atmósfera.

Oparin y Haldane ya explicaron en los años 20 que en éstas condiciones debieron producirse importantes reacciones bioquímicas de formación de compuestos orgánicos en ausencia de organismos vivos (evolución abiótica o química). Pero la vida no apareció hasta el 15 de Octubre aproximadamente de nuestro calendario (hace unos 3400 millones de años).

Unas diminutas estructuras en forma de vesículas que eran capaces de desarrollar en su interior reacciones químicas coordinadas para obtener energía aparecieron en los océanos. Así, aparecieron las primeras formas de organismos vivientes en aquellos mares primitivos, las células. Estas primeras células eran muy simples (protobiontes o “vesículas metabólicas y eubiontes, cuando incorporaron un sistema genético, verdaderas formas de vida) y evolucionaron aumentando algo su complejidad interna hasta formas parecidas a las actuales bacterias. Estas formas tuvieron que obtener la energía necesaria para mantenerse vivas (mantener su nivel de organización interna) por oxidación de materia orgánica (heterótrofas), por oxidación de sustancias inorgánicas (quimiótrofas) o por oxidación de la materia orgánica previamente sintetizada mediante radiación luminosa (autótrofas).

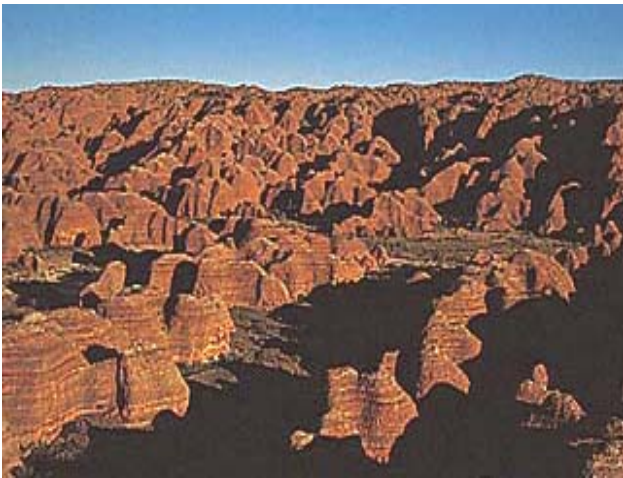


En cualquier caso queda claro que la oxidación tenía que producirse en ausencia de O_2 (anaerobiosis). Los aceptores finales de electrones podían ser sustancias inorgánicas (ejemplo las actuales bacterias reductoras de azufre: $S \rightarrow H_2S$ ver Shen et al. In Nature, 410, 77-80, 2001) o un compuesto orgánico parcialmente oxidado (fermentadoras), siempre con una capacidad oxidativa muy inferior a la del O_2 . Como éste tipo de metabolismo produce poca energía éstos organismos no pudieron evolucionar hacia formas muy complejas. Con todo, empezaron a proliferar por los océanos y fueron desarrollando en su interior reacciones químicas cada vez más complejas y eficaces (evolución metabólica). A continuación se muestra un interesante modelo para explicar la evolución de estas células primitivas, sacado de <http://www.gly.uga.edu/railsback/1122main.html>



Aparece el oxígeno: la primera gran “contaminación” atmosférica que aprovechan algunas células

Volviendo a nuestro calendario, el 1 de Noviembre aparecieron células capaces de utilizar la luz solar para obtener energía por fotosíntesis (como las actuales bacterias verdes y púrpuras del azufre, anaeróbicas y no productoras de O_2) y más tarde algunos de éstos organismos celulares desarrollaron una fotosíntesis que producía oxígeno (como cianobacterias fósiles encontradas en sedimentos). Este mecanismo era más favorable energéticamente y por tanto éste tipo de células empezó a proliferar por los mares, aumentó rápidamente la producción de éste gas y se fue acumulando en aquella atmósfera primitiva. Hace 1800 millones de años (por el 1 de Diciembre) la cantidad de oxígeno atmosférico ya era similar al actual.

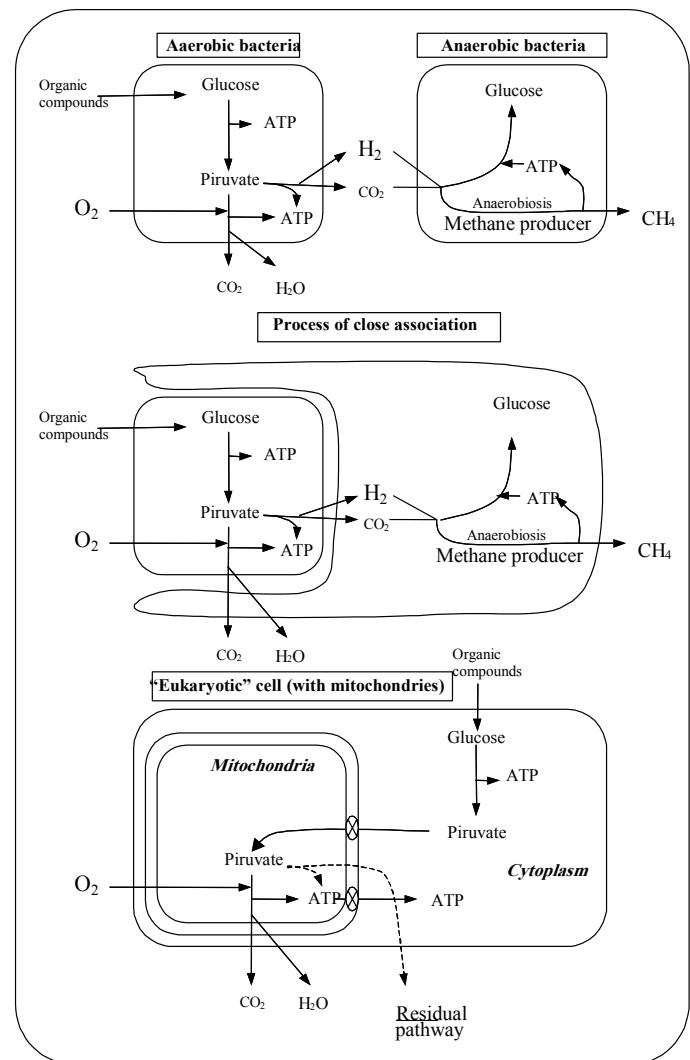


La acumulación de oxígeno en la atmósfera tuvo un efecto espectacular sobre el paisaje de la Tierra. Las rocas empezaron a oxidarse y tomaron tonalidades rojizas y amarillentas nunca vistas hasta entonces, el paisaje se llenó de colorido tomando un aspecto similar al de las actuales zonas áridas. De hecho el oxígeno representó la primera gran contaminación del planeta debida a la acción de los seres vivos.

Además, en las capas altas de la atmósfera, se formó un gas derivado del oxígeno, el ozono. Este gas absorbe intensamente las radiaciones ultravioletas del sol que destruyen los organismos; por tanto, disminuyó drásticamente la intensidad de éstas radiaciones a nivel de superficie terrestre y marina y aquellas células primitivas pudieron acceder a zonas mucho más superficiales de los mares y tener acceso al oxígeno allí disuelto. Algunas de ellas aprendieron a utilizar metabólicamente este nuevo gas. No vamos a indicar aquí las interesantes adaptaciones moleculares que debieron producirse para captar el O_2 y acoplarlo a las vías metabólicas oxidativas de la célula, solo notemos que con la respiración aeróbica se obtiene mucha más energía

debido a su elevada capacidad oxidativa. Este mayor rendimiento energético fue crucial ya que los organismos que lo poseían pudieron evolucionar a formas más complejas (recordemos que la complejidad requiere energía). Como consecuencia de ello, se dio un paso muy importante para que se pudieran formar organismos pluricelulares: la aparición de células eucariotas, células complejas, con núcleo y orgánulos, con un metabolismo aeróbico ya consolidado y que forman parte de todos los pluricelulares. Esto ocurrió hace aproximadamente 1400 millones de años (el 8 de Diciembre de nuestro calendario).

Recientemente se ha propuesto una interesante hipótesis que explica la formación de células eucariotas por una asociación íntima entre dos tipos de bacterias con metabolismos complementarios. Primero, ambos tipos de células tenderían a agruparse porque el hidrógeno y el dióxido de carbono producidos por la aeróbica son incorporados y usados por la autótrofa productora de metano. En un siguiente estadio, se iría favoreciendo una asociación cada vez más íntima entre ambos tipos celulares para favorecer el intercambio. Finalmente, uno de los tipos celulares queda incluido como orgánulo (mitocondria) en la otra célula. Así, los dos tipos de metabolismo quedan refundidos en uno solo, metabolismo aeróbico, de mayor eficiencia.



[El metabolismo aeróbico se consolida con las células eucariotas: el camino hacia los pluricelulares está abierto](#)

Las células eucariotas, con su elevado rendimiento energético, pudieron desarrollar complejos sistemas de locomoción y de relación. Por la zona superficial de los mares, donde el oxígeno es más abundante, algunos unicelulares debieron asociarse íntimamente, formando grupos ya coordinados y estables. Serían formas rudimentarias de pluricelulares.



Los Celenterados son animales muy sencillos, todas sus células son similares sin diferenciarse en tejidos especializados.

Los pluricelulares representan organizaciones más complejas y por tanto se requiere más energía para mantener su elevado nivel de organización. El desarrollo de un metabolismo de elevada eficacia, el aeróbico, debió ser un requisito necesario para poderse alcanzar este nuevo nivel de organización. Estas agrupaciones proliferaron y evolucionaron hacia formas mayores y más complejas, desarrollando tejidos y órganos especializados. Los primeros pluricelulares debieron aparecer hace unos 670 millones de años. Pronto aparecieron formas con estructuras esqueléticas (hace unos 550 millones de años) que dieron lugar a la gran proliferación de formas de invertebrados durante el período Cámbrico. No tardaron en aparecer los primeros vertebrados (peces primitivos tipo Agnatos y Placodermos) aunque no se diversificaron hasta el Devónico (hace 400 millones de años). Para situarnos, todo ello ocurrió en una semana de nuestro calendario, del 12 al 20 de Diciembre.

La presión de población marina estimula a la colonización de ambientes terrestres y a la respiración de aire. El aire tiene un elevado contenido de oxígeno.

Entonces tuvo lugar otro hecho notable en la evolución de los organismos. La explosión de organismos en el mar llenó las zonas oceánicas más idóneas para la vida, así algunos animales fueron quedando relegados a zonas menos estables, tales como marismas, ríos, lagos y zonas anegadas. En los períodos en que la pluviosidad y temperatura del planeta fueron elevadas aumentaban las extensiones de tierra anegada en forma de manglares y zonas pantanosas. Estas aguas cálidas son muy pobres en oxígeno, así que los organismos que allí vivían tuvieron que adaptarse a usar el oxígeno del aire lo que facilitó la transición hacia la vida en tierra firme.



El ambiente terrestre es mucho más variable que el marino, para poder colonizar dicho ambiente los animales tenían que desarrollar una respiración aérea y mecanismos para aislarse de las variaciones ambientales. Pero al conseguirlo dispusieron de mucho más oxígeno del que tenían los animales que permanecieron en el mar ya que el aire contiene mucho más O_2 que el agua. De nuevo, pues, fue el oxígeno el que permitió la obtención de mayor cantidad de energía metabólica para adaptarse a los ambientes cambiantes de la Tierra desencadenando una nueva escalada de aparición de organismos cada vez más complejos y sofisticados. Así, aparecen los anfibios y poco después los reptiles colonizan toda la tierra (del Pérmico al Cretácico, -280 a unos -80 millones

de años). En el Triásico ya existían mamíferos primitivos pero no se diversificaron de manera importante hasta el Cretácico (hace unos 140 millones de años).



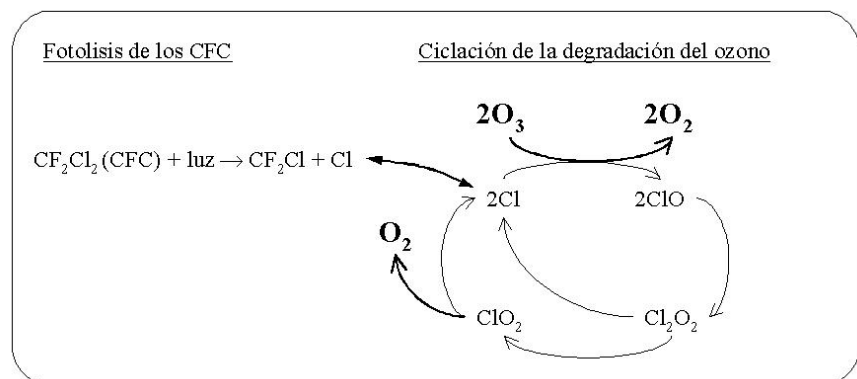
Mamíferos (al principio eran animales pequeños, como muestra la ilustración derecha, pero desarrollaron complejos mecanismos de regulación funcional) y aves desarrollaron grandes centros coordinadores de funciones a nivel encefálico (Prosencéfalo) que les permitió conseguir una gran independencia del medio variable que les rodea mediante mecanismos reguladores homeostáticos. Su encéfalo adquirió funciones de autocontrol y conducta consciente.

A partir de la aparición de los primeros homínidos africanos hace unos 11 millones de años (31 de Diciembre a las 10 horas y 30 minutos de la noche de nuestro calendario) los acontecimientos se precipitan. Así a las once de la noche ya saben trabajar la piedra, a las doce menos cuarto aprenden a usar el fuego, fundan los primeros poblados cuando falta medio minuto para las doce de la noche, 4 segundos antes de las doce nace Cristo y un segundo antes de las doce desarrollan el método científico y se produce la revolución industrial. Los hombres hemos aprovechado, para bien o para mal, mucho éste último segundo y hemos desarrollado toda la ciencia y la industria modernas.

La industria moderna libera clorofluocarbonos

Una de las consecuencias más importantes del desarrollo industrial ha sido la destrucción de la capa de ozono por la acumulación de compuestos clorofluocarbonos (CFC) liberados por la industria moderna. Estos compuestos parecían ser ideales ya que no reaccionaban y por tanto no contaminaban. Así que, una vez usados, se fueron liberando masivamente a la atmósfera. Lo que ocurrió es que poco a poco fueron ascendiendo y acumulándose en la estratosfera.

Allí, en condiciones extremas de temperatura (inferior a 60-80 °C bajo cero) e intensa luz solar (condiciones que se consiguen en la Antártida durante períodos de tiempo relativamente largos) se vuelven reactivos y descomponen el ozono en oxígeno (ver recuadro). El problema está en que las reacciones pueden ciclarse y así cada molécula de CFC va degradando continuamente ozono.



Resulta paradójico que los humanos, que de alguna forma hemos sobrevivido gracias a la formación de la capa de ozono en la tierra primitiva, seamos capaces ahora de volver el planeta a las condiciones iniciales. En éste caso se han tomado medidas a nivel mundial y parece que la reducción de emisión de CFCs está controlada. Hemos de tener en cuenta, sin embargo, que el proceso tiene gran inercia y actualmente aún están llegando a la estratosfera grandes cantidades de éstos compuestos liberados por la industria de los años ochenta. ¿Podremos realmente parar la destrucción de la capa de ozono por CFC?. ¿Podremos, sabremos o querremos actuar a tiempo para evitar futuras alteraciones del entorno?. Teniendo en cuenta los cambios vertiginosos que estamos produciendo en el entorno tendríamos que ser cautelosos al introducir alteraciones que pueden desencadenar efectos con gran inercia. ¿Qué historia se podrá escribir para el 1 de Enero del próximo año de nuestro calendario?.

Webs relacionadas

- Cellular evolution (Chapter 11). In EVOLUTION FACTS, INC. BOX 300 - ALTAMONT, TN. 37301 . <http://evolution-facts.org>
- The Progenote. Draft of an article to appear in the ENCYCLOPEDIA OF MOLECULAR BIOLOGY. <http://www.sp.uconn.edu/~gogarten/progenote/progenote.htm>
- Webpage for Dr. Bruce Railsback's lecture section. In Earth's History of Global Change, University of Georgia, Department of Geology. <http://www.gly.uga.edu/railsback/1122main.html>
- Cellular genesis. In The Harbinger symposium, "Religion & Science," Alabama Humanities Foundation, http://www.theharbinger.org/articles/rel_sci/fox.html
- The Origin of Higher Life Forms. <http://www.amazingdiscoveries.org/lifeforms.html>

Libros

- Avers, Charlotte J. Cap. 18 Cellular and molecular evolution. In Molecular Cell Biology. Ed. Addison-Wesley (1986)
- Montero, F. Y Morán, F. Biofísica. Procesos de autoorganización en Biología. Ed. EUDEMA, 1992.
- Losada, M., Vargas, M. A., De la Rosa, M.A., Florencio, F.J. Los elementos y moléculas de la vida. Introducción a la química biológica y biología molecular. Ed. Rueda, 1999.
- Ecología y Evolución. En Història Natural. Ed. Carroggio. 1990
- Tomo 15 Registre fòssil. En Història natural dels països catalans. Ed. Fundació Enciclopèdia Catalana, 1989.

Artículos

- Martin, W. & Müller, M. The hydrogen hypothesis for the first eukaryote. Nature, 392, 37-41 (1998)
- Castresana, J. & Saraste, M. Evolution of energetic metabolism: respiration-early hypothesis. TIBS, 20, 443-447 (1995)
- López-García, P. & Moreira, D. Metabolic symbiosis at the origin of eukaryotes. TIBS, 24, 88-93 (1999)
- Solomon, S. Progress towards a quantitative understanding of Antarctic ozone depletion. Nature, 347, 347-353 (1990)