

CAPÍTULO 3

Sol, luz y vida: comprendiendo el funcionamiento de las Estrellas y la Fotosíntesis

3.1	De la <i>Era Oscura</i> a los millones de estrellas	66
3.2	¿Por qué vemos el cielo negro por la noche?	69
3.3	El Sol como fuente de energía	71
3.4	Usando la energía del Sol: la leyenda de Arquímedes	75
3.5	Generadores de Fusión: emulando la energía de las estrellas	77
3.6	Fotosíntesis: convirtiendo la energía del Sol	78
3.7	Analizando la fotosíntesis con más detalle desde el punto de vista de la luz	80
3.8	La fotosíntesis artificial	83

3.1. De la *Era Oscura* a los millones de estrellas

Todos sabemos que el Sol es la **principal fuente de energía** de nuestro planeta y por lo tanto de vida en la Tierra. Como sabemos, el Sol es una de las muchísimas estrellas que hay en nuestra galaxia: la Vía Láctea. De hecho, este número se estima que se encuentra entre los **200 y 400 mil millones de estrellas**: no está mal ¿verdad? Para centrarnos y tener una idea de las dimensiones de nuestra galaxia, basta decir con que **su anchura se estima en unos 100.000 años-luz**. Esto significa que, montados en una hipotética nave capaz de viajar a la velocidad de la luz en el vacío¹, tardaríamos la nada despreciable cifra de 100.000 años en recorrer de lado a lado nuestra galaxia: ¿está claro que pequeña no es!

La siguiente pregunta que se nos puede ocurrir es: ¿y **cuántas galaxias hay en el**

¹Como ya sabemos, la velocidad de la luz en el vacío es de $v = 300.000 \text{ m/s}$



Figura 1. Imagen de la galaxia espiral NGC 6744, muy similar a nuestra Vía Láctea. Fuente: Wikimedia <http://bit.ly/2zUeRm1>

universo? Los astrónomos se conforman con indicar que hay centenares de miles de millones. **Conclusión: hay una cantidad inimaginable de estrellas en el universo que generan luz y energía** y, con ello, la posibilidad de facilitar la existencia de vida en millones de mundos.

Ante esta realidad, una reflexión interesante surge del hecho de que, atendiendo a las teorías actuales del mundo de la astrofísica, nuestro universo vivió una etapa conocida como “**Dark Ages**” o “**Era Oscura**” en la cual **¡no había luz!** En este periodo (hablamos de hace mucho, mucho tiempo, unos 380.000 años tras el Big Bang) aún no se habían formado las estrellas, por lo que, lógicamente, no había luz. Aunque, ¿es posible que hubiese luz en el universo antes de la formación de las estrellas? Para responder a esta pregunta es comenzar por el principio, de hecho, por el principio de **todo**, por el denominado **Big Bang**.

Como probablemente sabes, **Big Bang** es el nombre de la teoría más ampliamente aceptada a día de hoy sobre el origen del universo. Curiosamente, el término Big Bang fue acuñado de manera despectiva por los defensores¹ de la teoría que, con anterioridad, era más aceptada por la comunidad científica. Esta teoría básicamente postulaba que el universo era inmutable y eterno, sin comienzo ni final. A día de hoy hay muchas evidencias científicas que encajan con la teoría del Big Bang, hecho por el que es ampliamente avalada por la comunidad científica. En cualquier caso, según esta teoría, el universo se creó hace unos **14.000 millones de años** en una “explosión” a la que siguió una gran expansión de la materia y energía resultantes. En esos momentos, el universo era increíblemente caliente y brillante: de hecho, 3 minutos después de la explosión ya se habían formado núcleos de hidrógeno y helio que eran bombardeados por una intensa lluvia de electrones. De esta manera, esas partículas brillaban

¹El término Big Bang fue acuñado en particular por el astrónomo inglés **Fred Hoyle** en un programa de la BBC.

intensamente: tan intensamente que no dejaban pasar la luz y **el universo entero era un muro brillante y opaco**¹.

Tuvieron que pasar **380.000 años** para que el universo, tras un proceso de expansión y enfriamiento, se volviese **oscuro**. A partir de ese punto el universo continuó expandiéndose y enfriándose, estando formado fundamentalmente por nubes de helio e hidrógeno. A partir de aquí, la gravedad comenzó a tener efecto y en las zonas más densas el gas era atraído, aumentando su densidad y atrayendo a su vez más gas. Al aumentar la densidad, la temperatura del núcleo de esos cúmulos de gas fue aumentando, naciendo las estrellas tras unos **180 millones de años**. **Esta breve historia del universo ilustra el paso de un muro brillante y opaco a un universo oscuro y, finalmente, a un universo con las primeras estrellas y la luz asociada a éstas.**

Importante 3.1: A la caza de exoplanetas

En la actualidad existe un gran esfuerzo investigador por **encontrar planetas similares a la Tierra** vinculados a estrellas distintas al Sol, donde el ser humano podría vivir y donde incluso podría haberse desarrollado vida extraterrestre. Al margen de las técnicas empleadas para detectar la existencia de esos planetas^a, se considera que para que pueda haberse desarrollado vida en un planeta, éste debe estar situado dentro de la denominada **Distancia de Zona Habitable** (HZD: *Habitable Zone Distance*), que depende de la temperatura y luminosidad de su estrella asociada.

En este sentido es interesante recordar que Stephen Hawking, uno de los grandes científicos de nuestro tiempo, ha alertado sobre la necesidad de buscar otros planetas habitables para que la humanidad pueda sobrevivir^b

^aExisten varias decenas de exoplanetas detectados que son potencialmente habitables. Para más información: https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Exoplanetas_confirmados_potencialmente_habitables

^bNoticia sobre Stephen Hawking en La Vanguardia: <http://bit.ly/2tMF4Qt>.

Importante 3.2: A la caza de exoplanetas .. ¡en otras galaxias!

A finales del 2020 un grupo de científicos ha detectado lo que creen podrían ser indicios del primer exoplaneta perteneciente a una galaxia “externa”, esto es, orbitando una estrella que no pertenece a nuestra propia galaxia, la Vía Láctea: ¿no es increíble?

En este caso, la detección se ha hecho midiendo la ocultación de la radiación que la estrella asociada emite en forma de rayos-X. Como siempre ocurre en ciencia, hablamos de una hipótesis que sólo el tiempo y nuevas medidas indicarán si confirman este descubrimiento o si, por el contrario, hay que buscar otras explicaciones al fenómeno observado.

¹Fuente: “Un descubrimiento apabullante sobre el origen del universo” (Don Lincoln, Expansion.mx) <https://bit.ly/3psrZsW>



Figura 2. Imagen de Stephen Hawking y Barack Obama. Fuente: Wikimedia. Licencia: Dominio Público <http://bit.ly/2gQK2Hv>

3.2. ¿Por qué vemos el cielo negro por la noche?

Antes de continuar este tema hablando de la energía que podemos obtener de la radiación solar que llega a nuestro planeta, y aprovechando que hemos estado hablando del universo y las estrellas, vamos a abordar una curiosidad en forma de pregunta que puede resultar sorprendente, al menos en primera instancia: **¿por qué el cielo es negro por la noche?**. La pregunta puede llegar a parecer incluso absurda, pero vamos a ver que tiene más sentido del que parece.

En primer lugar, ¿por qué nos planteamos si quiera que el cielo pudiese ser brillante por la noche? Tenemos que pensar que el universo está lleno de estrellas distribuidas uniformemente, lo que implica que miremos a donde miremos en nuestro cielo, nuestra vista se estará dirigiendo hacia una estrella. Para ilustrar esta situación en la [Figura 3](#) se muestra una representación del cielo con el Sol y unas pocas estrellas (izquierda), el Sol con muchas más estrellas y el cielo prácticamente saturado de luz por todas las estrellas en esa región del espacio¹.

Para explicar por qué vemos el cielo fundamentalmente negro, en primer lugar podríamos

¹Parece una buena ocasión que las estimaciones actuales indican que en el universo puede haber 10 billones de galaxias. Nuestra galaxia, la Vía Láctea, tiene un total estimado de 100 mil millones de estrellas; así que una estimación rápida podría llevarnos a concluir que en el universo puede haber un total de 100,000,000,000,000,000,000,000 de estrellas.

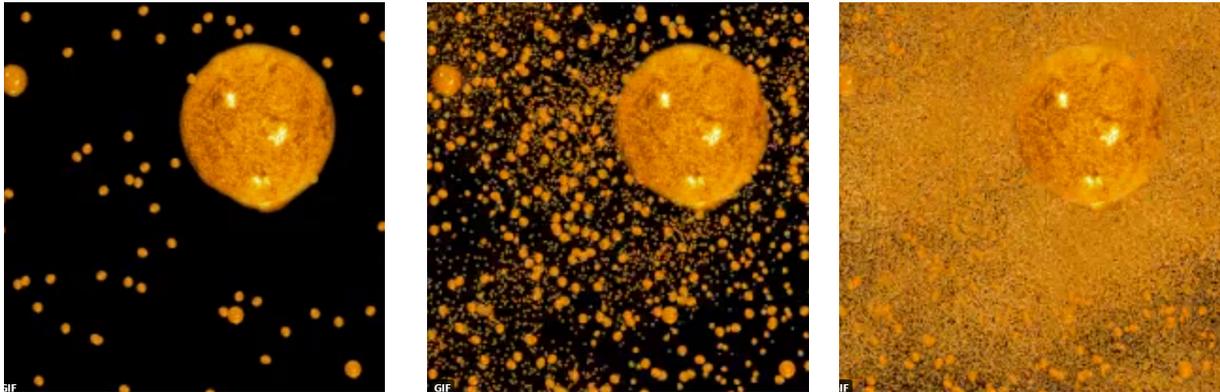


Figura 3. Representación esquemática de cómo debería verse el cielo nocturno teniendo en cuenta la cantidad de estrellas que hay en el universo.

pensar que se debe a que la luz de las estrellas lejanas nos llega muy débil, ya que su intensidad disminuye con el cuadrado de la distancia tal que $1/r^2$, donde r sería la distancia entre esa estrella y la Tierra. Sin embargo, también es cierto que a medida que nos alejamos hacia un determinado punto iremos encontrando más estrellas por el camino, por lo que ambos efectos deberían contrarrestarse. Parece que no vamos a encontrar la respuesta por esta línea de investigación. Veamos entonces donde puede estar la clave, en concreto las claves:

El universo se originó en el denominado Big Bang hace 13.700 millones de años . Esta hipótesis es ampliamente aceptada a día de hoy por la comunidad científica y está avalada por numerosos experimentos. Por otro lado, sabemos que mirar hacia el espacio implica viajar en el tiempo, ya que la luz tiene una velocidad finita de propagación, por lo que la luz que nos llega de una estrella muy lejana se emitió, en realidad, hace mucho tiempo. Todo esto implica que la luz de muchas estrellas y galaxias aún no ha tenido tiempo de llegar a la Tierra, por lo que empezamos a ver la solución a la pregunta planteada ... pero ¡aún hay más!

El universo se expande y, de hecho, es una de las principales pruebas de que existió el Big Bang, ya que antes se suponía que el universo era totalmente estático, sin principio ni final. El hecho de que el universo se expanda implica que el resto de galaxias y estrellas se alejan de nosotros, y esto es relevante ya que, como veremos más adelante, implica que la luz de esas estrellas se va “desplazando hacia el rojo”; esto es, parte de la luz visible puede convertirse en infrarroja y, con ello, seguir contribuyendo a que el cielo nocturno sea más oscuro de lo que esperábamos.

En el universo hay grandes nubes de gas que pueden absorber la luz de las estrellas y reemitirla en otras longitudes de onda no visibles, por lo que estaríamos ante otro mecanismo de “pérdida” de luz de las estrellas.

Así que, aunque nuestro cielo nocturno debiera estar “inundado” de luz de las estrellas, tanto las grandes distancias en el universo (y la velocidad finita de la luz), como la expansión de éste y la presencia de nubes de gas hacen que gran parte de esa luz no llegue a nuestro planeta, permitiéndonos disfrutar de un cielo oscuro y ligeramente estrellado por la noche.

3.3. El Sol como fuente de energía

Está claro, sin nuestra estrella, el Sol, no habría vida en la Tierra, y tampoco habría (prácticamente) energía que pudiésemos emplear. De manera directa (energía solar fotovoltaica/térmica/termoelectrica) o indirecta (energía eólica, hidráulica, derivada del mar, biomasa, etc.) el Sol es responsable de casi toda la energía que el ser humano puede generar/convertir/utilizar, tan sólo algunas excepciones, como la energía geotérmica, pueden ser consideradas como ajenas al Sol.

Cuestión 3.1: El Sol como fuente de energía

¿No estaremos exagerando? ¿Acaso tiene el **Sol** algo que ver con los **combustibles fósiles**? Busca información al respecto y responde **con tus propias palabras**.

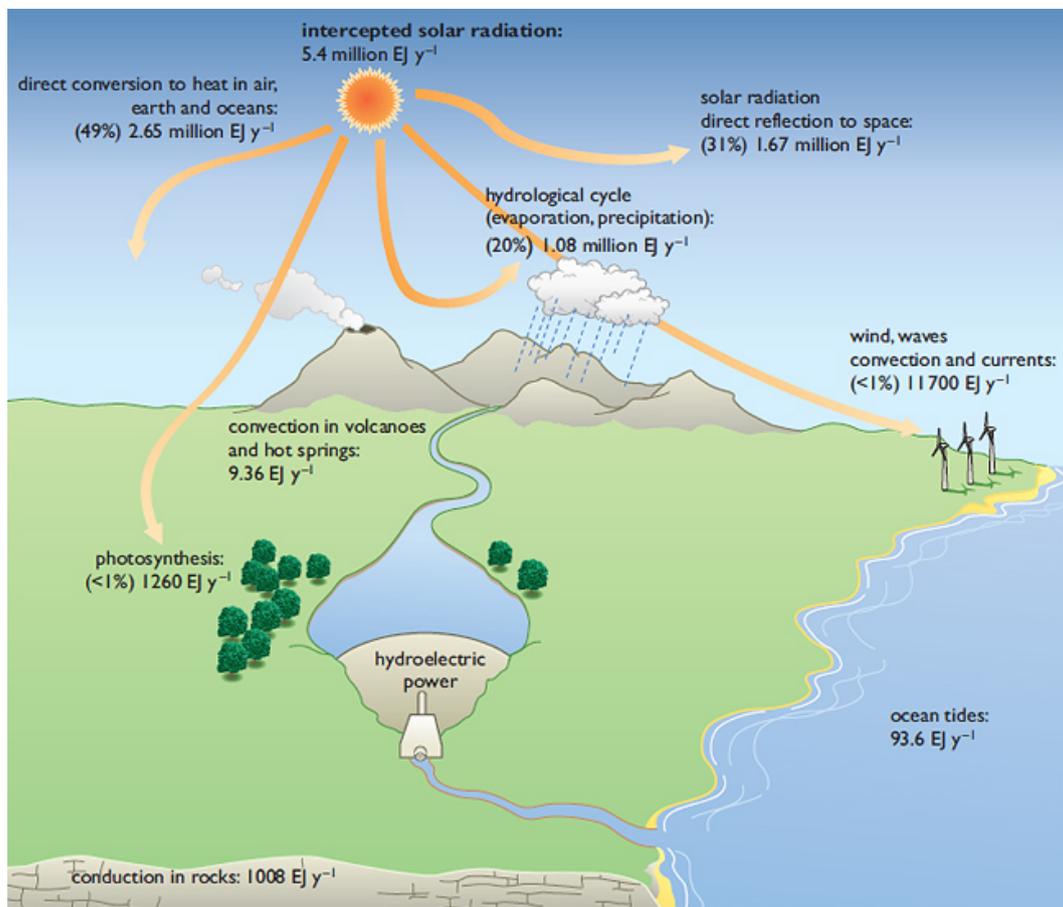


Figura 4. Esquema ilustrativo de la participación del Sol en la generación del recurso asociado a diferentes fuentes de energía. Fuente: http://www.open.edu/openlearn/ocw/pluginfile.php/411586/mod_oucontent/oucontent/12655/e788eacc/6634fd4b/renc_1_fig01wk1.jpg

En la **Figura 4** tenemos una representación más exacta de las formas de energía renovable disponibles en la Tierra. Como se puede observar existe una dependencia fundamental del Sol, que aporta 5.4 millones de EJ (exa-julios = 10^{18} julios). Puede apreciarse como otros mecanismos no directamente asociados a la radiación del Sol, como las mareas (en el que

el Sol tiene cierta influencia) o los fenómenos de convección en los volcanes, aportan cifras mucho más pequeñas en comparación.

3.3.1. El proceso de fusión: la energía de las estrellas

Sin tener que recurrir a explicaciones físicas somos conscientes de que el Sol genera una ingente cantidad de energía que nos llega en forma de radiación luminosa¹. Sin embargo, conocer el proceso responsable, en este caso la **fusión nuclear**, puede ser un primer paso en un intento de replicar el mismo para obtener una poderosa fuente de energía renovable.

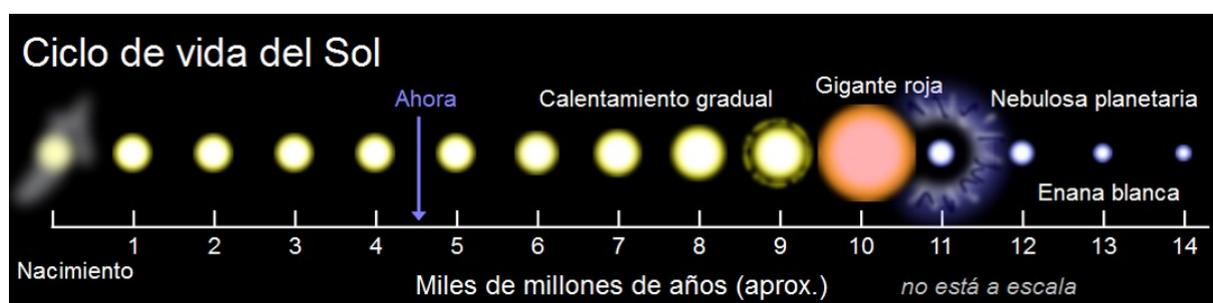


Figura 5. Evolución en la vida de una estrella y edad actual del Sol. Fuente: NACLE2 (Public Domain) https://es.wikipedia.org/wiki/Sol#/media/File:Solar_Life_Cycle_spa.svg

El Sol puede definirse como una gran bola de gas incandescente (un plasma), con un tamaño aproximado de un millón de veces el de la Tierra². El Sol tiene una edad de 4600 millones de años (ver Figura 5), lo que le sitúa aproximadamente a mitad de su ciclo de vida esperado.

El Sol está fundamentalmente compuesto por hidrógeno (H, 73%) y Helio (He, 25%), con unas temperaturas estimadas de 5600°C en su superficie y $15\text{millones}^{\circ}\text{C}$ en su interior.

¿Cómo se genera la energía en el Sol? En el núcleo de una estrella la temperatura y la presión son tan grandes que las partículas (en este caso hablamos de los átomos de hidrógeno y helio) son aceleradas a velocidades tan altas que, cuando chocan entre ellas, se llegan a producir reacciones nucleares.

En la Figura 6 tenemos un esquema de como se produce el **proceso de fusión nuclear**. La fusión nuclear desde un punto de vista simple puede entenderse como el proceso donde varios núcleos atómicos se unen para formar un núcleo más pesado, liberando además una gran cantidad de energía.

¹Hablamos de luz en su denición más amplia, no sólo de luz en el espectro visible, sino también de radiación óptica en el ultravioleta (UV) e infrarrojo (IR)

²La distancia del centro del Sol a su superficie es la equivalente a un viaje de ida y vuelta de la Tierra a la Luna

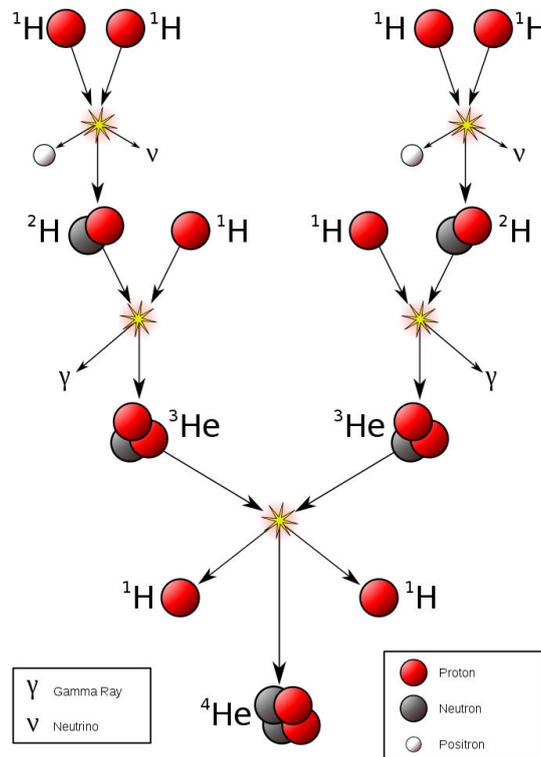


Figura 6. Representación esquemática del proceso de fusión nuclear en la estrellas. Fuente: Borb (CC BY-SA 3.0) https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fusion#/media/File:FusionintheSun.svg

Cuestión 3.2: Fusión y Fisión Nuclear

En ocasiones los términos de **fusión y fisión nuclear** pueden confundirse. Ya sabemos que la fusión se refiere al proceso de generación de energía en las estrellas: **¿y la fisión?** Busca información sobre este proceso y explica brevemente **con tus propias palabras** en qué consiste y en qué tipo de tecnología de generación de energía se emplea.

En el caso del proceso de fusión en el Sol, dos protones de hidrógeno se acercan lo suficiente como para que la interacción nuclear fuerte supere la repulsión eléctrica mutua. En este proceso se forma Deuterio ${}^2\text{H}$ que, posteriormente, al interactuar con otro protón proveniente de un átomo de hidrógeno, formará ${}^3\text{He}$ liberando radiación en forma de rayos gamma. El proceso de fusión finaliza con la formación de ${}^4\text{He}$.

Pero, ¡un momento! ¿Estamos hablando de radiación de **rayos gamma**? Esto ¿no os suena mal?

Cuestión 3.3: Rayos gamma

¿Cómo es la energía y la longitud de onda de los **rayos gamma** en comparación con la radiación "visible"? Los rayos gamma, ¿en qué eventos del universo participan? ¿Se utilizan rayos gamma en la Tierra?

Afortunadamente para nosotros, la radiación que llega a la Tierra lo hace en forma de

otras radiaciones: como bien sabemos en el rango visible, ultravioleta, infrarrojo, etc. ¿Por qué?

El fotón de rayos gamma, desde que se forma en el centro del Sol hasta que consigue escapar del mismo, puede tardar miles de años (algunos modelos lo cifran en ¡¡170.000!! años¹). Esto ocurre porque el fotón original, en su intento de escapar del Sol, se va encontrando con obstáculos (otras partículas) con las que choca, cambiando su dirección. En esos procesos los fotones van perdiendo energía hasta llegar niveles asociados con las regiones espectrales anteriormente comentadas.

¿Cuánta energía se genera en el Sol? Recurriendo a la famosa **ecuación de Einstein** que relaciona materia y energía, podemos encontrar una rápida respuesta a esta pregunta:

$$E = mc^2 \quad (3.1)$$

En la ecuación anterior **E** es la energía, **m** materia (masa) y **c** la velocidad de la luz en el vacío.

Para usar la ecuación anterior hay que tener en cuenta que en el Sol, en el proceso de fusión, se consumen **600 millones de toneladas de hidrógeno (por segundo)** para generar **596 millones de toneladas de He**. **¿Qué ocurre con las 4 millones de toneladas restantes?** En el proceso se han convertido en energía, así que sustituyendo en la ecuación anterior y empleando la constante c (velocidad de la luz), nos da un resultado de:

100.000.000.000.000.000.000 KWh de energía

La cifra anterior implica que, por segundo, en el Sol se genera una cantidad de energía superior al consumo mundial de energía en un año. Otra cosa es, por supuesto, como capturar y emplear esa energía de manera eficiente.

Importante 3.3: Esfera de Dyson

Un concepto interesante en este sentido es el de la **esfera de Dyson**, que se refiere a una hipotética megaestructura, propuesta en 1960 por el físico Freeman Dyson, que serviría para, rodeando una estrella, aprovechar al máximo la energía generada por ésta.

Esta estructura, que supuestamente podría servir para detectar civilizaciones extraterrestres avanzadas, ha sido noticia en los últimos meses al haberse detectado una estrella (y recientemente una segunda) con un comportamiento (en sus patrones de luminosidad) para el que aún no se han encontrado teorías satisfactorias. Más información en: <http://www.sciencealert.com/researchers-just-found-a-second-dyson-sphere-star>.

¹No confundir esta cifra con el tiempo que tarda un fotón en llegar desde la superficie del Sol a la Tierra: unos 8 minutos

3.4. Usando la energía del Sol: la leyenda de Arquímedes

En la actualidad, las energías renovables están experimentando un gran auge propulsado por diferentes situaciones, como el futuro agotamiento de los combustibles fósiles, el cambio climático o el incremento en el consumo energético a nivel global.



Figura 7. Centrales solares termoeléctricas PS10 y PS20 en Sevilla. Fuente: Wikimedia. Licencia: CC BY-SA 3.0 <http://bit.ly/2xNP8ei>

En los últimos años las energías renovables que dependen directamente del Sol han experimentado un gran auge. Hoy en día, la energía fotovoltaica es una de las principales tecnologías renovables, permitiendo la conversión de luz en energía eléctrica por medio de las células o paneles fotovoltaicos. Del mismo modo, la energía solar térmica, que usa la energía del Sol para el calentamiento de líquidos como agua, o la energía solar termoeléctrica o CSP (Concentrating Solar Power / Energía Solar de Concentración) han ido tomando una mayor relevancia. España es el primer país por potencia instalada en la tecnología CSP, con grandes centrales en las que un gran número de espejos orienta la radiación del Sol a una torre donde se calienta un líquido que, posteriormente, es usado para generar energía eléctrica por medio de una turbina. En la [Figura 7](#) se muestran las centrales CSP (termoeléctricas) PS10 y PS20 en Sevilla.

El uso por parte del hombre de la energía del Sol se remontan a la antigüedad, uno de los ejemplos más curiosos, precisamente muy cercano al concepto de la energía solar termoeléctrica, reside en la leyenda de la **defensa de Siracusa por parte de Arquímedes**.

Aunque el uso de espejos para cauterizar heridas y otros usos se remonta a épocas an-



Figura 8. Recreación de la supuesta defensa de Siracusa mediante un sistema de espejos diseñados por Arquímedes. Licencia: Dominio Público. Fuente: <http://irreductible.naukas.com/2009/11/27/el-rayo-de-arquimedes-de-siracusa-a-los-cazamitos/>.

teriores, se puede considerar a Arquímedes como uno de los “padres” de la energía solar térmica/termoeléctrica. Arquímedes es considerado uno de los científicos más importantes de la antigüedad, con aportaciones relevantes en el cálculo integral, el cálculo del número π , la explicación de la polea compuesta o la ley de la hidrostática, por mencionar algunos ejemplos.

Según la leyenda Arquímedes trató de defender su ciudad Siracusa del ataque de los romanos con un **sistema de grandes espejos capaces de concentrar la energía del Sol y quemar los barcos romanos**, aunque la veracidad de esta historia no está muy clara. Este supuesto sistema (que, de existir, no fue muy exitoso ya que Siracusa sucumbió al ataque, muriendo Arquímedes a manos de un soldado romano) ha tratado de ser replicado en múltiples ocasiones: desde el programa “Cazadores de mitos”¹ al mismísimo MIT (Instituto Tecnológico de Massachusetts)², con resultados diversos.

¹<https://youtu.be/kAWBvZcBZOU>

²http://web.mit.edu/2.009/www/experiments/deathray/10_ArchimedesResult.html

Cuestión 3.4: Arquímedes y el ¿“Rayo de la Muerte”?

¿Crees que fue real el “rayo de la muerte” de Arquímedes?

Investiga (con los recursos bibliográficos que consideres necesarios) la supuesta veracidad de este episodio histórico y discute (**con tus propias palabras**) si crees que fue técnicamente viable la utilización de espejos para quemar las naves romanas.

Importante 3.4: Heliodysee

Heliodysee es un centro de información abierto al público y situado en Francia, en el departamento de los Pirineos Orientales. El centro gira entorno al Gran Horno Solar de Odeillo, compuesto por una serie de espejos que reflejan la radiación del Sol sobre una segunda superficie de espejos que, finalmente, concentran la radiación sobre un objetivo de unos 40 cm de diámetro (con una concentración equivalente de unos 10.000 soles). La historia de este centro es curiosa y se remonta al uso de un espejo con fines antiáereos (imitando la famosa (y supuesta) defensa de Siracusa por parte de Arquímedes). Posteriormente se construyó el gran horno entre 1962-68, sirviendo como punto clave en la investigación para las actuales centrales termosolares.



Figura 9. Imagen del Horno Solar de Odeillo en Francia. Licencia: CCO Creative Commons. Fuente: <https://pixabay.com/es/horno-solar-odell%C3%B3-odeillo-francia-921116/>.

3.5. Generadores de Fusión: emulando la energía de las estrellas

En la búsqueda de nuevas tecnologías que permitan al ser humano una generación energética sostenible, más allá de los combustibles fósiles, destaca especialmente el proyecto de

desarrollar generadores de fusión nuclear. Se trataría, por tanto, de emular el proceso de generación de energía de las estrellas en nuestro planeta, por medio de pequeñas centrales que dispondrían de un potencial energético limpio e inmenso, sólo necesitando hidrógeno como fuente de energía.

El proyecto de este tipo de centrales, ejemplarizado por el proyecto ITER, es extremadamente complejo desde el punto de vista técnico y supone un auténtico reto científico. Hay que pensar que, por ejemplo, se necesitan materiales que puedan confinar el plasma (gas ionizado) que se generará a temperaturas altísimas (150 millones de $^{\circ}\text{C}$).

El proyecto ITER toma forma el 24 de mayo de 2006 con sus siete socios originales: Unión Europea, Japón, Estados Unidos, Corea del Sur, India, Rusia y China. La sede se estableció finalmente en Francia (Cadarache), asumiendo la UE un 40 % de la financiación total del proyecto, y Francia y el resto de socios un 10 % cada uno. Si bien la inversión (que se estima en unos 14000 millones de euros) es enorme, el avance del proyecto es lento y no se esperan hitos significativos hasta al menos 20 o 30 años.

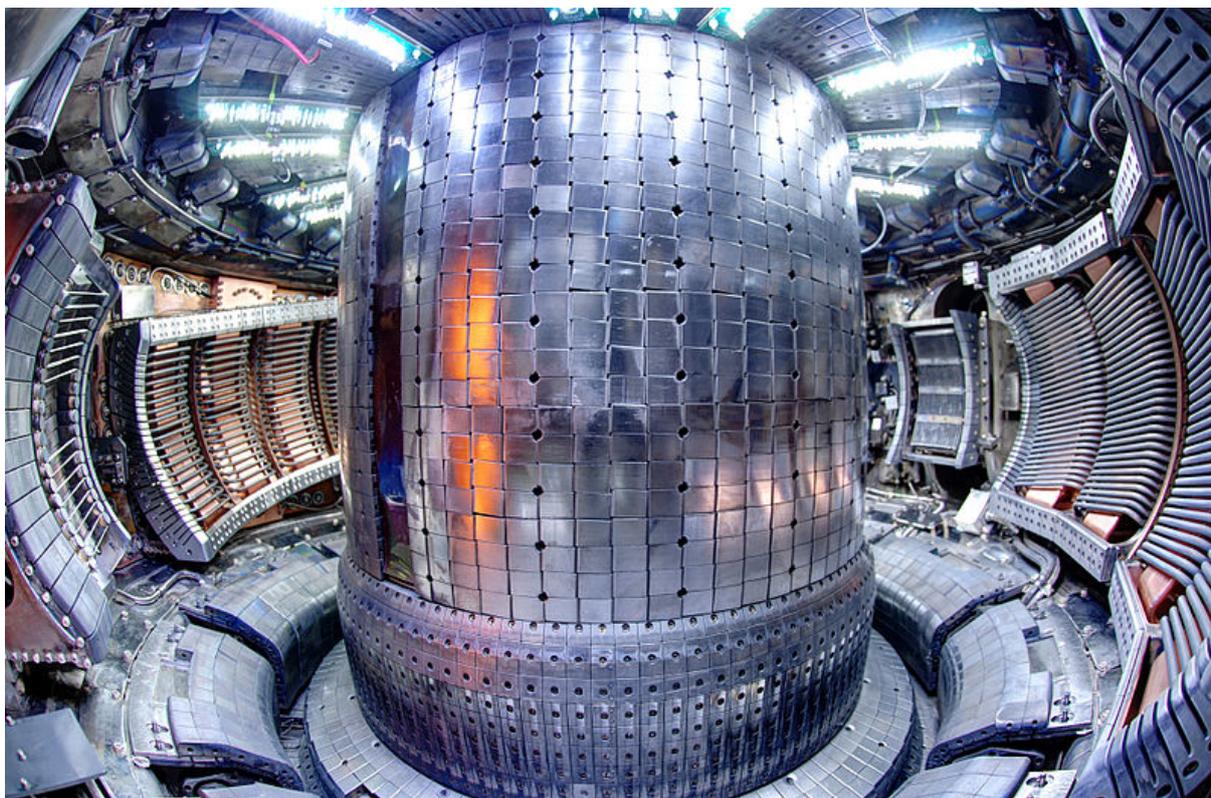


Figura 10. Imagen del interior de un prototipo de generador de fusión, en concreto del Alcator C-Mod (proyecto del MIT Plasma Science and Fusion Center. Licencia: CC-BY-SA 3.0. Fuente: <http://bit.ly/2hx6t1s>.

3.6. Fotosíntesis: convirtiendo la energía del Sol

Como ya se ha comentado, la existencia de una estrella cercana (en concreto, en un rango de distancias específico en función de su energía y de otros factores) es condición

indispensable para la existencia de vida tal y como la conocemos. En nuestro caso el Sol es fundamental para que exista vida en nuestro planeta Tierra. Sin embargo, otros fenómenos como la **fotosíntesis** son también claves en este sentido.

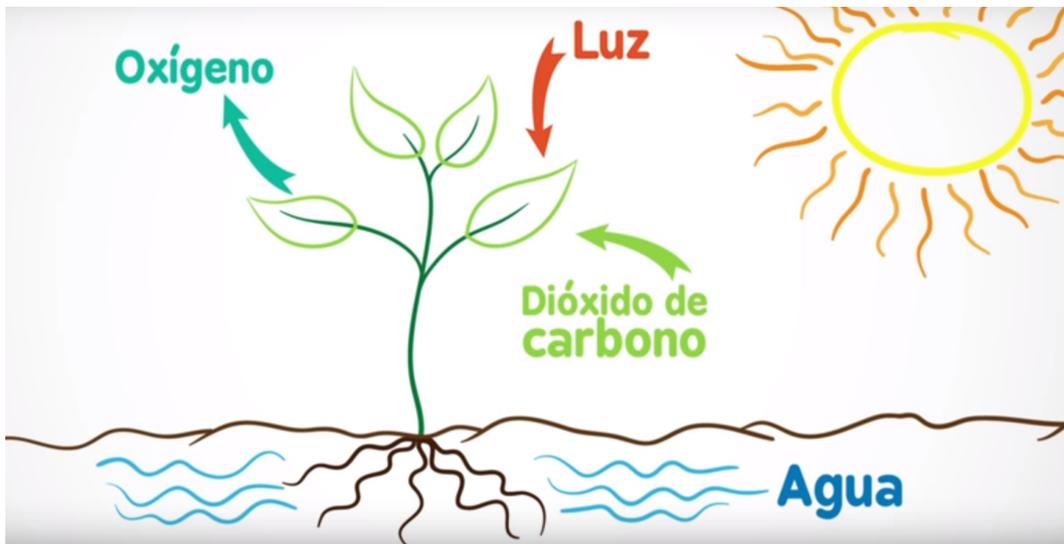


Figura 11. Ilustración del fenómeno de la fotosíntesis. Licencia: YouTube Estándar. Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=vBGGVU2DIDo>.

La palabra **fotosíntesis** proviene de los términos griegos: *photos* (luz) y *syn-thesis* (formación de compuestos). Básicamente se trata de un proceso en el que las plantas, aprovechando la energía del Sol, generan su propia comida en forma de azúcares. Para ello, al margen de la luz solar, las plantas necesitan también agua, minerales y CO₂.

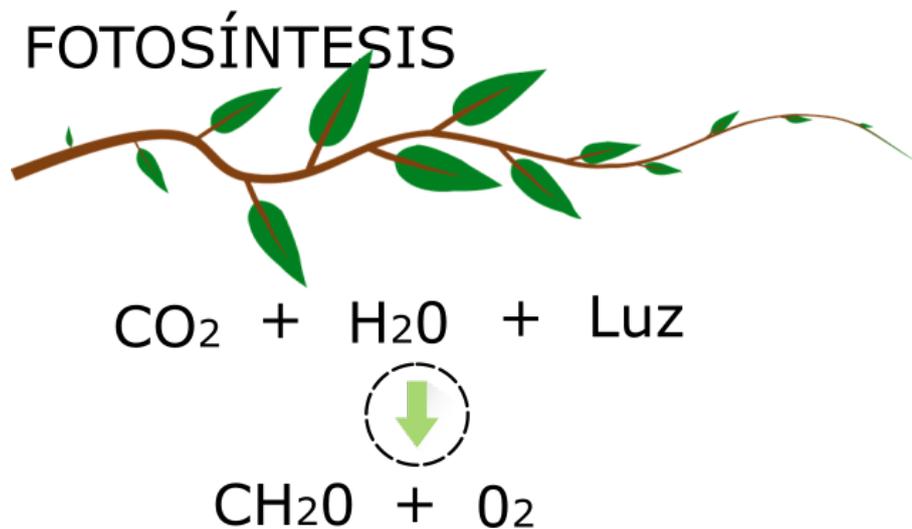


Figura 12. Representación esquemática del proceso de fotosíntesis. Licencia: Elaboración propia.

3.6.1. Factores que participan en la fotosíntesis

Como ya se ha comentado, **la luz** es un elemento clave en el proceso. Pero, **¿qué luz es la que realmente se emplea en el proceso?** Sabemos que la luz del Sol (luz blanca) se puede descomponer en sus diferentes componentes o colores, tal y como ocurre con el arco iris. Entonces: ¿todos los colores son empleados por igual en el proceso? La respuesta nos la da el propio color de las plantas.

Efectivamente, las plantas son de color verde así que, ¿será la luz verde la clave en el proceso? Pues la respuesta es negativa, ya que cuando apreciamos un objeto de un determinado color, lo que está haciendo esa superficie, tejido, etc. es precisamente reflejar ese color (esas longitudes de onda), por lo que precisamente el verde no es usado en las plantas para la fotosíntesis, sino que es reflejado por éstas y, lógicamente, no usado.

Además de la luz, para la fotosíntesis son fundamentales **el agua y el dióxido de carbono (CO₂)**, elementos con los que se puede producir la síntesis de los hidratos de carbono (CH₂O). La **temperatura** ambiente también juega un papel importante en el proceso, considerándose éste viable entre 0 y 50°C. Además, la **concentración de CO₂** también puede jugar un papel importante, ya que a mayor concentración de este gas, mayor será el rendimiento del proceso.

3.6.2. Fases de la fotosíntesis

La fotosíntesis se suele descomponer en dos fases: la fase fotoquímica (también conocida como fase “luminosa”) y la fase de fijación del CO₂.

En la fase fotoquímica el elemento clave es la energía aportada por la luz, que es capturada por medio de los pigmentos, fundamentalmente la clorofila¹. Los fotones absorbidos excitarán a los electrones de la clorofila, generando una cierta corriente eléctrica que será fundamental en el proceso.

En la fase de fijación del CO₂ la energía obtenida en la fase anterior se emplea para generar materia orgánica desde materia inorgánica. La fuente de carbono del proceso es el CO₂.

En términos generales, la fotosíntesis se lleva a cabo en las hojas de las plantas, en particular en los **cloroplastos**: estructuras de color verde (debido a la clorofila) características de las células vegetales.

3.7. Analizando la fotosíntesis con más detalle desde el punto de vista de la luz

Como hemos comentado anteriormente, el color verde de gran parte de las plantas que conocemos nos indica que, precisamente, la “componente” verde de la luz del Sol no es aprovechada por dichas plantas en la fotosíntesis. Veamos esto en mayor detalle ya que resulta

¹Algunas algas marinas funcionan en base a otros pigmentos y sí son capaces de aprovechar la luz verde

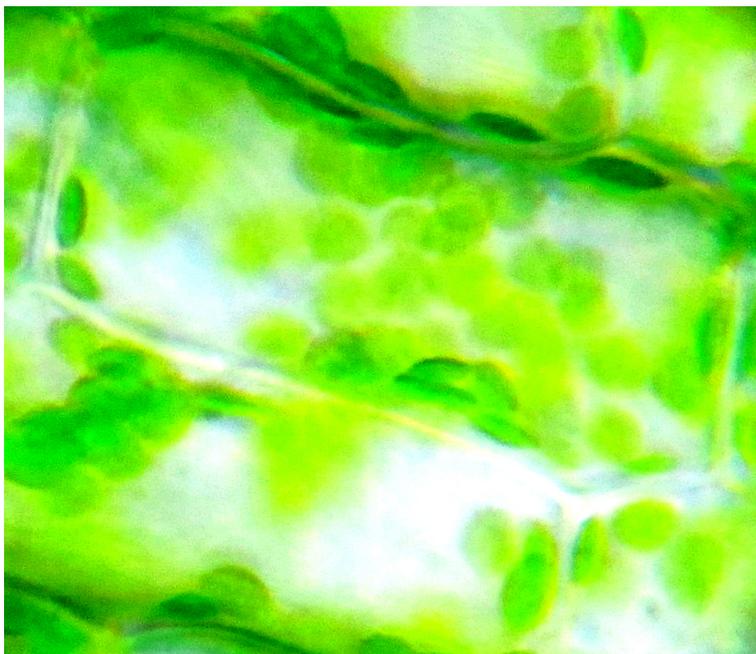


Figura 13. Imagen con un aumento de x400 que permite observar los cloroplastos de la Elodea (planta acuática). Fuente: Flickr. Licencia: CC-BY-SA 2.0.

de gran interés en el contexto de esta asignatura. Empecemos hablando de la **eficiencia** del proceso: ¿es la fotosíntesis un proceso eficiente? Esto es: ¿son las plantas capaces de aprovechar un alto tanto por ciento de la energía del Sol para generar la energía química resultante o, por el contrario, se pierde mucha energía en el proceso? La respuesta es que, efectivamente, **la fotosíntesis es un proceso muy eficiente**. Esto resulta especialmente interesante cuando comparamos este proceso natural con otros que el ser humano está tratando de replicar, como la energía fotovoltaica, donde la eficiencia (en este caso entendida como la conversión de la energía del Sol en electricidad) es aún baja, en el entorno del 20 % cuando hablamos de paneles solares comerciales.

¿Cuáles son las claves para que este proceso sea tan eficiente? Los científicos aún tratan de encontrar respuesta a esta pregunta, pero un reciente estudio (septiembre del 2020) propone la siguiente teoría: la clave para que el proceso sea tan eficiente reside en haber desarrollado un sistema que se **adapta de manera óptima a las fluctuaciones de la luz que llega del Sol**. Hay muchos factores que hacen que la cantidad de luz que llega a las hojas de una planta varíe: desde las condiciones atmosféricas (no pensemos sólo en las nubes, sino también en el viento o lluvia que puede mover las hojas y hacer que varíe la cantidad de luz que pueden recibir) hasta animales que pasen cerca de las plantas y puedan proyectar sombras sobre éstas, por ejemplo.

Como ya se ha mencionado, las plantas captan la luz a través de las clorofilas, moléculas que podemos entender como pigmentos que se encuentran en sus hojas. En realidad, las plantas tienen **2 tipos de clorofilas (A y B)** que absorben 2 colores (o longitudes de onda) distintos. ¿Por qué las plantas han desarrollado esta captura de luz en dos longitudes de onda distintas? La respuesta de este estudio que comentamos sugiere que esa captura de luz minimiza el efecto de las fluctuaciones de la cantidad de luz que le llega a la planta, permitiendo a ésta continuar el proceso de la fotosíntesis de manera óptima.

Cuestión 3.5: Clorofilas y colores absorbidos

El estudio que hemos mencionado, titulado “Quieting a noisy antenna reproduces photosynthetic light harvesting spectra”, puedes encontrarlo en el siguiente enlace^a:

<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1912/1912.12281.pdf>

Una explicación sencilla y amena sobre este tema puedes encontrarla en el **episodio 275 del podcast sobre ciencia “Coffee break: señal y ruido”**, en concreto entre el **minuto 22:30 y el 56:00**. Como curiosidad indicar que el episodio continúa hablando sobre la energía nuclear, un tema apasionante y que genera debate y controversia.

<http://research.iac.es/proyecto/coffeebreak/?p=2069>

^aSe trata de un artículo científico, por lo que es bastante técnico. Además, el artículo está en inglés, como ocurre con la mayoría de la producción científica internacional.

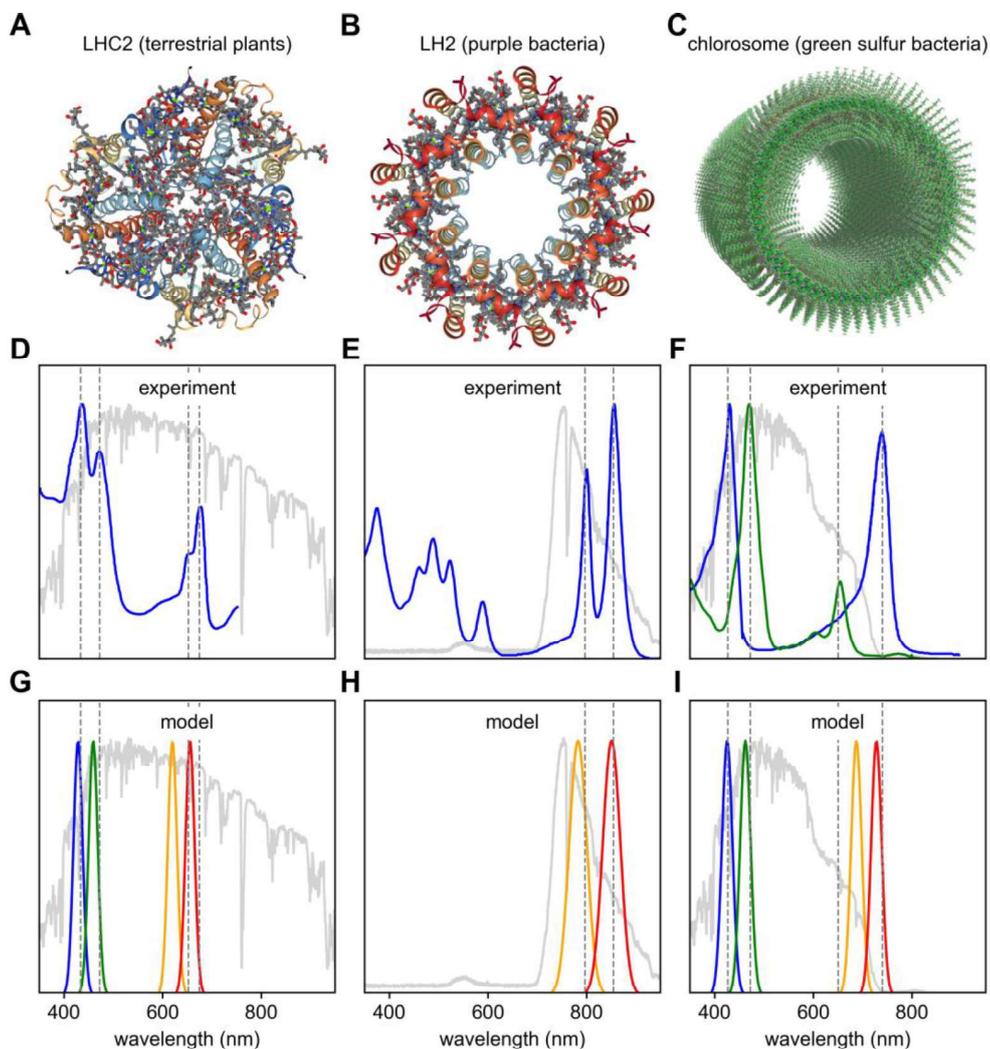


Figura 14. Absorción de luz por parte de las clorofilas de las plantas terrestres (A, D, G), la bacteria LH2 (B, E, H) y la bacteria verde del azufre (C, F, I). Fuente: “Quieting a noisy antenna reproduces photosynthetic light harvesting spectra”. Enlace: <https://bit.ly/3nGYjXj>

La **Figura 14** muestra el espectro de absorción de las plantas verdes terrestres “convencio-

nales”, así como de dos bacterias que también realizan la fotosíntesis pero en condiciones un poco distintas: bajo un conjunto de hojas (bacteria LH2) y a 2 metros bajo el agua (*chlorobi*, bacterias verdes del azufre). En la subfigura D se ha representado el espectro de absorción de las plantas verdes en azul y el espectro del Sol en gris. En la subfigura G se ha representado el modelo que los investigadores han hecho en este estudio, donde vemos que realmente hablamos de 4 colores o longitudes de onda de absorción en vez de 2, agrupadas en 2 grupos: azul-verde y amarillo-rojo. Así, ya conocemos los colores de la luz que son aprovechados por las plantas verdes para realizar la fotosíntesis.

En la imagen se han representado también las longitudes de onda aprovechadas por las dos bacterias mencionadas: LH2 y bacteria verde del azufre.

3.7.1. Importancia de la fotosíntesis

Resulta obvio que la fotosíntesis ha sido un proceso clave para el desarrollo de la vida (tal y como la conocemos hoy) en nuestro planeta. Nuestra atmósfera original era muy rica en CO₂, vapor de agua y nitrógeno, pero no tanto en oxígeno. Curiosamente, los primeros organismos vivos de nuestro planeta no necesitaban el oxígeno para sobrevivir. Esto cambió cuando el proceso de fotosíntesis comenzó en nuestro planeta por medio de algunas bacterias, aumentando así paulatinamente el nivel de oxígeno.

Hay que tener en cuenta también el papel fundamental de las plantas y la fotosíntesis en la fijación del CO₂ atmosférico. Es por ello por lo que fenómenos que acaban con grandes superficies forestales, como los incendios, son tan preocupantes desde el punto de vista del cambio climático.

3.8. La fotosíntesis artificial

Al igual que el ser humano está tratando de replicar el proceso de fusión nuclear en las estrellas con proyectos como el ITER, en la actualidad hay muchos esfuerzos investigadores centrados en la consecución de dispositivos que permitan llevar a cabo la **fotosíntesis artificial**.

Al igual que una célula fotovoltaica es capaz de convertir la luz del Sol en corriente eléctrica, la fotosíntesis artificial se basa en células solares capaces de replicar el proceso de fotosíntesis, esto es, de convertir agua, CO₂ y luz en energía, por ejemplo en **hidrógeno**.

En la actualidad hay varios proyectos de investigación que buscan hacer realidad este concepto, como el A-LEAF financiado por la comunidad europea y liderado por un grupo de investigación español¹.

¹<http://bit.ly/2iW6mUd>

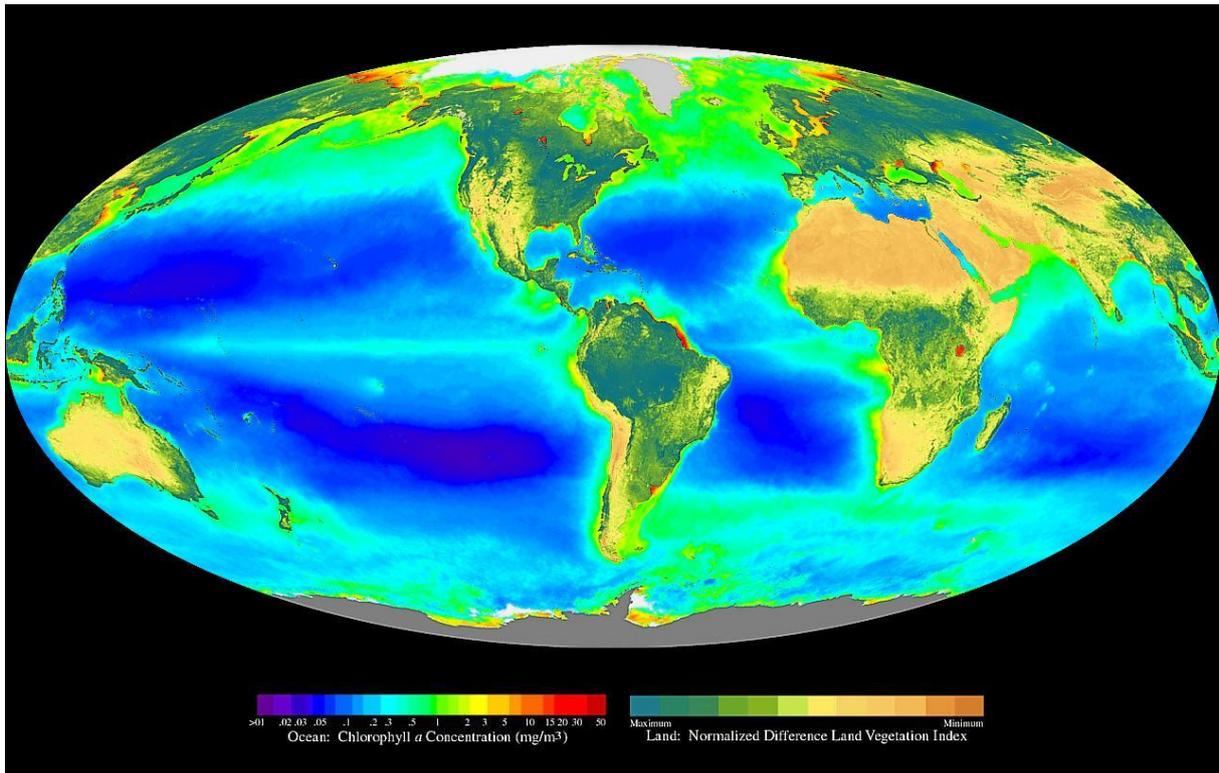


Figura 15. Distribución de la fotosíntesis en la Tierra (incluyendo la llevada a cabo por el fitoplancton en los océanos). Fuente: Wikimedia. Licencia: Dominio Público. <http://bit.ly/2z6x6b8>

Cuestión 3.6: Fotosíntesis Artificial

Busca información sobre proyectos en marcha centrados en la fotosíntesis artificial.

¿Cuál es su grado de madurez?

¿Crees que se trata de una tecnología con posibilidades de éxito en el futuro cercano?