

MONOGRAFÍA

# Cuantificación de la habitabilidad de los entornos naturales

Rolando Cárdenas Ortiz

Osmel Martín González

Noel Pérez Díaz

Laboratorio de Ciencia Planetaria, Facultad de Matemática, Física y  
Computación, Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas, Cuba

Jorge Horvath

Departamento de Astronomía, Instituto de Astronomía, Geofísica y Ciencias  
Atmosféricas, Universidad de São Paulo, Brasil

Liuba Peñate Alvariño

Unidad de Toxicología Experimental, Universidad de Ciencias Médicas  
Serafín Ruiz de Zárate Ruiz, Villa Clara, Cuba

Edición y Corrección: Anabel Amil

Rolando Cárdenas Ortiz, Osmel Martín González, Noel Pérez Díaz, Jorge Horvath, Liuba Peñate Alvariño, 2020

Editorial Feijóo, 2020

ISBN: 978-959-312-228-3



Editorial Samuel Feijóo, Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas, Carretera a Camajuaní, km 5 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba. CP 54830

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	4
1. La cuantificación de la habitabilidad.....	5
1.1 Índice de similaridad con la Tierra.....	7
1.2 Índices de habitabilidad acuáticos.....	8
1.2.1 La función de la luz.....	8
1.2.2 La función de la temperatura.....	9
1.3 Índices de habitabilidad terrestres.....	9
1.4 Habitabilidad cuantitativa desde el punto de vista ecológico.....	10
2. Casos de estudio.....	14
2.1 La habitabilidad en Alfa del Centauro.....	14
2.1.1 Alfa del Centauro B.....	14
2.1.2 Alfa del Centauro C.....	16
2.2 Evolución de la habitabilidad en la Tierra.....	19
2.2.1 Origen de la vida en la Tierra.....	19
2.2.2 Habitabilidad en el eón Arcaico.....	27
2.2.3 Habitabilidad en los eones Proterozoico y Fanerozoico.....	29
2.2.3.1 El choque radiacional extragaláctico.....	30
2.2.3.2 Las explosiones estelares.....	36
2.2.3.3 Impactos de cuerpos planetarios.....	56
3. El futuro de la vida en el Sistema Solar y en el Universo.....	58
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	60
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61

## INTRODUCCIÓN

En esta monografía se parte del principio filosófico sobre la unidad material del mundo, ampliamente favorecido por un abundante cúmulo de observaciones astrofísicas. Esto significa que las leyes más básicas de la naturaleza, formuladas por la física y la química, tienen validez en todo el Universo. Ello permite utilizar un modelo conceptual general de biogénesis, válido para cualquier parte del Universo observado. De esta manera, se considera que para la aparición de vida deben coexistir:

- Elementos químicos biogénicos (en la Tierra todas las especies conocidas contienen al menos CHON, P y S).
- Un solvente en el que los susodichos elementos puedan reaccionar para formar las complejas moléculas biológicas (en la vida en la Tierra es el agua).
- Una fuente de energía para vencer las barreras de activación típicas de las reacciones bioquímicas (luz para las especies fotosintéticas, energía de reacciones químicas para las quimiosintéticas).

Investigaciones que tuvieron en cuenta modelos modernos de nucleosíntesis y evolución estelar sugieren que cantidades mínimas necesarias de los mencionados ingredientes pudieron estar disponibles en el Universo aproximadamente 1 800 millones de años después del Big Bang, o sea, hace unos 12 000 millones de años [1, 2]. Por otro lado, el trabajo en [3] sitúa esta fecha en una época mucho más temprana: tan solo unos 10 o 17 millones de años después del Big Bang. En cualquier caso, teniendo en cuenta que el dominio de la materia no relativista (núcleos atómicos) sobre la radiación relativista (fotones) ocurrió unos 70 000 años después del Big Bang, la aparición y establecimiento de vida en el Universo solo fue posible

ya en la etapa de dominio de la materia, y ha continuado en la actual etapa de dominio de la energía oscura.

Por otro lado, la cuantificación de la habitabilidad es un área interdisciplinar y emergente dentro de las Ciencias Naturales, y se pueden distinguir tres corrientes para abordarla [4]. La corriente astrobiológica se enfoca en investigar las condiciones básicas para que los productores primarios puedan existir en cualquier lugar del Universo; la biogeoquímica se centra en la interacción organismo-entorno, mientras que en la ecológica se observa más la interacción entre los organismos dentro del contexto del ecosistema. Estas tres corrientes se complementan, pero aún quedan esfuerzos por hacer para una mejor comprensión del complejo fenómeno de la vida en sus diversas escalas espacio-temporales. En consonancia con esto, los objetivos de esta monografía son:

- Analizar la evolución de la habitabilidad en el Universo, desde las enormes escalas cosmológicas hasta las de planeta y ecosistema.
- Estimar cuantitativamente la habitabilidad de diversos entornos naturales, incluyendo la elaboración y aplicación de nuevos índices cuantitativos de habitabilidad.
- Proponer la inclusión de índices cuantitativos de habitabilidad en modelos de ecosistemas de nuestro país.

## 1. La cuantificación de la habitabilidad

La existencia de cuerpos planetarios rocosos en el Sistema Solar y el frecuente descubrimiento de exoplanetas en las dos últimas décadas han propulsado el desarrollo de criterios de habitabilidad genéricos, lo cual ha motivado cierta interacción entre astrobiólogos, científicos planetarios y ambientalistas.

De especial interés es la Teoría Cuantitativa de la Habitabilidad (TCH), de carácter emergente e interdisciplinar, que traza un puente entre la ecología y la astrobiología, y cuyo objetivo es explicar la distribución, abundancia y productividad de la vida. Es escalable en espacio y tiempo, de manera que puede ser aplicada tanto a escala de planeta como de ecosistema, a cualquier tipo de vida y en cualquier etapa de la evolución del Universo [5, 6]. Su principal postulado plantea que, en principio, un índice de habitabilidad puede representarse como un producto de funciones  $f_i$  de conjuntos de variables ambientales  $\{x_j\}$  que influyen sobre la vida:

$$IH = \prod_{i=1}^n f_i(\{x_j\}) \quad (1)$$

Un aspecto crucial de los índices de habitabilidad es que a través de estos se puede hacer una estimación de la productividad primaria neta (PPN) [7]:

$$PPN = IH \cdot PPN_{m\acute{a}x} \quad (2)$$

donde  $PPN_{m\acute{a}x}$  es la productividad primaria neta máxima que el ambiente puede sostener indefinidamente. Es la máxima velocidad a la que se puede formar la materia viviente (usualmente normalizada respecto al área o volumen del ecosistema).

Teniendo en cuenta las tres premisas del modelo general de biogénesis, se propone una metodología general para construir índices de habitabilidad [6]:

- a) Aspecto mineral: Se necesitan varios elementos químicos para formar estructuras estables, mientras que otros (o sus compuestos) pueden ser dañinos (como la salinidad excesiva en zonas costeras). Esto se representa mediante la función  $f(M)$ .
- b) Aspecto mezclador (solvente): Los elementos biogénicos necesitan de un solvente para combinarse y formar las complejas moléculas biológicas. Esto se representa mediante la función  $f(S)$ .

- c) Aspecto energético: Se necesita una fuente de energía para vencer las barreras de potencial de las reacciones bioquímicas. Esto se representa mediante la función  $f(E)$ .

Así, se puede reescribir (1) como:

$$IH = f_M f_S f_E \quad (3)$$

A continuación se presentan las métricas o índices utilizados para cuantificar la habitabilidad de diversos entornos naturales.

### 1.1 Índice de similaridad con la Tierra

Este índice fue desarrollado en el Laboratorio de Habitabilidad Planetaria de la Universidad de Puerto Rico en Arecibo [5, 8]:

$$IST = \prod_{i=1}^n \left( 1 - \frac{|x_i - x_{i0}|}{|x_i + x_{i0}|} \right)^{\frac{w_i}{n}} \quad (4)$$

donde  $x_i$  es una propiedad planetaria,  $x_{i0}$  es su valor en la Tierra actual,  $w_i$  es un exponente de peso y  $n$  es la cantidad de propiedades planetarias. El conjunto de variables se seleccionó para considerar dos ambientes del planeta: interior y exterior. La temperatura superficial y la velocidad de escape se relacionan con la velocidad de las reacciones bioquímicas en la superficie del planeta y con la retención de la atmósfera (*IST* exterior), mientras que el radio medio y la densidad se relacionan con la geodinámica (*IST* interior). La Tierra actual da  $IST = 1$ . Los planetas con *IST* en el rango comprendido entre 0,8 y 1 se consideran aptos para hospedar vida más o menos similar a la de la Tierra actual. Aquellos con índice en el rango 0,6-0,8 (como el actual Marte) son muy fríos o muy calientes, y podrían hospedar extremófilos. Un cuerpo planetario con  $IST < 0,6$  se considera no habitable.

## 1.2 Índices de habitabilidad acuáticos

En los ecosistemas acuáticos basados en la fotosíntesis, las variables ambientales que más influyen en la habitabilidad están relacionadas con la luz y la temperatura (aspecto energético), y con los nutrientes y la salinidad (aspecto mineral). La selección de las variables para construir un índice de habitabilidad depende del contexto en que este se aplicará. En la Tierra actual, la luz es el factor natural más importante que limita la producción primaria, lo cual es cierto para todos los ecosistemas, especialmente cuando es de noche [6, 9, 10]. Además, en los ecosistemas acuáticos, este es el factor natural que experimenta las variaciones más extremas, tanto espacial como temporalmente [9, 10]. La esencia de esta variabilidad parte de la inclinación del eje de rotación planetario y de la traslación de los planetas alrededor de su estrella madre, lo cual determina la variabilidad estacional. Incluso en los planetas que orbitan alrededor de enanas rojas, en anclaje de marea, es de esperar que la luz sea el factor limitante [6]. Al ser las enanas rojas las estrellas más abundantes en el Universo observado (representan alrededor del 75 % de las estrellas en nuestra galaxia), un índice de habitabilidad acuático bien diseñado podría aplicarse a muchos planetas.

Teniendo en cuenta lo expuesto en este epígrafe, se propone el índice de Habitabilidad Primaria Acuática (HPA), considerando el aspecto energético de la vida [6]:

$$HPA = f_E = f(L)f(T) \quad (5)$$

donde  $f(L)$  y  $f(T)$  son funciones de la luz y la temperatura, respectivamente.

### 1.2.1 La función de la luz

Para construir esta, se utiliza el modelo  $E$  de fotosíntesis [11, 6]:

$$\frac{P}{P_S}(z) = \frac{1 - \exp(-E_{PAR}/E_S)}{1 + E_{UV}^*(z)} \quad (6)$$

donde  $P(z)$  y  $P_S$  son, respectivamente, la tasa de fotosíntesis a la profundidad  $z$ , y la tasa máxima posible.  $E_{PAR}(z)$  es la irradiancia de la radiación fotosintéticamente activa ( $PAR$  por sus siglas en inglés) a la profundidad  $z$ ; mientras que  $E_{UV}^*(z)$  es la irradiancia de la radiación ultravioleta a la profundidad  $z$ , convolucionada con un espectro de acción biológica  $\varepsilon(\lambda)$ , el cual pondera las longitudes de onda ultravioleta según su potencial para inhibir la fotosíntesis. Así, las expresiones para el cálculo de las mencionadas irradiancias son:

$$E_{PAR}(z) = \sum_{\lambda} E(\lambda, z) \Delta\lambda \quad (7)$$

$$E_{UV}^*(z) = \sum_{\lambda} \varepsilon(\lambda) E(\lambda, z) \Delta\lambda \quad (8)$$

donde las irradiancias espectrales  $E(\lambda, z)$  son calculadas mediante la ley de Lambert-Beer:

$$E(\lambda, z) = E(\lambda, 0^-) e^{-K(\lambda)z} \quad (9)$$

El conjunto de coeficientes de atenuación  $K(\lambda)$  se obtuvo mediante interpolación lineal a partir de las tablas de referencia de la clasificación óptica de las aguas oceánicas y costeras de Jerlov [12, 13]. Este método permitió obtener coeficientes de atenuación  $K(\lambda)$  en el rango de 220-700 nm para cada nanómetro, de manera que en las ecuaciones (7) y (8),  $\Delta\lambda = 1 \text{ nm}$ . Las irradiancias  $E(\lambda, 0^-)$ , justo debajo de la superficie oceánica, se obtienen sustrayendo la luz reflejada en la interface atmósfera-océano:

$$E(\lambda, 0^-) = [1 - R] E(\lambda, 0^+) \quad (10)$$

donde  $E(\lambda, 0^+)$  es la luz incidente justo encima de la superficie oceánica, y  $R$  es el coeficiente de reflexión, calculado mediante las fórmulas de Fresnel para óptica.

El parámetro  $E_S$  es la irradiancia que da el 63 % de la tasa máxima posible de fotosíntesis si la radiación ultravioleta (UV) es despreciable. Es una

medida de la eficiencia de la especie en el uso de la radiación fotosintéticamente activa: cuanto menor es su valor, mayor es la eficiencia.

La tasa de fotosíntesis normalizada  $P(z)/P_S$  depende de la profundidad  $z$ . Su valor máximo es 1, el cual solo se logrará a una determinada profundidad, teniendo valores más pequeños por encima y por debajo de esta. Por eso, cuando se trabaja con toda la zona fótica, el promedio  $\langle P(z)/P_S \rangle$  tomará valores comprendidos en el rango 0-1, pero en realidad nunca alcanzará el valor 1. Por lo tanto, con el fin de enmarcar el rango de valores de  $f(L)$  entre 0 y 1, se normaliza  $\langle P(z)/P_S \rangle$  dividiéndolo por el máximo promedio posible  $\langle P(z)/P_S \rangle_{\text{ópt}}$ . Estas condiciones óptimas para la fotosíntesis se alcanzan en el tipo óptico I de aguas oceánicas (en el contexto de la clasificación óptica de las aguas oceánicas de Jerlov [6, 12]). Por tanto, como función de la luz  $f(L)$  se propone [6]:

$$f(L) = \frac{\left\langle \frac{P(z)}{P_S} \right\rangle}{\left\langle \frac{P(z)}{P_S} \right\rangle_{\text{ópt}}} \quad (11)$$

### 1.2.2 La función de la temperatura

Se utiliza:

$$f(T) = 1 - \left( \frac{T_{\text{ópt}} - T}{T_{\text{ópt}} - 273} \right)^2 \quad (12)$$

Esta ecuación es simétrica respecto a  $T_{\text{ópt}}$ , que es la temperatura óptima para la vida en la mayoría de los productores acuáticos primarios (alrededor de 298 K).

### 1.3 Índices de habitabilidad terrestres

Se utiliza el modelo  $\pi$  de productividad biológica [14]:

$$\frac{\Pi}{\Pi_{m\acute{a}x}} = f(T)f(p_{CO_2}) \quad (13)$$

donde  $f(T)$  es la misma que aparece en la ecuación (12), y  $f(p_{CO_2})$  es una función que depende de la presión (concentración) de dióxido de carbono en la atmósfera, ya que este gas es necesario para la fotosíntesis.

#### 1.4 Habitabilidad cuantitativa desde el punto de vista ecológico

Para tener una visión holística de la habitabilidad, es necesario tener en cuenta la interacción entre las especies, sello distintivo del enfoque ecológico (biológico) de la habitabilidad. Representativo de esto es el Modelo Inclusivo de Simulación Acuática (CASM por sus siglas en inglés), el cual ha descrito exitosamente los principales rasgos del proceso de eutrofización en lagos [15]. Este proceso se caracteriza por el enriquecimiento de nutrientes, especialmente fósforo y nitrógeno, que conlleva al incremento de los niveles de fitoplancton, mientras que otros grupos, tales como el zooplancton y los peces, se tornan relativamente escasos. La ecuación (14) representa la dinámica de los nutrientes en el ecosistema, donde  $I_N$  es la entrada externa del nutriente limitante  $N$ ;  $r_N$  es el ritmo de pérdida de nitrógeno por diversas causas (sedimentación, flujo al exterior, etc.), mientras que el tercer término del miembro derecho (md) modela el consumo de nutrientes por los productores primarios (fitoplancton  $X$ ). La forma de este término está inspirada en la cinética de Michaelis-Menten, que originalmente se aplicó a procesos simples en los que participaban las enzimas. En este caso,  $\gamma$  es el cociente entre la masa de nutriente (nitrato) y la biomasa;  $r_1$  es el ritmo máximo de crecimiento del fitoplancton; y  $k_1$  es una constante de semisaturación (cuando  $N = k_1$ , el término tendrá un 2 en el denominador). El cuarto término del md representa la entrada del nutriente  $N$  por la descomposición del detrito  $D$ , considerando que  $d_4$  es la velocidad de descomposición de  $D$ :

$$\frac{dN}{dt} = I_N - r_N - \frac{r_1 NX}{k_1 + N} + \gamma d_4 D \quad (14)$$

La producción primaria en el ecosistema es representada en la ecuación (15), donde el consumo de nutrientes por el fitoplancton  $X$  está representado por el primer término del md, y el segundo término muestra cómo el zooplancton  $Y$  depreda al fitoplancton  $X$ . En este término,  $f_1$  es la velocidad con que el zooplancton se alimenta, y  $k_2$  es la constante de semisaturación. El último término contiene la mortalidad del fitoplancton  $d_1$  y el ritmo  $e_1$  con que el mismo sale del ecosistema:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{r_1 NX}{k_1 + N} - \frac{f_1 X^2 Y}{k_2 + X^2} - (d_1 + e_1) X \quad (15)$$

La ecuación (16) representa la dinámica del consumidor primario: el zooplancton  $Y$ . El primer término del md muestra cómo este consume al fitoplancton  $X$ , mientras que el segundo indica cómo  $Y$  es consumido por el consumidor secundario: los peces zooplanctívoros  $Z$ . El parámetro  $\eta$  representa la eficiencia en la asimilación del zooplancton (el significado de los restantes parámetros puede deducirse de las explicaciones dadas para las ecuaciones [14] y [15]):

$$\frac{dY}{dt} = \frac{\eta f_1 X^2 Y}{k_2 + X^2} - \frac{f_2 Y^2 Z}{k_3 + Y^2} - (d_2 + e_2) Y \quad (16)$$

La dinámica del consumidor secundario  $Z$  se muestra en la ecuación (17). En esta el parámetro  $Z^*$  evita la situación no realista de versiones iniciales del CASM, en las que los peces podían surgir de estados en los que habían resultado extintos.

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{\eta f_2 Y^2 Z}{k_3 + Y^2} - (d_3 + e_3) (Z - Z^*) \quad (17)$$

La ecuación (18) representa la dinámica del detrito D (materia fecal y X, Y, Z muertos), la que deviene fuente de nutriente N después de su descomposición:

$$\frac{dD}{dt} = \frac{(1-\eta)f_1 X^2 Y}{k_2 + X^2} + \frac{(1-\eta)f_2 Y^2 Z}{k_3 + Y^2} + d_1 X + d_2 Y + d_3 Z - (d_4 + e_4) D \quad (18)$$

Téngase presente que los  $d_i$  son ritmos (velocidades) de muerte o descomposición, mientras que los  $e_i$  son ritmos de eliminación del ecosistema. Como se infiere del sistema de ecuaciones diferenciales de la (14) a la (18), el modelo CASM tiene cinco variables dinámicas y diecinueve parámetros, lo cual lo hace un modelo muy inclusivo (en [15] se presentan más detalles sobre este).

Sin embargo, la formulación presentada no considera la distribución vertical de las especies en la columna de agua. Esta es una omisión importante cuando se considera un escenario de estrés UV, dada la atenuación de la radiación debido a los fenómenos de absorción y dispersión. Para incluir este efecto, en [16, 17] se considera al fitoplancton como el único nivel trófico estresado por el UV, ya que está obligado a ser superficial porque necesita radiación fotosintéticamente activa. Para incluir el rol de algunos componentes del ecosistema (detrito y fitoplancton) como bloqueadores UV, se modificó el modelo CASM mediante la consideración del coeficiente de mortalidad del fitoplancton no como una constante, sino como una función de los mencionados componentes:

$$d_1 = e^{-h_x X - h_D D} d \quad (19)$$

Esta dependencia exponencial es motivada por la ley de Lambert-Beer:  $h_x$  y  $h_D$  son coeficientes para la atenuación UV del fitoplancton y el detrito, respectivamente, mientras que  $d$  es el coeficiente de mortalidad del fitoplancton cuando no se considera el efecto del bloqueo UV. La figura 1 muestra el comportamiento cualitativo del modelo en función del parámetro  $d_1$ .

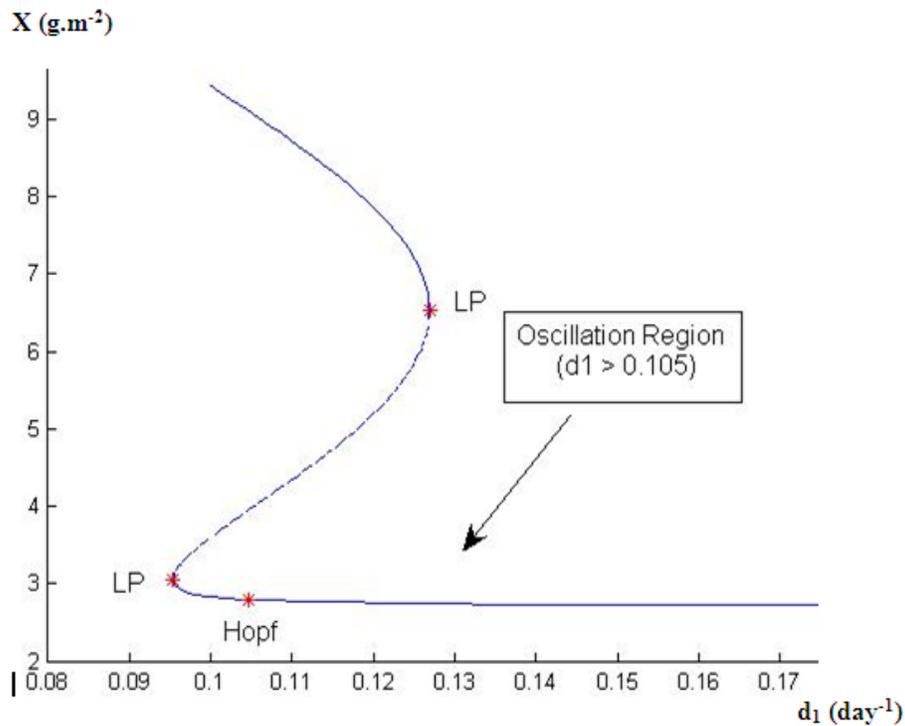


Fig. 1 La biestabilidad aparece para ritmos de mortalidad del fitoplancton ( $d_1$ ) en el rango aproximado 0,095-0,125 (la línea sólida representa estados estables u oscilatorios, la línea a trazos representa estados transientes). La bifurcación de Hopf a  $d_1 = 0,105 \text{ day}^{-1}$  marca la transición de un estado estable a uno oscilatorio.

Cuando el parámetro  $d_1$  se incrementa hasta  $d_1 = 0,105$  (solo un 5 % por encima del valor de referencia  $d_1 = 0,1$  en [15]), el estado estable claro emerge como un estado oscilatorio. Para valores mayores ( $d_1 > 0,125$ ), la biestabilidad se rompe y el estado oscilatorio es la única posibilidad. Estos estados alternativos se encuentran en CASM para otras regiones de valores de los parámetros [15].

## 2. Casos de estudio

### 2.1 La habitabilidad en Alfa del Centauro

El sistema estelar Alfa del Centauro consta de dos estrellas tipo solar (Alfa del Centauro A y B), y una enana roja (Alfa del Centauro C o Próxima), las cuales giran alrededor de su centro de masas. Dado que es el sistema más cercano a nuestro Sistema Solar, es uno de los principales blancos en la búsqueda de vida en nuestra vecindad cósmica.

#### 2.1.1 Alfa del Centauro B

Especial interés ha recibido Alfa del Centauro B, en parte porque determinadas simulaciones computacionales muestran la posibilidad de existencia de planetas rocosos en su zona «habitable» (concebida de la manera tradicional, esta es la zona en que puede haber agua líquida en la superficie planetaria) [18].

En [8] se hace una estimación preliminar de la habitabilidad de estos exoplanetas potenciales, utilizando las métricas de habitabilidad representadas en las ecuaciones (4), (6) y (13). Para esto, se consideraron solo los once planetas situados dentro de la zona habitable.

Para utilizar la ecuación (13), se asumió una atmósfera similar a la de la Tierra actual, por lo que el valor numérico de  $f(p_{CO_2})$  es el mismo para todos los exoplanetas. Este valor se obtuvo asumiendo  $T_{opt} = 298$  K y las condiciones promedio similares a la de la Tierra actual:  $T = 288$  K y  $I/I_{max} = 0,5$  [14]. Para obtener las temperaturas en las superficies planetarias, el espectro de emisión de Alfa del Centauro B se obtuvo utilizando el programa de cómputo estelar Spectrum [19]. Posteriormente se asumió un medio transparente entre la estrella y el tope de las atmósferas

planetarias, obteniéndose las correspondientes constantes solares (estelares) mediante:

$$E_{top} = \left(\frac{r}{R}\right)^2 E_{star} \quad (20)$$

donde  $r$  es el radio de Alfa del Centauro B,  $R$  es su distancia hasta el tope de la atmósfera planetaria, mientras que  $E_{star}$  y  $E_{top}$  son, respectivamente, la irradiancia emitida por la estrella, y la que llega al tope de la atmósfera del planeta. Las temperaturas en las superficies planetarias se calcularon usando el modelo climático unidimensional:

$$\frac{E_{top}}{4}(1 - A_{in}) = (1 - A_{out})\sigma T_s^4 \quad (21)$$

En esta ecuación,  $A_{in}$  y  $A_{out}$  son los albedos de las atmósferas planetarias a las radiaciones que entran y salen respectivamente, y  $\sigma$  es la constante de Steffan-Boltzmann.

La tabla 1 muestra los resultados de los cálculos de habitabilidad según las métricas (4) y (13).

Tabla 1 Valores numéricos para dos índices de habitabilidad en exoplanetas de Alfa del Centauro B

Planeta	IST	$T_s$ ; K	Productividad Biológica ( $\pi/\pi_{m\acute{a}x.}$ )
a1	0,92	291	0,55
a5	0,93	290	0,54
a6	0,87	271	0
a8	0,91	267	0
b2	0,86	336	0

b3	0,74	349	0
b4	0,92	285	0,44
b7	0,91	310	0,43
b8	0,68	364	0
c1	0,77	373	0
c3	0,91	282	0,37

Se aprecia concordancia en las predicciones de las métricas  $IST$  y  $III_{max}$ . El modelo  $E$  de fotosíntesis falló, pues predijo tasas de fotosíntesis incluso en océanos en ebullición, propiciado en gran medida por la no inclusión explícita de la temperatura en la ecuación (6). Cálculos más recientes muestran concordancia de este modelo con  $IST$  y  $III_{max}$  si se le incluye una función de la temperatura como la dada por la ecuación (12). En esta modelación preliminar, se concluye que los hipotéticos planetas rocosos a1, a5, b7 y c3 tienen buen potencial para hospedar vida fotosintética no muy diferente a la de la Tierra actual, mientras que a1 y a5 parecen tener un potencial ligeramente mejor que la Tierra actual, ya que su índice  $III_{máx}$  es mayor que 0,5.

### 2.1.2 Alfa del Centauro C

La estrella Alfa del Centauro C, también llamada Próxima del Centauro, es una enana roja, por lo que la mayor parte de la radiación que emite (85 %) es en la banda infrarroja. Debido a que las enanas rojas son relativamente frías, es muy probable que la zona de habitabilidad de sus planetas caiga en la

región de anclaje de marea o rotación sincrónica, en la que el planeta siempre da la misma cara a la estrella. Esto implica que un hemisferio esté siempre iluminado y el otro siempre oscuro, con complicaciones climáticas severas debido al drenaje de energía térmica del hemisferio iluminado hacia el oscuro [20, 21]. Además, las enanas rojas son muy «inquietas», con frecuentes tormentas que implican emisiones de rayos X potencialmente letales [22]. Lo anterior sugiere que la probabilidad de que los planetas que orbitan estas estrellas alberguen vida es baja. Sin embargo, dado que son las más abundantes del Universo observado (75 % en la Vía Láctea), son de gran interés para la astrobiología [23].

En [24] se aplica la métrica de habitabilidad dada por la ecuación (6) para estimar la habitabilidad de un planeta hipotético que orbite alrededor de Próxima del Centauro dentro de la zona de habitabilidad. Se utilizó la aproximación de cuerpo negro, por lo que las irradiancias espectrales  $E_{star}(\lambda)$  emitidas por la estrella se calcularon mediante la ley de Planck:

$$E_{star}(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{k_B T \lambda}} - 1} \quad (22)$$

donde  $h$  es la constante de Planck,  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío,  $\lambda$  es la longitud de onda de la radiación,  $k_B$  es la constante de Boltzmann y  $T$  es la temperatura efectiva de la estrella ( $3\,042 \pm 117$  K). Las irradiancias espectrales en el tope de la atmósfera planetaria  $E_{top}(\lambda)$  se calcularon aplicando la ecuación (20) a cada longitud de onda. Las irradiancias espectrales en la superficie del océano  $E(\lambda, 0^+)$  se calcularon mediante:

$$E(\lambda, 0^+) = [1 - A_{in}] E_{top}(\lambda) \quad (23)$$

donde  $A_{in}$  es el albedo de la atmósfera planetaria para la radiación infrarroja, asumiéndose similar al de la Tierra actual ( $A_{in} = 0,4$ ). En [24] se presentan más detalles sobre el transporte radiativo en el océano y la aplicación de la ecuación (6). Las tablas 2 y 3 muestran las tasas de fotosíntesis promedio para una capa superior oceánica (capa mezclada) de 40 metros de

profundidad, considerándose una alta eficiencia en el uso de la radiación fotosintéticamente activa ( $E_S = 2 \text{ W/m}^2$ ).

Tabla 2 Promedios de las tasas de fotosíntesis en aguas oceánicas del exoplaneta para especies con alta eficiencia en el uso de la radiación fotosintéticamente activa ( $E_S = 2 \text{ W/m}^2$ )

Tipo de aguas	$\left\langle \frac{P}{P_s} \right\rangle$
Aguas claras (tipo I)	51,7
Aguas intermedias (tipo II)	34,0
Aguas turbias (tipo III)	22,7

Tabla 3 Promedios de las tasas de fotosíntesis en aguas oceánicas actuales de la Tierra para especies con alta eficiencia en el uso de la radiación fotosintéticamente activa ( $E_S = 2 \text{ W/m}^2$ )

Tipo de aguas	$\left\langle \frac{P}{P_s} \right\rangle$
Aguas claras (tipo I)	75,9
Aguas turbias (tipo III)	79,1

La productividad resulta menor que en la Tierra actual, pero no es baja, de manera que en principio podría ser posible la vida fotosintética en un exoplaneta que orbite alrededor de una enana roja si los organismos desarrollan la capacidad de utilizar parte de la banda infrarroja para la fotosíntesis.

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la vida en planetas que orbitan alrededor de enanas rojas enfrentaría complicaciones climáticas serias, entre las que se encuentran las frecuentes tormentas de rayos X (a razón de una

por día terrestre), que depositarían considerables dosis de radiación ionizante en el tope de la atmósfera planetaria. No obstante, en [22] se realiza una modelación preliminar de la afectación resultante en la fotosíntesis y en la sobrevivencia celular, concluyéndose que la fotoprotección de las aguas oceánicas puede ser suficiente para mantener moderadas tasas de actividad biológica.

## 2.2 Evolución de la habitabilidad en la Tierra

### 2.2.1 Origen de la vida en la Tierra

El origen de la vida en la Tierra es un problema abierto. Algunos lo sitúan al comienzo del eón Arcaico, hace alrededor de 3 800 millones de años, edad probable de los primeros estromatolitos (colonias de cianobacterias), mientras que otros prefieren la fecha menos controversial de unos 3 500 millones de años atrás, ya bien dentro del Arcaico Temprano (con un intervalo temporal entre 3 800 y 3 400 millones de años atrás). Sin embargo, el fechado de algunos zircones ha dado como resultado 4 400 millones de años de edad. Como estos minerales requieren de agua líquida para formarse, han dado lugar a la hipótesis de una Tierra Temprana Fría durante lo que se podría llamar el Hadeico Medio, entre 4 400 y 4 000 mil millones de años atrás [25]. En este escenario, los océanos de magma de la Tierra primigenia ya habrían sido sustituidos por océanos de agua líquida con temperaturas apropiadas para la vida. Por otro lado, hasta fines del siglo pasado predominó la suposición de que la fotosíntesis fue el primer mecanismo de producción primaria durante la evolución de la vida. Sin embargo, el descubrimiento de la quimiosíntesis en ecosistemas hidrotermales y en la biosfera subterránea, y la construcción de árboles filogenéticos universales, parecen mostrar que esta antecedió a la fotosíntesis [26,4]. No obstante, en [27,16] se estima un razonable potencial fotosintético para los crudos escenarios del Hadeico Medio y el Arcaico

Temprano. Para ello, se asumieron irradiancias espectrales en la superficie del planeta similares a las del escenario del Arcaico Tardío (situado aproximadamente entre 3 000 y 2 500 millones de años en el pasado) estudiado en [28]. Esto se justifica, *grosso modo*, porque en todos los casos el Sol ya había pasado su fase inicial de T Tauri, caracterizada por una mayor proporción de emisiones ultravioletas (UV), y la atmósfera en ningún caso había desarrollado aún el escudo UV que es la capa de ozono. Además, aunque la composición exacta de aquellas paleoatmósferas aún está en debate, las proporciones de varios de los componentes principales eran, al parecer, similares para los tres casos ( $N_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$ ). Para la transferencia radiativa en el océano se asumieron coeficientes de atenuación de la luz similares a los del Arcaico Tardío: las llamadas «aguas más claras» de Smith y Baker [29], de la misma manera que se hizo en [28]. En el Arcaico Temprano la fracción de cobertura continental de la superficie de la Tierra era aún menor que en el Arcaico Tardío (alrededor de 10 %), lo cual propiciaba océanos muy claros: las aguas más claras de Smith y Baker son un poco más claras que las más claras en la clasificación de Jerlov (las de tipo I). Se obtuvieron los campos de luz subacuáticos para ángulos solares cenitales de 0 y 60 grados: el primero provee máxima irradiación con el Sol directamente encima de la cabeza, mientras que el segundo da irradiancias similares a las del mediodía actual en altas latitudes. Dado que las principales rutas bioquímicas han mostrado ser similares en la evolución de la vida en la Tierra, para el parámetro de eficiencia fotosintética se consideró  $E_S = 20 \text{ W/m}^2$ , obtenido de promediar 16 valores reportados en [11] para fitoplancton antártico actual. Este, al igual que en el Arcaico, también se encuentra sometido a estrés UV debido a los problemas con la capa de ozono. El valor  $E_S = 20 \text{ W/m}^2$  también se obtuvo para un fitoplancton generalizado del océano actual en el proceso de calibración del índice de Habitabilidad Primaria Acuática (ver subsección 1.2 y [6]), lo cual aporta consistencia para esta suposición. No obstante, para considerar la natural variabilidad biológica, también se consideraron valores de 15 y 25  $\text{W/m}^2$ .

Entonces se aplicó la ecuación (6) para obtener las tasas de fotosíntesis. Las figuras 2 y 3 muestran el potencial fotosintético para los dos ángulos solares cenitales seleccionados.

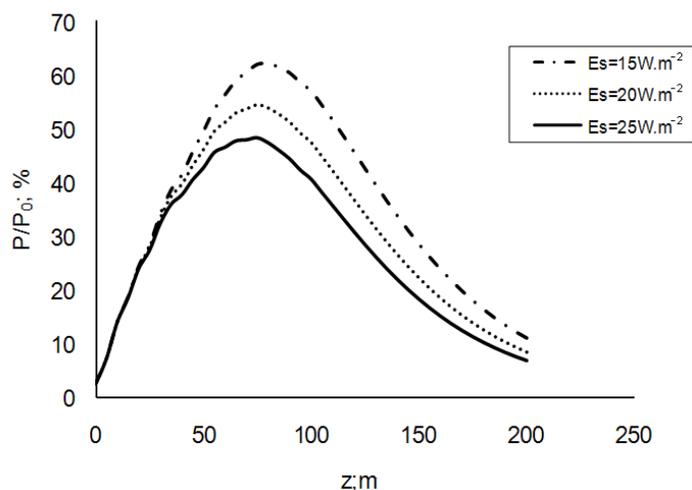


Fig. 2 Tasas de fotosíntesis relativas vs. profundidad oceánica en el Hadeico Medio y Arcaico Temprano, para un ángulo solar cenital de 0 grados

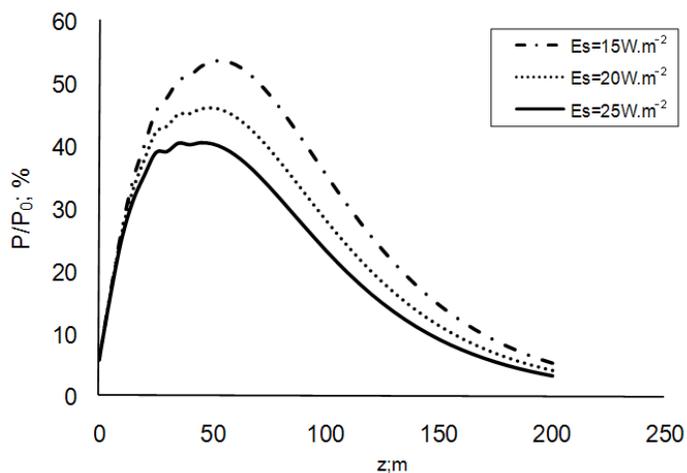


Fig. 3 Tasas de fotosíntesis relativas vs. profundidad oceánica en el Hadeico Medio y Arcaico Temprano, para un ángulo solar cenital de 60 grados

En ambos casos, cerca de la superficie se observa un bajo potencial debido a la inhibición causada por la radiación UV, pero debido a que esta se atenúa más rápidamente en el océano que la radiación fotosintéticamente

activa (RFA), se alcanza el máximo potencial a decenas de metros de profundidad. Por debajo de este, predomina el efecto de la atenuación de la RFA. Las figuras muestran el potencial para la fotosíntesis que tendría una célula en un océano en calma. Sin embargo, la Tierra rotaba mucho más rápido en aquel entonces, por ejemplo: una vuelta completa en solo 15 horas a inicios del Arcaico. Esto muy probablemente induciría fuertes vientos en la superficie oceánica, lo cual a su vez produciría un régimen activo de circulación vertical en la capa superior de este (la llamada capa mezclada). Las células atrapadas en corrientes con componente vertical estarían expuestas a distintas intensidades y espectros de UV y RFA, debido al hundimiento y la resuspensión periódicos. Si bien para el Arcaico Tardío es razonable asumir capas mezcladas de 30 m de profundidad [28], para el Hadeico Medio y el Arcaico Temprano la mayor velocidad de los vientos podría haberlas llevado hasta 40 m. Por esto, en [27,16] se asume una circulación tipo Langmuir (corrientes verticales circulares de hasta 40 m de profundidad), y se calcula la tasa promedio de fotosíntesis de una célula atrapada en esta. Para ello, las irradiancias promedio recibidas por la célula en un ciclo se calcularon mediante:

$$\overline{E_{inh}^*} = \frac{\sum_{z=0}^{z_L} \sum_{\lambda=200nm}^{400nm} E(\lambda, z) \epsilon_E(\lambda) \Delta\lambda \Delta z}{z_L} \quad (24)$$

$$\overline{E_{PAR}} = \frac{\sum_{z=0}^{z_L} \sum_{\lambda=400nm}^{700nm} E(\lambda, z) \Delta\lambda \Delta z}{z_L} \quad (25)$$

donde  $z_L$  es la máxima profundidad a la que la circulación de Langmuir se extiende (40 m en este caso). La tabla 4 muestra la influencia del mezclado vertical en las tasas de fotosíntesis.

Tabla 4 Valores promedio, en un ciclo completo, del potencial fotosintético de una célula atrapada en una corriente vertical circular de Langmuir

$E_s$ ; $W/m^2$	15	20	25
$P/P_s$ ; % ( $sza = 0$ deg)	7,12	7,10	7,07
$P/P_s$ ; % ( $sza = 60$ deg)	15,8	15,2	14,5

Se muestra que este sencillo patrón de circulación vertical podría reducir al menos el potencial fotosintético por la exposición a la radiación UV cerca de la superficie.

En cualquier caso, en [27,16] para el Hadeico Medio y el Arcaico Temprano se arriban a las mismas conclusiones que en [28] para el Arcaico Tardío: pudo haber existido una biota oceánica, quizá numéricamente abundante pero de baja diversidad, debido a la intensa radiación UV en las primeras decenas de metros del océano, producida por la ausencia de una capa de ozono en la atmósfera. En las mencionadas eras, la superficie del planeta era muy hostil para la vida, no solo por la intensa irradiación UV, sino por otros fenómenos ambientales, entre los que destacan los frecuentes impactos de asteroides. Por esto, la hipótesis de un origen subterráneo de la vida, o en las profundidades oceánicas (donde no llega la luz solar), es la que predomina en estos momentos, con la quimiosíntesis como probable mecanismo original de producción primaria [26, 4]. Sin embargo, en [30] se argumenta que en algunos de estos ecosistemas la fotosíntesis también podría tener un potencial no despreciable. En efecto, una bacteria verde del azufre que utiliza luz como fuente de energía fue colectada en la vecindad de la fumarola negra TY de la cordillera del Pacífico Este [31], lo cual motivó que se modelara el potencial para la fotosíntesis en este ecosistema [30]. El

orificio de TY está a una latitud norte de 9 grados 49,63', a una longitud oeste de 104 grados 17,37', y a una profundidad de 2 391 m, donde la luz solar no llega. Por ende, la luz que utiliza esta bacteria es de origen geotérmico: los fotones que emite el agua caliente. La temperatura del agua en el orificio de TY es 647 K, por lo que se consideró despreciable el flujo de fotones en la parte visible del espectro y solo se consideró la banda infrarroja (IR). Para obtener las irradiancias espectrales, se consideró que el agua cercana al orificio era también muy caliente, por lo que emitiría fotones IR, y por tanto sería más realista considerar una fuente distribuida de radiación que una fuente puntual o esférica. Se asumió una aproximación de cuerpo gris para el agua, con una emisividad  $\varepsilon = 0,95$ . Las irradiancias espectrales  $E(\lambda, T)$  se calcularon mediante:

$$E(\lambda, T) = \varepsilon E_{bb}(\lambda, T) \quad (26)$$

donde  $E_{bb}(\lambda, T)$  son las irradiancias espectrales del cuerpo negro a una temperatura  $T$ , dadas por la ley de Planck (ecuación [22]). Las irradiancias totales para la RFA fueron calculadas entonces mediante la ecuación (7). La bacteria colectada en TY absorbe IR fundamentalmente en el rango de 700-800 nm, pero teniendo en cuenta otros reportes sobre bacterias que podrían absorber a longitudes de onda incluso mayores que 1 000 nm, también se exploraron las posibilidades de absorción hasta  $\lambda_f = 1\ 100$  nm y  $\lambda_f = 1\ 300$  nm. Entonces se utilizó la ecuación (6), considerando  $E_{inh} = 0$ , debido a la ausencia de UV en este ecosistema. El parámetro de eficiencia fotosintética para las mayorías de las especies está en el rango  $E_S = 2-100$  W/m<sup>2</sup>. Sin embargo, considerando la excepcional capacidad de las bacterias verdes del azufre para utilizar incluso luz IR, también se consideraron valores menores. En realidad, la inspección visual de la figura 5 en [32] sugiere  $E_S \cong 5$  W/m<sup>2</sup>. Por otro lado, la figura 4 incluida en el presente trabajo muestra el potencial fotosintético vs.  $T$  para organismos muy eficientes que solo utilizan luz entre 700 y 800 nm. Se observa que a temperaturas iguales o un poco menores que las del orificio de TY, el

potencial normalizado es del orden de  $10^{-3}$ . Esto sugiere que para que en estos ecosistemas haya una mayor proporción de fotosíntesis respecto a la quimiosíntesis, los organismos fotosintéticos deben utilizar un mayor rango de la banda IR.

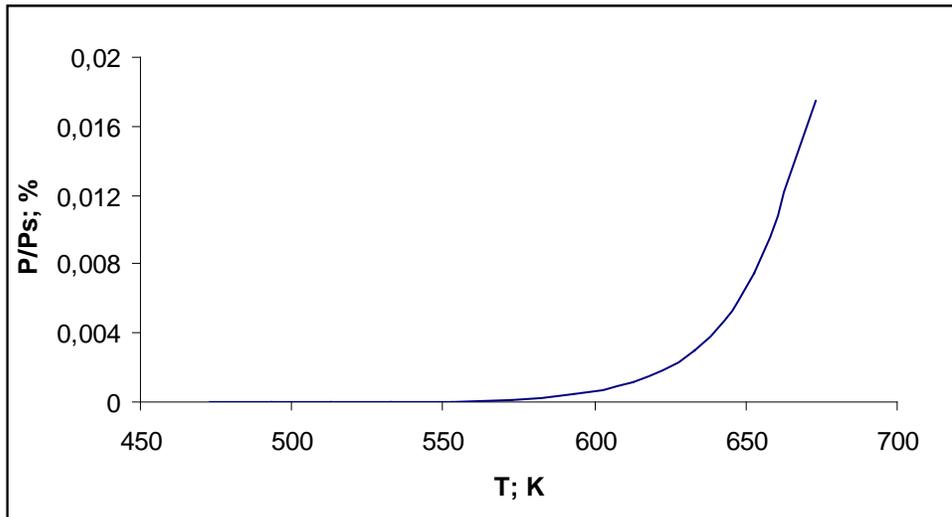


Fig. 4 Tasas de fotosíntesis en función de la temperatura para organismos muy eficientes ( $E_S = 0,5 \text{ W/m}^2$ ) que solo utilizan luz IR entre 700 y 800 nm

Las figuras 5 y 6 muestran el potencial cuando se usan los rangos 700-1 100 nm y 700-1 300 nm, para organismos con una alta eficiencia fotosintética ( $E_S = 0,5-2,5 \text{ W/m}^2$ ), como es de esperar para fotoautótrofos que vivan en entornos con niveles tan tenues de luz.

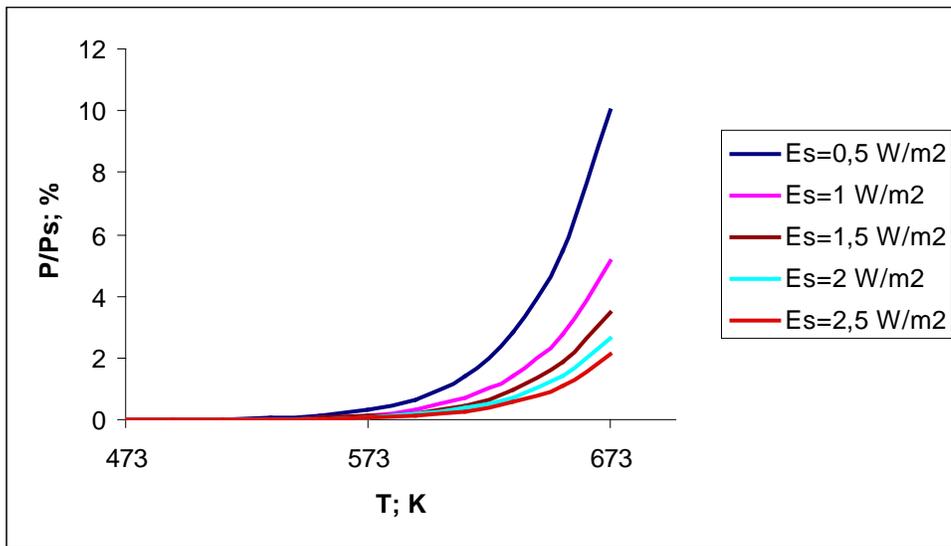


Fig. 5 Tasas de fotosíntesis normalizadas cuando se utiliza el rango IR 700-1 100 nm

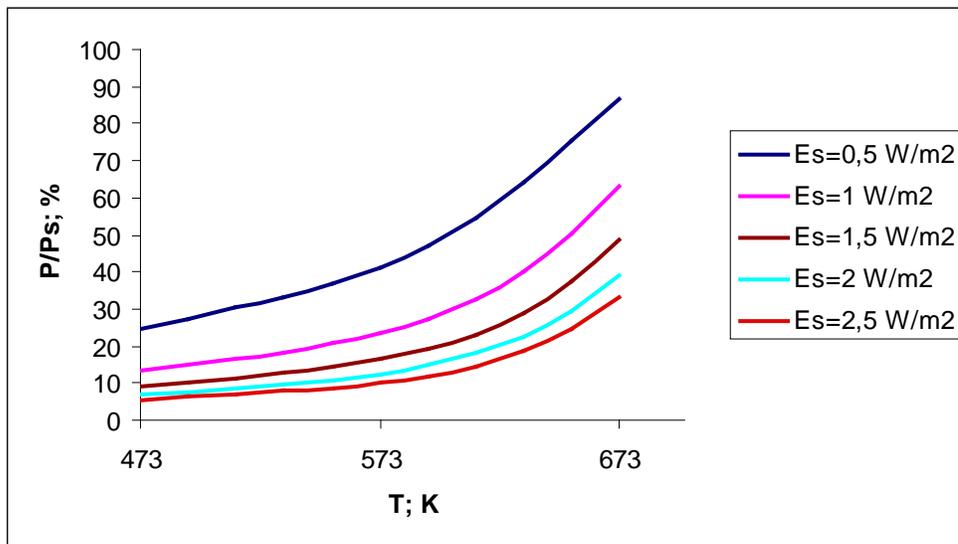


Fig. 6 Tasas de fotosíntesis normalizadas cuando se utiliza el rango IR 700-1 300 nm

Las figuras 5 y 6 muestran un potencial fotosintético comparable al de ecosistemas que se encuentran en la zona fótica oceánica (0-200 m de profundidad). Sin embargo, cabe señalar que los ecosistemas en los abismos oceánicos aún no han sido suficientemente estudiados. Los datos

disponibles hoy día apuntan a la quimiosíntesis como mecanismo dominante en la producción primaria, y a la fotosíntesis con modestas contribuciones. Se habla sobre la posible existencia de estos ecosistemas en las profundidades oceánicas de otros cuerpos planetarios, como el satélite Europa del planeta Júpiter.

### 2.2.2 Habitabilidad en el eón Arcaico

Como se infiere de la subsección anterior, desde el punto de vista fotobiológico, la habitabilidad en el eón Arcaico estaba restringida por la alta irradiación UV en la superficie del planeta. A pesar de que el Sol era un 25 % menos luminoso que en la actualidad, la ausencia de bloqueadores UV en la atmósfera, en particular la ausencia de una capa de ozono, imponía un crudo régimen fotobiológico en la superficie del planeta. Sin embargo, es probable que hubiera bloqueadores UV en el océano. En particular, las formaciones de bandas de hierro en el océano Arcaico apuntan a la presencia del ion  $\text{Fe}^{2+}$  en concentraciones suficientes como para proveer un significativo bloqueo del UV. Este llegaría a las superficies oceánicas mediante afloramiento hidrotérmico desde el océano profundo, y estaría mientras las condiciones de anoxia se mantuvieran [33-35]. Sin embargo, después del advenimiento de la fotosíntesis oxigénica, el oxígeno eliminaría este hierro soluble reducido de la capa mezclada oceánica [36], por lo que esta protección UV no existiría en el Arcaico Tardío. Por ende, la habitabilidad en esta era sería similar a la del Hadeico Medio, como se plantea en la subsección anterior y en [27, 28]. En [37] se presenta la modelación del potencial fotosintético en las eras del Arcaico Temprano y Arcaico Medio, suponiendo la presencia de  $\text{Fe}^{2+}$  como bloqueador oceánico de UV. Las irradiancias espectrales a nivel del mar se obtuvieron como se explica en la subsección 2.2.1. Para el océano de estas eras, se consideraron las concentraciones de  $\text{Fe}^{2+}$  sugeridas en [38], lo cual implica intensa absorción de UV, especialmente en las bandas UV-C (200-280 nm) y UV-B (280-320 nm). Los coeficientes de atenuación en el

rango 210-310 nm, con una concentración de  $\text{Fe}^{2+}$  de  $10^{-4}\text{mol/dm}^3$ , fueron inferidos de datos reportados en [39]. El resto de los coeficientes (310-700 nm), fueron los de Smith y Baker para las aguas más claras [29,28]. A manera de comparación, también se realizaron los cálculos para el Arcaico Tardío, cuando ya el océano carecía de iones  $\text{Fe}^{2+}$ ; en este caso en todo el rango de longitudes de onda se utilizaron los coeficientes de Smith y Baker. Se utilizó un espectro generalizado de acción biológica  $\varepsilon(\lambda)$  que tiene en cuenta tanto el daño al ADN como la inhibición de fotosistemas en el aparato fotosintético obtenido para fitoplancton de regiones templadas [40], en el que se aprecia la gran inhibición que causa el UV-C (222-280 nm). El rango de longitudes de onda de este espectro es de 222-399 nm, ya que incluso sin ozono atmosférico las irradiancias espectrales por debajo de 222 nm son despreciables a nivel del mar. Se seleccionaron dos patrones de circulación: océano en reposo y corrientes circulares verticales (circulación de Langmuir). Las temperaturas superiores en el Arcaico pueden haber implicado capas mezcladas menos profundas, causando una mayor exposición del fitoplancton al UV solar. Es difícil imponer restricciones a la profundidad de la capa mezclada en este eón [28], por lo que en [37] se seleccionaron celdas de Langmuir con profundidades de 20, 40 y 100 m. La tabla 5 muestra los resultados para las celdas de 40 m de profundidad.

Tabla 5 Tasas de fotosíntesis promedio en una celda de Langmuir de 40 m de profundidad

	<b><math>E_s = 2 \text{ W/m}^2</math></b>		<b><math>E_s = 50 \text{ W/m}^2</math></b>		<b><math>E_s = 100 \text{ W/m}^2</math></b>	
	0°	60°	0°	60°	0°	60°

<b>Arcaico Temprano</b>	67,2	80,0	59,8	54,8	46,3	36,2
<b>Arcaico Tardío</b>	51,8	61,9	44,8	39,5	33,3	25,0

Se observa que la presencia de un bloqueador oceánico del UV como el  $\text{Fe}^{2+}$  mejora notablemente el régimen fotobiológico en el Arcaico Temprano, creando un ambiente para la fotosíntesis definitivamente más favorable que el del Arcaico Tardío. Los resultados para celdas de Langmuir con otras profundidades arrojan conclusiones similares [37].

### 2.2.3 Habitabilidad en los eones Proterozoico y Fanerozoico

Durante el Arcaico Tardío la fotosíntesis oxigénica dotó de oxígeno al océano, y comenzó a hacerlo con la atmósfera. Esto contribuyó al establecimiento relativamente rápido de una capa de ozono en la atmósfera, pues con alrededor de  $10^{-1}$ - $10^{-2}$  PAL (Present Atmospheric Level) de  $\text{O}_2$  atmosférico, es suficiente para crear una capa de ozono más o menos similar a la actual. La etapa exacta en que ya se puede considerar formada una capa de ozono dentro del eón Proterozoico es aún controversial, pero la mayoría de las evidencias apunta a las eras Proterozoico Media y Proterozoico Tardía. La protección UV del ozono propició que la vida se diversificara y conquistara los continentes. Sin embargo, el verdadero Big Bang biológico ocurrió a inicios del eón Fanerozoico (542 millones de años atrás hasta el presente), en el llamado período Cámbrico: fue la llamada Explosión del Cámbrico. Esta se caracterizó por una extinción masiva de

gran parte de la biota precedente, para dar paso a la mayoría de los géneros que conocemos en el presente. No todas las probables causas de estas y de otras fluctuaciones de biodiversidad que se observan en el registro fósil de la Tierra se han estudiado a plenitud. En esta subsección se abordan algunas de las que tienen amplia incidencia en el régimen radiacional de los ecosistemas.

### 2.2.3.1 El choque radiacional extragaláctico

Varios fenómenos astrofísicos dentro de nuestra galaxia pueden depositar considerables dosis de radiaciones ionizantes en el tope de la atmósfera de la Tierra, dentro de los que destacan las explosiones estelares (incluyendo las de nuestro Sol). Se ha planteado la posibilidad de que esto haya influido en la evolución biológica, en el doble rol de las radiaciones ionizantes: esterilizante para muchas especies, y mutagénica para otras (estimulando la especiación). Por otro lado, existen indicios de que incluso radiaciones provenientes de fuera de nuestra galaxia hayan tenido influencia en la vida en nuestro planeta. En [41] se examina esta posibilidad en el contexto del choque radiacional extragaláctico, según el cual la Tierra recibe una dosis incrementada de rayos cósmicos de alta energía cuando se encuentra en el norte de nuestra galaxia [42]. Esto sucede porque la órbita del Sistema Solar alrededor del centro de la Vía Láctea no está en un plano, pues tiene ascensos (hacia el norte galáctico), y descensos (hacia el sur galáctico) periódicos. Cuando se está relativamente cerca del norte galáctico, se recibe una dosis mayor de radiación extragaláctica de alta energía, producto de la onda de choque resultante del movimiento acelerado de la Vía Láctea hacia el clúster de Virgo. Resulta muy interesante la coincidencia del período de este ciclo con el período de descensos en la biodiversidad detectado en el registro fósil: ambos tienen lugar en una época situada aproximadamente 62 millones de años atrás (ver [42] y referencias incluidas en esta). Esto constituyó motivación para realizar el trabajo publicado en [41]. Como

primera consideración, se tuvo en cuenta que cuando los rayos cósmicos de alta energía llegan al tope de la atmósfera, la interacción con los núcleos atómicos (fundamentalmente de nitrógeno y oxígeno si se trata de una atmósfera «moderna» como la Proterozoica y la Fanerozoica), genera cascadas de diversas partículas elementales de menor energía, las cuales constituyen los llamados rayos cósmicos secundarios. A nivel del mar llegan mayoritariamente protones, neutrones y muones. De estas, las de mayor poder penetrante en el océano son los muones, los cuales pueden viajar cientos de metros en la columna de agua oceánica. Por ello, en [41] se presenta la disminución de la fotosíntesis del fitoplancton que un flujo de muones de alta energía podría ocasionar. Para esto, es necesario incluir el efecto de las radiaciones ionizantes en el modelo E de fotosíntesis (ecuación [6]), ya que este solamente considera radiaciones electromagnéticas no ionizantes (UV no ionizante, visible e IR). En [41] se consideró que el modelo E fue desarrollado y probado en el fondo ordinario de radiación ionizante en la Tierra actual; entonces, para incluir fluctuaciones importantes del fondo de las radiaciones ionizantes, se propone:

$$\frac{P}{P_S}(z) = \frac{1 - \exp(-E_{PAR}/E_S)}{f_{ri}(z) + E_{UV}^*(z)} \quad (27)$$

donde  $f_{ri}(z)$  es la dosis normalizada de radiación ionizante absorbida a la profundidad oceánica  $z$ . Los estudios sobre el daño biológico de los muones en muestras no humanas son escasos [42]. Sin embargo, algunos estudios sugieren que las dosis son proporcionales al flujo total de muones, y que el factor fluencia/dosis tiene pocas variaciones con la energía [43-46]. En particular, la figura 1 en [46] muestra que los coeficientes de conversión de las dosis efectivas para los muones de alta energía ( $10^2$ - $10^5$  MeV) tienen una dependencia muy suave respecto a la energía de los muones. Teniendo en cuenta las referencias [43-46], en [41,42] se utiliza el *ansatz* de que, en el caso de una irradiación con muones de alta energía, la dosis incrementada  $D_{inc}$  en la superficie de la Tierra sería proporcional al flujo incrementado  $F_{inc}$ :

$$\frac{F_{inc}}{F_n} = \frac{D_{inc}}{D_n} \quad (28)$$

El subíndice  $n$  se refiere a las respectivas magnitudes durante el régimen ordinario o «normal». En [41] se propone como dosis normalizada de radiación ionizante a nivel del mar  $f_{ri}(0)$ :

$$f_{ri}(0) = \frac{D_{inc}}{D_n} = \frac{F_{inc}}{F_n} \quad (29)$$

Se considera que  $f_{ri}(z)$  es constante en la columna de agua, ya que esta función es un cociente y no una magnitud absoluta, y porque debido a la disponibilidad de RFA, la fotosíntesis se realiza fundamentalmente en los primeros 200 m del océano. Con estas consideraciones, el modelo modificado de fotosíntesis queda:

$$\frac{P}{P_S}(z) = \frac{1 - \exp(-E_{RFA}/E_S)}{f_{ri}(0) + E_{UV}^*(z)} \quad (30)$$

Este es un primer intento de cuantificar el efecto en la fotosíntesis del fitoplancton de la radiación ionizante en general, y de los muones en particular. Resulta interesante que cuando no hay desviación del flujo de radiación ionizante respecto al fondo promedio,  $f_{ri}(0) = 1$ , y se recupera el modelo E (ecuación [6]), como caso particular. En [42] se consideran dos casos extremos cuando la Tierra está en el norte galáctico:

- 1) Incremento mínimo de la radiación ionizante:  $f_{ri}(0) = 1,26$ .
- 2) Incremento máximo de la radiación ionizante:  $f_{ri}(0) = 4,36$ .

La tabla 6 muestra las tasas de fotosíntesis promedio para varios escenarios.

Tabla 6 Tasas de fotosíntesis promedio para escenarios con fondo radiacional normal e incrementado

Régimen radiacional	Latitud (grados)	Tipo óptico de agua oceánica	Tasas promedio de fotosíntesis <P/Ps>; %	
			Es = 2 W/m <sup>2</sup>	Es = 100 W/m <sup>2</sup>
Normal	0	I	90	25,8
		III	18,7	4,26
	30	I	89,4	23,4
		III	18,1	4,13
	60	I	75,6	12,0
		III	14,7	2,3
Incremento mínimo de radiación ionizante	0	I	72,2	21,1
		III	15,1	3,6

	30	I	71,7	19,1
		III	14,6	3,5
	60	I	61,3	10,1
		III	11,9	2,0
Incremento máximo de radiación ionizante	0	I	21,7	6,75
		III	4,68	1,37
	30	I	21,5	6,1
		III	4,5	1,3
	60	I	10,1	0,3
		III	3,8	0,9

La tabla 7 cuantifica la proporción en que la fotosíntesis se mantiene bajo el fondo radiacional de los muones.

Tabla 7 Reducción relativa de las tasas promedio de fotosíntesis (comparadas con el escenario con irradiación normal)

Régimen	Latitud	Tipo óptico de	Tasas promedio de
---------	---------	----------------	-------------------

radiacional	(grados)	agua oceánica	fotosíntesis <P/Ps>; %		
			Es = 2 W/m <sup>2</sup>	Es = 100 W/m <sup>2</sup>	
Incremento mínimo de radiación ionizante	0	I	80,2	81,8	
		III	80,7	84,5	
	30	I	80,2	81,6	
		III	80,7	84,7	
	60	I	81,1	84,2	
		III	81,0	87,0	
	Incremento máximo de radiación ionizante	0	I	24,1	26,2
			III	25,0	32,2
30		I	24,0	26,1	
		III	22,7	31,5	

	60	I	13,4	2,5
		III	25,9	39,1

Se observa que, para el caso de incremento mínimo de la radiación, para todas las latitudes, la reducción de las tasas de fotosíntesis es de alrededor del 20 %. Cuando el incremento es máximo, la reducción es drástica: esta cae 4 o 5 veces, y en algunas ocasiones aún más. Considerando que el fitoplancton es el eslabón inicial más importante del ensamblaje trófico oceánico, esto podría propiciar un importante descenso en la biodiversidad, reforzando la hipótesis expuesta en [42] de la existencia de una periodicidad de alrededor de 62 millones de años en la biodiversidad fósil.

### 2.2.3.2 Las explosiones estelares

El estadio final de las estrellas grandes (tipos O, B y A) se caracteriza por una violenta explosión en la que la mayor parte de la masa de la estrella es expulsada a temperatura y velocidad muy altas al medio interestelar. Solo dentro de este gas caliente a millones de grados de temperatura se forman los núclidos con número másico superior al 56 (hierro), por lo que estas explosiones juegan un papel fundamental en la evolución química del Universo: son las llamadas supernovas. También juegan un papel importante en la aparición de nuevos sistemas solares, pues fertilizan el espacio con los elementos químicos imprescindibles, y con frecuencia sacan del equilibrio hidrostático a las nubes moleculares gigantes de hidrógeno y helio, para que a partir de estas se formen nuevos sistemas solares (como fue el caso de nuestro Sistema Solar). Sin embargo, una explosión de tipo supernova, con el frecuentemente concomitante brote de rayos gamma (BRG), puede depositar cantidades enormes de radiación ionizante en el tope de las

atmósferas de planetas que se encuentren en sus cercanías, poniendo en riesgo la vida en estos, si es que existe. Por ende, es importante modelar el riesgo real que los BRG's poseen para la vida, especialmente en nuestro planeta Tierra. El primer elemento a analizar sería la frecuencia con que ocurren en la Vía Láctea (aunque respecto a la radiación de BRG y supernovas extragalácticas, a nuestro planeta llegan sobre todo neutrinos, y la atenuación con la distancia implica que solo los galácticos pueden ser peligrosos para la vida en la Tierra). Se considera que la frecuencia disminuye con la metalicidad (en astrofísica se consideran no metales solo el hidrógeno y el helio, principales componentes de las nubes moleculares que originan las estrellas; los demás elementos químicos se consideran metales). Como la metalicidad disminuye con la edad del Universo, se plantea que la frecuencia de los BRG ha venido disminuyendo. En [47] se modela la frecuencia  $r(t)$  de BRG por galaxia como una función exponencial que cae con el tiempo  $t$ :

$$r(t) = r(0)\exp(t/\tau) \quad (31)$$

donde  $r(0)$  es la frecuencia en el comienzo del Universo, y  $\tau$  es la constante de decaimiento. En la parametrización original, se consideró la edad del Universo como  $t_U = 15$  Ga y  $\tau = 2,5$  Ga. En [48] se incluyen estimados más recientes:  $t_U = 13$  Ga y  $\tau = 2$  Ga. Con estas suposiciones se explora la frecuencia para el tiempo de existencia de la Tierra ( $\cong 5$  Ga). Los resultados, normalizados al valor estimado actual  $r(t_U) = 10^4/\text{Ga}$ , se presentan en la figura 7.

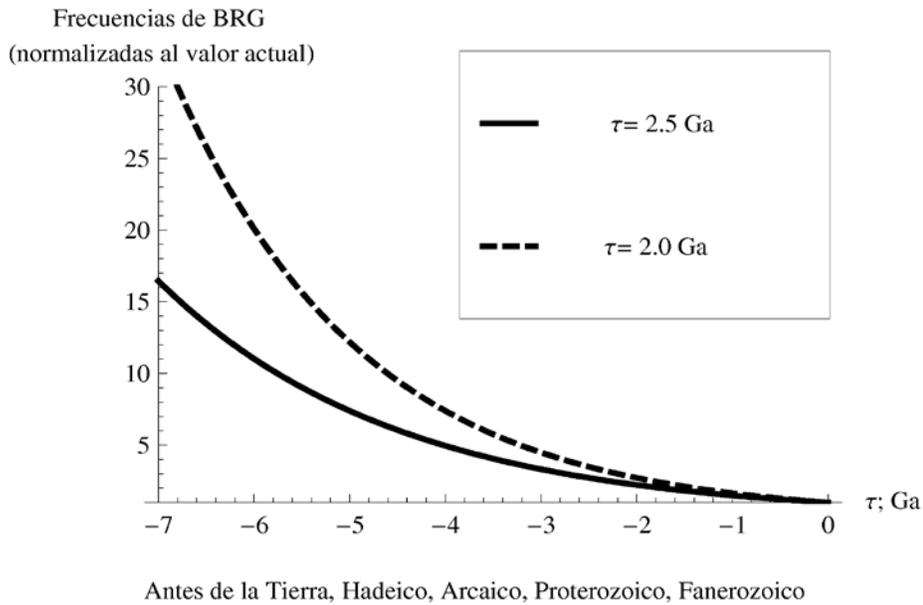


Fig. 7 Frecuencias estimadas de BRG durante la historia geológica de la Tierra

En dependencia del valor de  $\tau$ , se observa una frecuencia entre cinco y diez veces superior para el eón Hadeico y entre tres y cinco veces superior para el Arcaico. La frecuencia es un orden superior para etapas previas a la formación del Sistema Solar, lo cual es interesante si se tiene en cuenta que la edad promedio de los planetas de tipo terrestre en la Vía Láctea es alrededor de 2 Ga superior a la de la Tierra [49]. El primer efecto a corto plazo que experimentaría un planeta alcanzado por un BRG sería el reprocesamiento de la radiación gamma en su atmósfera, el cual por lo general resultaría en un brusco aumento de la radiación UV a nivel del mar, llamado flash UV. En el presente, la capa de ozono es la protección atmosférica más eficiente de nuestro planeta contra los efectos dañinos del UV solar sobre los seres vivos. De manera análoga, el flash UV sería parcialmente bloqueado por el ozono, dependiendo la eficiencia del bloqueo de la localización de la fuente del UV en la atmósfera, de la distribución del ozono y del valor total de la columna de ozono atmosférico [48]. El flash UV es el resultado de las desexcitaciones de los átomos y moléculas después de su interacción con la radiación gamma primaria del BRG. Por tanto, la

principal fuente del UV estará localizada a alturas donde la energía depositada alcanza sus valores más altos. La estructura del perfil de energía depositado está determinada por el espectro incidente y por el grosor de la atmósfera, siendo prácticamente independiente de la composición de esta [50]. Para computar el perfil de la deposición de energía en la atmósfera, se sigue el procedimiento esbozado en [51,16]. De acuerdo con esos trabajos, la radiación gamma de alta energía se atenúa progresivamente al pasar por las capas de la atmósfera, debido a los procesos de absorción y dispersión de Compton. Esta atenuación se modela por la ley de Lambert-Beer con los correspondientes coeficientes másicos de atenuación atmosférica. Se considera una atmósfera exponencial bien mezclada (excepto el ozono) con una escala de altitud  $H_0 = 8$  km, y densidad y presión superficiales de  $1,3 \times 10^{-3}$  g/cm<sup>3</sup> y 1 atm, respectivamente. La figura 8 muestra la energía depositada normalizada a su máximo valor.

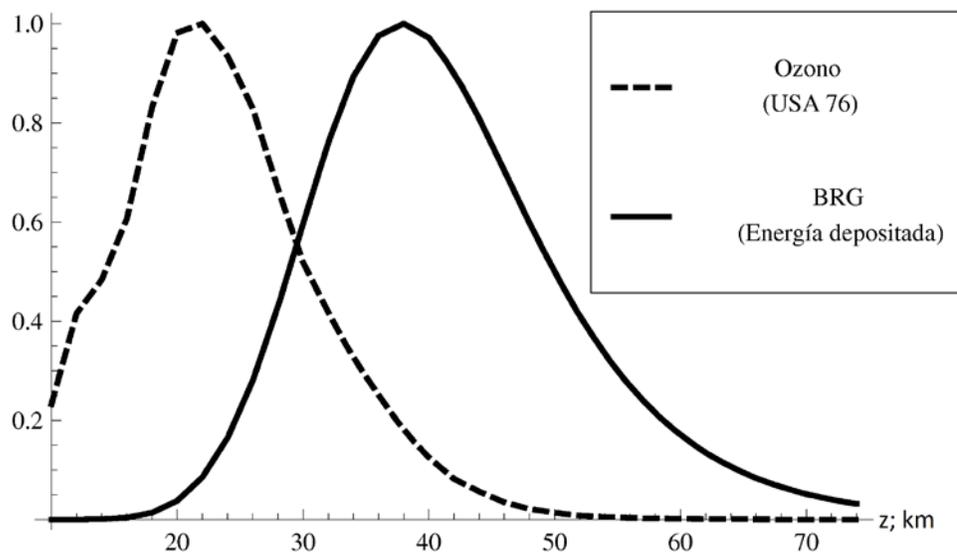


Fig. 8 Perfiles de deposición de energía y del ozono, ambos normalizados respecto a sus mayores valores

En el caso de la atmósfera contemporánea, se observa el máximo de producción de ozono en la estratosfera a unos 22 km de altura (se consideraron como referencia valores medios anuales reportados para Standard USA, 76 Atmosphere at 45 N). Sin embargo, la máxima emisión de la fuente del flash UV ocurre a unos 40 km de altura, 18 km por encima de la máxima producción de ozono. Más del 97 % de la columna total de ozono está por debajo de 40 km, y 84 % por debajo de los 30 km, donde la energía depositada cae a la mitad de su máximo valor. Todo esto implica un bloqueo relativamente eficiente del flash UV por la capa de ozono, en atmósferas como las modernas (Fanerozoico y Proterozoico Tardío, de 0,8 Ga hasta el presente). Para la atmósfera del Proterozoico Medio (2,3-0,8 Ga antes del presente), con un contenido de O<sub>2</sub> de 10<sup>-1</sup>-10<sup>-2</sup> PAL, se tiene una capa de ozono más fina, pero más cercana a la troposfera (1,5 km más baja por cada orden de disminución del contenido de O<sub>2</sub>) [52], lo cual puede redundar en una adecuada protección ante el flash UV, si la atmósfera es gruesa (pues mientras más cercano está el ozono a la troposfera, su eficiencia en la atenuación del UV es mayor). Para las atmósferas con contenidos de O<sub>2</sub> en el rango 10<sup>-3</sup>-10<sup>-5</sup> PAL (Proterozoico Temprano y Arcaico), el bajo contenido de ozono podría implicar un flash UV muy intenso en la superficie planetaria, con consecuencias drásticas para la biota no protegida. Si se tiene en cuenta que la frecuencia de los BRG era superior en aquel entonces, se tiene un indicador sobre el rol potencial que estos eventos pueden haber jugado en la evolución de la vida en los planetas rocosos de la Vía Láctea.

Una vez considerada la frecuencia de los BRG y la potencial protección que brindan las atmósferas planetarias, ahora se presenta la distancia a la que un emisor de BRG puede ser peligroso para la Tierra, pues no todos los que se originan dentro de la Vía Láctea lo son. En [51,16] se presentan detalles de esa modelación. Se calculan las irradiancias biológicas efectivas E\* utilizando un espectro de acción biológica  $\varepsilon(\lambda)$  para daño ADN [28, 53], y se definen y calculan las fluencias biológicas efectivas F\* [51] mediante:

$$F^* = E^* \Delta t \quad (32)$$

donde  $\Delta t$  es el tiempo de exposición al UV. Dada la variabilidad entre las especies en cuanto a su resistencia a las radiaciones, definir un daño biológico significativo resulta borroso. Se modificó el criterio en [54] para la acción de un BRG en el Fanerozoico: en lugar de utilizar irradiancias biológicas efectivas, en [51] se introducen las fluencias biológicas efectivas (ecuación [32]) para estimar el daño biológico potencial del UV. Se asume la siguiente condición para tener una significativa mortalidad marina por el flash UV:

$$F_{GRB}^* = nF_{Sun}^* \quad (33)$$

donde  $F_{GRB}^*$  y  $F_{Sun}^*$  son las fluencias biológicas efectivas debidas al flash UV del BRG y el UV del Sol, respectivamente, y  $n$  es un número real mayor que cero. Esto significa que en un tiempo de exposición de 10 s (flash UV), un organismo estaría expuesto a una fluencia biológica efectiva  $n$  veces mayor que la que recibe del Sol en un día. Parece razonable esperar una significativa mortalidad de habitantes superficiales tanto en mar como en tierra ya para  $n = 1$ , pues los mecanismos de reparación celular tendrían poco tiempo para actuar durante los diez segundos del flash UV y posteriormente vendrían secuelas. En cuanto a la exposición al Sol, se tuvo en cuenta que en el Arcaico Temprano el día duraba unas 15 horas, lo cual fue aumentando hasta las 24 horas actuales. Se tomó un valor medio de 20 horas y 10 para la exposición al Sol. Las diferencias en la duración del día y en latitud no cambian sustancialmente los resultados [51,16]. Ahora se define la irradiancia biológica efectiva adimensional  $E_{ad}^*$ :

$$E_{ad}^* = \frac{E_{GRB}^*}{I_{GRB}^{top}} \quad (34)$$

donde  $I_{GRB}^{top}$  es el flujo total del BRG en el tope de la atmósfera. Combinando las ecuaciones (32-34) se obtiene:

$$E_{ad}^* I_{GRB}^{top} \Delta t_{GRB} = n E_{Sun}^* \Delta t_{Sun} \quad (35)$$

La fluencia del BRG en el tope de la atmósfera es:

$$I_{GRB}^{top} \Delta t_{GRB} = \frac{E_{\gamma}}{\Delta \Omega \times D^2} \quad (36)$$

En la expresión anterior,  $E_{\gamma} = 5 \times 10^{43}$  J es la energía gamma,  $\Delta \Omega$  es el ángulo sólido fijado a 0,01 sr [55], y  $D$  es la distancia al progenitor del BRG. Sustituyendo la ecuación (36) en la ecuación (32) y resolviendo para  $D$ , se obtiene la expresión para calcular las distancias críticas desde las cuales una emisión del BRG causaría una significativa mortalidad en la superficie de la Tierra:

$$D = \sqrt{\frac{E_{\gamma} \times E_{ad}^*}{\Delta \Omega \times \Delta t_{Sun} \times n \times E_{Sun}^*}} \quad (37)$$

Para estimar  $E_{Sun}^*$  para las distintas atmósferas, se propone un esquema aproximado. Se considera que la atmósfera Arcaica estudiada en [28] corresponde a una atmósfera con  $10^{-5}$  PAL. De la figura 5 de esta referencia se infieren valores aproximados de 80 W/m<sup>2</sup> y 20 W/m<sup>2</sup> para ángulos solares cenitales de 0 y 60 grados, respectivamente. Como un promedio planetario aproximado en [51], se toma 50 W/m<sup>2</sup>. Luego se usa la tabla 3 de [56], donde los  $E_{Sun}^*$  están normalizados al valor actual, lo cual permite calcular los valores absolutos de  $E_{Sun}^*$  para todas las atmósferas, teniendo el valor absoluto de una de ellas (50 W/m<sup>2</sup> para  $10^{-5}$  PAL). La tabla 8 muestra la energía UV que alcanza la superficie, expresada como fracción de la energía original incidente en el tope de la atmósfera.

Tabla 8 Energía UV que alcanza la superficie planetaria, expresada como fracción de la energía original incidente en el tope de la atmósfera

<b>O<sub>2</sub>; PAL</b>	<b>UV-A 315-400 nm</b>	<b>UV-B 280-315 nm</b>	<b>UV-C 130-280 nm</b>	<b>Total 130-600 nm</b>
10 <sup>0</sup>	2,330 x 10 <sup>-02</sup>	6,311 x 10 <sup>-04</sup>	3,043 x 10 <sup>-12</sup>	2,022 x 10 <sup>-01</sup>

$10^{-1}$	$5,867 \times 10^{-02}$	$2,789 \times 10^{-03}$	$2,418 \times 10^{-09}$	$2,480 \times 10^{-01}$
$10^{-2}$	$6,484 \times 10^{-02}$	$5,161 \times 10^{-03}$	$4,817 \times 10^{-07}$	$2,583 \times 10^{-01}$
$10^{-3}$	$6,598 \times 10^{-02}$	$8,943 \times 10^{-03}$	$5,802 \times 10^{-05}$	$2,643 \times 10^{-01}$
$10^{-4}$	$6,616 \times 10^{-02}$	$1,187 \times 10^{-02}$	$2,338 \times 10^{-03}$	$2,699 \times 10^{-01}$
$10^{-5}$	$6,617 \times 10^{-02}$	$1,210 \times 10^{-02}$	$2,933 \times 10^{-03}$	$2,707 \times 10^{-01}$

El espectro incidente en la superficie del planeta se puede ver en la figura 9.

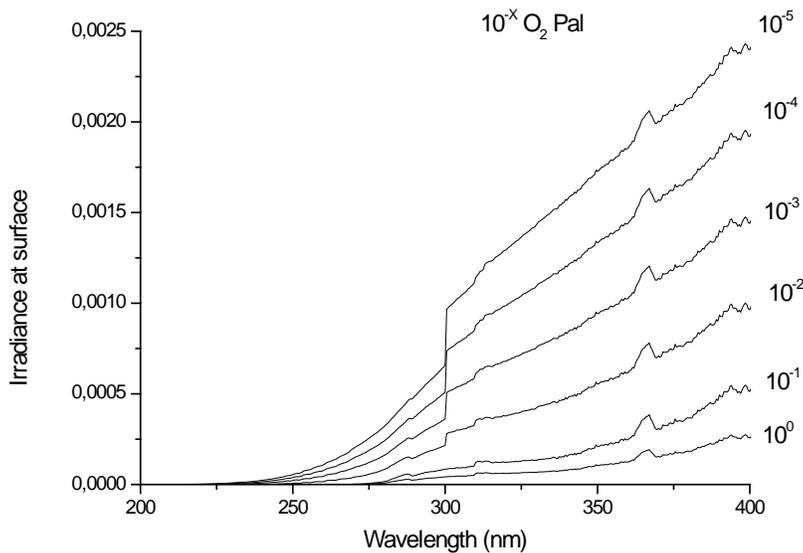


Fig. 9 Irradiancias UV que alcanzan la superficie planetaria para diferentes atmósferas y longitudes de onda, normalizadas respecto a la irradiancia total del BRG en el tope de la atmósfera

Este espectro se convoluciona con el de acción biológica  $\varepsilon(\lambda)$  para obtener las irradiancias biológicas efectivas. La figura 10 muestra estas irradiancias adimensionales para las atmósferas estudiadas.

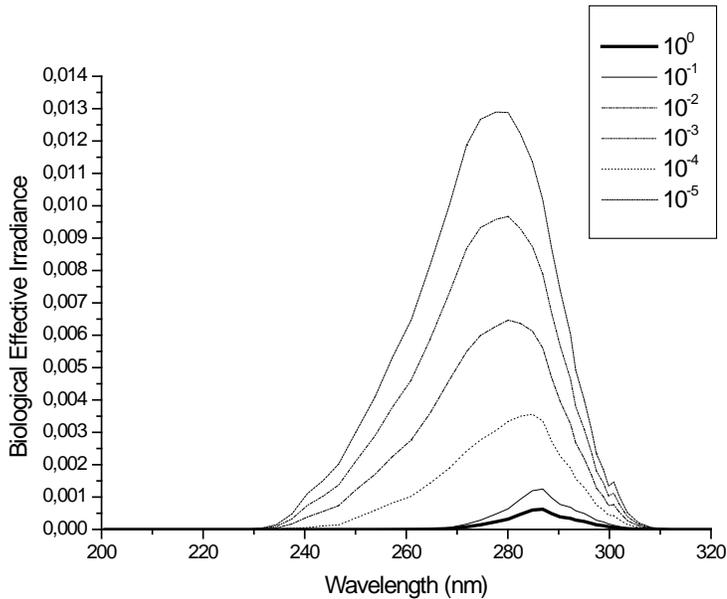


Fig. 10 Irradiancias biológicas efectivas normalizadas respecto a la irradiancia total del BRG en el tope de las atmósferas estudiadas

Como era de esperar, a menor contenido de oxígeno, el daño causado por el BRG resulta mayor. Para estimar las distancias críticas, se utiliza la ecuación (37). Estas dependen de la magnitud del daño biológico, dado por el parámetro  $n$ , por lo que la correspondiente distancia se denota como  $D_n$ . En [54] se considera que  $n = 2$  causaría significativa mortalidad marina, especialmente en el fitoplancton, obligado a vivir cerca de la superficie, porque necesita RFA para la fotosíntesis. Sin embargo, en la mencionada referencia se utilizan flujos (irradiancias), mientras que en [51,16] se utilizan fluencias biológicas efectivas. También, como en [51,16] se consideran varios eones, se plantea que el daño instantáneo causado por el flash UV no implica necesariamente mayor mortalidad, ya que se debe tener en cuenta el

daño por el UV solar al que las especies están adaptadas (dado por  $E^*_{Sun}$  en la ecuación [37]). Ambas magnitudes se incrementan con la reducción del contenido de oxígeno, como se ve en la tabla 9, la cual también muestra las distancias críticas [16].

Tabla 9 Distancias críticas para que el flash UV multiplique la fluencia biológica efectiva causada por el UV solar

Contenido de O <sub>2</sub> ; PAL	$E^*_{ad}$	$E^*_{Sun}$ ; W/m <sup>2</sup>	D <sub>2</sub> ; kpc	D <sub>4</sub> ; kpc	D <sub>8</sub> ; kpc	D <sub>16</sub> ; kpc
1	0,005028	0,009158	4,45	3,14	2,22	1,57
10 <sup>-1</sup>	0,01006	0,01410	5,07	3,58	2,53	1,79
10 <sup>-2</sup>	0,042528	0,09561	4,00	2,83	2,00	1,42
10 <sup>-3</sup>	0,084888	1,9610	1,25	0,88	0,63	0,44
10 <sup>-4</sup>	0,1283	33,4535	0,37	0,26	0,18	0,13
10 <sup>-5</sup>	0,1719	50	0,35	0,25	0,17	0,12

Nota: 1 kpc = 3,1 x 10<sup>19</sup> m

Se infiere que las biosferas del Fanerozoico y Proterozoico Tardío y Medio serían las más afectadas a corto plazo. Para causar un daño tan alto como el de n = 16, las distancias para estas biosferas son las mismas estimadas por otras vías para el último BRG que potencialmente impactó la Tierra en el último Ga: entre 1 y 2 kpc. Para una distancia dada del emisor del BRG, los ecosistemas bajo una atmósfera con 10<sup>-1</sup> O<sub>2</sub> PAL (Proterozoico Medio) serían los más estresados. Para el Fanerozoico, en [13] se modela el efecto

sobre las tasas de fotosíntesis del fitoplancton oceánico. Para ello, se propaga el espectro del flash UV en la columna de agua, partiendo del espectro recibido en la superficie oceánica, el cual se muestra en la figura 11.

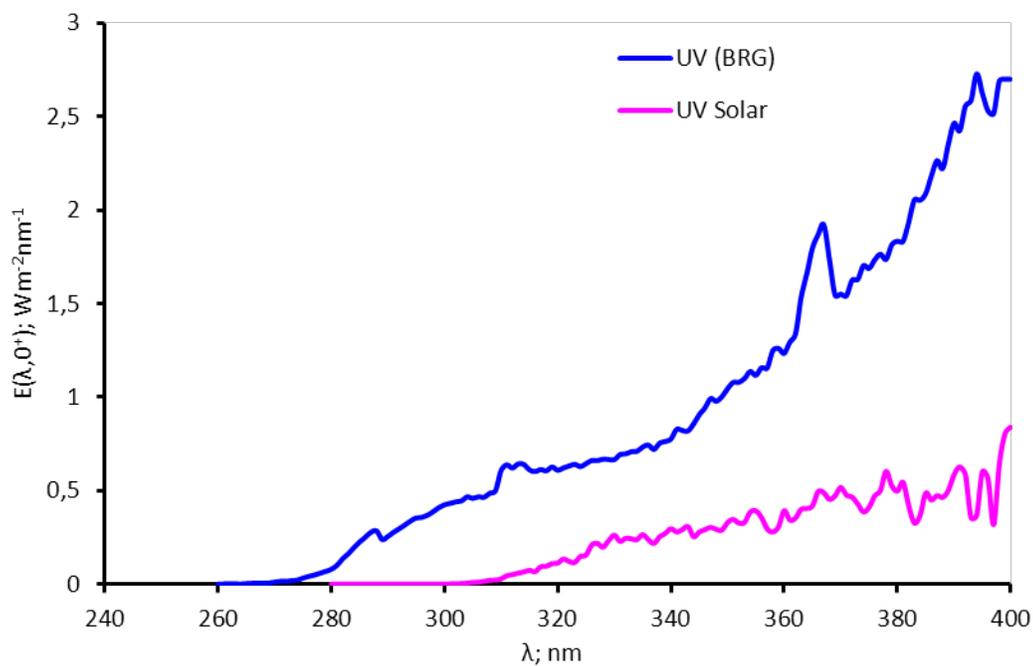


Fig. 11 Espectros UV, provenientes del BRG y del Sol, recibidos en la superficie del océano

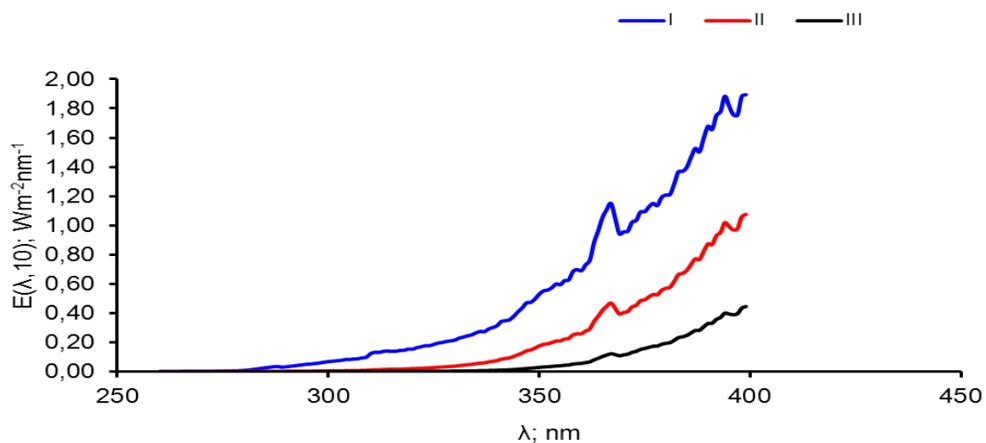


Fig. 12 Espectro del UV proveniente de BRG, recibido a 10 m de profundidad para los tres tipos de agua (I, II y III)

El espectro en la columna de agua dependerá del tipo óptico de esta, como se muestra en la figura 12. Como es de esperar, a medida que el agua es más turbia, el flash UV resulta más atenuado. Como se observa en la figura, en la superficie oceánica la irradiancia UV producto del BRG es mucho mayor que la solar en las bandas UV-B y UV-A. En [57, 58] se modela la letalidad que esto podría ocasionar en la biosfera subacuática superficial, especialmente en el fitoplancton. Para ello, se comenzó con el modelo clásico para las curvas de sobrevivencia de células irradiadas:

$$S = e^{-\alpha F} \quad (38)$$

donde  $S$  es la fracción que sobrevive,  $\alpha$  es la pendiente y  $F$  es la dosis o fluencia. Entonces se propone introducir el uso de las fluencias o dosis biológicas efectivas  $F^*$  mediante el modelo modificado:

$$S(z) = e^{-\alpha^* F^*(z)} \quad (39)$$

donde  $S(z)$  es la fracción que sobrevive a la profundidad  $z$ ,  $\alpha^*$  es la nueva pendiente (biológicamente efectiva), y  $F^*(z)$  es la dosis (fluencia) biológica efectiva a la profundidad  $z$ . Las pendientes  $\alpha^*$  son una medida de la radiosensibilidad de la especie; se determinaron considerando que las dosis  $F$  reportadas en [59] cumplen la expresión:

$$F = E\Delta t \quad (40)$$

Asumiendo  $F^* = E^*\Delta t$  y dividiendo esta expresión entre la ecuación (40), se obtiene:

$$\frac{F^*}{F} = \frac{E^*}{E} \quad (41)$$

Tanto  $F$  como  $E$  se reportan en [59], mientras que  $E^*$  fue determinada en [28], de manera que la ecuación anterior permite la determinación de  $F^*$  para cada especie. Posteriormente se obtuvo la dosis biológica efectiva para la cual el 10 % de las células sobrevive ( $F_{10}^*$ ), utilizando los valores de  $F_{10}$  reportados en [59], lo cual permite encontrar las nuevas pendientes  $\alpha^*$ .

En [59] se irradiaron varias especies. En [57, 62] se asumió que entre estas, *Escherichia Coli* sería un buen estimador para el fitoplancton más radiosensible; la bacteria acuática *Rhodobacter sphaeroides* sería intermedia, y la bacteria del suelo *Rhizobium Meliloti* sería el proxy para el fitoplancton más resistente al UV. También se analizó el caso en que los mecanismos de reparación estarían inhibidos: aguas muy frías o un flash UV nocturno (porque de noche la división celular está sincronizada en el fitoplancton oceánico [60], haciéndolo mucho más sensible a las radiaciones). Para tener en cuenta este último escenario, se utilizaron los datos en [59] para cepas en que la reparación está inhibida debido a la falta del gen *recA*, para los extremos de la «banda de sobrevivencia» (*E. coli* y *R. meliloti*). Para indicar que una cepa posee el mencionado gen se escribe *recA*<sup>+</sup>, y si no lo tiene se escribe *recA*<sup>-</sup>.

Las figuras 13 y 14 muestran las fracciones de sobrevivencia para los tipos de agua I y III (el comportamiento para los tipos intermedios está enmarcado por el comportamiento en los dos primeros tipos mencionados).

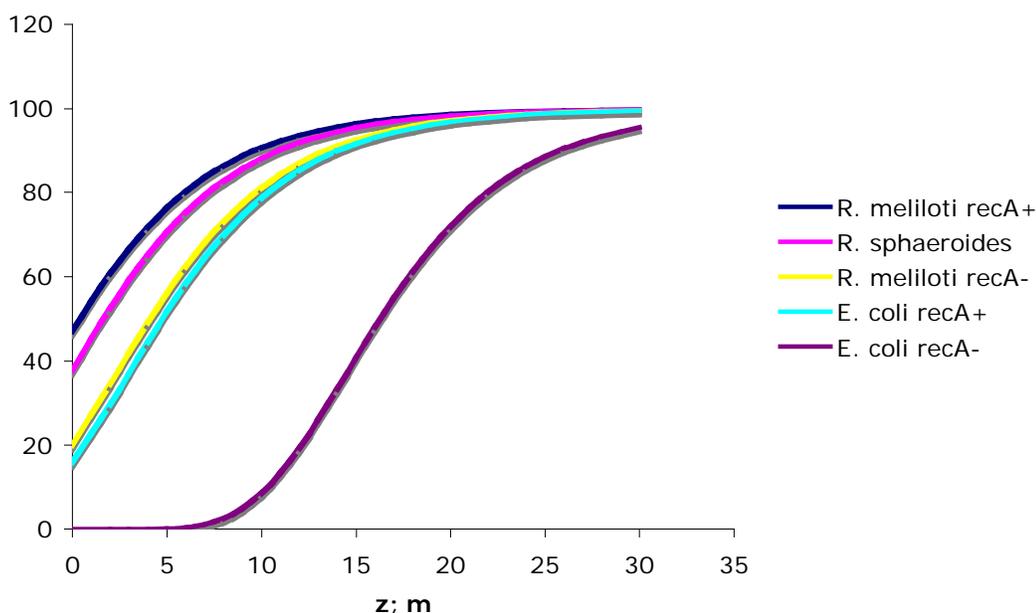


Fig. 13 Fracción de sobrevivencia vs. profundidad para las células de fitoplancton después del flash UV, para las aguas tipo I

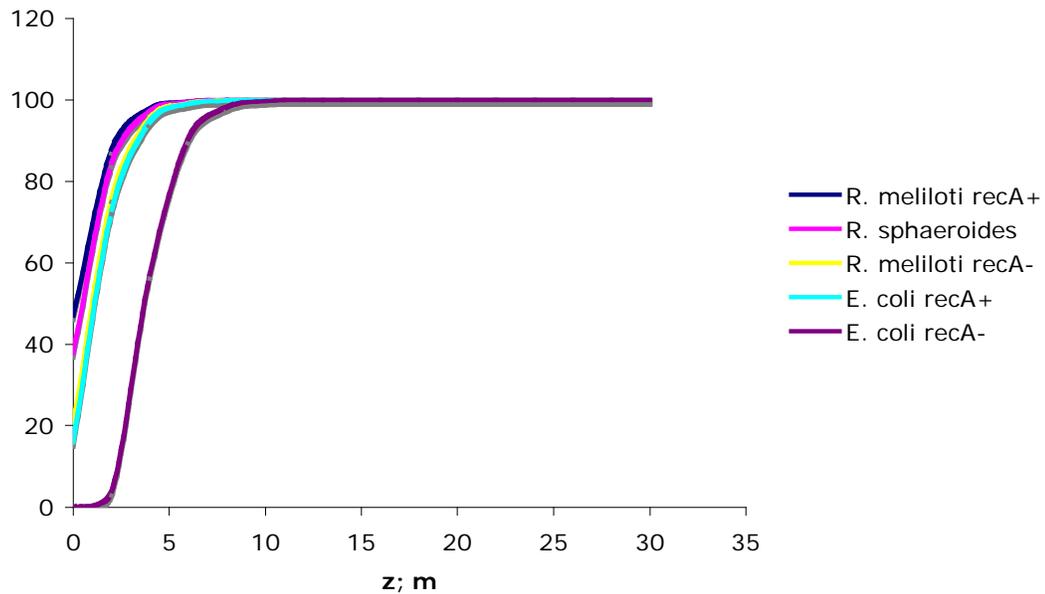


Fig. 14 Fracción de sobrevivencia vs. profundidad para las células de fitoplancton después del flash UV, para las aguas tipo III

La tabla 10 muestra la reducción de biomasa en una capa mezclada de 30 m de profundidad.

Tabla 10 Reducción total de biomasa en la capa mezclada superior del océano

Escenario	Especie	I	IA	IB	II	III
Buena reparación	<i>R. meliloti recA<sup>+</sup></i>	10,4	8,8	8,8	4,2	2,7
	<i>R. sphaeroides</i>	12,8	10,8	9,1	5,2	3,3
	<i>E. coli recA<sup>+</sup></i>	20,3	17,2	14,5	8,2	5,0
Mala reparación (agua fría, flash UV nocturno)	<i>R. meliloti recA<sup>-</sup></i>	18,6	15,8	13,2	7,5	4,6
	<i>E. coli recA<sup>-</sup></i>	57,1	48,6	40,7	22,8	13,3

La mayor parte de las modernas cuencas oceánicas son oligotróficas (aguas tipo I, IA o IB), de manera que de la tabla 10 se puede esperar una letalidad de alrededor del 10 % para un flash UV en escenarios con buena reparación, asumiendo que la mayoría de las especies de fitoplancton se comportarían de modo similar a la bacteria acuática *R. sphaeroides*. Sin embargo, las células de algunas especies de picofitoplancton son tan pequeñas (diámetro de alrededor de 0,6  $\mu\text{m}$ ), que no pueden albergar una elaborada maquinaria de reparación del ADN. Un ejemplo notable lo constituye el género *Prochlorococcus*, los organismos más abundantes en la Tierra [61]: liberan un estimado del 20 % del oxígeno enviado a la atmósfera mediante la fotosíntesis, y se hallan en la base del ensamblaje trófico oceánico. Debido a sus limitadas posibilidades de reparación, la letalidad podría alcanzar un 25 % en aguas cálidas, e incluso más en aguas muy frías o por la noche (tabla 10). Por otro lado, los individuos que estén por debajo de la capa mezclada (ver figuras 13 y 14) y los que estén en el hemisferio no iluminado por el flash UV (de unos 10 s de duración) no serían afectados, al menos directamente.

El flash UV sería un efecto a corto plazo después de la incidencia de un BRG en un planeta tipo rocoso como el nuestro. Sin embargo, a mediano plazo se manifestarían varios efectos, que comenzarían por perturbaciones de la química atmosférica que inmediatamente impactarían la biosfera. Dentro de estos destaca la formación de óxidos de nitrógeno, los cuales bloquean la luz solar (implicando un enfriamiento global potencial) y devienen catalizadores de la descomposición del ozono. Estas perturbaciones ambientales se mantendrían durante años [54]. En [17,16] se modela el efecto potencial que tendrían sobre la biosfera de nuestro planeta. Para ello, se tuvo en cuenta que en [54] se estima una reducción de la irradiancia total en el rango 0-10 % debido a la formación de  $\text{NO}_2$ , por lo que se calcularon las columnas de este gas que provocarían reducciones de la irradiancia total, dadas por el número fraccionario  $f$ :

$$\frac{I_{after}}{I_{before}} = f \quad (41)$$

donde *after* y *before* significan antes y después del impacto del BRG. Se utilizaron para *f* los valores 0,98; 0,96; 0,94 y 0,92. Los valores de las irradiancias totales antes y después del impacto se calcularon mediante:

$$I_{before} = \int_{280nm}^{700nm} I_0(\lambda) d\lambda \quad (42)$$

$$I_{after} = \int_{280nm}^{700nm} I_0(\lambda) e^{-\tau} d\lambda \quad (43)$$

donde  $\tau$  es el camino óptico de los fotones en la columna de  $\text{NO}_2$  e  $I_0(\lambda)$  es el espectro solar en la superficie de la Tierra, dado en [62]. Los efectos atmosféricos mencionados afectan la fotosíntesis: más UV solar puede dañar el ADN e inhibir la fotosíntesis, mientras que la menor disposición de luz visible o RFA reduce la energía disponible para este proceso (aunque la deposición de nitratos mediante la lluvia, al combinarse el  $\text{NO}_2$  en la atmósfera, podría compensar esto, al menos parcialmente [54, 17, 16]). Dada la considerable variabilidad en la sensibilidad de las especies a las radiaciones y a que no hay linealidades, es muy complicado modelar cómo la biosfera se comportaría ante un exceso de UV. Sin embargo, una idea aproximada de los efectos biológicos de la depresión del ozono es el factor de amplificación de las radiaciones (RAF por sus siglas en inglés), el cual relaciona las irradiancias biológicas efectivas  $E^*$  con las columnas de ozono  $N$  antes y después del evento ionizante:

$$\frac{E_{after}^*}{E_{before}^*} = \left( \frac{N_{before}}{N_{after}} \right)^{RAF} \quad (44)$$

Los RAF dependen tanto del grupo de especies como del proceso biológico considerado. Este último está representado por una función de ponderación biológica (BWF por sus siglas en inglés). La tabla 11 muestra un

estimado del daño a algunos procesos biológicos para varios niveles de depresión del ozono.

Tabla 11 Factores de amplificación de las radiaciones (RAF) e incremento fraccionario de las irradiancias biológicas efectivas para algunas funciones de ponderación biológicas y varios niveles de depresión del ozono

Función de ponderación biológica	Factor de amplificación de las radiaciones	$\frac{E_{after}^*}{E_{before}^*}$ para varios % de depresión del ozono			
		38	30	20	10
Fotoinhibición de fitoplancton marino	0,31	1,16	1,12	1,07	1,03
Fotoinhibición de plantas terrestres	0,51	1,27	1,20	1,12	1,05
Daño al ADN	1,67-2,2	2,22-2,85	1,82-2,20	1,45 -1,63	1,19 -1,26

En [54] se estima que el «típico BRG del último Ga» sobre la Tierra causaría una depresión de hasta 38 % del ozono, que persistiría por años. Por ejemplo, pasados siete años, todavía habría una reducción del 10 % del ozono. La tabla anterior sugiere que el daño al ADN sería el mayor daño que pudiera ocasionársele a la biosfera, y que las plantas terrestres sufrirían más que el fitoplancton (lo cual es de esperar por la protección que brinda el agua ante el UV). Sin embargo, las funciones de ponderación biológicas son medidas generalmente en condiciones controladas de laboratorio, por lo que tienen utilidad limitada para estimar la respuesta real de los organismos al UV. Por ejemplo, el fitoplancton tiene baja eficiencia para reparar los daños por UV cuando la temperatura es baja, pero tiene buena eficiencia a

temperaturas intermedias. Por lo general, la reparación no se incluye de manera adecuada cuando se miden las BWF, por lo que el factor de amplificación biológico (BAF) daría mejor información sobre los efectos biológicos del UV:

$$\frac{P_{after}}{P_{before}} = BAF \times \frac{E_{before}^*}{E_{after}^*} \quad (45)$$

donde  $P$  es un proceso biológico, como la fotosíntesis. Desafortunadamente, no se han medido muchos BAF, aunque están realizándose trabajos en esa dirección. Por otro lado, la reducción de la irradiancia debido a la formación de  $\text{NO}_2$  también ocasionaría efectos sobre la biota. La tabla 12 muestra cómo se afectarían algunas bandas.

Tabla 12 Relación entre las irradiancias antes y después del BRG, para la irradiancia total y para algunas bandas

F	f <sub>UV-A</sub>	f <sub>PAR</sub>	f <sub>350-450 nm</sub>
0,98	0,92	0,98	0,92
0,96	0,85	0,95	0,84
0,94	0,78	0,93	0,77
0,92	0,71	0,90	0,70

Se observa una absorción ligeramente selectiva para la banda visible o fotosintéticamente activa (PAR), y una absorción más pronunciada para las bandas UV-A y la de fotorreparación (350-450 nm). Esta última banda es necesaria para ejecutar el mecanismo de reparación más eficiente de daño causado al ADN por el UV-B. Adicionalmente se chequeó que una depresión

del 30 % del ozono implicaría un aumento del UV-B del 22 %, pero solo un 0,37 % de incremento del UV-A, por lo que la contribución de la reducción del ozono al incremento del UV-A es mucho menor que su decremento por la formación de  $\text{NO}_2$ , que en este caso reduce la luz en un 10 %. Así, el efecto global neto del BRG sugiere una combinación de más daños debido al UV-B (por la depresión del ozono) y menos eficiencia en la reparación del ADN por la presencia de menos luz en la banda de fotorreparación. Además, implica menos PAR para la fotosíntesis. Una modelación más detallada requiere considerar las relaciones entre las especies, para lo cual en [17,16] se utilizó la modificación del Modelo Inclusivo de Simulación Acuática (CASM por sus siglas en inglés) explicada en la sección 1.4. Teniendo en cuenta la modificación dada por la ecuación (19) para incluir los efectos del transporte radiativo en dicho modelo, y las contribuciones iguales del detrito  $D$  y el fitoplancton  $X$  a la atenuación del flash UV en la columna de agua ( $h = h_D = h_X$ ), se observa el comportamiento en la figura 15.

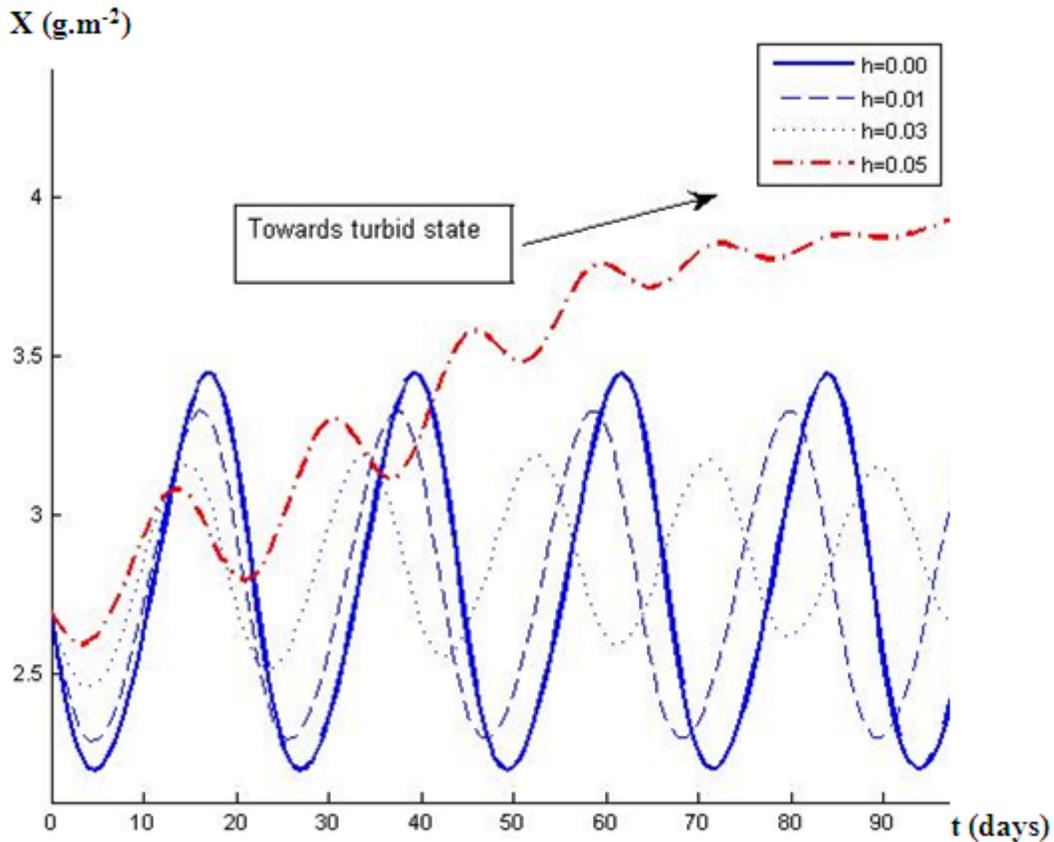


Fig. 15 La autoprotección de los fotones UV por parte del detrito y el fitoplancton puede causar cambio de régimen (de claro a turbio) u oscilaciones alrededor de un estado claro

Se aprecia que si la autoprotección no es muy alta, persiste el estado oscilatorio alrededor del régimen claro, con pequeñas correcciones en la amplitud y período de las oscilaciones. Si la autoprotección alcanza cierto valor umbral, la población de fitoplancton se recupera progresivamente en el tiempo y el ecosistema regresa al estado turbio original.

Los resultados presentados en esta subsección ilustran las complejidades para predecir la evolución o habitabilidad de los ecosistemas cuando se toman en cuenta las interacciones entre varios niveles tróficos, lo cual es típico del enfoque ecológico de la habitabilidad.

### 2.2.3.3 Impactos de cuerpos planetarios

Los impactos astronómicos tienen un rol importante en la evolución de los sistemas planetarios. En el caso del planeta Tierra, dos ejemplos importantes son el Gran Impacto Lunar (responsable de la formación de la Luna) y el impacto de Chicxulub. Este último ocasionó un cambio climático global que condujo a una extinción masiva de biota que incluyó a los dinosaurios. El impactor fue un asteroide de entre 10 y 15 km de diámetro, y su colisión con la Tierra liberó una energía del orden de  $10^{23}$  J, que superó en más de 1 000 millones de veces a la energía de las primeras bombas atómicas que se fabricaron [63]. Esto produjo una desestabilización del sur de la placa tectónica de Norteamérica, provocando terremotos de categoría 10 en toda la cuenca del Caribe y tsunamis gigantescos. El hollín de los incendios forestales, el polvo y los gases de azufre liberados por la evaporación de la roca blanca y la del asteroide bloquearon la entrada de la luz solar en escalas de meses o años, configurando un escenario conocido como «frío y oscuridad». Por otro lado, la liberación de gases de cloro y bromo y la formación de óxidos de nitrógeno pudo haber destruido totalmente la capa de ozono [64, 65].

El mencionado escenario de frío y oscuridad causó un colapso de la fotosíntesis, con la consecuente deforestación global. Dentro de las especies vegetales que sobrevivieron a este período se encuentran aquellas capaces de soportar largos períodos de inactividad hasta que se restablezcan condiciones ambientales apropiadas para su metabolismo. Tal es el caso de varias especies de fitoplancton, capaces de quedar en estado durmiente durante decenas de años [66]. En [67] se hace una modelación preliminar del potencial para la fotosíntesis del fitoplancton en el peor escenario posible a principios del Paleógeno: se supone una atmósfera clara pero aún sin ozono, asumiendo que la escala de recuperación de este es mayor que la de sedimentación del polvo atmosférico (décadas vs. años). Se aplicó el modelo E de fotosíntesis para obtener las tasas promedio de este proceso en una

celda de Langmuir de 40 m de profundidad, para ángulos solares cenitales de 0 y 60 grados (representando regímenes de irradiación solar intenso y débil, respectivamente). Las tablas 13 y 14 muestran tasas apreciables de fotosíntesis, incluso para especies muy poco eficientes en la utilización de la RFA.

Tabla 13 Tasas promedio de fotosíntesis en una celda de Langmuir de 40 m de profundidad, para un ángulo solar cenital de 60 grados

$E_s$ ; W/m <sup>2</sup>	5	15	20	25	150
Tipo óptico I	47,1	43,4	40,2	37,1	11,1
Tipo óptico II	71,3	51,1	44,5	39,4	10,0
Tipo óptico III	53,3	34,0	29,2	25,6	6,4

Tabla 14 Tasas promedio de fotosíntesis en una celda de Langmuir de 40 m de profundidad, para un ángulo solar cenital de 0 grados

$E_s$ ; W/m <sup>2</sup>	5	15	20	25	150

Tipo óptico I	38,7	38,4	37,7	36,7	15,5
Tipo óptico II	73,2	61,5	56,2	51,6	16,3
Tipo óptico III	62,7	44,2	39,1	35,2	10,5

En [68] se modela de modo más detallado la recuperación de la fotosíntesis, teniendo en cuenta la recuperación dinámica de la atmósfera después del impacto de Chicxulub.

### 3. El futuro de la vida en el Sistema Solar y en el Universo

Se estima que la habitabilidad primaria fotosintética en el planeta Tierra se puede extender por unos 800 millones de años, ya que el ciclo carbonato-silicato, acelerado por el aumento de la actividad solar, consume paulatinamente el CO<sub>2</sub> atmosférico, gas imprescindible para la fotosíntesis. A partir de unos 2 000 millones de años, la temperatura superficial del planeta probablemente ya será demasiado alta como para permitir cualquier forma de vida, y ya el océano se habría evaporado hacia el espacio. Unos 5 000 millones de años hacia delante ya nos ubican en el escenario de culminación del Sol en su etapa de secuencia principal, lo cual implica la expulsión de sus capas exteriores calientes, con la consecuente evaporación de los planetas del Sistema Solar interior, entre los que se encuentra la Tierra.

Vaticinar el futuro de la vida a nivel de Universo es mucho más complicado, pues no todos los cosmólogos están de acuerdo respecto a la

futura evolución de este. Si se cumple la corriente más aceptada, la expansión del Universo continuaría de forma acelerada, implicando un escenario de muerte térmica sin los gradientes de variables ambientales (como la temperatura), necesarios para sostener procesos alejados del equilibrio termodinámico como los biológicos.

Lo mencionado en este último subepígrafe se refiere a la evolución natural, sin la intervención de la vida inteligente. Quizá esta pueda detener o mitigar las enormes amenazas naturales que parece encontrar la vida para perpetuarse en el Universo que conocemos... O tal vez exista un Multiverso, y el destino de otros Universos no sea el mismo que el de nuestro Universo... A principios de este trabajo se comentó sobre lo difícil de definir la vida, ¿entonces pudiera ser que el Multiverso es un ser vivo que en su evolución desarrolla la vida inteligente para conocerse a sí mismo y perpetuarse?

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **Conclusiones**

En este trabajo se ha hecho un análisis de la evolución de la habitabilidad primaria en el Universo observado, utilizando el modelo del Big Bang como paradigma cosmológico. Como trabajo altamente interdisciplinar en el que se manejan aspectos de Cosmología, Astrobiología y Ciencias de la Tierra, se utilizan los tres enfoques complementarios de la habitabilidad cuantitativa: astrobiológico, biogeoquímico y ecológico.

Se presentaron varias métricas de habitabilidad, algunas elaboradas por los autores que aún se hallan en vías de mejoramiento. Se aplicaron para estimar la habitabilidad de una amplia gama de entornos naturales, desde la escala de planeta hasta la de ecosistema.

### **Recomendaciones**

La comprensión cada vez más profunda del complejo fenómeno de la vida puede redundar en un mejor manejo de los ecosistemas de nuestro planeta. En este trabajo se ha enfatizado en la biosfera basada en la fotosíntesis, pues hoy es dominante sobre la quimiosíntesis en nuestro planeta. Sin embargo, en determinados ecosistemas los productores quimiosintéticos son predominantes, como sucede en los ecosistemas hidrotermales de las profundidades oceánicas. Por ende, una nueva dirección de trabajo en el grupo de los autores se perfila hacia la biosfera quimiosintética y sus interacciones con la fotosintética. Asimismo, se trabaja en el refinamiento de las métricas de habitabilidad y su aplicación a varios entornos naturales, incluyendo ecosistemas de nuestro país. Esto último ya es un trabajo en progreso con el Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos y el Centro de Investigaciones de Ecosistemas Costeros de Cayo Coco.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. SMITHSONIAN ASTROPHYSICAL OBSERVATORY NASA: «Astrophysics data system», available online: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2009AAS...21430502V>
2. SOFTPEDIA NEWS: «Astrobiologists think life may be 12 billion years old», available online: <http://news.softpedia.com/news/Astrobiologists-Think-Life-May-Be-12-Billion-Years-Old-114602.shtml>
3. LOEB, ABRAHAM: «The Habitable Epoch of the Early Universe», *International Journal of Astrobiology*, 13 (4): 337–339, Cambridge University Press, October, 2014.
4. SHOCK, EVERETT L. and MELANIE E. HOLLAND: «Quantitative Habitability», *Astrobiology*, 7(6): 839-851, Mary Ann Liebert Inc. publishers, Estados Unidos, December, 2007.
5. PLANETARY HABITABILITY LABORATORY: «Quantitative Habitability Theory», available online: <http://phl.upr.edu/projects/planetary-habitability>
6. CÁRDENAS, ROLANDO, NOEL PÉREZ, JESÚS MARTÍNEZ-FRÍAS and OSMEL MARTÍN: «On the Habitability of Aquaplanets», available on: <https://www.mdpi.com/2078-1547/5/2/284/htm>
7. MÉNDEZ, ABEL: «Evolution of the global terrestrial habitability during the last century», available online: <https://www.hou.usra.edu/meetings/habitability2019/pdf/1030.pdf>
8. GONZÁLEZ, A., ROLANDO CÁRDENAS ORTIZ and JOHN HEARNshaw: «Possibilities of life around Alpha Centauri B», available online: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1401/1401.2211.pdf>
9. HADJIBIROs, KIMON: *Ecology and Applied Environmental Science*, pp. 49–51, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Ratón, Florida, 2013.
10. KIRK, JOHN T. O.: *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*, 3rd. ed., p. 453, Cambridge University Press, 2011.

11. FRITZ, JENNIFER J., PATRICK NEALE, RICHARD F. DAVIS and JILL A. PELOQUIN: «Response of Antarctic phytoplankton to solar UVR exposure: Inhibition and recovery of photosynthesis in coastal and pelagic assemblages», *Marine Ecology Progress Series* (365): 1-16, Inter-Research Science Center, August, 2008.
12. JERLOV, NILS: *Marine Optics*, 2nd. ed., pp. 127-137, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1976.
13. PEÑATE, LIUBA, OSMEL MARTÍN, ROLANDO CÁRDENAS and SUSANA AGUSTI: «Short-term effects of gamma ray bursts on oceanic photosynthesis», *Astrophysics and Space Science*, 330 (2): 211-217, Springer Science + Business Media, Berlín, 2010.
14. VOLK, TYLER: «Feedbacks between weathering and atmospheric CO<sub>2</sub> over the last 100 million years», *American Journal of Science* (287): 763-779, American Journal of Sciences and Arts, Estados Unidos, 1987.
15. AMEMIYA, TAKASHI, TAKATOSHI ENOMOTO, AXEL G. ROSSBERG, TETSUYA YAMAMOTO, YUHEI INAMORI and KIMINORI ITOH: «Stability and dynamical behavior in a lake-model and implications for regime shifts in real lakes», *Ecological Modelling* (206): 54-62, Elsevier, Amsterdam, 2007.
16. MARTÍN GONZÁLEZ, OSMEL: «La foto-biofilia de la Vía Láctea», tesis de doctorado en Ciencias Físicas, Facultad de Matemática, Física y Computación, Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas, Santa Clara, 2011.
17. MARTÍN, OSMEL, ROLANDO CÁRDENAS, MAYRENE GUIMARAIS, LIUBA PEÑATE, JORGE HORVATH and DOUGLAS GALANTE: «Effects of gamma ray bursts in Earth's biosphere», *Astrophysics and Space Science*, 326 (1): 61-67, Springer Science + Business Media, Berlín, 2010.
18. GUEDES, JAVIERA M., EUGENIO J. RIVERA, ERICA DAVIS, GREGORY LAUGHLIN, ELISA V. QUINTANA and DEBRA A. FISCHER: «Formation and Detectability of Terrestrial Planets around  $\alpha$  Centauri B», available online: <http://www.oklo.org/wp-content/images/AlphaCenApJPaper.pdf>

19. APPALACHIAN STATE UNIVERSITY: «Spectrum», available online: <http://www.appstate.edu/~grayro/spectrum/spectrum.html>
20. BARNES, RORY, SEAN N. RAYMOND, BRIAN JACKSON and RICHARD GREENBERG: «Tides and the Evolution of Planetary Habitability», *Astrobiology* 8 (3): 557-568, Mary Ann Liebert Inc. publishers, Estados Unidos, 2008.
21. MERLIS, TIMOTHY M. and TAPIO SCHNEIDER: «Atmospheric dynamics of Earth-like tidally locked aquaplanets», *Journal of Advances in Modeling Earth System* 2 (13): 1-17, 2010.
22. PEÑATE, LIUBA, ROLANDO CÁRDENAS and OSMEL MARTÍN: «Environmental Effects of Flares from Red Dwarf Stars», *International Journal of Modern Physics E*, 20 (2): 37-41, World Scientific Publ CO PTE LTD, 5 Toh Tuck Link, Singapore, 2011.
23. TARTER, JILL C., PETER R. BACKUS, ROCCO L. MANCINELLI, JONATHAN M. AURNOU et. al.: «A Reappraisal of the Habitability of Planets around M Dwarf Stars», *Astrobiology* 7 (1): 30-65, Cambridge University Press, March, 2007.
24. LÓPEZ-ÁGUILA, M., R. CÁRDENAS ORTIZ y L. RODRÍGUEZ-LÓPEZ: «Sobre la habitabilidad de exoplanetas orbitando a Próxima del Centauro», *Revista Cubana de Física* 30 (2): 77-80, Sociedad Cubana de Física, Facultad de Física de la Universidad de La Habana, La Habana, dic., 2013.
25. VALLEY, JOHN W., WILLIAM H. PECK, ELIZABETH M. KING and SIMON A. WILDE: «A cool early Earth», *Geology* (4): 351-354, Geological Society of America, United States, 2002.
26. PACE, NORMAN R.: «Origin of life-facing up to the physical setting», *Cell* 65 (4): 531-533, Elsevier, Amsterdam, May, 1991.
27. MARTÍN, OSMEL, LIUBA PEÑATE, ROLANDO CÁRDENAS and JORGE E. HORVATH: «The Photobiological Regime in the very Early Earth and the Emergence of Life», in Joseph Seckbach (ed.), *Genesis in the Beginning. Precursors of Life, Chemical Models and Early Biological*

- Evolution*, pp. 145-155, Springer Science + Business Media, Berlín, 2012.
28. COCKELL, C. S.: «Ultraviolet radiation and the photobiology of Earth's early oceans», *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 30 (5): 467-499, International Society for Study of the Origin of Life, October, 2000.
  29. SMITH, R. C. and K. S. BAKER: «Optical properties of the clearest natural waters», *Applied Optics* 20 (2): 177-184, The Optical Society, Washington, 1981.
  30. PÉREZ, NOEL, ROLANDO CÁRDENAS, OSMEL MARTÍN and MICHEL LEIVAMORA: «The potential for photosynthesis in hydrothermal vents: a new avenue for life in the Universe?», *Astrophysics and Space Science* (346): 327-331, Springer Science + Business Media, Berlín, January, 2013.
  31. BEATTY, THOMAS, JÖRG OVERMANN, MICHAEL T. LINCE, ANN K. MANSKE, ANDREW S. LANG, ROBERT E. BLANKENSHIP, CINDY L. VAN DOVER, TRACEY A. MARTINSON and GERALD PLUMLEY: «An obligately photosynthetic bacterial anaerobe from a deep-sea hydrothermal vent», *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102 (26): 9306-9310, Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos, Estados Unidos, June, 2005.
  32. PRINGAULT, OLIVIER, MICHAEL KUHLT, RUTGER de WIT and PIERRE CAUMETTE: «Growth of green sulphur bacteria in experimental benthic oxygen, sulphide, pH and light gradients», *Microbiology* (144): 1051-1061, Microbiology Society, London, 1998.
  33. LOWE, D. R.: «Comparative sedimentology of the principal volcanic sequences of Archean greenstone belts in South Africa, Western Australia and Canada: Implications for Crustal Evolution», *Precambrian Research* (17): 1-29, Elsevier, Amsterdam, 1982.
  34. OLSON, J. M. and B. K. PIERSON: «Photosynthesis 3.5 thousand million years ago», *Photosynthesis Research*, 9 (1-2): 251-259, International Society of Photosynthesis Research, Pennsylvania, January, 1986.

35. GARCÍA-PICHEL, F: «Solar ultraviolet and the evolutionary history of cyanobacteria», *Origins of Life and Evolution of the Biosphere* 28 (3): 321-347, International Society for the Study of the Origin of Life, June, 1998.
36. DREVER, J I: «Geochemical model for the origin of Precambrian banded iron formations», *Geological Society America Bulletin* (85): 1099-1106, Geological Society America, Estados Unidos, 1974.
37. ÁVILA, DAILÉ, ROLANDO CÁRDENAS and OSMEL MARTÍN: «On the Photosynthetic Potential in the Very Early Archean Oceans», *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, (43): 67-75, International Society for the Study of the Origin of Life, 2013.
38. CROWE, SEAN A., CARRI AYNE JONES, SERGEI KATSEV, CÉDRIC MAGEN, ANDREW H. O'NEILL, ARNE STURM, DONALD E. CANFIELD, G. DOUGLAS HAFFNER, ALFONSO MUCCI, BJØRN SUNDBY and DAVID A. FOWLE: «Photoferrotrophs thrive in an Archean Ocean analogue», *Proceedings of the National Academy of Sciences* (105): 15938-15943, Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos, Estados Unidos, 2008.
39. CLEAVES, H. JAMES and STANLEY L. MILLER: «Oceanic protection of prebiotic organic compounds from UV radiation», *Proceedings of the National Academy of Sciences* (95): 7260-7263, Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos, Estados Unidos, 1998.
40. NEALE, PATRICK J.: Personal communication, 2011.
41. RODRÍGUEZ, LIEN, ROLANDO CÁRDENAS and OSCAR RODRÍGUEZ: «Perturbations to aquatic photosynthesis due to high-energy cosmic ray induced muon flux in the extragalactic shock model», *International Journal of Astrobiology* 12 (4): 326-330, Cambridge University Press, October, 2013.
42. ATRI, DIMITRA and ADRIAN L. MELOTT: «Biological implications of high-energy cosmic ray induced muon flux in the extragalactic shock model», *Geophysical Research Letters* (38): L19203, American Geophysical Union, Washington D.C., 2011.

43. FERRARI, A., M. PELLICIONI and M. PILLON: «Fluence to effective dose conversion coefficients for muons», *Radiation Protection Dosimetry* (74): 227-233, Oxford University Press, 1997.
44. PELLICIONI, M.: «Overview of fluence to effective dose and fluence to ambient dose equivalent conversion coefficients for high energy radiation calculated using the FLUKA code», *Radiation Protection Dosimetry*, 88 (4): 279-297, Oxford University Press, 2000.
45. CHEN, J.: «Fluence-to-absorbed dose conversion coefficients for use in radiological protection of embryo and foetus against external exposure to protons from 100 MeV to 100 GeV», *Radiation Protection Dosimetry*, 118 (4): 378-383, Oxford University Press, 2006.
46. SATO, TATSUHIKO, AKIRA ENDO and KOJI NIITA: «Fluence-to-dose conversion coefficients for muons and pions calculated based on ICRP publication 103 using the PHITS code», *Progress in Nuclear Science and Technology* (2): 432-436, Atomic Energy Society of Japan, Japan, 2011.
47. ANNIS, JAMES: «An Astrophysical Explanation for the Great Silence», available online: arXiv: astro-ph/9901322v1
48. MARTÍN, OSMEL, ROLANDO CÁRDENAS, JORGE E. HORVATH and LIUBA PEÑATE: «Effects of Galactic Gamma Rays Bursts on Planetary Atmospheres», *International Journal of Modern Physics E*, 20 (2): 67-70, World Scientific Publ CO PTE LTD, 5 Toh Tuck Link, Singapore, 2011.
49. LINEWEAVER, CHARLEY, YESHE FENNER and BRAD K. GIBSON: «The Galactic Habitable Zone and the Age Distribution of Complex Life in the Milky Way», *Science* 303 (5654): 59-62, American Association for the Advancement of Science, Washington D.C., 2004.
50. SMITH, D., J. SCALO and J. WHEELER: «Transport of ionizing radiation in Terrestrial-like Exoplanet Atmospheres», *Icarus* (171): 229-253, American Astronomical Society's Division for Planetary Sciences, Washington D.C., 2004.

51. MARTÍN, OSMEL, DOUGLAS GALANTE, ROLANDO CÁRDENAS and JORGE E. HORVATH: «Short-term effects of gamma ray bursts on Earth», *Astrophysics and Space Science* (321): Springer Science + Business Media, Berlín, April, 2009.
52. KASTING, JAMES F. and DAVID C. CATLING: «Evolution of a habitable planet», *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* (41): 429-463, Annual Reviews, Palo Alto, California, 2003.
53. COCKELL, CHARLES S. and JOHN A. RAVEN: «Ozone and life on the Archaean Earth», *Philosophical Transactions of The Royal Society* (365): 1889-1901, Royal Society, London, 2007.
54. THOMAS, B., A. MELOTT, C. JACKMAN, C. LAIRD, M. MEDVEDEV, R. STOLARSKI, N. GEHRELS, J. CANNIZZO, D. HOGAN and L. EJZAK: «Gamma-ray bursts and the Earth: Exploration of atmospheric, biological, climatic and biogeochemical effects», *Astrophysical Journal* (634): 509-533, Institute of Physics Publishing, Bristol, 2005.
55. FRAIL, D., S. KULKARNI, R. SARI, S. DJORGOVSKI, J. BLOOM, T. GALAMA, D. REICHART, E. BERGER, F. HARRISON, P. PRICE, S. YOST, A. DIERCKS, R. GOODRICH and F. CHAFFEE: «Beaming in Gamma-Ray Bursts: Evidence for a Standard Energy Reservoir», *Astrophysical Journal Letters* (562): L55-L58, Institute of Physics Publishing, Bristol, 2001.
56. SEGURA, ANTÍGONA, KARA KRELOVE, JAMES F. KASTING, DARRELL SOMMERLATT, VICTORIA MEADOWS, DAVID CRISP, MARTIN COHEN and ELI MLAWER: «Ozone concentrations and ultraviolet fluxes on Earth-like planets around other stars», *Astrobiology* 3(4): 689-708, Mary Ann Liebert Inc. publishers, Estados Unidos, 2003.
57. GUIMARAIS, MAYRENE, ROLANDO CÁRDENAS and JORGE HORVATH: «Intense ultraviolet perturbations on aquatic primary producers», available online: <http://arxiv.org/abs/1010.0727>
58. CÁRDENAS, ROLANDO, OSMEL MARTÍN, LIUBA PEÑATE and JORGE HORVATH: «Effects of Galactic Gamma Ray Bursts on Planetary Biospheres», *International Journal of Modern Physics E* 20 (2):

- 132-135, World Scientific Publ CO PTE LTD, 5 Toh Tuck Link, Singapore, 2011.
59. GASCON, JORDI, ANNA OUBIÑA, ANNA PÉREZ-LEZAUN and JORDI URMENETA: «Sensitivity of selected bacterial species to UV radiation», *Current Microbiology* (30): 177-182, Springer Science + Business Media, Berlín, 1995.
  60. AGAWIN, NONA S. R. and SUSANA AGUSTÍ: «Prochlorococcus and Synechococcus cells in the Central Atlantic Ocean: distribution, growth and mortality grazing rates», *Vie et Milieu* (55): 165-175, Laboratoire Arago, Université Pierre et Marie Curie, París, 2005.
  61. PARTENSKY, F., W. HESS and D. VAULOT: «Prochlorococcus, a Marine Photosynthetic Prokaryote of Global Significance», *Microbiology and Molecular Biology Reviews* 63 (1): 106-127, American Society for Microbiology, Estados Unidos, 1999.
  62. ASTM INTERNATIONAL: «Standard tables for reference solar spectral irradiances», available online: <http://www.astm.org/Standards/G173.htm>
  63. SCHULTE, PETER et al.: «The Chicxulub Asteroid Impact and Mass Extinction at the Cretaceous-Paleogene Boundary», *Science* 327 (5970): 1214-1218, American Association for the Advancement of Science, Washington D.C., March, 2010.
  64. TIE, XUEXI and GUY BRASSEUR: «The response of stratospheric ozone volcanic eruptions: Sensivity to atmospheric chlorine loading», *Geophysical Research Letters* 22 (22), American Geophysical Union, Estados Unidos, 1995.
  65. KRING, DAVID A.: «Ozone-depleting Cl and Br produced by the Chicxulub impact event», *Meteoritics & Planetary Science* (34): A67-A68, Meteoritical Society, Virginia, Estados Unidos, 1999.
  66. RIBEIRO, SOFIA, TERJE BERGE, NINA LUNDHOLM, THORBJØRN J. ANDERSEN, FÁTIMA ABRANTES and MARIANNE ELLEGAARD: «Phytoplankton growth after a century of dormancy illuminates past

resilience to catastrophic darkness», *Nature Communications*, 2 (311), Nature Publishing Group, Reino Unido, 2011.

67. PÉREZ, NOEL, ROLANDO CÁRDENAS, OSMEL MARTÍN and R. ROJAS: «Modelling the onset of photosynthesis after Chicxulub asteroid impact», *Astrophysics and Space Science* (343), Springer Science + Business Media, Berlín, 2013.
68. PÉREZ, NOEL, OSMEL MARTÍN y ROLANDO CÁRDENAS: «Evolución del proceso de fotosíntesis después del impacto del asteroide de Chicxulub», *Revista Cubana de Física*, 31 (1), Sociedad Cubana de Física, Facultad de Física de la Universidad de La Habana, La Habana, jul., 2014.