

Astrobiología, el origen de la vida y el cambio global

► Héctor L. D'Antoni¹

1. Senior Research Scientist & Assistant Chief. Ecosystem Science Technology Branch. Licenciado en Antropología, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata. Especialista en Palinología Actual y Palinología del Cuaternario, Laboratorio Hugo de Vries, Universidad de Amsterdam (Países Bajos). Doctor en Ciencias Naturales, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata Estudios Post-Doctorales (1979), Instituto de Botánica, Universidad de Hohenheim (Stuttgart, Alemania). Programa para Ejecutivos en la Escuela de Gobierno "John F. Kennedy", de la Universidad de Harvard (Cambridge, Mass. Estados Unidos) (2003).

* NASA Ames Research Center
Moffett Field, CA 94035-1000
Hector.L.Dantoni@nasa.gov

Acta Bioquímica Clínica Latinoamericana

Incorporada al Chemical Abstract Service.

Código bibliográfico: ABCLDL.

ISSN 0325-2957

Durante el pasado mes de mayo se desarrollaron en la ciudad de Mar del Plata las 2das. Jornadas Bioquímicas del Sudeste Bonaerense. Allí, el Dr. Héctor D'Antoni tuvo a su cargo una interesante conferencia que *Acta Bioquímica Clínica Latinoamericana* reproduce en su totalidad.

Resumen

En 1996, la Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio de los Estados Unidos (NASA) invitó a la comunidad científica a crear un Instituto de Astrobiología. El primer taller sobre el tema se realizó en NASA Ames y marcó el comienzo oficial de esta rama de la ciencia que tiene sus raíces en la Exobiología de los Estados Unidos y la Biología Cósmica de la ex Unión Soviética. En el nuevo concepto, las Ciencias de la Tierra tienen una presencia mayor y se pone el acento en el enfoque interdisciplinario. En otros talleres se analizaron los méritos de los componentes a incluir en el "mapa de ruta" de la Astrobiología. El taller organizado por Carlos Lasta y colaboradores en Mar del Plata (1999) analizó las costas y estuarios como colectores de señales complejas de ecosistemas continentales y trató varias facetas de la actividad humana y el cambio ambiental. Hoy la Astrobiología trata de responder las siguientes preguntas: ¿Cómo comienza y evoluciona la vida? ¿Existe vida en otros lugares del universo? ¿Cuál es el futuro de la vida en la Tierra y más allá? Algunas evidencias recientes sumadas al desarrollo de la Bioquímica y Biología Molecular estimulan la formulación de hipótesis sobre el origen espontáneo, el de un antecesor común muy simple y aun desconocido, o su procedencia desde el espacio exterior. La emergencia de la vida cambió la composición química de la atmósfera con la inyección de oxígeno, producto de la fotosíntesis, y enseguida formó la capa de ozono estratosférico que cambió las condiciones para la vida en la tierra facilitando la colonización de los continentes. Las etapas más recientes de la historia humana introdujeron otra clase de cambio. En 1896 el químico sueco Svante Arrhenius predijo que la temperatura global de la Tierra ascendería varios grados si la concentración de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera se duplicaba. El CO₂ y otros gases transparentes a la luz y opacos al calor producen el "efecto invernadero" que da a la Tierra su clima típico. Este efecto se ve aumentado con la inyección de CO₂ en la atmósfera a causa del uso de combustibles fósiles que han provisto energía a la revolución industrial. La NASA retomó las ideas de Arrhenius y analizó otros cambios inducidos por la humanidad en la composición y balance de la atmósfera, hidrosfera, geosfera y biosfera para definir la Ciencia del Sistema Tierra con el fin de estudiar el cambio global. Esta disciplina integra el saber de las ciencias naturales en todas las escalas y usa todos los mecanismos de verificación, desde cromatógrafos hasta satélites. La astrobiología ofrece un marco de integración y referencia para los tres temas del título de este artículo.

Introducción

La astrobiología marcha en dirección contraria a la que tomaron las ciencias en la segunda mitad del siglo veinte. En lugar de definir territorios temáticos cada vez más angostos y abstractos, la astrobiología intenta integrar los conocimientos producidos por las distintas ramas de la ciencia para tratar sus cuestiones fundamentales: ¿De dónde venimos? ¿Estamos solos? ¿Cuál es el futuro de la vida? La integración de campos del saber que se han desarrollado independientemente durante medio siglo no es una tarea trivial. Para empezar, es necesario establecer las relaciones existentes entre algunos campos y, a partir de ellas, construir esta integración del saber científico.

Relaciones

La Astrobiología estudia el origen, evolución, distribución y futuro de la vida en el universo. El estudio del origen de la vida trata del paso de la química pre-biótica a la aparición de las biomoléculas y los primeros organismos. El análisis del cambio global enfoca los factores del cambio planetario y la alteración de sus balances causada por la humanidad. El propósito de este artículo es mostrar que la Astrobiología, el estudio del origen de la vida y el análisis del cambio global están relacionados.

Cabe preguntarse si es posible realizar el estudio propuesto por la Astrobiología. ¿Es posible estudiar el origen, la evolución y futuro de la vida en el universo? Creemos que es posible y que, en realidad, ya sabemos algo de estas cuestiones. La definición de Astrobiología no es muy diferente a la de Biología que aprendimos en la universidad. Sin embargo, la Astrobiología brinda un marco de referencia más correcto que el planetario ya que ahora buscamos el origen de la vida en los lugares del universo que reúnen las condiciones para ser habitables.

En la actualidad es posible tratar una problemática tan amplia gracias a los aportes de la tecnología espacial y, en general, a la relación cada vez más estrecha de la ciencia y la tecnología. Así, en tiempos de Alexander von Humboldt (1769-1859), una lupa de mano y una balsa permitían hacer avances enormes en las Ciencias Naturales. En su extenso viaje por América del Sur, el sabio alemán describió ocho mil especies biológicas, analizó la hidrología y, en el Chimborazo concibió las ideas que dieron origen a la biogeografía y a la ecología sistémica. Sobre el volcán, Humboldt notó que las fajas altitudinales de vegetación eran análogas a las que encontraría viajando desde el Ecuador hacia el polo. Su equipamiento técnico era muy sumario y las piezas principales reunían los adelantos de la óptica de su tiempo. La ciencia de hoy requiere igual inteligencia pero equipos muchísimo más poderosos.

Telescopio espacial

El Telescopio Espacial Hubble (Fig. 1), por ejemplo, es un instrumento extraordinario que permite observar el universo a una profundidad desconocida hasta hace pocos años. Es sabido que una empresa privada proveyó un espejo defectuoso que impidió el uso inmediato del instrumento en su máximo poder. El defecto fue corregido por un ingeniero de la NASA con la colaboración del Departamento de Física de la Universidad de Maryland a un costo mínimo. El esfuerzo se convirtió en paradigma de la buena administración y es usado como ejemplo en la Escuela John F. Kennedy de Gobierno de la Universidad de Harvard. Desde su reparación, el Hubble no ha cesado de enviar imágenes que han profundizado nuestra comprensión del universo.

HIRIM

Otro ejemplo de instrumentación avanzada es el HIRIM (Fig. 2), un microscopio desarrollado para la NASA por la empresa Kairos-Scientific (Santa Clara, California¹). Yo tuve el gusto de participar en este proyecto como referente técnico de la NASA y por ello, el primer prototipo del HIRIM se encuentra en mi laboratorio. La imagen que está en la pantalla de la computadora (ver figura) resume la investigación que permite este instrumento. Arriba a la izquierda se ve la pared de un grano de polen de *Nothofagus* (los árboles de los bosques de la Patagonia) de unos 3.000 años de edad incluido en hojuelas de *Sphagnum*, un musgo que forma una turbera de Tierra del Fuego. En la figura se distingue un rectángulo de puntos blancos que delimita una sección del preparado. Abajo, a la izquierda se ven los espectros de absorción de los sucesivos puntos de la transecta. A la derecha se observan los espectros de absorción de todo el preparado. Así, este micro-espectrómetro permite analizar la composición química de una preparación en el mismo rango de radiación que utilizan los detectores montados en satélites. En efecto, se miden las características espectrales de las moléculas del interior de las células y que, en la naturaleza integran las características espectrales de los biomas observados por los detectores satelitales. Estos ofrecen una imagen espectral sinóptica de la biosfera que el HIRIM permite relacionar con las moléculas que la producen.

1. En la actualidad Kairos-Scientific está establecida en San Diego, California.



Figura 1. El telescopio Hubble visto desde un trasbordador espacial.

¿Qué hemos aprendido con la ciencia espacial?

EL BIG BANG

En Estrasburgo, en 1918, el astrónomo Karl Wirtz midió el desplazamiento sistemático hacia el rojo en la luz procedente de algunas nebulas y lo llamó *K-correction* aunque sin advertir las implicaciones cosmológicas

que tenía su hallazgo. En 1927 el jesuita belga Georges Lemaître fue el primero en proponer que el universo había comenzado con la “explosión” de un “átomo Prístino”. En 1929, y basándose en la teoría de la relatividad, el astrónomo Edwin Hubble proveyó evidencia para soportar la hipótesis de Lemaître. La nueva tecnología permitió mediciones precisas y cálculos que parecían imposibles. Hoy el “*Big Bang*” es el modelo estándar del origen del universo y sostiene que éste comenzó cuando un solo punto de materia infinitamente densa y caliente explotó en forma espontánea. Se cree que el punto era más pequeño que la cabeza de un alfiler y que explotó en un enorme borbotón de energía. De los desechos de esa explosión se formaron todas las galaxias, estrellas y planetas. Se cree que este evento que los astrofísicos llaman una “singularidad”, ocurrió en un momento hace unos quince mil millones de años. Las investigaciones que condujeron a la formulación actual del modelo fueron iniciadas por los astrónomos Arno Penzias y Robert Wilson (1964) cuando intentaban detectar microondas del espacio exterior. Accidentalmente descubrieron un ruido de origen extraterrestre. Lo extraño era que el ruido parecía provenir de todas las direcciones al mismo tiempo. Resultó obvio entonces que lo que se oía era radiación de todos los confines del universo que había quedado como residuo del *Big Bang* (Fig. 3).

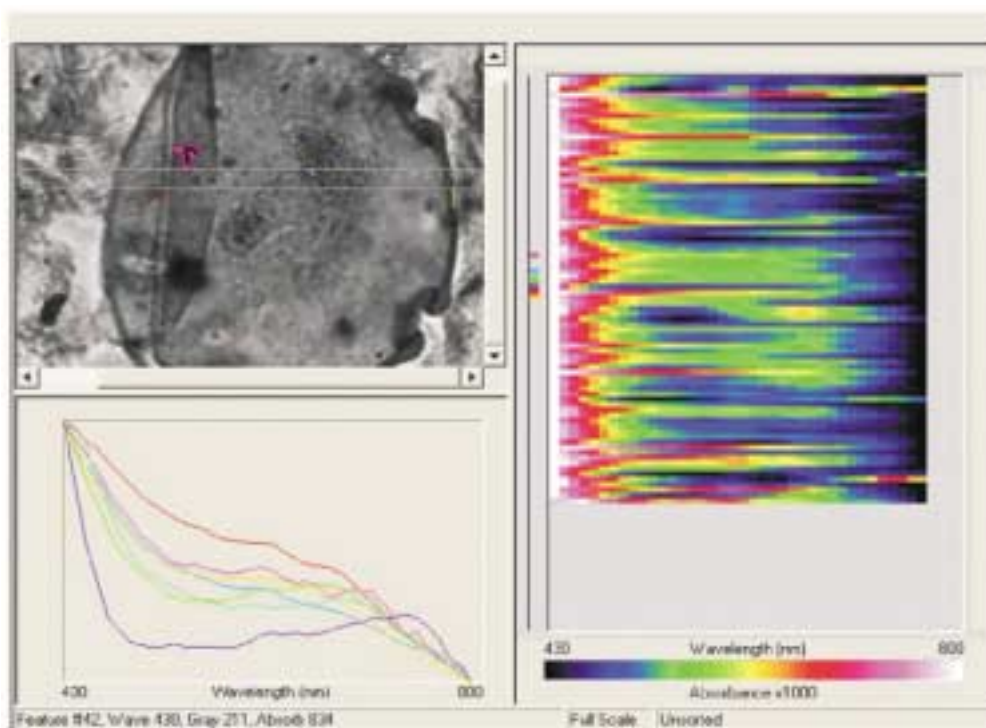


Figura 2. Pantalla del microscopio HIRIM (de Kairos Scientific). Arriba a la izquierda se ve el campo microscópico con un grano de polen de *Nothofagus* sp. rodeado de hojuelas del musgo *Sphagnum* sp. de una turbera de Tierra del Fuego (Argentina) datada en 3000 años de antigüedad. El rectángulo de puntos blancos es una transecta cuyo espectro de absorción se ve en la ventana de abajo, a la izquierda. A la derecha se ve el espectro de absorción de toda la preparación.

En el año 2003, en la Universidad de Harvard asistí a una conferencia² en la que Robert Kirshner³ presentó el trabajo de su grupo, que continuó las mediciones de Hubble. Kirshner propuso un modelo neo-relativista de la expansión universal dinamizado por la energía oscura. Este modelo reflota la “constante cósmica” desarrollada por Einstein para explicar el componente faltante en los balances de masa y energía y que luego abandonó. Sesenta años más tarde, la energía oscura parece ser el componente faltante en la actual expansión del universo con el ingrediente de la aceleración. En una discusión separada analizamos con él los puntos de contacto entre su teoría y aquellas de la década de 1960 popularizadas por la BBC de Londres (Hermann Bondi, William B. Bonnor y Raymond Lyttleton representaban un universo del estado estable, relativista y eléctrico respectivamente) y valoramos la diferencia entre aquellas teorías basadas en unos pocos hechos y la presente con el apoyo enorme de la tecnología espacial. En la actualidad tenemos una teoría del origen del universo y el origen del tiempo. En este campo, en la astroquímica y en la observación del espacio profundo, las contribuciones de la NASA son de enorme importancia, desde el mapeo de las microondas residuales del *Big Bang* en el universo, la presencia de helio y deuterio en los confines del mismo y otros numerosos hallazgos agregan pruebas al modelo del *Big Bang*.

EL PROCESO DEL UNIVERSO

Los astrónomos creen que el universo se originó hace unos quince mil millones de años, a partir del *Big Bang*, cuando se formaron las primeras nubes de hidrógeno y de helio. Enseguida, enormes fuerzas gravitatorias colapsaron las nubes y formaron estrellas que convirtieron el H y el He en elementos más pesados, como el carbono, nitrógeno y oxígeno, que son necesarios para la vida. Esos elementos volvieron al espacio con la explosión de algunas estrellas que formaron nebulas donde se sintetizaron moléculas simples como el agua, monóxido de carbono e hidrocarburos. Las nebulas colapsaron a su vez formando una nueva generación de estrellas y sistemas solares. La Figura 4 es una imagen de la galaxia NGC 300 que se encuentra a 7,5 millones de años luz de la Tierra en dirección a la constelación Sculptor; fue capturada por el Telescopio Espacial Spitzer de la NASA⁴ con una cámara digital para el infrarrojo. Las estrellas comunes aparecen en azul mientras que las nubes

2. Organizada por la Dra. Hashima Hasan, Jefa Científica del Telescopio Hubble.
3. Clowes Professor of Science de la Universidad de Harvard.
4. La NASA ha desarrollado investigaciones extraordinarias con el Programa de los Grandes Observatorios que incluye cuatro telescopios espaciales que observan el universo con diferente luz: El Hubble en el visible, el Compton en rayos gamma, el Chandra en rayos X, y el Spitzer en infrarrojo.

de polvo que marcan los brazos de la espiral se ven en rojo. La mayoría de las estrellas se ha concentrado alrededor del centro de la galaxia pero las más jóvenes se ubican hacia afuera en los brazos y periferia de ésta.

En este colosal proceso de expansión ocurrieron accidentes. Los astrónomos creen que la galaxia conocida como Anillo de Lindsay-Shapley (Fig. 5), que está a unos 300 millones de años luz de la Tierra en la constelación Volans y parece un brazalete de brillantes fue embestida por una “galaxia intrusa”. Esta imagen, que fue tomada por el telescopio Hubble, muestra la forma peculiar de esta galaxia que resultó de la colisión cósmica. La parte exterior de la galaxia donde todavía se aprecia su forma en espiral, se convirtió en el anillo mientras que los restos de la parte central sobreviven como una estructura blanco-amarillenta que ocupa una cuarta parte del espacio interior del anillo.

Nuestra galaxia, la Vía Láctea (Fig. 6), nos incluye en una posición medio-distal en uno de los brazos de sus espiras. Nuestro Sol es una estrella mediana cuya superficie se muestra en esta imagen tomada desde un satélite. Fröhlich y Lean (1998) y Fröhlich (2004) demostraron que la energía emitida por el Sol (Fig. 7) varía en 0,1% y nosotros mostramos que esas variaciones tienen influencia en los procesos de la biosfera terrestre (D’Antoni y Skiles 2005).

EL SISTEMA SOLAR

En nuestro sistema solar se formaron cometas (que parecen ser los objetos más primitivos del sistema), meteoritos, asteroides y planetas. Se cree que los cometas son residuos del *Big Bang*. Orbitan alrededor del Sol y están formados por hielo y polvo por lo que, a veces se los llama *bolas de nieve sucia* tal vez para contrarrestar el encanto que siempre han tenido para la gente. Los asteroides también orbitan alrededor del Sol y son pequeños planetas pétreos. Concentrados en una banda alrededor del Sol, marcan el límite entre dos grupos de planetas: En el primero se encuentran los cuatro planetas exteriores llamados gigantes gaseosos ya que son mundos enormes formados por una mezcla de H y He. Se cree que sus gruesas atmósferas se extienden miles de kilómetros por debajo de su cubierta de nubes hacia un pequeño núcleo central de roca. Plutón es un mundo distante formado principalmente por hielo que a veces cruza la órbita de Neptuno, como ocurrió entre 1979 y 1999 en que este pequeño planeta estuvo más cerca del Sol que Neptuno. En el segundo grupo están los cuatro planetas interiores llamados “enanos rocosos” porque son pequeños comparados con los exteriores y están formados casi totalmente por rocas. Su pequeño tamaño les hace retener atmósferas con gases pesados como el dióxido de carbono, oxígeno, y nitrógeno.

Uno de los logros notables de la tecnología está representado por la imagen de los anillos de Saturno (Fig 8)

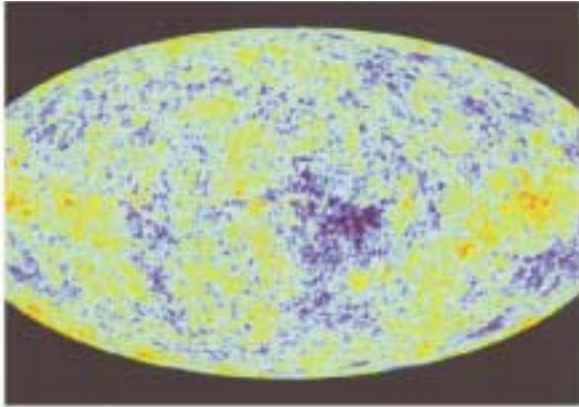


Figura 3. Radiación de microondas considerada como residuo del "Big Bang".

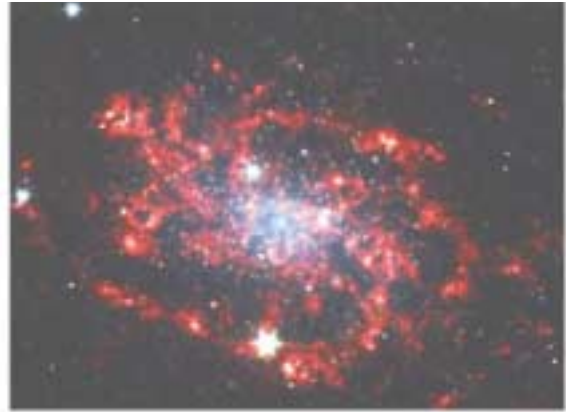


Figura 4. La galaxia NGC 300 vista por el telescopio espacial infrarrojo Spitzer de la NASA. Se halla a 7,5 millones de años luz de la Tierra, en la constelación Sculptor.



Figura 5. La galaxia Lindsay-Shapley vista por el Hubble está a 300 millones de años luz de la Tierra. Se cree que fue chocada por otra dejando en su interior un cuerpo amarillento y hacia afuera los restos de las espiras.



Figura 6. La Vía Láctea. La flecha marca la posición del sistema solar dentro de nuestra galaxia.

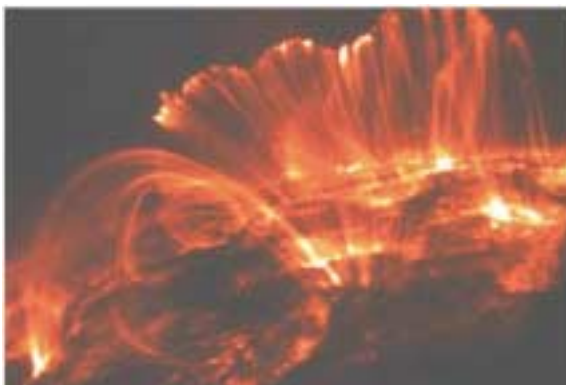


Figura 7. La superficie del sol inmediatamente después de una explosión y enfriándose 1 millón de grados.

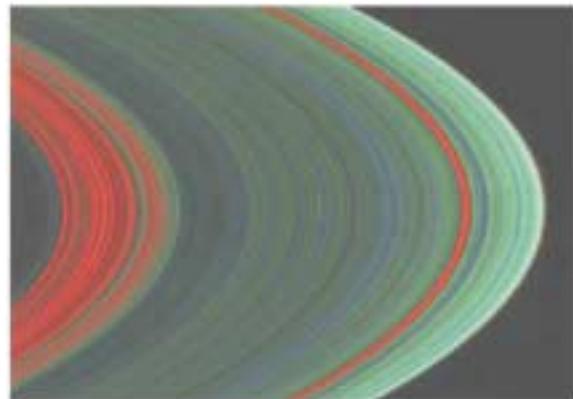


Figura 8. Los anillos de Saturno captados en UV por la nave espacial Cassini. La imagen en falso color donde azul a verde es hielo, rojo contiene más rocas. Los objetos que forman los anillos varían en tamaño desde micrones a decenas de metros.

tomada desde adentro hacia afuera por la nave espacial Cassini. Para llegar al planeta, la nave tuvo que atravesar los anillos recibiendo impactos importantes. En la planificación de la nave se tuvieron en cuenta esos impactos de modo que el viaje a través de esa zona hostil no dañó los instrumentos de Cassini.

Dado que el clima terrestre produce la meteorización y erosión de la superficie, la evidencia fácilmente discernible de impactos de meteoroides⁵ es escasa. Se conocen alrededor de 150 cráteres mayores en la Tierra, como el Cráter de Riess (Alemania) dentro del cual hay dos ciudades importantes, Oettingen y Nördlingen, y gran actividad agrícola, el de Arizona (en Estados Unidos) que está virtualmente inalterado y el Campo del Cielo (en Argentina) que es una colección de múltiples impactos. En relación con esto y gracias a la tecnología, en julio de 1994 vimos por televisión el choque de un cometa contra un planeta del sistema solar. La llegada de los fragmentos del Cometa P/Shoemaker-Levy 9 a la superficie de Júpiter fue un fenómeno de múltiples impactos. El telescopio Hubble detectó las huellas de esos impactos (Fig. 9). Esta prueba material de los choques celestes observados por la humanidad tenía un antecedente importante en la Tierra. En 1908, un gran ruido llamó la atención de los habitantes de una región de Siberia. Al mirar al cielo vieron el estallido de un meteorito y cómo sus fragmentos llegaban al suelo. Esto ocurrió en Tunguska y ha sido considerado el evento sideral más importante en la historia de la civilización. Por fin, nosotros estamos investigando algunas posibles evidencias de impactos en América del Sur.

El agua de nuestros océanos no puede derivar de la actividad volcánica y es probable que se deba a impactos de cometas de hielo (como el que Shoemaker/Levy que impactó a Júpiter). Existen dudas, sin embargo, porque la espectroscopia del cometa Hale-Bopp (que nos visitó en 1997) mostró una alta proporción de agua pesada (D₂O) en el hielo del cometa que contrasta con la concentración de D₂O en el agua de la Tierra.

LA SUPERFICIE DE MARTE

Dos vehículos de exploración *rovers* manejados desde el Jet Propulsion Laboratory de la NASA en Pasadena (California) descendieron en Marte y transmiten información geoquímica a la Tierra (Fig. 10). En su edición del 1 de junio de 2005, la *Astrobiology Magazine* habla de uno de estos *rovers*, Spirit, como el chico-problema. En sus exploraciones de Marte, los *rovers* Spirit y Opportunity encontraron abundante evidencia de agua líquida en el pasado marciano. Este hallazgo *in situ* viene a confirmar las observaciones del Mariner 9 en 1969 y las imágenes detalladas del Viking en 1976 (NASA 1974, 1980).

5. Nombre genérico dado a los meteoritos y cometas.

En la actualidad, los *rovers* encontraron principalmente lava del tipo que se ve en Hawai, en Oregon o en la Patagonia. Al principio de la misión se hallaron pequeñas evidencias de agua en el pasado pero nada parecía indicar sedimentos de fondo de lago o alguna otra formación geológica que indicara la presencia de abundante agua líquida en el pasado, capaz de alojar vida. La investigación comenzó dentro de un cráter, pero cinco meses después de tocar suelo marciano, el día 156 del año marciano Spirit salió del cráter y llegó a la base de la colina (Columbia Hill). Inmediatamente encontró un tipo de roca diferente, con signos inequívocos de agua en el pasado. Hay varios tipos de rocas en la colina cuyos colores van desde el gris al anaranjado lo que indica su grado de oxidación. La mayor evidencia de agua se encontró en la roca Clovis, que es más blanda que el basalto. Los resultados del análisis con el espectrómetro Mössbauer indicaron que un mineral llamado Goethita es abundante en esa roca. La Goethita es FeO(OH), cuyo oxhidrido sólo se forma en presencia de agua líquida. No está claro aún cómo se puso el agua en contacto con este óxido de hierro y se han propuesto varias hipótesis. La segunda evidencia es el hallazgo de sales, sulfatos de hierro. Pero es un sulfato de hierro hidratado que indica un pasado de agua líquida. También en este caso se evalúan varias hipótesis sobre cómo el sulfato vino a estar en contacto con el agua. Como quiera que haya sido, es seguro que en algún momento de su pasado, Marte tuvo las condiciones necesarias para albergar vida.

El origen de la vida

La vida en nuestro planeta es toda la evidencia tangible de vida que tenemos. Es interesante analizarla desde la perspectiva de la Astrobiología. En primer término, nuestro planeta se formó a una distancia del Sol que le permite tener agua líquida, que se considera *conditio-sine-qua-non* para la vida. El origen de la vida puede fijarse en el momento en que las interacciones entre materia y energía produjeron sistemas autocatalíticos que pasan información de una generación a otra.

PANSPERMIA

En el siglo XIX, cuando la teoría cosmológica del estado estable estaba de moda, Lord Kelvin, Svante Arrhenius y otros grandes científicos creían que la transferencia de la vida de un planeta a otro era inevitable dadas la extensión y duración infinita del universo. Esta hipótesis se llamó Panspermia. En el siglo XX, el colosal desarrollo de la Biología y más tarde la idea del *Big Bang* hicieron olvidar a la Panspermia y los esfuerzos científicos se concentraron en el origen de la vida en la Tierra. Los experimentos de Urey y de Miller en los Estados Unidos, los de Oparin en la Unión Soviética y en NASA Ames los



9A

Figura 9. A, Impactos de los fragmentos del cometa P/Shoemaker-Levy 9 en Júpiter tomados en UV por el telescopio espacial Hubble.

B, Imágenes de los fragmentos del cometa P/Shoemaker llegando al planeta.



9B

de Cyril Ponemperuma que, en la década de 1960 decía que “la vida es una propiedad inherente de la materia en cierto grado de organización” no contradicen la idea de la Panspermia. En la última década se han reunido datos que sugieren que la Panspermia es un proceso natural y común del universo. Una pregunta clave parece ser, ¿La vida se originó primero en la Tierra?

Gracias a las mediciones precisas del universo realizadas con el telescopio Hubble se ha podido calcular su edad, con una fórmula fundamental de la física

$$\frac{\text{(distancia de una galaxia particular)}}{\text{(la velocidad de esa galaxia)}} = \text{(tiempo)}$$

Reemplazando en la fórmula con los valores medidos para una galaxia,

$$4.6 \times 10^{26} \text{ cm} / 1 \times 10^9 \text{ cm/seg} = 4.6 \times 10^{17} \text{ seg}$$

El resultado es unos 15 Ga (15 mil millones de años).

Otro argumento en favor de la Panspermia fue provisto por el estudio del meteorito marciano ALH84001

(Fig. 11) recuperado en la Antártida. El análisis paleo-magnético de este meteorito de roca probó que viajó desde Marte a la Tierra sin que su interior se calentara a más de 40 °C, una temperatura perfectamente compatible con la vida. La posible presencia de magnetofósiles muy similares a las bacterias terrestres encontrados en el carbonato del meteorito ALH84001 refuerza la idea de la existencia de vida en otros planetas y su posible transporte en el universo. Yo he tenido el gusto de prestar el microscopio HIRIM de mi laboratorio y al que me referí más arriba, para hacer un estudio micro-espectroscópico en el visible, con una resolución espacial de 1 μm y una resolución espectral de 1 nm, de una sección delgada del meteorito y que condujo a la conclusión de que las formas encontradas en el carbonato podían corresponder a bacterias.

PRIMERAS FORMAS DE VIDA

El análisis por “reloj molecular” de numerosos genomas completos de bacteria, archaea y eucarya indica que el primer ancestro común de los organismos vivientes tiene unos 4.0 Ga.

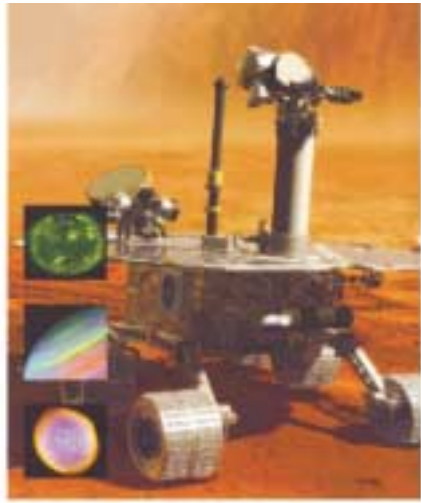


Figura 10. Uno de los rovers que exploran la superficie de Marte.

Podemos generalizar sugiriendo que la vida (los sistemas autocatalíticos que pasan información de una generación a otra) puede aparecer en un planeta con agua líquida, nutrientes y fuente de energía. Las moléculas de ADN, armaron su red en los mares primitivos, desarrollando paso a paso los linajes de organismos cuyos descendientes pueblan hoy nuestra biosfera.

¿Cómo eran sus estructuras? NASA Ames tiene antecedentes importantes en la investigación de los organismos vivos emparentados con las primeras formas de vida. A mediados de la década de 1980, Elisa D'Antoni estudió la ultraestructura de las cianobacterias que forman las películas microbianas actuales en los estromatolitos de Guerrero Negro (México) para un proyecto de David Des Marais. Este último autor ha mantenido esa línea de investigación y la ha incorporado al Proyecto de Astrobiología del Grupo Ames.

¿Las formas de vida primitiva tenían las mismas características que las actuales? Lynn Margulis ha sugerido que algunas organelas muy importantes (mitocondrias y cloroplastos) tenían vida libre y que entraron como simbiosis en otras células. Margulis asignó importancia a la simbiosis como factor en el proceso evolutivo. Esta idea fue recogida por importantes científicos como Lehninger en su famoso libro de Bioquímica.

Las plantas y animales invadieron la tierra firme donde surgieron otras formas de vida cada vez más avanzadas hasta llegar a la humanidad. Ésta, asistida por su propia tecnología, ha salido al espacio tratando de entender sus orígenes, expandirse en nuevos territorios y buscar otras líneas de vida en el cosmos.

Desde el punto de vista de la Astrobiología, el primer asunto a considerar en la búsqueda de vida extraterrestre es que el planeta o satélite donde se la busca esté

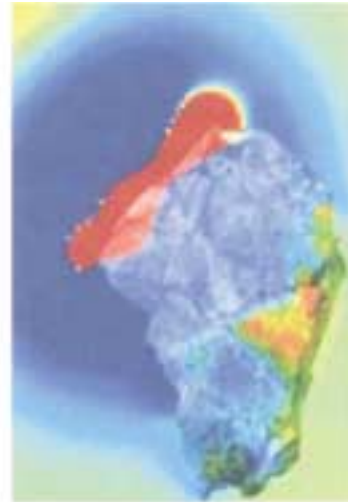


Figura 11. El meteorito marciano ALH84001. El análisis paleomagnético probó que esta roca viajó desde Marte sin que su temperatura interior superase cuarenta grados centígrados.

dentro de la zona habitable alrededor de su estrella (o que reúna las condiciones físicas propias de aquella zona). En general, la zona habitable es la faja alrededor de una estrella en la que un planeta puede contener agua líquida. En el sistema solar, el límite exterior es el del flujo solar de 726 w m^{-2} , cuando se condensa el CO_2 y se detienen los ciclos geoquímicos. El límite interior está establecido por un flujo solar de 1507 w m^{-2} en que se pierde agua por fotodisociación y el H escapa al espacio. El flujo solar de la Tierra es de 1370 w m^{-2} .

LOS AMBIENTES EXTREMOS

Aun en nuestro planeta y en la actualidad hay evidencia de la vida adaptada a las condiciones extremas que deben haber prevalecido en los momentos iniciales de la vida en nuestro planeta. Las investigaciones en el hielo han mostrado una fascinante colección de formas vivas, sugiriendo que conviene explorar mundos helados en busca de vida. Por extensión estamos explorando algunos satélites del sistema solar que contienen hielo, como la luna Europa, de Júpiter, tratando de dilucidar si existe agua líquida, y por tanto, la condición fundamental para la existencia de vida. Otros sitios de interés para la búsqueda de vida en ambientes helados son la séptima y octava lunas de Júpiter (Ganímedes y Callisto, además de la sexta, Europa) y la décimocuarta luna de Saturno (Titán).

El Río Tinto (en Huelva, España) muestra otro aspecto de los ambientes extremos. La vida es riquísima y diversa en sus aguas con $\text{pH} = 2.5$. Otros ambientes extremos estudiados en la actualidad son las fumarolas submarinas y los géiseres. En éstos existen organismos vivos capaces de tolerar temperaturas que considerábamos letales hasta hace poco tiempo.

mos letales hasta hace poco tiempo.

PLANETAS EXTRASOLARES

No menos importante es la búsqueda de mundos que puedan albergar la vida más allá del sistema solar. Hasta la fecha se han identificado ciento cincuenta planetas en otros sistemas solares y se están aplicando técnicas refinadas de espectroscopía para analizar las características químicas de esos planetas y sus atmósferas.

EL CAMBIO GLOBAL

El cambio es una propiedad intrínseca de los sistemas. Como tal, la Tierra es un sistema cambiante. Ha cambiado a través del tiempo la proporción de los océanos y la tierra firme, la altura del nivel de mar, las formas de la superficie y el clima, es decir la condición media de la atmósfera. La tectónica de placas ha reconfigurado tanto el fondo del mar como el número, distribución, y topografía de los continentes. Estos cambios son producidos por enormes fuerzas naturales tales como las que sujetan el movimiento de la Tierra en su órbita alrededor del Sol, las variaciones de la energía que emite el Sol y las erupciones volcánicas.

Otros componentes del cambio global son aquellos producidos, inducidos o aumentados por las actividades humanas. Aunque en general son cambios de magnitud muchísimo menor que los que acabamos de comentar,

pueden alcanzar escala global y tener consecuencias devastadoras para la humanidad y para el resto de los seres vivientes. Estos cambios son sobre todo climáticos pero influyen a otros componentes del "Sistema Tierra".

El calentamiento global es producido por el efecto invernadero (Fig. 12). La atmósfera contiene gases de invernadero (vapor de agua y gases de traza CO_2 , CH_4 , óxido nitroso, ozono, clorofluorocarbonos, los CFCs de los cuales el freón es el más conocido), que son transparentes a la energía de onda corta y opacos a la de onda larga. El efecto invernadero es un componente normal del Sistema Tierra por el cual la temperatura media del planeta es 33°C más alta de lo que sería sin ese efecto y por tanto inhóspita para la vida como la conocemos hoy. Lo que nos preocupa es el efecto invernadero aumentado.

La combustión de carbón, petróleo y gas natural para alimentar la calefacción, mover nuestros vehículos y máquinas, e iluminar nuestras ciudades produce CO_2 y otros gases de invernadero. La deforestación y limpieza de la tierra para usos agrícolas también agrega gases de invernadero. Las actividades humanas alteran la composición química de la atmósfera, la radiación solar que recibimos y la circulación de los fluidos. Estas alteraciones ponen en riesgo los balances planetarios. Los gases de traza suman menos del 1% de la atmósfera, pero están creciendo rápido debido a las actividades humanas.



Figura 12. El "efecto invernadero" natural de la Tierra. La atmósfera contiene vapor de agua y gases de traza como el dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, ozono troposférico y clorofluorocarbonos, que son transparentes a la luz y opacos al calor. Estos gases producen el efecto invernadero.

CO₂ ATMOSFÉRICO

El CO₂ creció un 25% desde fines del siglo XIX (de 280 a 350 ppm). Su tasa de crecimiento anual es del 0,5% y su concentración se duplicará en 140 años. El uso de los combustibles fósiles es responsable de casi todo el aumento. A eso se suma la deforestación. El efecto del CO₂ es igual a la suma de los efectos de todos los otros gases, pero esta proporción está cambiando. La concentración de CH₄ se duplicó desde el año 1800 y este gas es unas 25 veces más eficaz que el CO₂ para captar calor. Se produce por el uso de combustibles fósiles, la actividad de las bacterias de los pantanos, de las tierras de relleno y arrozales, pérdidas en líneas de gas, regurgitación y flatulencia de los rumiantes, etc. El uso de combustibles fósiles como el carbón, petróleo y gas natural inyecta 6 mil millones de toneladas (= 6 GT) métricas de carbono a la atmósfera cada año. La deforestación del planeta no es un problema trivial. Hacia 1988 se había deforestado un 6% de la selva amazónica del Brasil (230.400 km²). Pero los daños marginales (por fragmentación, cambios en la exposición solar, etc.) hacen que la proporción ascienda al 16,5% (unos 590.000 km²). Regiones mucho más peque-

ñas en el sureste de Asia (Camboya, Tailandia y Vietnam) han perdido una superficie forestal similar a la del Brasil. Cada hectárea de selva tropical contiene 300 toneladas métricas de carbono. Así, entre 1850 y 1990 la deforestación mundial inyectó 122 GT de C a la atmósfera. La tasa actual es de 1,6 GT de C por año, que se suman a los 6 GT que inyecta el uso de combustibles fósiles. Así, *la acción humana inyecta anualmente 7,6 GT de C por año en la atmósfera*. Se ha podido reconstruir la historia del CO₂ atmosférico desde 1860 y se ve un crecimiento importante desde comienzos de la revolución industrial. En el mismo plazo, la temperatura media mundial aumentó un grado Celsius. En el máximo de la última glaciación del Cuaternario la temperatura media anual bajó tres a cinco grados, de modo que un grado representa entre un quinto y un tercio de aquel gran cambio. La correlación entre el aumento de la concentración de CO₂ atmosférico y el de la temperatura parece bien establecida (Fig. 14). Una prueba sólida del ascenso de la temperatura es el retroceso de los frentes glaciares (Fig. 13). Además de los cambios en la química atmosférica hay pruebas incontestables del calentamiento como esta imagen del complejo glaciario de Montana.

Figura 13. En el Parque Nacional de los Glaciares del estado de Montana, se ha medido un gran retroceso de los frentes glaciares. La superficie en rojo era la que cubrían los glaciares en 1850 y la superficie en amarillo es la extensión de esos glaciares en 1979.

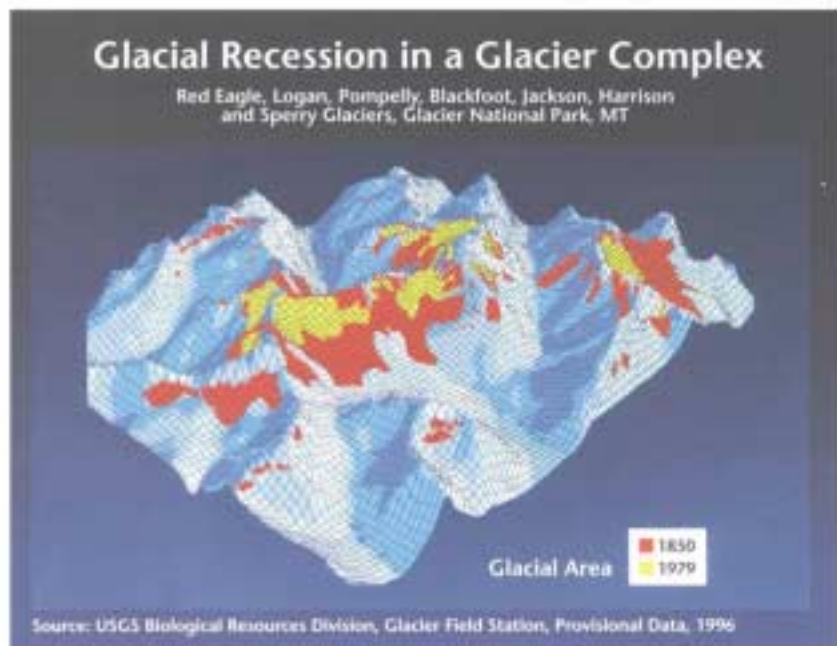
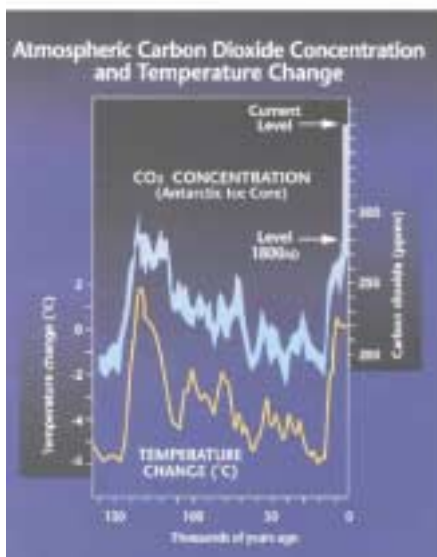


Figura 14. Cambios en la concentración de dióxido de carbono y la temperatura en los últimos 150.000 años. La concentración actual de dióxido de carbono es significativamente mayor que los máximos históricos que se muestran en el gráfico. La temperatura ha aumentado en respuesta a la concentración del gas de invernadero, pero la relación entre ambos factores no ha sido siempre lineal.

El fuego es un factor ecológico de importancia en los bosques de California, pero también es estimulado por el fenómeno El Niño en la Selva Amazónica y en el resto de la faja tropical del planeta donde produce daños materiales y fuerza la migración humana (Meggers 1996).

DISTINTOS ESCENARIOS PARA EL CAMBIO

Si la temperatura aumenta derritiendo los hielos polares ascenderá el nivel del mar. Sabemos que durante la última glaciación el nivel del mar bajó por lo menos 90 metros. Ahora estamos 1 °C por encima de la temperatura global "normal". Si la temperatura ascendiera 1 °C los sectores turísticos de Florida desaparecerían, lo mismo pasaría en lugares como La Boca, Ensenada, Berisso, la Depresión del Salado y hasta algunos lugares costeros de Mar del Plata. Asimismo, el ascenso de la temperatura aumenta la extensión de las zonas áridas y genera nuevas. Asimismo cambia los patrones de circulación atmosférica y reduce la superficie de los hielos polares.

Los modelos que se usan en el estudio del cambio global predicen cómo cambiaría el planeta en distintos escenarios. Por ejemplo, si la concentración de CO₂ subiese al doble, la humedad del suelo de las regiones agrícolas se reduciría significativamente a causa del aumento de la temperatura. El cuadro global muestra un gran aumento de la temperatura en la región polar del norte y un leve enfriamiento en el sur. Hay un secado moderado de toda la faja tropical del planeta. Pasando de la realidad a la predicción, las emisiones de CO₂ en 1995 estaban repartidas en un 75% para los países desarrollados y un 25% para el de los países en desarrollo. La emisión agregó entonces 6,5 GT de C por año. En 2035 las emisiones se repartirían por igual entre los dos grupos de países pero el total de las emisiones subiría a 11,7 GT.

Las imágenes del sensor TOMS (fig. 15) muestran el agujero del ozono austral en octubre. El agujero ha crecido desde entonces y el problema comienza a verse en el Ártico. El neerlandés Paul Crutzen, el mejicano Mario Molina y el estadounidense Sherwood Rowland recibieron el Premio Nobel de Química de 1995 porque explicaron los procesos fotoquímicos de la destrucción del ozono estratosférico. La relación de los CFCs con la destrucción del ozono quedó bien establecida y esto condujo a la reafirmación del Protocolo de Montreal en el que los países signatarios se comprometen a reducir hasta eliminar la producción de freón y otros gases que dañan el ozono.

EJEMPLOS DEL CAMBIO GLOBAL

Sólo mencionaré dos ejemplos para dar una idea de la importancia de este cambio: entre 1995 y 1998. Con mi colega Jay Skiles y la colaboración de varios científicos y estudiantes creamos un experimento para evaluar

algunos efectos del aumento de la radiación ultravioleta de longitud de onda media (280-320 nm), llamada UV-B. Para ello construimos una estructura con tres cámaras que reunían exactamente las mismas condiciones, excepto por la radiación UV-B. En la primera cámara, la UV-B era bloqueada por completo, en la segunda se la reducía en 15% (una condición similar a la "normal" antes de producirse la erosión de la capa de ozono) y, en la tercera cámara se permitía el paso de toda la UV-B procedente del Sol. Allí pusimos plantas ya establecidas de alfalfa (*Medicago sativa* L.) y las observamos durante diez semanas de verano. Medimos la radiación solar UV-B con una resolución espectral de 1 nm, la concentración de clorofila en las hojas de las plantas, la distancia internodal, y otras medidas de interés biológico. En el año 1995 observamos diferencias significativas entre los tratamientos, en 1996 las diferencias no fueron significativas y en 1997 las diferencias fueron grandes (Fig. 16). Hemos presentado estos resultados en reuniones científicas e informes a la NASA y actualmente preparamos con Skiles una monografía detallando los experimentos y sus resultados. En resumen, la UV-B afectó al crecimiento de las plantas (el área foliar y la distancia internodal) probablemente por destrucción de las hormonas de crecimiento, concentración de clorofila por destrucción de la molécula, aumento de la concentración de pigmentos flavonoides que absorben UV-B, creemos que se redujo también la función fotosintética por daño de la proteína que controla el funcionamiento del fotosistema II y prolongó el ciclo biológico de las plantas que rindieron un 20% menos de biomasa útil como forraje.

El otro ejemplo es un estudio de la epidemiología del cáncer de piel en Puerto Rico. En el estudio conducido por Jaime Matta, de la Escuela de Medicina de la ciudad Ponce se determinó que las admisiones hospitalarias por cáncer de piel aumentaron un 400% entre 1979 y 2000. Parte de este aumento debe ocurrir en respuesta a las campañas de educación sanitaria que hacen a la gente más consciente del peligro de exponerse a esa radiación. Pero no conocemos campaña educativa de ningún tipo que produzca resultados del 400%. Está claro que hay un aumento mayor en los casos de cáncer de piel. El impacto que hicieron estos hallazgos sobre el grupo de investigación lo llevó a seguir los casos de los pacientes censados antes. En la mayoría de los casos esos pacientes fallecieron años después víctimas de alguna forma más severa de cáncer. Pasando de la epidemiología a la molécula, acabamos de publicar un artículo en *Photochemistry and Photobiology* sobre las dosis de UV-A y UV-B necesarias para poner en marcha el mecanismo de apoptosis para eliminar los fibroblastos de la piel dañados por esa radiación solar. Hay mucho más que decir sobre el cambio global, pero estos ejemplos muestran con dramatismo la importancia del tema.

PROBLEMAS EN LA PREDICCIÓN

Las predicciones se hacen con modelos computacionales complejos. Las mediciones ambientales sistemáticas se realizan desde hace pocas décadas y, en pocos casos hay datos de más de un siglo. Estos registros no abarcan todo el rango posible de variación de sus variables.

LA OSCILACIÓN AUSTRAL EL NIÑO

Un tema que integra la problemática del Cambio Global es la Oscilación Austral "El Niño" (o ENSO por su sigla en inglés). El calentamiento del Pacífico tropical tiene efectos globales. ¿Es parte del cambio global? ¿Ocurría antes del siglo XX? ¿Está aumentando? Es necesario conocer su historia para establecer si se trata de un fenómeno post industrial o si está ocurriendo desde hace tiempo y sólo hemos observado un componente del conjunto natural. Usando inteligencia artificial, redes nerviosas y otras herramientas de precisión sobre fósiles con excelente resolución temporal hicimos nuestra contribución, para un plazo mayor (Fig. 17). Este trabajo muestra que los aumentos y descensos de la temperatura superficial del Pacífico similares a las que causan los fenómenos de El Niño y La Niña han ocurrido a lo largo de los últimos 750 años y que, por ejemplo, la pequeña edad del hielo del Renacimiento se correlaciona con el mínimo de Maunder, época de menor incidencia de las manchas solares y con varios episodios fríos en la temperatura superficial del pacífico, aportando otra prueba de la interconexión de los factores en el Sistema Tierra. Esta reconstrucción estimuló el estudio de los efectos de "El Niño" en América del Sur a mayor resolución espacial que aquella de los modelos de circulación global (GCM). Utilizando el índice verde (NDVI) en una cartografía satelital con pixels⁶ de 8 km de lado pudimos demostrar el gran contraste entre los efectos de "El Niño" (fase cálida) y "La Niña" (fase fría) de la Oscilación Austral sobre la vegetación de América del Sur (Fig. 18).

Indirectamente, esta reconstrucción subraya la importancia de la datación "absoluta" de los eventos del pasado. Sin resolución anual, la contribución de los fósiles al estudio de la SST y su validación como componente de modelos predictivos pierde mucho valor. Los conjuntos fósiles de diatomeas, granos de polen y esporas de las plantas son registros vicarios del clima y el ambiente a escalas temporales más gruesas. El análisis de estos fósiles es una paleobiología cuantitativa que puede ayudar a resolver el déficit de datos. En cambio, los métodos paleontológicos normales no sirven para esta tarea porque se expresan en códigos que no se pueden

6. Pixel = Picture element. Las unidades que componen una imagen digital.

traducir a los modelos de proceso ecosistémico basados en física, fisiología y ecología.

RECONSTRUIR EL PASADO PARA PREDECIR EL FUTURO

En nuestro proyecto de Astrobiología creamos un modelo que desarrolla un poco más las ideas de Monteith, Seller, Gowan, Running and Nemani para predecir la producción primaria neta (NPP, la medida sinóptica de la actividad ecosistémica), ajustado a los cambios en las fuerzas planetarias que actuaron sobre el clima y los ecosistemas del pasado.

$$\text{Paleo-NPP} = \{t\Sigma (\sigma^* \text{Paleo-NDVI})^* \epsilon\} \text{V.O.S.}$$

(**Paleo-NPP** es función del contenido de agua en el suelo; ($t\Sigma$), la biomasa verde durante la estación de crecimiento ($\sigma^* \text{Paleo-NDVI}$), ajustando todo por la ubicación y tipo de metabolismo (ϵ) y por el estado de los dinamizadores climáticos en cada momento de la historia, **V.O.S.**). Usamos los datos del modelo NASA-CASA (completamente independiente de nuestro modelo) para calibrar las ecuaciones y como control de calidad.

La astrobiología ha servido como marco para analizar el origen del universo, el de la vida y los cambios ambientales de nuestro planeta, naturales y artificiales, es decir, inducidos, aumentados u originados por la actividad humana.

EN SÍNTESIS

- La teoría del *Big Bang* ha ganado aceptación al descubrirse la radiación residual de la explosión que dio origen al universo.
- La formación de elementos a partir de H y He puso al C en cuarto término entre los elementos más abundantes del universo.
- La expansión del universo fue medida por Hubble en 1929 y a mucha mayor escala por Kirshner en 2003, que proveyó una explicación material para la expansión.
- Los telescopios espaciales miden con precisión las distancias y movimientos en el espacio y con estos datos se puede estimar la edad del universo en unos 14,8 Ga.
- La vida parece ser una propiedad de la materia con cierto grado de organización.
- La presencia de agua líquida es necesaria para que exista la vida.
- El agua de nuestros océanos no puede derivar de la actividad volcánica y es probable (aunque discutible) que se deba a impactos de cometas de hielo (como el de Shoemaker/Levy que impactó a Júpiter).

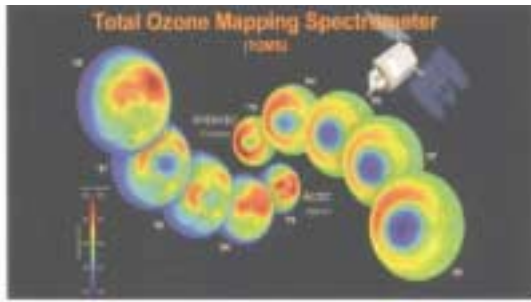


Figura 15. Los agujeros en la capa de ozono estratosférico sobre los polos. A la izquierda se ve el déficit de ozono en el Polo Norte y a la derecha en el Polo Sur.



Figura 16. Vista parcial de las cámaras de cultivo emplazadas en el centro Ames. A la izquierda se ven las plantas de alfalfa expuestas a las condiciones corrientes (1997) de UV-B solar; en el centro, las plantas bajo una reducción del 15% de radiación UV-B y a la derecha las plantas creciendo bajo exclusión de UV-B. Nótese las diferencias de color, altura y densidad del follaje (de D'Antoni & Skiles, 1998I Progress Report to the DDF Fund).

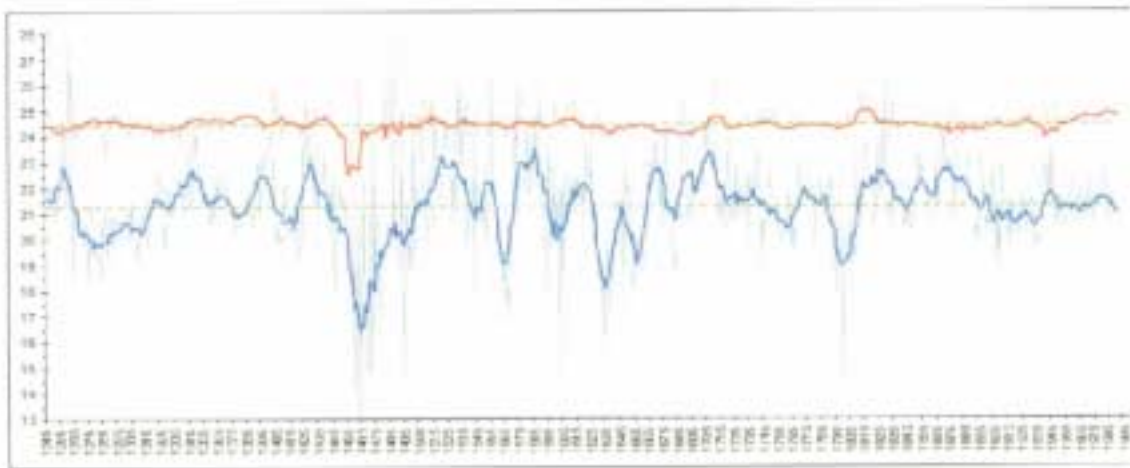


Figura 17. Reconstrucción de la temperatura superficial de la porción tropical de los océanos Pacífico (azul) y Atlántico (rojo) desde 1246 a 1995. Las respectivas líneas verdes muestran el promedio de la temperatura. Las líneas finas son predicciones puntuales, las gruesas son resultado de un promedio móvil de cinco años (D'Antoni & Mlinarevic, 2002).

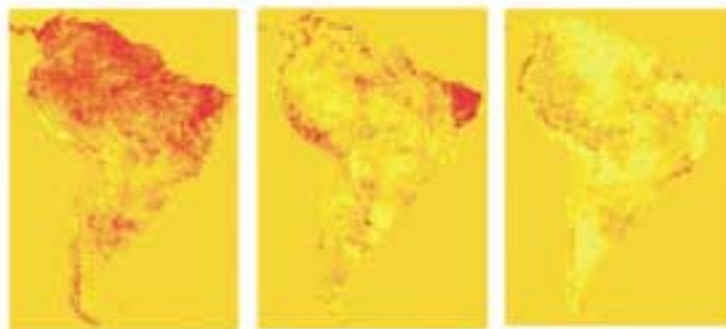


Figura 18. Desviaciones del "índice verde" (NDVI) producidas por la Oscilación Austral "El Niño". Verde = positivo, amarillo = neutro y rojo = negativo. En 1983 casi todo es negativo, excepto la costa de Ecuador. En 1984, el exceso de agua en el suelo se ve en Ecuador y en la pampa. En 1985, el fenómeno La Niña invierte casi todos los desvíos. (D'Antoni, Peterson & Mlinarevic, 2002).

- El concepto de Panspermia parece tener pruebas en cometas (aminoácidos) y meteoritos (restos celulares) como vehículos.
- Los análogos de la vida primitiva en la Tierra (y el universo) se investigan en los ambientes extremos.
- La actividad humana cambia la composición de la atmósfera y daña la capa de ozono estratosférico.
- El calentamiento global se debe al aumento del efecto invernadero por el agregado de CO₂, CH₄, NO₂ y CFC que son transparentes a la energía de onda corta y opacos a la de onda larga.
- Los efectos del calentamiento se ven en el retroceso de los glaciares, en la disminución del hielo polar y en la elevación de la línea de nieves perpetuas.
- La tendencia se revierte cuando los volcanes inyectan aerosoles en la atmósfera que filtran la radiación solar.
- La instrumentación, desde los telescopios espaciales y satélites hasta HIRIM y otros instrumentos de avanzada permiten pasar desde moléculas y células a biomas, planetas y galaxias.
- La ciencia y la tecnología espacial hicieron posible una visión sinóptica de la Naturaleza a su máxima escala.

MI OPINIÓN

- La magnitud de estos descubrimientos en el universo, el sistema solar y nuestro planeta indica la necesidad de una reevaluación del saber científico.
- Los estudios de cambio global sugieren que debemos tratar al planeta con la misma atención que damos a nuestra casa y a los seres vivos con la misma ética con que tratamos a nuestra familia.

CORRESPONDENCIA

HÉCTOR L. D'ANTONI
NASA Ames Research Center
Moffett Field, CA 94035-1000
E-mail: Hector.L.Dantoni@nasa.gov

Referencias bibliográficas

- Spirit, the Problem Child. *Astrobiology Magazine*, June 1, 2005 Disponible en (<http://astrobio.net/news>). Consulta realizada el 28-9-05.
- Bugos GE. Atmosphere of Freedom. Sixty Years at the NASA Ames Research Center. Washington DC: NASA SP-4314, 2000.
- D'Antoni HL, Skiles JW. Prediciendo ecosistemas del pasado en América del Sur. *Astrobiology Science Conference* (Moffett Field: March 28 2004-April 1 2004) *Int J Astrobiol* 2004; 3 (suppl. 1): 10.
- D'Antoni HL, Skiles JW. Hindcasting Ecosystems: Exploring Links Between Astrobiology and Earth Science. *Astrobiology* 2005; 5 (2): 229-30.
- D'Antoni HL, Peterson DL, Mlinarevic A. Rapid Rates of Change in South American Vegetation linked to "El Niño" Southern Oscillation. Abstracts. *Astrobiology Science Conference*. Presenter 27. NASA Ames Research Center, Moffett Field, 2002.
- D'Antoni HL, Mlinarevic A. Past Sea Surface Temperature Derived from Tree Rings. *Astrobiology Science Conference*. Abstracts. Presenter 28. NASA Ames Research Center. Moffett Field, 2002.
- DeVincenzi D, Briggs G, Cohen M, Cuzzi J, DesMarais D, Harper L, *et al* (eds.). *Astrobiology Workshop*. Final Report. Leadership in Astrobiology. NASA Conference Publication 10153, 1996.
- Fröhlich C. Solar Irradiance Variability. En *Solar Variability and its Effects on Climate*. Geophysical Monograph 141. Washington DC: [s.e.], 2004 p.97-110.
- Fröhlich C, Lean J. The Sun's total irradiance: cycles and trends in the past two decades and associated climate change uncertainties. *Geophysical Research Letters* 1998; 25, 4377-80.
- Fröhlich C, Lean J. Solar Irradiance Variability and Climate. *Astronomische Nachrichten* 2002; 323: 203-12.
- Hartmann EP. *Adventures in research: a history of Ames Research Center 1940-1965*. Washington CD: NASA, 1970.
- Hartmann WK, Rappaport O. *The New Mars. The Discoveries of Mariner 9*. Washington DC: NASA, 1974.
- Kirshner R. *The Extravagant Universe. Exploding Stars, Dark Energy and the Accelerating Cosmos*. [s.l.]: Princeton University Press, 2003.
- Lasta CA, Mianzan H, Guerrero R, Acha M, (Eds.). *Astrobiology, El Niño and South American Ecosystems*. INIDEP, Agencia, SECYT, CONAE, UNMDP, MGP, Mar del Plata, 1999.
- Matta J, Ramos J, Armstrong R and D'Antoni H. 2005. Environmental UVA and UVB Threshold Doses for Apoptosis and Necrosis in Human Fibroblasts. *Photochemistry and Photobiology* (Preprint).
- Meggers B, Amazonia J. *Man and Culture in a Counterfeit Paradise*. Washington, D.C.: Smithsonian Institution Press, 1996.
- Muenger E. *Searching the Horizon. A History of Ames Research Center 1940-1976*. Washington: NASA - 4304, 1985.
- National Research Council. *Strategy for the Detection and Study of Other Planetary Systems and Extrasolar Planetary Materials: 1990-2000*. Washington, D.C.: National Academy Press; 1990.
- Penzias AA. The Origin of Elements. Nobel Lecture on 8 December 1978. Stockholm. The Nobel Prizes.
- Spitzer CR. (editor). 1980. *Viking Orbiter Views of Mars*. Washington D.C: NASA 441.
- Windhausen A. *Geología Argentina (Segunda Parte). Geología Histórica y Regional del territorio Argentino*. Buenos Aires: Jacobo Peuser Limitada, Editores; 1931.