

**PRISCILLA NOWAJEWSKI BARRA**  
ES LICENCIADA EN FÍSICA Y DOCTORA EN INGENIERÍA, MENCIÓN FLUIDODINÁMICA CON ESPECIALIZACIÓN EN METEOROLOGÍA DE LA UNIVERSIDAD DE CHILE. DURANTE SU TESIS DOCTORAL INVESTIGÓ LA DINÁMICA ATMOSFÉRICA DE PLANETAS "DE AGUA" TIPO TIERRA (ES DECIR, PLANETAS SIMILARES A LA TIERRA PERO SIN CONTINENTES) UTILIZANDO SIMULACIONES CLIMÁTICAS. ESTE TRABAJO FUE PUBLICADO EN EL AÑO 2018 EN LA REVISTA ICARUS, ESPECIALIZADA EN CIENCIAS PLANETARIAS.

# BÚSQUEDA DE VIDA EN OTROS PLANETAS

**PALABRAS CLAVES:**  
HABITABILIDAD PLANETARIA,  
DINÁMICA ATMOSFÉRICA,  
SIMULACIONES NUMÉRICAS

**KEYWORDS:**  
PLANETARY HABITABILITY,  
ATMOSPHERIC DYNAMICS,  
NUMERICAL SIMULATIONS

**RESUMEN.** Las últimas misiones espaciales y su descubrimiento de miles de exoplanetas han sido un importante estímulo para la investigación en astrobiología. Los problemas que estudia esta incipiente disciplina científica utilizan métodos y técnicas provenientes de disciplinas como la astronomía, la biología, la geofísica, la química y la meteorología, entre otras. Uno de los objetivos principales de la astrobiología es comprender las propiedades físicas que debe cumplir un planeta para que se desarrolle la vida. Este artículo describe algunos conceptos básicos de las ciencias planetarias y las ciencias atmosféricas, que permiten explicar la influencia de la atmósfera y su dinámica en las condiciones de habitabilidad planetaria, haciendo hincapié en la necesidad de que exista agua líquida en la superficie de un planeta. Se destacan los efectos producidos por la variación en el eje de rotación de un planeta sobre la circulación general de la atmósfera y cómo esto incide en la habitabilidad.

**ABSTRACT.** The latest space missions and their discovery of thousands of exoplanets have greatly stimulated research into the emerging field of astrobiology. The problems investigated by this field require methods and techniques from different disciplines, including astronomy, biology, geophysics, chemistry, and meteorology, among others. One of the main aims of astrobiology is to understand the physical properties that a planet must have for life to proliferate. This article explains some basic concepts of planetary sciences and atmospheric sciences, relevant to elucidate the influence of the atmosphere and its dynamics on habitability conditions, emphasising the requirements for the presence of liquid water on a planet's surface. Special attention is paid to the effects that the variation on the planet's obliquity has on the general circulation of the atmosphere, and how this, in turn, affects habitability.

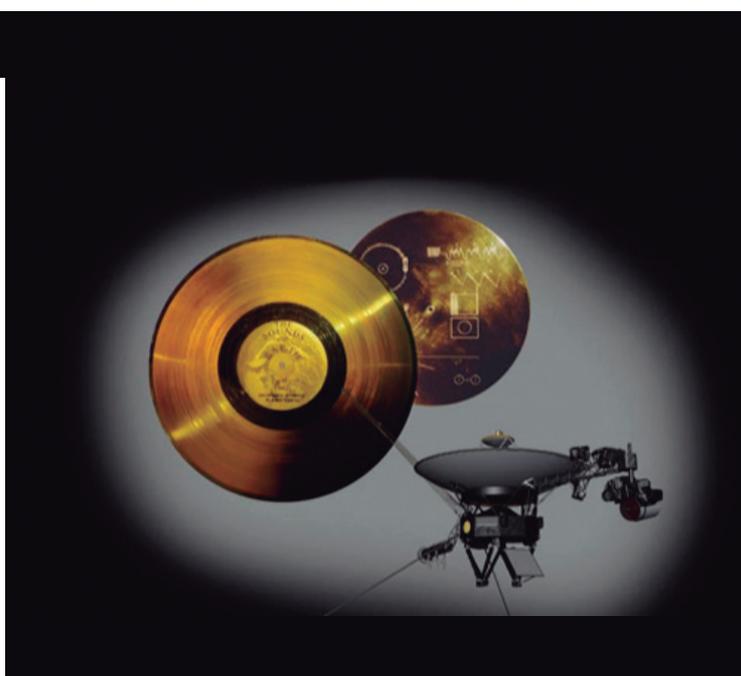
¿Estamos solos es el universo? Es muy probable que esta pregunta surja cada vez que miremos la inmensidad del cielo nocturno, recordándonos que somos solo un pequeño grano de arena en un universo cuyo tamaño supera nuestras dimensiones.

Esta pregunta, que despierta la curiosidad de muchos, ha sido desde siempre abordada como temática de la ciencia ficción e incluso de la filosofía.

Uno de los grandes divulgadores científicos modernos, Carl Sagan, generó los espacios para incluir esta pregunta como una problemática científica. En pleno apogeo de las misiones espaciales, Sagan planteaba, como una necesidad científica, la búsqueda de vida extraterrestre, frente a una comunidad escéptica. Convencido de la existencia de vida, e incluso de civilizaciones inteligentes, en otros rincones del espacio, Sagan fue capaz de popularizar las ciencias planetarias y la astrobiología en la comunidad, hasta llegar a convencer a la NASA de incorporar un mensaje terrestre universal en las sondas espaciales Voyager y Pioneer, poniendo en evidencia nuestra existencia.

Por otro lado, también en los años 70, el astrónomo estadounidense Frank Drake buscó estimular la discusión sobre el tema a través de la estimación de la cantidad de civilizaciones inteligentes que deberían existir en nuestra galaxia.

**Figura 1.** Las misiones espaciales Voyager 1 y 2 portan grabaciones en un disco de oro que contiene saludos en 60 lenguajes, música de diferentes culturas y sonidos naturales de nuestro planeta, además de información electrónica que una civilización avanzada podría convertir en diagramas y fotografías. También las misiones Pioneer 10 y 11, lanzadas en 1972 y 1973, respectivamente, contienen una placa con ilustraciones de la figura humana basadas en los dibujos de Leonardo da Vinci y las esculturas griegas, la posición relativa del Sol respecto al centro de la galaxia y a 14 púlsares, además de la trayectoria del Pioneer en el sistema solar (Imágenes obtenidas desde NASA Image and Video Library, NASA ID: PIA14113, NASA ID: ARC-1972-AC72-1338, para Voyager y Pioneer).



Si bien no hemos encontrado evidencia de la existencia de vida fuera de la Tierra, y mucho menos de civilizaciones inteligentes fuera de nuestro sistema solar, el descubrimiento, realizado por Michel Mayor y Didier Queloz en 1995 (Mayor y Queloz, 1995), del primer planeta extrasolar (es decir, un planeta que no orbita en torno al Sol, sino en torno a otra estrella) constituyó un importante estímulo para la investigación en astrobiología, al comprobarse que existen otros mundos fuera de nuestro sistema solar, algunos de los cuales podrían incluso estar habitados.

Este descubrimiento marcó un hito en la historia, que intensificó el interés por la búsqueda de vida en otros planetas. La respuesta a nuestra pregunta inicial se transformó en un área de investigación que obligó al desarrollo de nuevas tecnologías destinadas a identificar planetas fuera de nuestro sistema solar, como fue el caso de la misión espacial Kepler (2009), o también nuevas técnicas que permitieran utilizar todo el potencial de los grandes observatorios astronómicos, como los ubicados en gran parte del Norte Grande de Chile. A través del análisis de estas grandes cantidades de datos —lo cual asimismo significó generar nuevas herramientas computacionales— se logró identificar miles de nuevos planetas de diferentes tamaños, incluyendo algunos similares a la Tierra, que orbitan alrededor de estrellas como nuestro Sol.

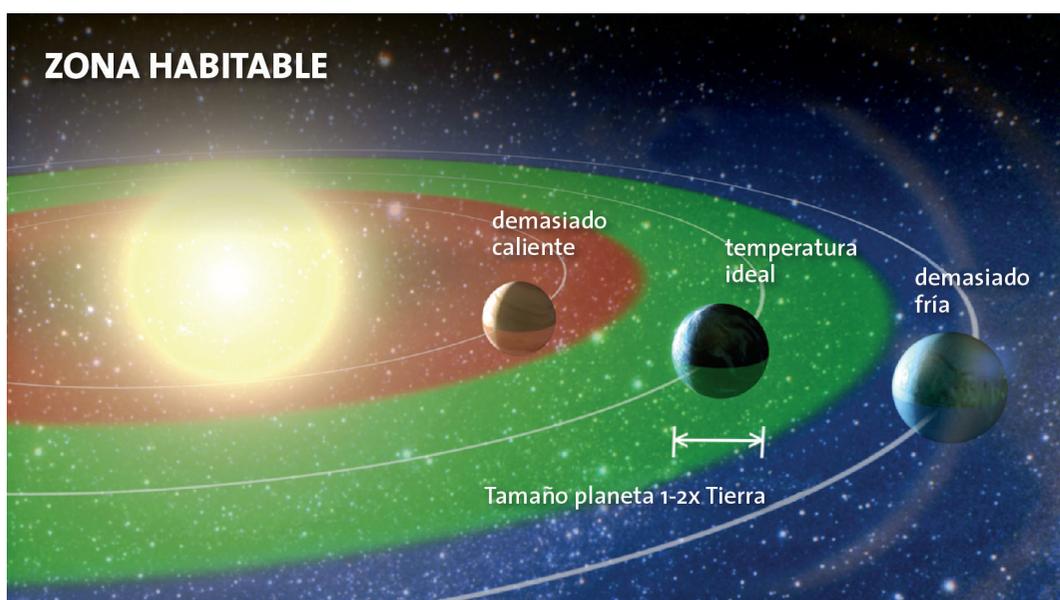
Hoy sabemos que, estadísticamente, existe al menos un planeta por cada estrella en nuestra galaxia; un panorama radicalmente distinto al que se enfrentaba la comunidad científica de los años 70. Sin embargo, no hemos encontrado vida, por lo que hemos modificado la pregunta inicial y actualmente tratamos de responder ¿cuáles son las condiciones necesarias para que exista vida en otros planetas?

## HABITABILIDAD PLANETARIA

En nuestro planeta, el elemento esencial sobre el cual se construye la vida es el agua. Por esta razón, ya que necesitamos partir desde un punto conocido, la búsqueda de vida en otros planetas se centra en aquellos planetas que puedan tener agua líquida sobre o bajo su superficie, como es el caso de algunos cuerpos celestes de nuestro sistema solar.

Así, la habitabilidad planetaria se define como la capacidad de un planeta para mantener el agua líquida en su superficie, permitiendo la proliferación de vida.

En 1853, William Whewell (Inglaterra, 1794-1866) notó que la distancia Tierra-Sol permitía la existencia de agua líquida en la superficie de la Tierra. Cien años después, el científico estadounidense Harlow Shapley (1885-1972) hizo referencia a la existencia de un “cinturón de agua líquida” que rodeaba a las estrellas: una zona donde las temperaturas hacen posible la existencia de agua en un planeta que orbita en torno a una estrella. Hoy en día llamamos zona habitable (ZH) a esta región anular que rodea a una estrella, donde un planeta tiene la mayor probabilidad de presentar y mantener agua líquida en su superficie. La ZH corresponde a un rango acotado de distancias entre el planeta y la estrella, en el que se dan las condiciones para la presencia de agua líquida. En pocas palabras, para estar en la ZH un planeta no debe hallarse ni demasiado cerca ni demasiado lejos de la estrella. Los planetas que están muy cerca de su estrella son demasiado calientes para tener agua líquida, mientras que los que están muy lejos son demasiado fríos. Geométricamente la ZH puede representarse como una región en forma de anillo, limitada por un círculo interno y otro externo, ambos centrados en la estrella.



**Figura 2.** La zona habitable es la región circular que rodea a la estrella, donde la probabilidad de encontrar agua líquida en la superficie del planeta aumenta (verde). La figura muestra una representación artística de la zona habitable de una estrella tipo Sol. Los colores muestran las regiones donde la temperatura es alta (rojo), intermedia (verde) y baja (azul), la cual disminuye a medida que aumenta la distancia hacia la estrella (Imagen obtenida de NASA Exoplanet Exploration. Créditos: Petigura/UC Berkeley, Howard/UH-Manoa, Marcy/UC Berkeley).

La posición de la ZH está determinada por la temperatura de la estrella, cuanto más fría es la estrella, más cerca está la ZH de la estrella, y al revés cuando su temperatura es mayor. Como ya se explicó, la ZH tiene un límite interno y uno externo. Un planeta que se encuentre en el límite interno de la ZH puede experimentar la evaporación de su atmósfera debido a la proximidad a la estrella que lo alberga. Esto significa que los gases que conforman la atmósfera del planeta se escapan hacia el espacio, ya que sus partículas se mueven más rápido que la velocidad de escape del planeta.

Por convención, en el límite exterior de la ZH se produce la condensación del dióxido de carbono debido a las bajas temperaturas (Catling, 2013).

Por otro lado, la extensión entre ambos límites de la ZH depende de las propiedades intrínsecas de la estrella, además de la respuesta de la atmósfera del planeta frente al flujo de radiación que recibe (De Vera *et al.*, 2013). Por ejemplo, las estrellas jóvenes presentan mayor actividad coronal, por lo que son más recurrentes los eventos de eyección de masa coronal o viento solar, lo que afecta al flujo de radiación que recibe el planeta (Schmitt, 2015).

En nuestro sistema solar, los planetas que están ubicados dentro de la ZH del Sol son Venus, la Tierra y Marte.

Venus se encuentra en el límite interior de la ZH, a una distancia de 0.7 UA desde el Sol. Según Kasting (1988), el fuerte efecto invernadero que observamos actualmente en Venus es el producto de la evaporación del océano de agua líquida que presentaba en su superficie en su etapa temprana. Al estar cerca del Sol, las altas temperaturas provocaron el aumento de la tasa de escape del hidrógeno hacia el espacio, evaporando su océano líquido y dejando grandes concentraciones de CO<sub>2</sub> en su atmósfera.

En el otro extremo, Marte está ubicado en el límite exterior de la ZH a una distancia de 1.5 UA desde el Sol. A pesar de que está compuesta en gran parte por CO<sub>2</sub>, la atmósfera de Marte es incapaz de crear un efecto invernadero que permita mantener temperaturas cálidas en su superficie, por lo que el promedio de temperatura global en la superficie es de -60 °C, la temperatura de condensación del CO<sub>2</sub>.

La Tierra está ubicada en el medio de la ZH del Sol. En esta ubicación (1 UA) es posible obtener una temperatura que permite la existencia de agua líquida en la superficie del planeta. Sin embargo, según Hart (1978), la posición en la que se encuentra la Tierra dentro de la ZH es de un equilibrio inestable, ya que, si su posición cambiara en un pequeño porcentaje, la Tierra podría experimentar un estado de bola de nieve y congelarse, como Marte, o sufrir la evaporación de su atmósfera, como Venus, ya que se cree que las condiciones actuales de Venus pueden ser explicadas por la presencia de un océano líquido en su etapa temprana de formación, condiciones similares a las de nuestra Tierra. Como Venus está ubicado cerca del Sol, las moléculas de vapor de agua en su atmósfera fueron afectadas por la radiación ultravioleta, que rompieron sus enlaces y liberaron el hidrógeno hacia el espacio. Así, las moléculas más pesadas, como el CO<sub>2</sub>, se acumularon en la atmósfera.

Según la estimación de Kopparapu *et al.* (2013), la ZH del Sol se extiende entre 0.95 UA y 1.67 UA. Sin embargo, su extensión podría variar, si se consideran factores internos del planeta que puedan ayudar a mantener las temperaturas superficiales sobre el punto de congelación del agua. Es así que los parámetros orbitales que influyen en la distribución de la radiación en la superficie, la composición química de la atmósfera del planeta o la presencia de continentes, entre otros factores, interfieren con la estimación de la posición de la ZH, ya que, por ejemplo, la presencia de nubes puede disminuir el rango interno de la ZH al reflejar la radiación entrante al planeta y disminuir su temperatura superficial.

## LA IMPORTANCIA DE LOS PARÁMETROS ORBITALES

La forma en que se distribuye sobre la superficie de un planeta la radiación que proviene de la estrella depende de ciertos rasgos del movimiento de traslación (órbita) del planeta en torno a la estrella, y del movimiento de rotación del planeta en torno a sí mismo. Tres parámetros resultan particularmente relevantes: la distancia media entre el planeta y la estrella, la excentricidad de la órbita planetaria y la oblicuidad del eje de rotación del planeta. Expliquemos brevemente el significado de estos parámetros:

- La distancia entre el planeta y la estrella caracteriza el tamaño de la órbita planetaria y, como ya se explicó, indica si el planeta está o no en la ZH.
- La excentricidad es el parámetro que describe la forma de la órbita. Las órbitas de excentricidad nula son circulares. Las órbitas de excentricidad no nula (con valores comprendidos entre cero y uno) son elípticas: a mayor excentricidad, mayor elongación de la órbita.
- La oblicuidad es un ángulo que indica cuán “recostado” está el eje de rotación del planeta sobre el plano de la órbita.

Oblicuidad nula significa que el eje de rotación es perpendicular al plano orbital. Por otra parte, una oblicuidad de 90 grados significa que el eje de rotación del planeta está totalmente recostado sobre el plano orbital y es paralelo a este plano. La oblicuidad da origen al ciclo de las estaciones y determina cuánta radiación reciben las distintas zonas de las capas superiores de la atmósfera. Esto se puede ilustrar considerando los dos casos extremos de oblicuidad cero y de oblicuidad de 90 grados. En un planeta con oblicuidad nula no habría estaciones. Todas las regiones del planeta recibirían una cantidad media de radiación

constante a lo largo del año. Pero las regiones ecuatoriales recibirían más radiación que las regiones de latitudes intermedias, y mucha más que las regiones polares. En el otro caso extremo, el de un planeta de oblicuidad de 90 grados, el ciclo de las estaciones sería mucho más marcado que en la Tierra, con un mayor contraste entre el invierno y el verano. En todas las regiones, excepto en las regiones ecuatoriales, habría una parte del año durante la que sería siempre de día (dando lugar a tórridos veranos) y una época durante la que sería siempre de noche (influyendo sus inviernos, ya que la temperatura de estos dependerá de la superficie del planeta).

En el caso de la Tierra y de otros planetas, las características del movimiento planetario mencionadas anteriormente no permanecen constantes en el tiempo. Por un lado, el eje de rotación de la Tierra gira describiendo un cono en torno a una línea perpendicular al plano de la órbita terrestre. Este movimiento, llamado precesión, no implica un cambio en el valor de la oblicuidad. Por otra parte, los parámetros orbitales de la tierra (en particular, la excentricidad de su órbita y la oblicuidad de su eje de rotación) cambian en el tiempo debido a las perturbaciones gravitacionales producidas por otros cuerpos del sistema solar.

Según la teoría de Milankovitch, estas variaciones afectarían a la cantidad de radiación que llega al planeta, influyendo sobre su clima. En la Tierra, la evidencia obtenida a través de registros geológicos nos indica que la excentricidad de la órbita terrestre cambia, entre elíptica y circular, cada 100 000 años; la precesión modificaría la posición de los solsticios y los equinoccios cada 26 000 años.

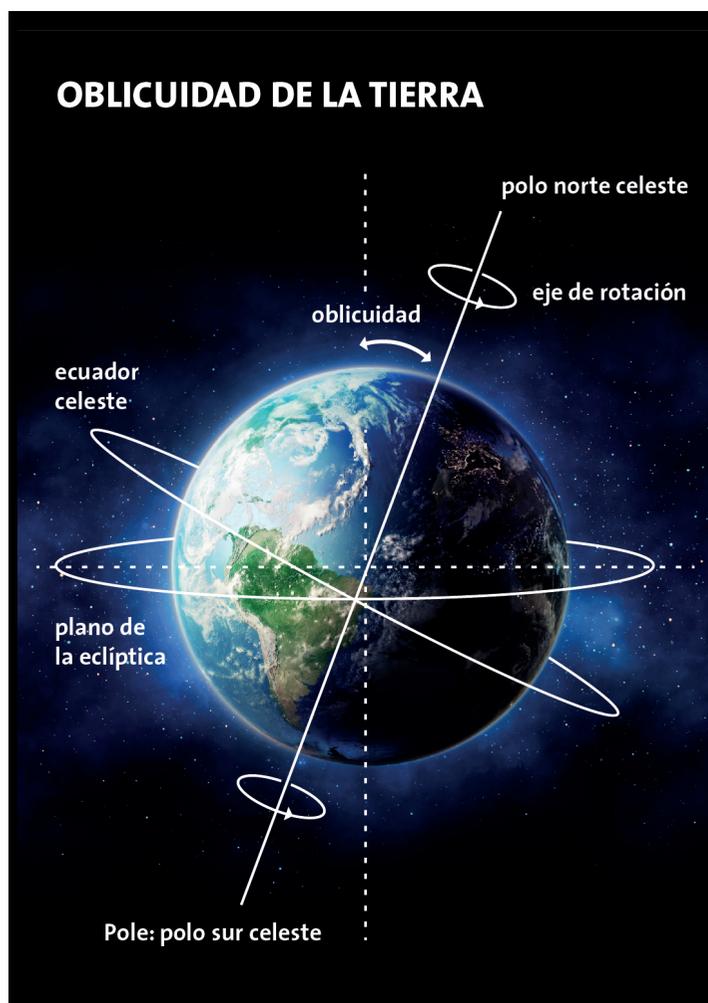
Según Imbrie *et al.* (1993), la oblicuidad varía entre 22° y 24° cada 41 000 años. Esta variación de 2° es suficiente para provocar los ciclos glaciales-interglaciares que ha experimentado nuestro planeta en los últimos dos millones de años. Esto se debe a que la oblicuidad tiene un efecto inmediato sobre el clima del planeta, al determinar la distribución latitudinal de la radiación estelar entrante (insolación) en las capas superiores de la atmósfera, provocando las estaciones del año y afectando al desarrollo de la circulación general de la atmósfera.

Laskar *et al.* (1993) indican que esta alta estabilidad de la oblicuidad terrestre se produce gracias al efecto de marea provocado por la Luna. Sin nuestro satélite natural, la Tierra entraría en una ventana caótica con variaciones en la oblicuidad entre 60° y 90°, causando un clima inestable que perjudicaría el desarrollo de la vida en el planeta.

Por esta razón, Seager (2013) indica que es necesario considerar la importancia de los parámetros orbitales dentro del estudio de habitabilidad planetaria.

El estudio del impacto de la oblicuidad en el clima de planetas extrasolares tipo Tierra indica que la existencia de agua líquida es una consecuencia de la actividad atmosférica, la que está determinada por el cambio en la distribución de la insolación.

En algunos casos, existe multiestabilidad climática, como en nuestro planeta, donde coexisten las regiones cubiertas y libres de hielo. Ya que los planetas congelados son descartados como habitables, el parámetro de habitabilidad planetaria, en este caso, sería la cobertura de hielo marino, el cual se desarrolla en la superficie como consecuencia de la actividad atmosférica (Linsenmeier *et al.*, 2015). El océano, responsable de mantener el clima templado en el planeta, también cambia su comportamiento por efecto de la oblicuidad, ya que este parámetro influye sobre el régimen de viento superficial, aumentando la habilidad del océano de modular las temperaturas extremas que se puedan presentar en el planeta (Ferreira *et al.*, 2014). Por otro lado, Williams y Pollard (2003) estudiaron el impacto de la oblicuidad en la



**Figura 3.** La oblicuidad es el ángulo entre el eje de rotación del planeta y la normal a su plano orbital, lo cual produce una inclinación que distribuye la radiación que entra al planeta, aumentando la energía recibida por las latitudes que quedan orientadas hacia la estrella (Imagen obtenida de NASA Global Climate Change).

Tierra, con una configuración continental y concentración de gases de efecto invernadero que pudiera desatar la evaporación de la atmósfera o el congelamiento global. Encontraron que nuestro planeta mantendría su temperatura sobre el punto de congelación del agua, sin promover las condiciones para que exista la evaporación de la atmósfera del planeta o que este caiga en un estado de congelación permanente.

## CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA

Mantener la temperatura global sobre el punto de congelación depende en gran parte de los procesos internos del planeta. Es así que sus procesos geofísicos son una de las condiciones fundamentales para los estudios de habitabilidad planetaria (Lammer *et al.*, 2010).

Como se expuso anteriormente, la existencia de agua en estado líquido en un planeta está determinada en primer lugar por la distancia a su estrella, ya que esto determina la cantidad de radiación que el planeta recibe y, por lo tanto, su temperatura superficial.

Luego, el planeta se dice que es habitable si su temperatura está sobre el punto de congelación del agua, lo que se produce con mayor probabilidad en la zona habitable de la estrella, lugar donde se enfoca la búsqueda de planetas extrasolares.

Una temperatura superficial templada es crucial, ya que se debe evitar la evaporación de la atmósfera o caer en un estado de bola de nieve, es decir, la congelación de la superficie del planeta (Kasting, 1988).

He nombrado varias veces la radiación, ya que es la principal fuente de energía para que ocurran los procesos atmosféricos. El camino que atraviesa la radiación hacia la superficie del planeta no es directo, ya que es absorbido, reflejado y dispersado por los componentes atmosféricos: gases y polvo, principalmente. Del total de radiación estelar que entra en el tope de la atmósfera del planeta solo un porcentaje logra llegar a la superficie, mientras que, de la cantidad de radiación que logra llegar a la superficie, una fracción es absorbida y otra fracción es reemitida hacia el espacio (Trenberth *et al.*, 2009), dependiendo de la presencia de océanos, continentes, vegetación o hielo, ya que estos modifican las propiedades de reflectividad de la superficie, es decir, su albedo o la razón entre la cantidad de radiación estelar reflejada y la radiación estelar entrante (Robock, 1980).

La radiación estelar es absorbida constantemente por la atmósfera y la superficie, lo cual provoca el aumento de la temperatura. Al calentarse, la superficie emite radiación térmica (en el rango infrarrojo del espectro electromagnético) hacia el espacio, la que en su camino también es absorbida, reflejada y dispersada por los componentes atmosféricos.

Desde el punto de vista de las capas superiores de la atmósfera se observa un balance entre la cantidad de radiación estelar entrante y la cantidad de radiación térmica emitida por el planeta, situación denominada de equilibrio radiativo.

Sabemos que existen ciertos tipos de gases atmosféricos que absorben esta radiación térmica y, por lo tanto, aumentan la temperatura globalmente: los gases de efecto invernadero.

Sánchez-Lavega (2011) indica que, en un planeta con atmósfera densa, la temperatura superficial global aumentará por la interacción entre los componentes atmosféricos y la radiación térmica, produciendo un efecto invernadero, es decir que reflejará una parte de esta radiación hacia la superficie, aumentando su temperatura globalmente.

En el caso de los planetas con una atmósfera delgada, su temperatura superficial global será su temperatura de equilibrio o de cuerpo negro, la cual depende sobre todo del albedo y la radiación estelar entrante.

La variación vertical de la temperatura de la atmósfera está determinada por su composición química, mientras que la variación superficial de la temperatura está dada por la oblicuidad, ya que —como se explicó antes— esta determina la forma en que es distribuida la insolación en la superficie del planeta,

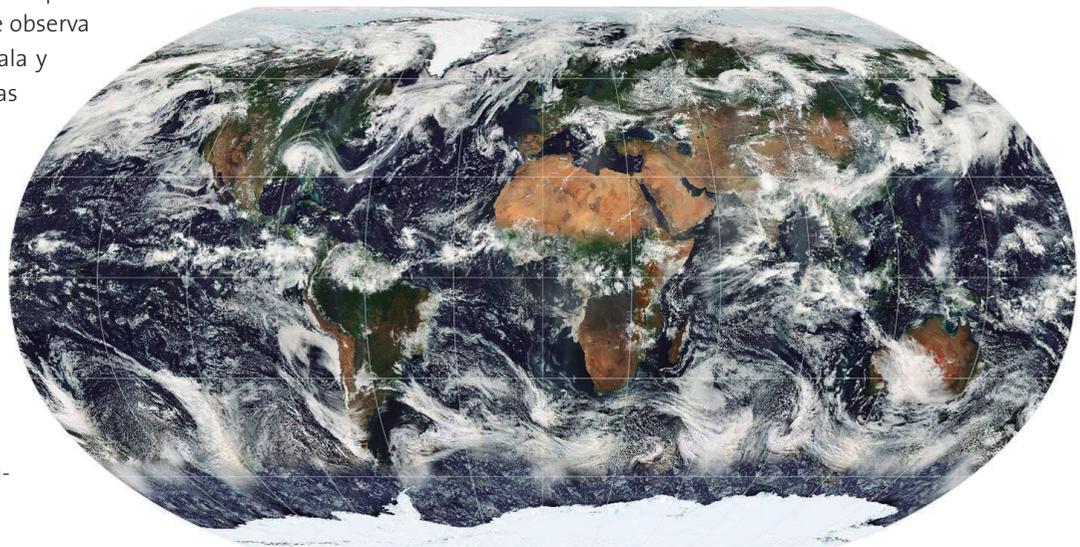
generando zonas de mayor y menor radiación absorbida y provocando un calentamiento diferencial en la superficie. Así, los gradientes de temperatura observados en el planeta son la principal fuente de energía disponible para los movimientos que caracterizan la circulación general de la atmósfera.

La atmósfera es una capa esférica que rodea un planeta, mantenida por su gravedad, cuya principal fuente de energía es la radiación estelar proveniente de la estrella que lo alberga. La geometría esférica del planeta produce una distribución no homogénea de la insolación, calentando diferencialmente la superficie. Esto cambia la presión atmosférica, produciendo una circulación en la atmósfera debido al movimiento de masas de aire entre las regiones de mayor y menor temperatura. La dirección del viento que se produce dependerá de la rotación del planeta, en particular, del balance geostrófico o el equilibrio entre la desviación del viento provocada por la fuerza de Coriolis que aparece por la rotación del planeta y la diferencia de presión que ocurre en la región (Ingersoll, 2013).

Cuando la atmósfera es baroclínica, es decir que su densidad depende de la presión y la temperatura, el calentamiento diferencial horizontal produce cambios en la altura de la columna de aire. Sobre la superficie cálida, la columna de aire es cada vez más alta, ya que el aire asciende, mientras que sobre las superficies frías la columna de aire baja, lo que produce una inclinación de las isobaras (niveles de igual presión) y genera una inestabilidad baroclínica. Esta inestabilidad busca equilibrar la energía potencial de la isobara, disminuyendo su altura. Así, la energía potencial de la isobara se convierte en energía cinética, produciendo solenoides que se mueven desde zonas con bajas a altas temperaturas.

En la Tierra, esta inestabilidad se observa como movimientos de gran escala y de mesoescala, como los sistemas frontales (Vallis, 2017).

El sistema climático compensa las diferencias de temperatura: mantiene las temperaturas templadas a nivel global y, de esta forma, genera mecanismos que permiten disipar la energía o transportar el calor desde regiones de mayor a menor temperatura.

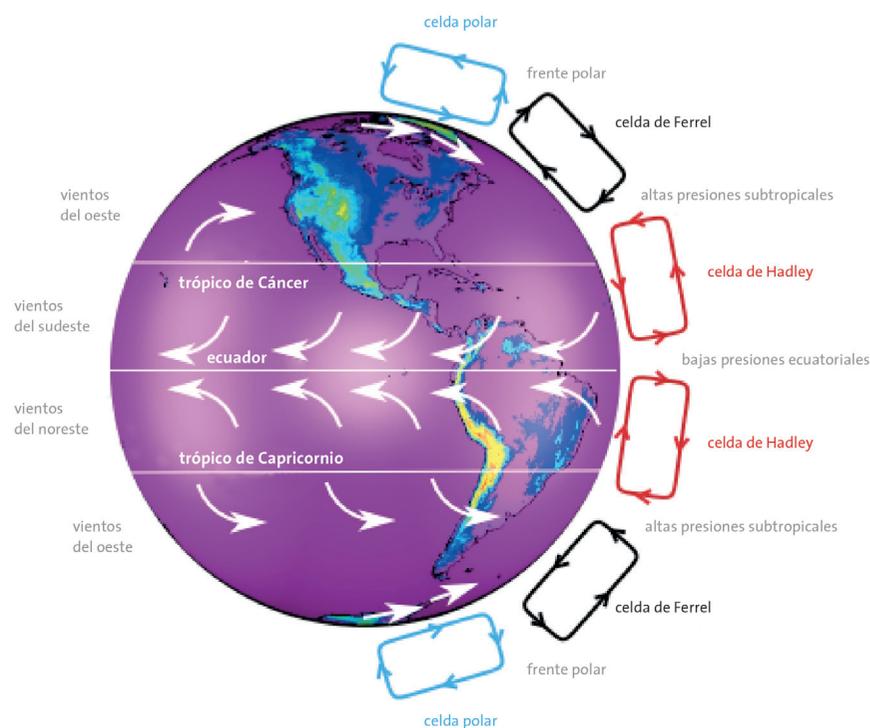


Verticalmente se produce convección, ya que la superficie es de mayor temperatura que los niveles verticales, debido a que la temperatura disminuye con la altura. Las masas de aire que son calentadas por la superficie ascienden y se mueven hacia las regiones de menor temperatura, donde la masa de aire desciende y se mueve cerca de la superficie hacia la región de mayor temperatura, donde vuelve a ascender.

En la Tierra, la convección afecta al régimen de vientos, ya que se observan regiones latitudinales donde predomina el viento del este, y en otras; el viento del oeste.

En la actualidad, sabemos que el ancho de la celda convectiva es inversamente proporcional a la tasa de rotación del planeta y que en la Tierra se presenta en una configuración de tres celdas convectivas por hemisferio: la celda de Hadley, con su rama ascendente en el Ecuador y la descendente en la región subtropical; la celda de Ferrel, cuya rama descendente se ubica en la región subtropical y la ascendente en la región extratropical, y la celda Polar, cuya rama ascendente está localizada en la región extratropical y la descendente en el polo.

El transporte neto de energía interna, potencial y cinética se produce desde una región con mayor temperatura hacia una de menor temperatura. La dirección del transporte de energía neto se define por la cantidad de energía y trabajo que realiza una parcela de aire que busca llegar a la región de menor temperatura, ya que la parcela de aire que sale de la región de menor temperatura vuelve con menor energía y, por lo tanto, realiza menos trabajo en su retorno a la región de mayor temperatura. En la Tierra, el transporte de



energía está representado por diferentes mecanismos, dependiendo de la latitud: en los trópicos predominan las celdas de Hadley, mientras que hacia el polo predomina la inestabilidad baroclínica, que transporta la energía a través de procesos turbulentos.

Como vemos, las condiciones para determinar la habitabilidad planetaria son más complejas que lo que se planteaba inicialmente, ya que es necesario entender el comportamiento de su sistema climático como respuesta frente al forzamiento externo.

La actual teoría de la circulación atmosférica depende de la masa y composición atmosférica, el flujo estelar, la tasa de rotación y los parámetros orbitales del planeta, pero fue pensada para nuestro planeta.

El descubrimiento de una variedad tan grande de planetas extrasolares plantea un gran desafío para el estudio de atmósferas planetarias, sobre todo, para el desarrollo de nuevos modelos atmosféricos. Estos nuevos mundos añaden un rango significativo de parámetros que afectan la teoría de la circulación atmosférica terrestre, que falla al momento de caracterizar otros planetas, pero que ayuda al aumentar el conocimiento sobre la teoría de circulación atmosférica (Showman *et al.*, 2010).

## PLANETAS CÁLIDOS, ¿HABITABLES?

Los planetas congelados se descartan como planetas habitables, pero ¿será que todos los planetas que presentan agua líquida en su superficie son habitables?

Como vimos en la sección anterior, el sistema climático del planeta influye para mantener las temperaturas templadas del planeta, por lo tanto, podríamos decir que la habitabilidad también puede ser considerada como una consecuencia atmosférica.

No tenemos que ir a otro planeta para ver cómo los factores atmosféricos pueden afectar la habitabilidad. Consideremos el aumento de las temperaturas globales en la Tierra. Sabemos que, por efecto del calentamiento global, ciertas regiones de nuestro planeta se están volviendo cada vez más inhóspitas, ya que sus habitantes están muriendo por hipertermia o choque de calor, la cual se produce debido a que no logramos disipar el calor interno por evaporación, al estar en un ambiente con alta humedad y alta temperatura. En 1913, el mayor registro de temperatura del aire se obtuvo el 10 de julio, en el valle de la Muerte (EE. UU.), donde alcanzó 56.7 °C. A esta temperatura la hipertermia se produce con tan solo 20 % de humedad en el ambiente.

En 2010 se hizo el experimento—mediante simulaciones por computadora—de aumentar en 10 °C la temperatura global de la Tierra para visualizar los efectos de un calentamiento global extremo (Sherwood y Huber, 2010). El estudio utilizó la temperatura de bulbo húmedo ( $T_w$ ), la cual indicó que el límite en que se

produce la muerte por choque de calor en los mamíferos se produce en regiones donde  $T_w > 35\text{ }^\circ\text{C}$ .

$T_w$  corresponde a la menor temperatura que puede alcanzar el aire cuando se evapora toda su humedad, por lo que  $T_w$  es una relación entre la temperatura del aire y la humedad relativa del ambiente. Por lo tanto, aumentando en  $10\text{ }^\circ\text{C}$  la temperatura del aire a nivel global, se produce un aumento en el contenido de vapor de agua en la atmósfera, lo cual provoca que solo algunas regiones al sur de nuestro planeta se mantendrían habitables bajo dichas condiciones. Por lo tanto, es evidente el rol de la atmósfera al describir la habitabilidad de un planeta.

Veamos qué pasa con la habitabilidad si cambiamos la oblicuidad del planeta, ya que sabemos que la circulación atmosférica está determinada por la distribución de insolación, producto de la oblicuidad. Consideremos un planeta “de agua”, es decir, un planeta tipo Tierra sin continentes, que mantiene las características terrestres respecto de su tamaño y distancia a la estrella tipo Sol, tal como los que buscan actualmente las misiones espaciales (cabe aclarar que un planeta “de agua” no está literalmente hecho de agua. Tiene una estructura similar a la Tierra, pero está cubierto totalmente por océanos). Un planeta de este tipo presentará cambios significativos en la actividad atmosférica al aumentar su oblicuidad, ya que, a medida que la inclinación aumenta, las mayores temperaturas se producen en los polos. El cambio se produce en las oblicuidades sobre  $54^\circ$ , donde las masas de aire se mueven hacia el ecuador, la que se convierte en la región con menor temperatura, invirtiendo el transporte de energía que vemos en la Tierra (Nowajewski *et al.*, 2018).

Calculando  $T_w < 35\text{ }^\circ\text{C}$  como índice atmosférico de habitabilidad en nuestro experimento de oblicuidad, vemos que estos planetas de agua son más habitables que nuestro planeta, bajo las mismas condiciones orbitales, e incluso cuando uno de los hemisferios está en completa oscuridad. Bajo  $54^\circ$  de oblicuidad, estos planetas son habitables en todas las latitudes durante todo el año; sobre esta inclinación la habitabilidad disminuye hacia los polos, ya que la temperatura del aire y la humedad relativa aumenta durante seis meses. Sin embargo, se mantienen habitables entre  $40^\circ$  latitud sur y  $40^\circ$  latitud norte.

Si ahora calculamos  $T_w$  en nuestro planeta, vemos que también la región entre los  $40^\circ$  de latitud norte y sur se mantiene habitable durante todo el año, tal como observamos en los planetas de agua con alta oblicuidad. Sin embargo, la habitabilidad en la Tierra disminuye hacia los polos debido a las bajas temperaturas, donde el riesgo de hipotermia es inevitable.

Por lo tanto, que un planeta presente agua líquida en su superficie no garantiza que sea habitable, al menos por mamíferos, ya que la temperatura del aire y la humedad del ambiente son factores determinantes en la habitabilidad.

## ALGUNOS COMENTARIOS FINALES

Carl Sagan se esforzó por convencer a la comunidad científica escéptica de su época sobre la importancia de las investigaciones en astrobiología. Fue un pionero de las ciencias planetarias, y un gran defensor de “la capacidad humana para generar ciencia como una herramienta que permite develar los misterios de la naturaleza por sobre los supuestos de la pseudociencia” (Sagan, 1980). Desde entonces, son muchos los avances que hemos observado. La llegada del hombre a la Luna y su permanencia en el espacio marcó un hito fundamental para las futuras misiones espaciales, pasando a ser pilares esenciales de la exploración humana de otros objetos celestes.

Hoy en día, dejamos de hablar de habitabilidad planetaria como un tema de ciencia ficción y generamos grandes esfuerzos en la investigación de los planetas extrasolares, a fin de identificar posibles candidatos para la existencia de vida. Esta ya no es un área exclusiva de la astronomía, si no que el estudio de otros planetas es una ciencia interdisciplinaria, donde además de astronomía, necesitamos saber sobre biología, química, geología, geofísica y meteorología, entre otras áreas de las ciencias que nos permitan entender cada uno de los detalles que nos presente cada planeta extrasolar que descubramos.

La misión Kepler logró identificar una gran cantidad de planetas fuera de nuestro sistema solar. Sin embargo, serán las próximas misiones espaciales las que nos permitirán conocer más acerca de sus atmósferas y, por lo tanto, entender si son capaces de albergar vida o no. Es posible que la pregunta de si estamos solos en el universo tenga una respuesta dentro de los próximos años, lo que marcará, sin duda, un nuevo hito en la historia de la humanidad.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Catling, D. C. (2013). *Astrobiology: A Very Short Introduction*. Oxford: OUP.
- De Vera, J. P. y Seckbach, J. (Eds.) (2013). *Habitability of Other Planets and Satellites*. Springer.
- Ferreira, D., Marshall, J., O’Gorman, P. A., Seager, S. (2014). “Climate at high-obliquity”. *Icarus*, 243, pp. 236-248. doi:10.1016/j.icarus.2014.09.015
- Hart, M. H., (1978). “The evolution of the atmosphere of the earth”. *Icarus*, 33, pp. 23-39. doi:10.1016/0019-1035(78)90021-0
- Imbrie, J., Berger, A., Boyle, E. A., Clemens, S. C., Duffy, A., Howard, W. R., Kukla, G., Kutzbach, J., Martinson, D. G., McIntyre, A., Mix, A. C., Molino, B., Morley, J. J., Peterson, L. C., Pisias, N. G., Prell, W. L., Raymo, M. E., Shackleton, N. J., Toggweiler, J. R. (1993). “On the structure and origin of major glaciation cycles 2. The 100,000-year cycle”. *Paleoceanography*, 8, pp. 699-735. doi:10.1029/93PA02751
- Ingersoll, A. (2013). *Planetary Climates*. Princeton: Princeton University Press.
- Kasting, J. F. (1988). “Runaway and moist greenhouse atmospheres and the evolution of Earth and Venus”. *Icarus*, 74, pp. 472-494. doi:10.1016/0019-1035(88)90116-9
- Kopparapu, R. K., Ramirez, R., Kasting, J. F., Eymet, V., Robinson, T. D., Mahadevan, S., Terrien, R. C., Domagal-Goldman, S., Meadows, V., Deshpande, R. (2013). “Habitable zones around main-sequence stars: new estimates”. *Astrophys. J.*, 765, p. 131. doi:10.1088/0004-637X/765/2/131
- Lammer, H., Selsis, F., Chassefière, E., Breuer, D., Grießmeier, J. M., Kulikov, Y. N., Erkaev, N. V., Khodachenko, M. L., Biernat, H. K., Leblanc, F., y otros. (2010). “Geophysical and atmospheric evolution of habitable planets”. *Astrobiology*, 10, pp. 45-68. doi:10.1089/ast.2009.0368
- Laskar, J., Joutel, F., Robutel, P. (1993). “Stabilization of the Earth’s obliquity by the Moon”. *Nature* 361, pp. 615-617. doi:10.1038/361615a0
- Linsenmeier, M., Pascale, S., Lucarini, V. (2015). “Climate of Earth-like planets with high obliquity and eccentric orbits: Implications for habitability conditions”. *Planet. Space Sci.* 105, pp. 43-59.
- Mayor, M., Queloz, D. (1995). “A Jupiter-mass companion to a solar-type star”. *Nature*, 378, pp. 355-359. doi:10.1038/378355a0
- Nowajewski, P., Rojas, M., Rojo, P., Kimeswenger, S. (2018). “Atmospheric dynamics and habitability range in Earth-like aquaplanets obliquity simulations”. *Icarus*, 305. doi:10.1016/j.icarus.2018.01.002
- Robock, A. (1980). “The seasonal cycle of snow cover, sea ice and surface albedo”. *Mon. Weather Rev.*, 108, pp. 267-285. doi:10.1175/1520-0493(1980)108<0267:TSCOSC>2.0.CO;2
- Sagan, C. (1980). *Cosmos*. Barcelona: Planeta.
- Sánchez-Lavega, A. (2011). *An Introduction to Planetary Atmospheres*. CRC Press.
- Schmitt, J. (2000). *Stellar Activity*. Recuperado de [https://www.hs.uni-hamburg.de/index.php?option=com\\_content&view=article&id=68&Itemid=332&lang=en](https://www.hs.uni-hamburg.de/index.php?option=com_content&view=article&id=68&Itemid=332&lang=en)
- Seager, S. (2013). “Exoplanet habitability”. *Science*, 340, pp. 577-581.
- Shapley, H. (1953). *Climatic Change: Evidence, Causes, and Effects*. Harvard University Press.
- Sherwood, S. C., Huber, M. (2010). “An adaptability limit to climate change due to heat stress”. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 107, pp. 9552-9555. doi:10.1073/pnas.0913352107
- Showman, A. P., Cho, J. Y. K., Menou, K. (2010). “Atmospheric circulation of exoplanets”. *Exoplanets*, 526, pp. 471-516.
- Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., Kiehl, J. (2009). “Earth’s global energy budget”. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 90, pp. 311-323. doi:10.1175/2008BAMS2634.1
- Vallis, G. K. (2017). *Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics*. Cambridge University Press.
- Williams, D. M., Pollard, D. (2003). “Extraordinary climates of Earth-like planets: three-dimensional climate simulations at extreme obliquity”. *Int. J. Astrobiol.*, 2, pp. 1-19.