

**UNA APROXIMACIÓN HISTÓRICA AL ESTUDIO DE LA ZONA
HABITABLE A PARTIR DE LA RADIACIÓN TÉRMICA**

Carlos Andres Ospina Castillo

Código: 2014146045

Universidad Pedagógica Nacional de Colombia

Facultad de Ciencia y Tecnología

Departamento de Física

Licenciatura en Física

Bogotá, Colombia

2023

**UNA APROXIMACIÓN HISTÓRICA AL ESTUDIO DE LA ZONA
HABITABLE A PARTIR DE LA RADIACIÓN TÉRMICA**

Trabajo de grado para optar al título de Licenciado en Física

Carlos Andres Ospina Castillo

Código: 2014146045

Asesor

Giovanny Sierra Vargas

Universidad Pedagógica Nacional de Colombia

Facultad de Ciencia y Tecnología

Departamento de Física

Licenciatura en Física

Bogotá, Colombia

2023

Contenido

INTRODUCCIÓN.....	1
➤ CAPÍTULO I	3
Problemática	3
Objetivo general	5
Objetivos específicos	5
Justificación	5
Antecedentes	7
Metodología	8
➤ CAPÍTULO II	11
Radiación térmica	11
Radiación de cuerpo negro y ley de Stefan-Boltzmann	15
La catástrofe ultravioleta	19
Consideraciones finales del capítulo	22
➤ CAPÍTULO III	23
La zona habitable: Una revisión histórica	24
Ciencia Exoplanetaria: Planeta ricitos de oro	33
La zona habitable a través de un modelo de balance energético	39
Factores adicionales como criterios de habitabilidad	46
➤ CAPÍTULO IV	49
Reflexiones y consideraciones finales	49
REFERENCIAS BIBLIOGRAFÍA	54
ANEXO 1	61
Transferencia de calor por conducción y convección	61
Anexo 2	64
Experimento de Stefan	64

Dedicatoria

A mi madre Esperanza Castillo, quien con su amor y apoyo incondicional me ha acompañado siempre en el camino de la vida, impulsándome incesantemente hacia la realización de mis sueños. No me alcanzará esta vida para expresarte toda mi gratitud madre querida.

A Jenyffer Lozano, mi querida amiga con quien a través de los años he compartido un sinfín de vivencias y quien finalmente se ha convertido en la hermana que la vida decidió obsequiarme.

Agradecimientos

A Nicolas Molina, mi amigo y estimado colega, quien con sus valiosas reflexiones y orientaciones contribuyó de manera determinante a direccionar la investigación del presente trabajo de grado.

A Iván Hernández, gran amigo que tuve la fortuna de conocer en esta etapa de mi formación académica. Le agradezco los aprendizajes que de un modo u otro han sido significativos en mi vida.

A mi asesor Giovanni Sierra, por su manera efectiva de dirigir mi proceso escritural en este trabajo. Su orientación fue apreciable.

INTRODUCCIÓN

La zona de habitabilidad (ZH) es un concepto fundamental en astrofísica y astrobiología que se refiere a la región alrededor de una estrella donde las condiciones de temperatura podrían permitir la existencia de agua líquida en la superficie de un planeta (Poffo, 2012). Este requisito esencial es clave tanto para la vida en la Tierra como para la búsqueda de vida en otros planetas. En este estudio, se aborda la ZH desde una perspectiva histórica y conceptual, basándose en los principios de la física de la radiación térmica y el concepto de cuerpo negro.

En el siglo XIX, el estudio de la espectrometría solar realizado por Joseph Von Fraunhofer impulsó el surgimiento de la Astrofísica, una disciplina que combina los conocimientos de la Física y la Astronomía (Peña, 2012). Esta nueva perspectiva permitió comprender las propiedades físicas y químicas de las estrellas. Posteriormente, a finales del siglo XX, la interacción entre la astrofísica y la geología planetaria condujo al descubrimiento y estudio de los exoplanetas, es decir, planetas que orbitan otras estrellas (Zuluaga Callejas, 2015).

La astrobiología, surgida en la década de los 90, es una disciplina científica interdisciplinaria que integra la física, la biología, la química y la geología para investigar el origen, evolución y distribución de la vida en el universo (Peña, 2012). La ZH, juega un papel crucial en esta disciplina científica, ya que contribuye a determinar las condiciones, que, en primera instancia, podrían ser adecuadas para la existencia de agua líquida en la superficie de un exoplaneta que orbite dentro de esta región. La comprensión rigurosa de la ZH requiere el análisis de conceptos fundamentales en física, como la transferencia y propagación de la radiación térmica, el cuerpo negro, y los procesos de emisión y absorción de energía radiante. Estos conceptos son base para determinar la extensión de la zona habitable alrededor de una estrella en función de su tipo espectral.

Sin embargo, también es importante abordar la ZH desde una perspectiva histórica, ya que esto plantea comprender la evolución del concepto desde diferentes enfoques del conocimiento y cómo ha sido enriquecido por los avances científicos. Esto nos ayuda a apreciar la complejidad y la interconexión de los factores que determinan la habitabilidad

de un planeta, brindándonos una visión más completa del progreso científico en este campo.

En el contexto de la educación, resulta importante adoptar un enfoque interdisciplinario que integre disciplinas científicas como la Física, la Astronomía y la Astrobiología. Este enfoque tiene el potencial de enriquecer los procesos de enseñanza y aprendizaje en el estudiante, permitiéndole una comprensión holística de los eventos naturales, particularmente relacionados con la habitabilidad en el universo (Farias & Barbosa, 2017). Aunque este trabajo de investigación no ha sido directamente implementado en un escenario educativo, su perspectiva puede servir como punto de partida para investigaciones futuras y su aplicación en la enseñanza de la Física.

En el capítulo 1 se plantea la problemática de la investigación, los objetivos que se proponen alrededor de la misma, la justificación y antecedentes que sirven como insumo para nutrir las bases que finalmente la sustentan. El capítulo 2 contiene una contextualización del fenómeno de la radiación térmica con algunos contenidos de corte histórico, que sirven como base para el lector en la comprensión de la ZH desde el estudio de la física térmica, tema clave de la investigación realizada. El capítulo 3 constituye el eje central de este documento; en él se realiza un abordaje de corte histórico que recoge la discusión en torno a la definición del concepto de ZH a través de diversos autores, desde su génesis hasta su interpretación actual dentro de la Astrofísica y Astrobiología. Finalmente, en el capítulo 4 se elabora una serie de reflexiones y consideraciones finales, producto del trabajo propuesto para el estudio introductorio de la ZH desde la fenomenología de la radiación térmica.

➤ CAPÍTULO I

Problemática

En la formación académica del estudiante, la Física es una disciplina científica que usualmente se enseña de manera tradicional, es decir, centrada en el contenido, lo cual conlleva a un proceso de enseñanza-aprendizaje de los fenómenos naturales que se presentan en el aula de manera descontextualizada, fragmentada y lineal (Bigozzi *et al.*, 2014). Este enfoque puede conllevar a una experiencia de aprendizaje en la cual, el estudiante perciba el concepto como algo abstracto y difícil de comprender, sin poderlo vincular, es decir, alejándolo de su experiencia cotidiana. Tal desconexión genera una disminución en el interés y la motivación del estudiante hacia la Física y en general, hacia la ciencia (Erazo, 2017; Torres et al., 2018).

En consecuencia, es esencial reflexionar sobre la idoneidad de los métodos de enseñanza de la ciencia, en términos de su capacidad para estructurar de manera integral los conocimientos de las distintas disciplinas científicas, con el objetivo de evitar restricciones en el desarrollo de habilidades de pensamiento crítico y analítico en los estudiantes. Estas habilidades son de vital importancia para abordar los desafíos científicos y tecnológicos contemporáneos, como aquellos relacionados, por ejemplo, con los fenómenos que determinan las condiciones para que un planeta diferente de la Tierra se considere con el potencial para ser habitable (Rua & Peña, 2016).

Por otro lado, la organización de los conocimientos disciplinares en el campo de la Física, y en términos más generales, en el ámbito del quehacer científico, se encuentra directamente relacionada con los procesos que se desarrollaron en contextos históricos específicos. Sin embargo, los procesos típicos de enseñanza de la Física se centran más en presentar los resultados de los conceptos y ecuaciones, que en proporcionar un contexto histórico que permita comprender cómo se llegó a dichos resultados (Erazo, 2017). De manera similar, presentar una definición del concepto de ZH como producto final, aislado del contexto histórico de la ciencia a la que precede (la Astrobiología), sería desconocer la influencia que otros saberes disciplinares, como la geografía, la Ciencia planetaria y Atmosférica, y la Física, han tenido en su desarrollo desde su génesis hasta el día de hoy (Lingam, 2021).

En el programa curricular de la Licenciatura en Física que ofrece el Departamento de Física de la Universidad Pedagógica Nacional, se evidencia una falta de trabajos de discusión científica interdisciplinar que aborden de manera holística la relación entre la radiación térmica, y los fenómenos asociados con la habitabilidad planetaria¹, particularmente el caso de la ZH. La ausencia de un espacio académico donde se explore el papel de los procesos térmicos de las estrellas y su relación con la existencia de agua líquida en un planeta y, por tanto, en la posibilidad del surgimiento de la vida, puede constituir una limitación en la formación de los futuros maestros en enseñanza de las ciencias, en este caso particular, de la Física.

Además, desde mi experiencia en diferentes espacios de práctica como en el Instituto Pedagógico Nacional (IPN), y el Colegio Argelia, los estudiantes manifiestan un alto interés en tópicos alusivos a la búsqueda de vida en otros entornos planetarios. Esto transcurre en espacios informales de formación académica, como los semilleros escolares. Esto sugiere que, aunque hay interés, no existen espacios en los que tales intereses puedan socializarse.

Es necesario abordar esta problemática dentro del programa curricular, puesto que esto puede permitir a los maestros en formación explorar desde una perspectiva científica los fenómenos relacionados con la vida en el universo, a partir de la conexión entre saberes disciplinares como la Física desde la radiación térmica y la Astrobiología desde la habitabilidad planetaria. Al hacerlo, se promoverá una formación enriquecedora desde la educación científica, cuyo enfoque podrá estar distanciado de la fragmentación conceptual en la comprensión de los fenómenos naturales (Rua & Peña, 2016; Chefer & Oliveira, 2022).

De acuerdo con las ideas expuestas anteriormente, para el presente proyecto de trabajo emerge la pregunta investigativa:

¿Cómo construir una narrativa alrededor de la HZ recurriendo a procesos históricos que sirva como insumo para posibilitar el desarrollo de otras comprensiones en el contexto

¹ Para verificar esto, consultar el repositorio público de la Universidad Pedagógica Nacional <http://repositorio.pedagogica.edu.co/handle/20.500.12209/38>

actual alrededor de la enseñanza de la Física (radiación térmica), en relación con los problemas de los que se ocupan campos de estudio como la astrofísica y la astrobiología?

Objetivo general

Establecer una aproximación al estudio de la zona habitable desde una perspectiva histórica y conceptual, a partir de la física de la radiación térmica y el concepto de cuerpo negro, que sirva como insumo para ampliar los procesos de formación en los maestros dentro del contexto la enseñanza de la ciencia.

Objetivos específicos

- Construir un marco de referencia conceptual que se base en las nociones de radiación térmica, cuerpo negro y ley de Stefan-Boltzmann, con el fin de contribuir a la comprensión de la zona habitable.
- Realizar un estudio el concepto de zona habitable mediante un enfoque histórico para comprender su evolución y características hasta la actualidad.
- Interpretar la relación entre la física de la radiación térmica y la zona habitable con el propósito de establecer una base conceptual que sirva a los futuros maestros en formación para crear escenarios de discusión sobre temas de habitabilidad planetaria en el contexto de la enseñanza de la ciencia.

Justificación

El objetivo de este trabajo de grado se fundamenta en construir una aproximación al estudio de la ZH desde una perspectiva histórica y conceptual, a partir de la Física de la radiación térmica y el concepto de cuerpo negro. Este tema se presenta como una oportunidad valiosa para la enseñanza de la Física, ya que aborda aspectos fundamentales de la Astrofísica, la búsqueda de vida en otros planetas y la comprensión de los procesos físicos básicos involucrados en la habitabilidad de estos.

Según Carvajal (2010), actualmente la formación de futuros docentes en ciencias exige la necesidad de buscar rutas pedagógicas en los procesos de enseñanza- aprendizaje que no terminen por encaminarse dentro del aula, hacia una cultura discursiva en la interpretación y comprensión de la actividad y el quehacer científico, de forma aislada, fragmentada y dispersa. Respecto a lo anterior, la elaboración del presente documento se justifica en la necesidad de promover una enseñanza de la Física que vaya más allá de la memorización aislada de ecuaciones y conceptos. Mediante el estudio de la zona de habitabilidad y su relación con la física de la radiación térmica y el concepto de cuerpo negro, se logra construir la oportunidad de explorar y comprender de manera más profunda, cómo estos principios físicos se encuentran involucrados con los procesos naturales que permiten el fenómeno de la vida, tal y como podrá apreciarse particularmente en el desarrollo del capítulo III del presente documento.

En cuanto a su pertinencia, el presente documento busca ajustarse con las exigencias actuales de la enseñanza de la Física, que promueva la alfabetización científica y la capacidad de abordar problemas complejos desde una perspectiva global de la ciencia (Mosquera, 2006). Este último aspecto cobra especial relevancia dentro del tema propuesto, ya que aporta aspectos conceptuales de la Física, la Astronomía y la Astrobiología que permiten al estudiante de física comprender la conexión entre diferentes campos del conocimiento y su aplicación en la vida cotidiana, fomentando así, el desarrollo de habilidades de pensamiento crítico y el vínculo entre la Física y otras disciplinas científicas.

Por otro lado, a nivel nacional, la Astrobiología ha ganado importancia como disciplina científica, con enfoques educativos e investigativos. Grupos como el Instituto de Astrobiología de Colombia (IAC) y el Grupo de Astrobiología de la Universidad Nacional de Colombia (UNASB) trabajan para impulsar el desarrollo de la astrobiología tanto en el ámbito de la enseñanza de las ciencias naturales como en el campo investigativo (Bueno, 2011).

En este contexto, debido a que en el Departamento de Física de la Universidad Pedagógica Nacional no se encuentran documentos orientados al estudio disciplinar de la ZH, se espera que con la investigación y recopilación documental plasmada en el presente trabajo, pueda ofrecerse un panorama general e introductorio dirigido a los maestros en formación de la

Licenciatura en Física, que opten por encaminarse en futuras investigaciones y reflexiones concernientes tanto al papel que puede representar el estudio interdisciplinar de la Astrobiología en la enseñanza de la Física, como a la construcción de temáticas relacionadas con la conceptualización de habitabilidad planetaria, las cuales puedan nutrir la formación de la cultura científica dentro del aula.

Antecedentes

Para realizar la construcción de la presente propuesta de proyecto de grado, se buscaron algunos trabajos que abordan temáticas relacionadas tanto con la investigación teórica como con discusiones y reflexiones dentro del aula que puedan vincularse al concepto de habitabilidad estelar. A continuación, se exponen los autores y sus respectivos trabajos de investigación que serán considerados como referente para el desarrollo del presente documento.

A nivel local: (Tovar, 2019). Una aproximación a la explicación de los sismos a través del concepto de onda mecánica. Este documento se centra en la investigación de la onda sísmica, la cual da lugar a fenómenos naturales conocidos como movimientos telúricos. Para esto, se analizará este tipo de onda desde la perspectiva de las ciencias de la Tierra, utilizando el concepto de onda mecánica descrito por la física. Este escrito tiene como propósito aportar algunos aspectos sobre el planteamiento metodológico que propone, tanto por método (investigación documental) como por tratamiento de tema(multidisciplinario).

A nivel nacional: (Rua y Peña, 2016). Recontextualización del concepto de habitabilidad planetaria a partir de un análisis histórico epistemológico de los planteamientos de J. Kasting. Trabajo de grado para optar al título de licenciado en educación con énfasis en ciencias naturales y educación ambiental. El objetivo del trabajo es analizar los planteamientos de J. Kasting sobre la habitabilidad planetaria a través de una perspectiva histórica y epistemológica. Además, se busca integrar este concepto en la enseñanza y desarrollar una secuencia didáctica para su implementación en la Institución Educativa San Juan Bosco. Este trabajo aporta aspectos metodológicos de corte histórico. Además, aborda

el tema de habitabilidad planetaria orientado hacia una discusión en el aula sobre los criterios que hacen posible la vida en un planeta.

A nivel internacional: Poffo (2012). Determinación de la zona de habitabilidad estelar. Trabajo especial de la licenciatura en astronomía. El autor describe el concepto de habitabilidad estelar basado en los trabajos de J. Kasting y presenta dos modelos para determinar la Zona de Habitabilidad Estelar: el modelo de temperatura constante y el modelo de dos capas extendido. El objetivo de este trabajo de grado es proporcionar los elementos necesarios para construir la conceptualización física de la ZH.

(Oreiro y Solves 2015). Evaluación de la enseñanza de la Astrobiología en Secundaria: análisis de libros de texto y opiniones del profesorado en formación. Este artículo analiza la integración de la astrobiología en la enseñanza de las ciencias naturales en la educación secundaria en España. Su objetivo es enriquecer la reflexión sobre la astrobiología como una ciencia interdisciplinaria y cómo puede ser incorporada en la enseñanza de las ciencias naturales. El propósito es contribuir a la discusión sobre la existencia de vida en el universo y cómo este tema puede ser abordado desde diferentes perspectivas para enriquecer la formación científica en el aula.

Metodología

El presente estudio adopta un enfoque multidisciplinario al abordar el concepto de la ZH. Esta investigación, por lo tanto, se nutre de disciplinas científicas como la Física, la Astronomía y la Astrobiología, las cuales desempeñan un papel fundamental en el análisis y comprensión de este objeto de estudio. Parafraseando a Cisneros (2012) en el contexto de este trabajo: la interacción y colaboración entre estos saberes del conocimiento resulta clave para lograr obtener resultados significativos que permitan abordar de manera integral los desafíos que surgen el transcurso de la elaboración del documento. Como consecuencia de esto, el enfoque multidisciplinario es esencial para el desarrollo completo de la investigación realizada sobre la zona habitable.

Se llevó a cabo una búsqueda y análisis de referentes conceptuales en textos especializados, trabajos de grado, tesis de grado, artículos de investigación, entre otros, con el objetivo final de recopilar y sistematizar la información relevante y pertinente en torno a la pregunta que orienta el presente documento. El marco metodológico sobre el que se sustenta este proceso escritural, según Cisneros (2012) es de tipo bibliográfico o documental. Esto quiere decir que el método investigativo aplicado, de acuerdo con Cisneros (2012) “se fundamenta en la recopilación de información contenida en documentos impresos como libros, revistas, periódicos, etcétera, con el propósito de profundizar en las teorías para complementar, refutar o derivar nuevos conocimientos” (p. 7-8). De este modo, se recurre a fuentes de investigación documental primarias, las cuales, como dice Jurado (2002): “son aquellas que contienen información no abreviada y original. Son todos los hechos e ideas estudiados bajo nuevos aspectos”. Igualmente se indagará en las fuentes secundarias con el objetivo principal de obtener información documental primaria a través de la búsqueda localizada en citas bibliográficas, reseñas o resúmenes de revista (Jurado, 2002). El propósito de esta investigación documental se orienta en establecer parámetros de compilación, organización, selección y reflexión analítica de todos los referentes conceptuales necesarios para la formulación y consolidación del marco teórico de estudio (Monje, 2011).

Con lo descrito, se busca que este trabajo tenga la capacidad de plasmar una perspectiva general del estado actual del conocimiento relacionado a la conceptualización de la zona de habitabilidad desde un estudio histórico sustentado en conceptos de radiación térmica. Con referente a lo anterior, acerca del papel que juega la investigación documental en el estado actual del conocimiento, Bernal (2010) afirma que: “consiste en un análisis de la información escrita sobre un determinado tema, con el propósito de establecer relaciones, diferencias, etapas, posturas o estado actual del conocimiento respecto al tema objeto de estudio”.

El presente se desarrolla bajo la estructura de las siguientes tres fases:

Fase 1: Esta fase se inicia con una indagación documental de fuentes primarias, entre las cuales vale la pena citar: *The Principia: The Authoritative Translation and Guide: Mathematical Principles of Natural Philosophy* (Cohen, I. B., Whitman, A., & Budenz, J. Trad) de Newton, I. (1999) (Título original publicado en 1687), *Of the Plurality of Worlds:*

An Essay: Also, a Dialogue on the Same Subject de Whewell (1853), *Habitable zones around main sequence stars* de Kasting et al (1993), *The evolution of habitable zones during stellar lifetimes and its implications on the search for extraterrestrial life* de Underwood et al (2003), entre otras. Y fuentes secundarias como: *Determinación de la zona de habitabilidad estelar* de Denis Poffo (2013), *Recontextualización del concepto de habitabilidad planetaria a partir de un análisis histórico epistemológico de los planteamientos de J. Kasting* de Pabon, J & Sandoval, Z (2016). En general, con esta indagación documental, se busca el objetivo de serle fiel tanto a la línea histórica del estudio de la radiación térmica como al desarrollo histórico del concepto de zona de habitable a la luz de los documentos abordados.

Fase 2: En esta fase, se tiene como propósito analizar, describir y conceptualizar la zona de habitabilidad estelar desde el estudio de la física de la radiación térmica. De esta manera, se busca lograr desde una perspectiva analítica la descomposición y posterior comprensión de cada uno de los conceptos físicos que se articulan con los parámetros propios de la astrofísica necesarios para abordar el estudio de la zona habitable (inquiridos en la primera fase) tal y como afirma Jurado (2002): “Entendemos por análisis la descomposición de un todo en sus elementos”.

Fase 3: En esta fase, es necesario hacer uso de diversas fuentes especializadas, de modo que la proyección de la investigación documental posea un enfoque de carácter multidisciplinar debido a que su estudio involucra varias áreas del conocimiento (Cisneros, 2013). Con ello se pretende focalizar finalmente todo lo indagado en las fases anteriormente estructuradas, generando un documento académico (trabajo de grado) que permita aproximarse a la comprensión del concepto de zona habitable desde una perspectiva histórica a la luz de la pregunta de investigación propuesta.

➤ CAPÍTULO II

En este capítulo se realizará una descripción del fenómeno de propagación de calor por radiación térmica incluyendo a su vez, algunos elementos conceptuales relacionados con las leyes de la radiación. Particularmente, se abordará el concepto de cuerpo negro, radiación de cuerpo negro y ley de Stefan-Boltzmann. También se discutirán algunos acontecimientos importantes, tanto teóricos como experimentales, que tuvieron lugar a finales del siglo XIX y que condujeron a una descripción alternativa a la interpretación ondulatoria de la transferencia de energía radiante. Posteriormente, se hace una consideración final alrededor de como los conceptos abordados nutren el panorama que permite describir la existencia de la ZH estelar.

Radiación térmica

Dentro del estudio de la termodinámica, el concepto de calor se refiere a la transferencia de energía de un sistema a otro, o de un sistema con el entorno que le rodea, siempre que exista un gradiente de temperatura entre ambos sistemas, esto quiere decir que el calor sólo se transportará desde los sistemas, regiones o medios con temperatura más alta hacia los que se encuentran con temperatura más baja (Cengel & Ghajar, 2011). En el caso de la conducción y convección térmica, para que la energía pueda ser transportada de un sistema físico a otro, o a través del mismo sistema físico, el medio que configura dicho sistema debe ser material en cualquiera de sus tres estados (sólido, líquido o gaseoso).

Sin embargo, cuando el modo de transporte de calor es la radiación, la energía no necesita la existencia de ningún medio interventor para propagarse. Esto significa que a diferencia de la conducción y la convección² ([Ver anexo 1](#)), la radiación es el único mecanismo de transporte de energía que puede propagarse a través del vacío (Manrique Valadez, 2002). Igualmente, cabe mencionar que la radiación viaja a través del espacio vacío a la velocidad de la luz, sin que esta sufra ningún tipo de atenuación al momento de propagarse³. Esto es

² Estos aspectos sobre transferencia de calor son ampliados en el anexo 1

³ Que no se confunda esta idea con la noción de intensidad de radiación en una región particular del espacio, la cual decrece con el cuadrado inverso de la distancia.

lo que esencialmente permite el transporte de energía en forma de calor desde una estrella como el Sol hasta el planeta Tierra (Cengel & Ghajar, 2011).

Ahora bien, para comprender el modo en como la energía se propaga en el espacio a través del mecanismo de radiación, veremos que es necesario recurrir a los fundamentos de la teoría electromagnética establecidos hacia mediados del siglo XIX.

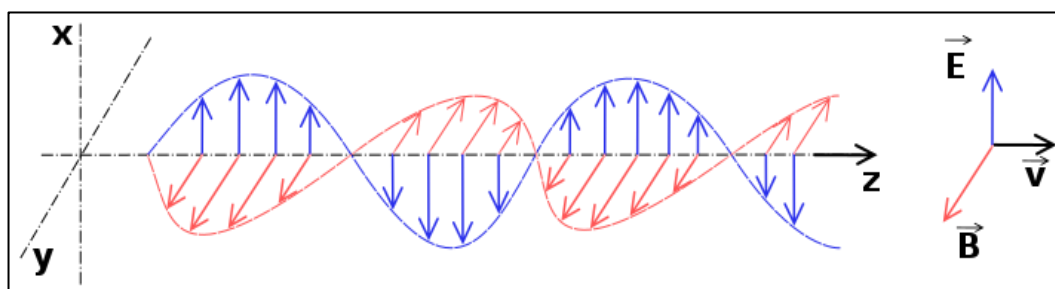


figura 1 En esta representación de una onda electromagnética se puede observar el campo eléctrico (azul), perpendicular al campo magnético (rojo), los que a su vez son perpendiculares a la velocidad (negro) y dirección en que se propagan. Encontrado en https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/35/Onde_electromagnetique.svg

El físico escocés James Clerk Maxwell entre 1850 y 1870, quien a partir de la deducción de un sistema de ecuaciones⁴, sintetizó en una sola teoría los fenómenos eléctricos, magnéticos y ópticos sobre la luz, estableciendo así, un nuevo campo de estudio en la física que hoy se conoce como el electromagnetismo clásico (Beléndez, 2008). Maxwell, además postuló en sus modelos teóricos, la existencia de las ondas electromagnéticas, producidas a partir de cargas eléctricas en movimiento.

Cuando una carga eléctrica experimenta una aceleración, esta genera un campo eléctrico variable, que a su vez genera un campo magnético variable, causando nuevamente un campo eléctrico variable que volverá a generar un campo magnético variable, y así sucesivamente. De tal modo, las ondas electromagnéticas (Figura 1) se constituyen como el

⁴ Hoy en día se estudian como las cuatro ecuaciones de Maxwell, las cuales fueron sintetizadas por Oliver Heaviside (1850-1925) y Williard Gibbs (1839-1903). Estas son:

1. La ley de Gauss de los campos eléctricos
2. La ley de Gauss de los campos magnéticos
3. La ley de Faraday-Henry de la inducción electromagnética
4. La ley de Ampere-Maxwell

resultado de “las vibraciones de su campo eléctrico \vec{E} y su campo magnético \vec{B} , que oscilan en planos mutuamente perpendiculares (Garcia Castaneda & De Geus, 2003, p. 43).

Estas vibraciones u oscilaciones, debidas al campo eléctrico y magnético, causan perturbaciones periódicas que se propagan en el espacio vacío a la velocidad de la luz. La dirección, y por lo tanto la velocidad de propagación, es perpendicular a la dirección de los campos que se encuentran en movimiento. Es a esta clase de ondas que se les denomina radiación electromagnética (Garcia Castañeda & De Geus, 2003).

Una onda electromagnética, se puede describir a partir de dos características físicas esenciales, es decir, su longitud de onda y su frecuencia de oscilación ν , propiedades para las que en el vacío pueden ser relacionadas como

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (1)$$

donde $c = 2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}$ corresponde a la constante de la velocidad de la luz en el vacío como medio de propagación. Podemos notar que en la ecuación (1) la longitud de onda y la frecuencia asociadas a la onda electromagnética son inversamente proporcionales, es decir, que cuanto mayor sea la frecuencia, menor será la longitud de onda (Garcia Castañeda & De Geus, 2003).

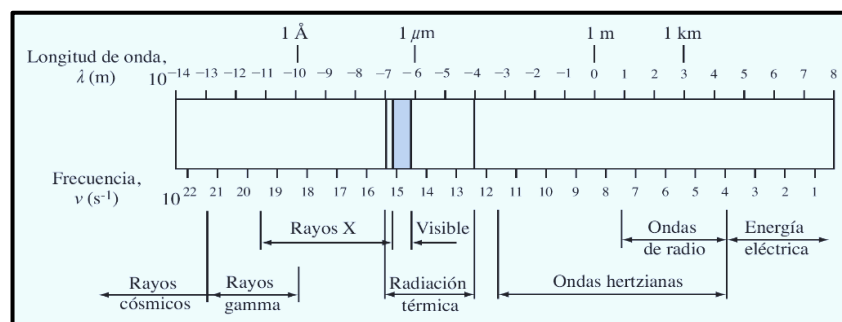


figura 2 Espectro electromagnético. Tomado de (Cengel & Ghajar, 2011).

Dependiendo de la fuente que se encuentre emitiendo energía en forma de radiación electromagnética, la onda electromagnética asociada puede tomar una diversa gama de valores en relación con su longitud y frecuencia, en un amplio rango que abarca desde

longitudes de onda menores a $10^{-10}\mu\text{m}$ para fuentes astrofísicas como los rayos cósmicos, hasta longitudes de onda mayores que $10^{10}\mu\text{m}$ que pertenecen al rango de las ondas de radio y de energía eléctrica (Cengel & Ghajar, 2011). A esta distribución de valores energéticos posibles en función de su longitud de onda y frecuencia se le denomina espectro de la radiación electromagnética o simplemente espectro electromagnético (Domingo, 2013).

La región del espectro electromagnético en donde se ubica la radiación térmica comprende longitudes de onda entre los $0.1\mu\text{m}$ y $100\mu\text{m}$. Como se puede apreciar en la figura 2, este tipo de radiación electromagnética abarca gran parte de la región del infrarrojo (IR), pasando por toda la región del espectro visible⁵ (figura 3), hasta llegar a alcanzar una parte del rango que corresponde a la radiación ultravioleta (UV). Así, a diferencia de otros tipos de radiación electromagnética como los rayos gamma, los rayos x o las ondas de radio, la radiación térmica es la forma en cómo un cuerpo emite y absorbe energía en forma de calor como consecuencia directa de su temperatura (Manrique Valadez, 2002).

Color	Banda de longitudes de onda
Violeta	0.40-0.44 μm
Azul	0.44-0.49 μm
Verde	0.49-0.54 μm
Amarillo	0.54-0.60 μm
Naranja	0.60-0.67 μm
Rojo	0.63-0.76 μm

Figura 3: Rangos de longitudes de onda de los diferentes colores en el espectro visible. Tomado de (Cengel & Ghajar, 2011).

Existe una conexión entre la temperatura y el color de la luz que un material emite en forma de radiación, la cual puede ser percibida únicamente cuando este material se encuentra a temperaturas muy altas. Gracias a nuestra experiencia cotidiana, hoy en día podemos comprobar que, si por ejemplo tomamos un objeto metálico y lo exponemos al fuego, este

⁵ El espectro visible de la radiación electromagnética corresponde a la luz que percibe el ojo humano en todo su rango de colores, dependiendo de su longitud de onda y frecuencia. Este rango abarca desde el violeta (entre 0.40 y $0.44\mu\text{m}$), hasta el rojo hasta el rojo (entre 0.63 y $0.76\mu\text{m}$),

empezará a cambiar de color en función del incremento de su temperatura, lo que significa que, iniciará un proceso de disipación de energía en forma de calor después de un breve periodo de tiempo. Aunque al principio la barra metálica, no presentará ningún cambio de color perceptible al ojo humano, si se podrá percibir por cuenta de la variación del calor emitido, es decir, se encontrará a una temperatura mayor que la temperatura del medio. Sin embargo, si el objeto metálico se mantiene expuesto al fuego durante mucho tiempo, la temperatura del material irá aumentando progresivamente, a tal grado que será perceptible al ojo humano. De tal forma que, en un principio el color que emitirá el objeto metálico será rojo opaco, gradualmente se convertirá en un rojo amarillento más intenso, hasta alcanzar, con el tiempo de exposición suficiente, un color entre azul y blanco (Eisberg & Resnick, 1992). Tal relación fue documentada por primera vez en 1792, por el ceramista inglés Thomas Wedgwood, al observar la tonalidad rojiza que manifestaban a una determinada temperatura, los hornos destinados para la fabricación de cerámica (figura 4). Esto, independiente del tamaño, forma y construcción del horno en cuestión (Carroll & Ostlie, 2017).



GUÍA DEL ALFARERO	
550 °C	ROJO OSCURO
750 °C	ROJO GUINDADO
900 °C	ANARANJADO
1.000 °C	AMARILLO
1.200 °C	BLANCO

Figura 4: Guía del alfarero que describe la relación temperatura - color

Radiación de cuerpo negro y ley de Stefan-Boltzmann

Una de las mayores contribuciones logradas en el campo de estudio de la radiación térmica, fue llevada a cabo por el físico austriaco Josef Stefan en 1879, cuando en su trabajo titulado *Über die Beziehung zwischen der Wärmestrahlung und der Temperatur* (Sobre la relación entre la radiación térmica y la temperatura), demuestra experimentalmente que la energía o

intensidad total radiada por un cuerpo negro, es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. Hoy en día esta relación de proporcionalidad que lleva su nombre es considerada una de las leyes más importantes dentro del fenómeno de la radiación térmica (Rivadulla, 2002).

El modo en como Stefan llegó a esta conclusión se deriva de los resultados obtenidos por John Tyndall en 1865, al realizar mediciones sobre la radiación que se disipa en forma de calor, por un alambre de platino a distintas temperaturas, luego de hacerle pasar una corriente eléctrica (Braun, 2007). De acuerdo con Stefan (1879), cuando el alambre de platino se encuentra a una temperatura de 1473° K (manifestando un color blanco en su superficie), la intensidad de la radiación emitida es aproximadamente 11.7 veces mayor que cuando se encuentra a una temperatura de 798°K (la superficie del alambre manifiesta un color rojizo opaco) ([Ver anexo 2](#)). Este resultado es obtenido a través de la expresión:

$$\left(\frac{1473}{798}\right)^4 = 11.67 \quad (2)$$

Fue a partir de esta relación de proporcionalidad entre T^4 y energía total radiada E , que Stefan, dedujo una aproximación del valor de la temperatura de la superficie solar. Haciendo uso de los datos recogidos en los trabajos de Jacques-Louis Soret⁶, encuentra que la densidad de flujo de radiación solar es 29 veces mayor que la de una lámina metálica calentada a una temperatura estimada entre los 2173K y 2273K⁷. Asumiendo que la atmosfera terrestre absorbe una porción de la radiación incidente, Stefan determina que la densidad de flujo total del sol es $\left(\frac{3}{2}\right)(29) = 43,9$. De aquí, tomando la relación entre T^4 y E , deduce que $43.5^{(1/4)} = 2,568$, siendo esta la cantidad de veces que la temperatura del sol es mayor que la temperatura de la lámina metálica. Con este último valor, Stefan pudo

⁶ Soret, J.L. (1872): "Comparaison des intensités calorifiques du rayonnement solaire et du rayonnement d'un corps chauffé à la lampe oxyhydrique" *Archives des sciences physiques et naturelles* (Geneva, Switzerland), 2nd series, 220-229.

⁷ La lamina metálica en cuestión se encuentra a cierta distancia del instrumento de medición, de tal modo que este se observe con el mismo diámetro angular que el Sol visto desde la Tierra.

calcular finalmente que la temperatura de la superficie solar se encontraba entre 5580K y 5838K (Stefan, 1879).

En 1884, el físico austriaco Ludwig Boltzmann, a partir de fundamentos teóricos demostró los resultados experimentales obtenidos cinco años atrás, por su asesor de doctorado Josef Stefan. Partiendo de consideraciones termodinámicas, Boltzmann toma como base el trabajo de Adolfo Bartoli, en el que describe la existencia de presión de radiación, y aplicando las leyes de la teoría electromagnética de Maxwell al problema de la radiación de cuerpo negro, concluye que

$$E_{Tot} = \sigma T^4 \quad (3)$$

Esta ecuación se conoce como la ley de Stefan-Boltzmann⁸, y describe la cantidad total de energía radiada (en todas sus longitudes de onda) por unidad de área, de un cuerpo negro que se encuentra a una temperatura absoluta (Kuhn, 1980; Rivadulla, 2002).

Cualquier medio material que se encuentre a una temperatura por encima del cero absoluto (0 K), emite radiación térmica en distintas longitudes de onda. Sin embargo, como se describió anteriormente, la radiación térmica, abarca el rango de longitudes de onda que corresponde a la región del infrarrojo, es decir, por debajo del espectro visible al ojo humano. Si un cuerpo, no se encuentra a una temperatura cercana o superior a los 800 K, no emitirá radiación visible (Cengel & Ghajar, 2011). Esto no quiere decir necesariamente que un objeto no pueda ser observado. Cuando la luz blanca incide sobre la superficie de un objeto, este reflejará luz en determinada frecuencia o longitud de onda. Por ejemplo, si un material refleja toda la luz incidente, este se verá blanco. En caso de que dicho material se aprecie con un color distinto, significa que estará reflejando en la longitud de onda que corresponde a ese color⁹. Finalmente, si un material posee la propiedad física de absorber toda la radiación electromagnética que incide sobre este, se dice que se comporta como un cuerpo negro (García Castañeda & De Geus, 2003).

⁸ La constante σ tiene un valor de $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$ y se conoce como la constante de Stefan-Boltzmann.

⁹ En esta situación particular, el ojo humano discrimina el resto de los colores que son emitidos en distintas longitudes de onda, y solo percibe el color de emisión más intenso a una determinada temperatura. En realidad, la percepción sensorial de color es debido a la superposición de toda una franja de longitudes de onda que interactúan con los conos de los bastones de los ojos.

La introducción del concepto de cuerpo negro y su definición fue propuesta por primera vez en 1860 por el físico Gustav Robert Kirchhoff. Su planteamiento se estructuró en suponer la existencia de cuerpos con espesores infinitamente pequeños, los cuales absorben en su totalidad los rayos incidentes sobre estos, sin que los reflejan en absoluto (Kirchhoff, 1860). Sin embargo, siguiendo los planteamientos de Kirchhoff, un cuerpo negro no solo es un absorbedor perfecto de radiación, también se comporta como emisor perfecto de radiación en función de su temperatura (Rivadulla, 2002).

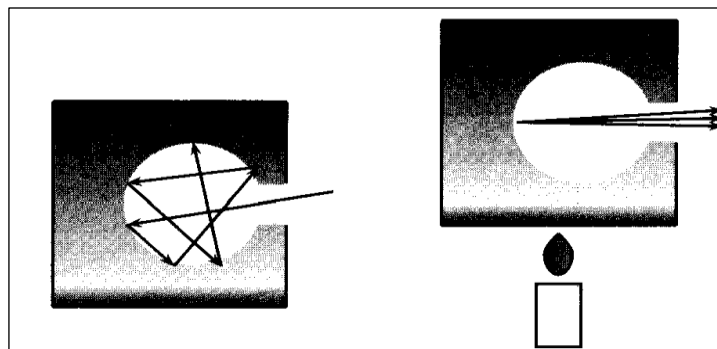


figura 5 A la derecha un cuerpo negro sobre el que incide radiación electromagnética y ésta es absorbida por sus paredes al ser reflejada en distintos puntos. A la izquierda un cuerpo negro al ser calentado comportándose como un perfecto emisor. Tomado de Introducción a la física moderna (García Castaneda, J., & De Geus, J 2003)

Podemos pensar en el cuerpo negro idealizado por Kirchhoff como una caja o cavidad con un pequeño orificio en sus paredes, que al interior son oscuras. La radiación electromagnética incidente a través del orificio comenzará a ser absorbida en su totalidad, poco a poco por las paredes del recipiente, mientras se refleja continuamente de un punto a otro (Figura 5 izquierda). Ahora bien, si calentamos el recipiente, este comenzará a comportarse como un emisor perfecto de radiación electromagnética a través del orificio (figura 5 derecha). Este tipo de radiación es la que se conoce como radiación de cuerpo negro.

Si la energía disipada en forma de radiación que emite el recipiente o cavidad (cuerpo negro), es igual a la que absorbe, entonces se encontrará a una temperatura constante, es decir, en condiciones de equilibrio térmico. Dicha cantidad o intensidad de energía

irradiada estará en función de la temperatura del material (Garcia Castañeda & De Geus, 2003).

La catástrofe ultravioleta

Entre los años de 1893 y 1896, Wilhem Wien elaboró un modelo teórico que permite describir como se distribuye la densidad de energía radiada por un cuerpo negro, en función de su frecuencia y temperatura¹⁰:

$$E(\nu) = \frac{\alpha_1 \nu^3}{e^{(\beta_2 \nu / T)}} \quad (4)$$

donde α_1 y β_1 son constantes arbitrarias. Este modelo se ajusta muy bien para describir las emisiones de radiación en longitudes de onda corta, es decir, para cuerpos que se encuentran a alta temperatura y su espectro de emisión abarca todo el rango de frecuencias visibles. Sin embargo, para densidades de energía cuyas frecuencias sean bajas (longitudes de onda larga), el modelo de Wien resulta ser insuficiente (Garcia Castañeda & De Geus, 2003).

Es así como en 1900, se utilizaron los trabajos realizados por los físicos Lord Rayleigh y Sir James Jeans para desarrollar un modelo basado en principios termodinámicos. Utilizando las mismas consideraciones teóricas que James Clerk Maxwell aplicó en su teoría cinética de los gases, los físicos postularon que la energía promedio de un oscilador eléctrico en equilibrio térmico dentro de un cuerpo negro está dada por $E \approx k_B T$ donde T es la temperatura y k_B es la constante de Boltzmann.

Basándose en el teorema de equipartición de la energía, Rayleigh-Jeans obtienen un modelo derivado que describe la distribución espectral de densidad de energía a través de la integral sobre todas las frecuencias, obteniendo:

$$E(\nu, T) = \frac{8\pi}{c^3} k_B T \nu^2 \quad (5)$$

¹⁰ Hoy en día este modelo se conoce como la Ley de distribución de Wien.

donde k_B es la constante de Boltzmann. Aunque el modelo de Rayleigh-Jeans es efectivo para describir emisiones de energía radiante con frecuencias bajas, su aplicación se restringe a dominios de longitudes de onda más cortas que el ultravioleta. Esto se debe a que, como se puede observar en la ecuación (5), la densidad de energía radiante es proporcional al cuadrado de la frecuencia. Por lo tanto, este modelo predice un resultado físicamente imposible conocido como la "catástrofe ultravioleta", donde la densidad de energía radiada aumentaría indefinidamente debido a la proporcionalidad del cuadrado de la frecuencia (García Castañeda & De Geus, 2003; Kuhn, 1980).

Paralelo a los trabajos teóricos desarrollados por Wilhem Wien y Rayleigh-Jeans, se llevaron a cabo trabajos experimentales notables, que por un lado permitieron confirmar la ley de Stefan- Boltzmann y la ley de Wien, pero también demostraron las discrepancias entre las curvas experimentales para la densidad de emisión de energía radiante y las descripciones de las curvas teóricas suministradas tanto por Rayleigh-Jeans como por Wien (Figura 6).

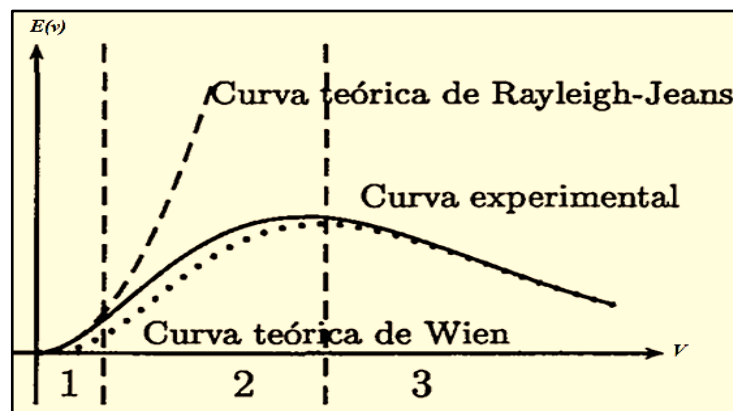


figura 6: Curva experimental de la radiación de cuerpo negro vs curvas teóricas obtenidas por Rayleigh-Jeans y W. Wien. La región 1 corresponde a bajas frecuencias, la región 2 al rango ultravioleta, y la región 3 a frecuencias altas (García Castañeda, J., & De Geus, J 2003)

Durante el período comprendido entre 1897 y 1903, los físicos Otto Lummer y E. Pringsheim realizaron una importante contribución que permitió la confirmación experimental de la ley de Stefan-Boltzmann. Esto lo lograron mediante el diseño y construcción de un cuerpo tan negro que fuera lo más cercano posible a la descripción

teórica propuesta por Kirchoff¹¹. El objetivo de su investigación era trabajar con altas temperaturas, por lo que se esforzaron por crear un cuerpo negro que pudiera soportarlas¹² (Hoffman, 2001).

Además, gracias a la invención del bolómetro¹³ en 1880, llevada a cabo por el astrónomo Samuel Langley, Lummer y Pringsheim realizaron modificaciones en este dispositivo y diseñaron un espectrobolómetro. Este instrumento permitía realizar mediciones de cuerpo negro que irradiara en el infrarrojo lejano, lo que serviría para detectar desviaciones significativas entre las predicciones de las curvas teóricas de la ley de Wien y las curvas experimentales en esa región del espectro electromagnético. En 1900, Heinrich Rubens, profesor de física en la Universidad de Berlín, y Ferdinand Kurlbaum también contribuyeron a demostrar las grandes discrepancias entre las predicciones de la ley de Wien y las curvas experimentales en radiación de onda larga, utilizando el método de rayos residuales (Hoffman, 2001).

El conflicto generado entre los modelos teóricos y los trabajos experimentales llevados a cabo a finales del siglo XIX condujo a que se generara un punto de inflexión en la interpretación de la radiación térmica como un fenómeno de naturaleza estrictamente ondulatoria. La teoría clásica del electromagnetismo de Maxwell, no resultó ser suficiente explicando la distribución de energía en equilibrio para un cuerpo negro. Asumir que la energía total de la radiación se distribuye (dentro de un cuerpo negro) equitativamente entre todas las longitudes de onda posibles, conlleva a que un cuerpo negro pueda absorber una cantidad ilimitada de ondas con frecuencias más altas y longitudes de onda más cortas (Rivadulla, 2002). Fue necesaria la introducción de un nuevo modelo para explicar la radiación de cuerpo negro y así resolver el error de la catástrofe ultravioleta. Una solución para resolver esta controversia fue presentada por Max Planck el 19 de octubre de 1900, durante un seminario de física en la universidad de Berlín. Su modelo de distribución espectral asume que un oscilador puede absorber o emitir energía proporcional a su

¹¹ El primer desarrollo experimental llevado a cabo para la construcción de un cuerpo negro fue elaborado por W. Wien y O. Lummer en 1895.

¹² Para ello diseñaron un cuerpo negro que consistía en un tubo de grafito calentado eléctricamente, el cual alcanzaba temperaturas de 2373K.

¹³ Con este instrumento, el astrónomo Samuel Langley realizó mediciones de la radiación solar incidente en la atmósfera terrestre.

frecuencia de oscilación ν de forma discretizada, es decir, en paquetes de energía $E_0 = h\nu$, donde h es una constante universal, llamada constante de Planck. A estos paquetes los denominó cuantos de energía y como consecuencia de ello, un oscilador solo puede absorber o emitir en múltiplos enteros de una cantidad mínima de energía $h\nu$. De esta forma, al expresar E_0 en términos de $h\nu$ en su ecuación de distribución de densidad de energía, se tiene:

$$E(\nu) = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{\nu^3}{e^{(h\nu/k_B T)} - 1} \quad (6)$$

La Ley de Planck, propuesta por Planck, es una ecuación que resuelve las discrepancias existentes entre las curvas experimentales y teóricas obtenidas a partir de las ecuaciones de Wien para frecuencias bajas y las ecuaciones de Rayleigh-Jeans para frecuencias altas. En otras palabras, esta ecuación describe con precisión los datos experimentales para todas las longitudes de onda en las que un cuerpo negro emite radiación en función de su temperatura (Rivadulla, 2002).

Consideraciones finales del capítulo

Este abordaje histórico nos permite establecer un contexto sobre los aspectos de la radiación térmica, que se encuentran implícitamente vinculados con todo el desarrollo teórico que involucrará el estudio de la ZH. Por ejemplo, el color de la temperatura nos permite comprender cómo los cuerpos emisores de luz, como las estrellas, cambian su apariencia en función de la variación de su temperatura. La relación entre temperatura y color determina su tipo espectral. Además, en principio, esto permite caracterizar la extensión de su ZH, pues nos indica la cantidad y tipo de radiación que recibe un planeta.

Por otro lado, con la ley de Stefan-Boltzmann podemos encontrar cantidad de energía que emite una estrella o un cuerpo planetario, y así, poder evaluar si este último se encuentra dentro de los rangos de distancia adecuados que hacen posible en primera instancia, la existencia de agua sobre su superficie. Finalmente, aunque sabemos que ningún objeto en el universo es un “cuerpo negro perfecto”, este concepto si nos proporciona una base teórica (idealizada) para comprender el modo en cómo los cuerpos celestes (Estrellas y planetas) interactúan con la radiación.

➤ CAPITULO III

Este capítulo se divide en dos secciones. En la primera sección se realizará una recontextualización del concepto de la ZH, mediante un abordaje histórico en el que se integraran progresivamente los diversos aspectos físicos, astrofísicos y astrobiológicos que inciden en la construcción de su definición y caracterización en la actualidad. A continuación, serán descritas las regiones de la ZH y cómo las restricciones de sus límites internos y externos afectan las condiciones de habitabilidad de un cuerpo planetario.

En la segunda parte de este capítulo, se abordará la zona habitable extendida a otros sistemas estelares, con el objetivo de comprender mejor la búsqueda de vida en el cosmos. Para ello se discutirá sobre los métodos de detección más utilizados en la búsqueda de exoplanetas orbitando otras estrellas, describiendo las categorías que hoy en día se aplican para caracterizarlos, hasta llegar a los de mayor interés para la búsqueda de vida. Se discutirá también sobre las estrellas de mayor interés astrobiológico, prestando atención a los criterios asociados con el tipo espectral de estrellas más adecuadas para la búsqueda de exoplanetas en la ZH.

Finalmente se explicará cómo se puede determinar la zona habitable a través del modelo de balance de energía de dimensión cero (modelo con atmósfera no absorbente)¹⁴, que utiliza la distancia del planeta a la estrella y la cantidad de energía que recibe para estimar su temperatura media global. Se tomará en cuenta el parámetro del albedo planetario para el modelo de temperatura de equilibrio, analizando la influencia que este posee en el balance de energía emitida y absorbida por un planeta.

¹⁴ También denominado modelo de temperatura equivalente de cuerpo negro.

La zona habitable: Una revisión histórica

En la sección anterior fue mencionado ya, que la zona habitable (ZH) se caracteriza como uno de los criterios astrofísicos esenciales para considerar un cuerpo planetario (planeta o satélite natural) como potencialmente habitable cuando este se encuentra dentro esta región. En la actualidad, este término es ampliamente utilizado y definido dentro de la investigación científica de campos disciplinares como la astrobiología y las ciencias planetarias (Hill et al., 2021; Kopparapu et al., 2013). Sin embargo, entre los siglos XVII y XIX el uso del concepto de zona habitable tuvo convergencia con otra disciplina académica como la geografía. Dentro de este contexto disciplinar, la zona habitable hacía referencia a las regiones del planeta Tierra, adecuadas para la vida humana (Lingam, 2021).

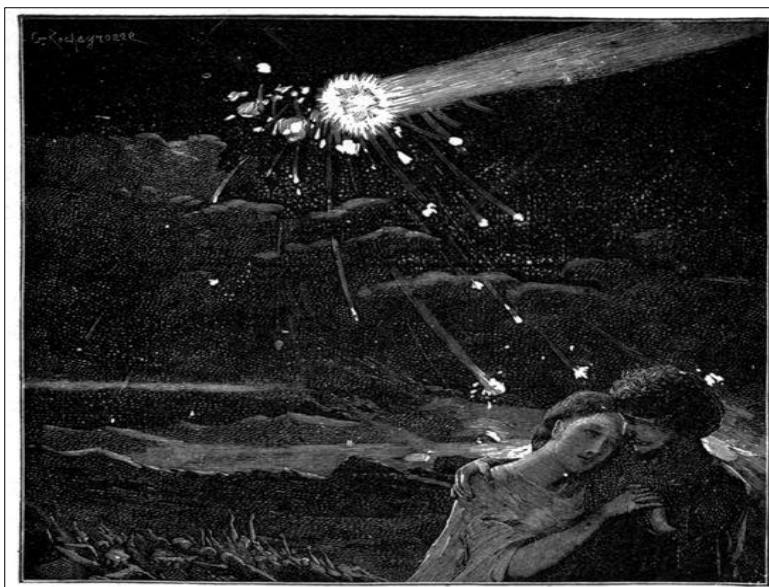


figura 7 "Omega: Los últimos días del mundo" es la traducción al inglés de la novela de Flammarion, *La Fin du Monde*, publicada en 1893. La premisa ficticia del libro es el descubrimiento de un cometa en curso de colisión con la Tierra en el siglo XXV. Imagen recuperada de: <https://www.gutenberg.org/files/57489/57489-h/57489-h.htm>

Un claro ejemplo de esto se puede encontrar en la novela de ciencia ficción titulada *La Fin du monde* (Figura 7), cuya autoría pertenece al astrónomo francés Camille Flammarion. En esta obra, Flammarion (1894, p.240) escribió:

A medida que la zona habitable se restringía cada vez más al ecuador, la población había disminuido aún más, al igual que la duración media de la vida humana, y llegó el día en que sólo quedaron unos pocos cientos de millones, dispersos en grupos a lo largo del ecuador, y mantener la vida sólo por los artificios de una laboriosa y científica industria (Citado en Lingam, 2021, p.2)

Es notable notar cómo, en aquel contexto histórico de finales del siglo XIX, la noción de la zona habitable se interpretaba principalmente en términos de connotación geográfica. Los fenómenos relacionados con esto tenían un impacto directo en la vida humana. Esta interpretación resalta la importancia de las condiciones ambientales y geográficas para el sustento de la población, y subraya el papel crucial que la tecnología y la ciencia desempeñaban en la supervivencia de la especie en un entorno cada vez más limitado.

En contraste con lo anterior, si retrocedemos hacia finales del siglo XVII, en la obra *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* de Sir Isaac Newton, encontramos lo que podría ser la primera estimación de las regiones del sistema solar en las que el agua dejaría de estar presente en estado líquido. Según Newton (1687), si la Tierra estuviera en la órbita de Saturno, el agua de la superficie terrestre se congelaría debido a la gran distancia que estaría del calor emitido por el Sol. Por el contrario, siguiendo el análisis de Newton (1687), si la Tierra ahora se encontrara en la órbita de Mercurio, debido a que la densidad de la luz solar (que es proporcional al calor irradiado por la estrella) es 7 veces mayor en esta región del sistema solar, el agua de la superficie de la Tierra se evaporaría. Newton llegó a esta conclusión extrapolando los resultados de un experimento que realizó con un termómetro, en el cual encuentra que el agua hierve cuando el calor del Sol es siete veces mayor que el calor registrado en época de verano (Newton, 1687)¹⁵.

Una caracterización más cercana a la definición actual de la ZH fue descrita por el científico británico Willian Whewell en 1853, en su obra *Of the Plurality of Worlds: An Essay: Also, a Dialogue on the Same Subject*. En este texto, la zona templada del sistema solar es la región dentro de la que orbita el planeta Tierra, una zona cálida en la que es posible la existencia de lluvia, algo que en los planetas interiores del sistema solar

¹⁵ Este análisis puede ser consultado en la versión traducida al inglés realizada por Ian Bruce. Página 18 del libro III, sección I: <http://www.17centurymaths.com/contents/newton/book3s1.pdf>

(Mercurio y Venus), no tiene lugar, puesto que al estar tan cerca del Sol, el vapor de agua sería arrasado por el calor irradiado de la estrella, además de impedir cualquier forma de vida sobre su superficie (Whewell 1853, p. 196)

No obstante, el biólogo y geólogo estadounidense Alexander Winchell, fue quizás, el primer científico en haber realizado la primera mención explícita registrada en la literatura, sobre el concepto de ZH en el sistema solar, en su obra "World-Life: Or Comparative Geology" de 1883. Según lo expresado por Winchell (1883, p. 507):

La Tierra, entonces, hasta donde podemos razonar, se encuentra en el centro de la *zona habitable* del sistema solar, si asumimos nuestras propias naturalezas como el criterio de habitabilidad. A ambos lados, la rigurosidad de las condiciones físicas parece proclamar a nuestro sistema como un desierto mudo y sin vida.

Lo anterior sugiere que la Tierra se encuentra ubicada en el centro de la "zona habitable" del sistema solar, haciendo referencia a que esta región otorga las condiciones térmicas adecuadas para sustentar la vida. Con relación a esto último, el autor enfatiza que, si consideramos nuestras propias naturalezas como el criterio para determinar qué es habitable, entonces la Tierra se encuentra en una posición privilegiada dentro de esta zona. También señala que, tanto en el lado interno como en el lado externo de esta región, las condiciones físicas son tan extremas que parecen indicar la existencia de un desierto sin voz carente de organismos vivos. Es de subrayar que, la caracterización expuesta por Winchell sobre la ZH centrada en su restricción de habitabilidad al fenómeno de la vida, resulta ser un factor esencial en la caracterización moderna de la ZH (Lingam, 2021).

En 1953, el astrónomo Harlow Shapley utilizó el término "cinturón de agua líquida" para describir la región alrededor de una estrella en la que un planeta puede mantener agua líquida en su superficie. Este es el primer abordaje que pone un énfasis particular en la importancia del agua como compuesto químico esencial para toda la vida terrestre (Kasting, 2012).

Paralelamente a la definición propuesta por Shapley, en el mismo año, el médico alemán Hubertus Strughold, en su obra "The Green and Red Planet: A Physiological Study of the Possibility of Life on Mars", caracteriza una región en el espacio dentro del sistema solar

que puede ser compatible con la vida en un entorno planetario dado. Esta región, ocuparía solamente una pequeña porción de los 4300 millones de millas de extensión que existen entre el Sol y el punto más lejano de la órbita de Plutón. A esta región la denominó *ecosfera térmica del sol*, y su envergadura comprende 75 millones de millas, es decir, tan solo un 1.75% de región que comprende la distancia Sol-Plutón (Strughold, 1953). El término ecósfera comenzó a ser utilizado por otros autores posteriores a Strughold, como una denominación análoga al concepto de "zona habitable" (Dole 1964; Shklovski & Sagan 1966; citados en Lingam 2021, p. 1)

Retomando el enfoque de Harold Shapley, sobre el carácter fundamental que representa el agua líquida para la existencia de la vida, a finales de la década de 1950 e inicios de la década 1960, el astrofísico Su-Shu Huang, elaboró una serie de trabajos sobre temas de habitabilidad, donde estableció criterios de tipo planetario. Uno de ellos se refiere al hecho de que un planeta debe poseer una corteza sólida y tener la suficiente fuerza gravitacional para retener agua líquida en su superficie (Huang, 1960). Este criterio fue extendido a planetas orbitando la zona habitable alrededor de otras estrellas, explorando escenarios en sistemas estelares binarios o múltiples, concluyendo que la posibilidad de encontrar mundos habitables en estos escenarios es mucho más baja que en estrellas solitarias como el Sol, debido a que las perturbaciones gravitacionales harían inestables las órbitas de los cuerpos planetarios (Heller & Armstrong, 2014; Kasting, 2012). Fue a partir de sus publicaciones que la denominación de zona habitable (Huang, 1959), ahora generalizada para cualquier sistema estelar, tomó el significado que hoy en día se le asocia en astrobiología (Kasting, 2012).

El problema de la ausencia de estabilidad orbital en sistemas binarios también fue explorado por Stephen Dole en 1964, al igual que el problema de bloqueo o acoplamiento de marea¹⁶ que enfrentaría un planeta orbitando dentro de la zona habitable de una estrella roja. En sus modelos climáticos, Dole explora la zona habitable con una restricción particularmente centrada en condiciones térmicas de habitabilidad para el ser humano. Las temperaturas de las superficies planetarias deben oscilar entre los -10 y 40°C. De acuerdo

¹⁶ El acoplamiento de marea es el proceso por el cual un planeta en órbita alrededor de una estrella, gira sobre su propio eje a la misma velocidad que la órbita. Esto resulta en que el planeta siempre presente la misma cara a la estrella.

con sus planteamientos, sostiene que al menos un 10% de la superficie del planeta en cuestión debe poseer una temperatura que no exceda los rangos mencionados (Kasting, 1993).

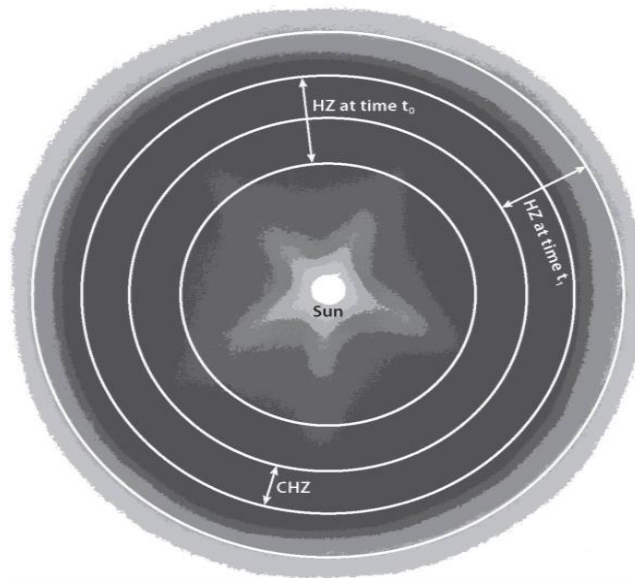


figura 8 En esta imagen se observa la superposición de regiones de la ZH propuesta por el modelo de Hart para conceptualizar la zona habitable continua (ZHC). Tomado de: *How to find a habitable planet* (Kasting, 2012)

Una ampliación del concepto de zona habitable fue presentada a finales de la década de 1970 por el astrofísico Michael Hart, en la que tuvo en cuenta la variación en la luminosidad del Sol como un factor influyente en su extensión. Para ello, se basó en elementos de evolución estelar y señaló que, durante la fase de secuencia principal, la luminosidad del Sol aumenta a medida que este envejece, lo que provoca que la zona habitable se desplace gradualmente hacia el exterior del sistema estelar. Por lo tanto, de acuerdo con Hart, a la superposición de rangos de extensión de la zona habitable entre un instante de tiempo inicial t_0 y un instante de tiempo posterior t_1 en el periodo de vida estelar (figura 8), se le denomina *zona habitable continua* (ZHC). En otras palabras, mientras que la zona habitable se define en un instante de tiempo específico, la ZHC se refiere a un período de tiempo en términos de escala de vida estelar (González, 2005; Kasting, 2012).

Un punto destacable de los trabajos de Hart sobre habitabilidad es su modelo climatológico presentado para el estudio de la zona habitable, el cual se distingue por su realismo y complejidad en comparación con los modelos y conceptualizaciones previamente elaboradas por otros autores. Con el fin de lograrlo, desarrolló un modelo computacional que simuló la evolución de la atmósfera terrestre desde sus comienzos geológicos, analizando de forma simultánea las variaciones en la luminosidad solar (Kasting, 2012).

El modelo de ZH propuesto por Hart, utiliza un conjunto de ecuaciones diferenciales dependientes del tiempo, para analizar variaciones climatológicas de la Tierra, variaciones en fenómenos geofísicos, en la liberación de dióxido de carbono (CO₂) por actividad volcánica y variaciones en el albedo atmosférico. Con esta serie de consideraciones, Hart logra determinar los límites internos y externos de la ZH en el sistema solar, la cual, según el modelo propuesto resultó ser una región muy reducida en extensión. Para el límite interno de la ZH, encontró un “efecto invernadero descontrolado” a 0.958 unidades astronómicas (UA) del sol. A una distancia de 1.01 UA se produce una “glaciación descontrolada” irreversible, estableciendo con esto el límite externo de la ZH (González, 2005).

Tabla 1 Límites de la ZH calculados por M. Hart

	ZH Interior (UA)	ZH Exterior (UA)
Modelo climatológico	Efecto invernadero descontrolado	Glaciación desc. irreversible
de M. Hart	0.958	1.01

Kasting et al. (1993) elaboró una caracterización más detallada que la presentada por Hart para determinar los límites internos y externos de la ZH. En su trabajo, presenta un modelo climatológico unidimensional¹⁷ sin nubes, para planetas con características geológicamente similares a la Tierra, con una atmósfera compuesta por CO₂, H₂O y N₂. El modelo muestra una dependencia de la temperatura superficial del planeta con respecto a radiación solar incidente sobre este.

¹⁷ Es un modelo radiativo-convectivo mediante el cual se determina la distribución vertical de la media global de la temperatura de la atmósfera y de la superficie terrestre, respondiendo a una composición atmosférica y a un albedo superficial predeterminados.

A diferencia del modelo presentado por Hart, en este caso se tiene en cuenta el ciclo “carbono-silicato”¹⁸ que funciona como un mecanismo de regulación climática al modificar las concentraciones de CO₂ en la atmósfera (González, 2005; Kasting et al, 1993).

Según el modelo propuesto por Kasting et al. (1993), el borde interno de la ZH se define como la distancia desde la estrella anfitriona en la que la radiación estelar provoca la fotólisis del agua en la estratosfera de un planeta. Este fenómeno ocurre cuando la radiación ultravioleta del Sol descompone las moléculas de agua en oxígeno e hidrógeno, con este último elemento químico escapando al espacio exterior. El límite de la ZH interna se conoce como el criterio de “pérdida de agua” y se estima que se encuentra a una distancia de 0.95 UA en torno a una estrella como el Sol¹⁹, cuando el flujo de radiación (S_{eff})²⁰ es un 10% ($1.1 \times 1361 \text{ W/m}^2$) mayor que el recibido actualmente en la Tierra. Si la Tierra se encontrara a esta distancia, la consecuencia sería un secamiento paulatino de los océanos (Porto de Mello et al. 2006). Revisiones posteriores realizadas a este modelo, calculan el límite de “perdida de agua” a una distancia de 0.99 UA cuando $S_{\text{eff}}=1.015$. Sin embargo, es importante aclarar que, para las consideraciones de este modelo climatológico, no se tiene en cuenta el enfriamiento causado por las nubes presentes en la atmósfera planetaria (Kopparapu et al., 2013).

Otro límite menos conservador que corresponde al borde interno de la ZH se determina cuando el aumento del efecto invernadero debido al vapor de agua promueve el calentamiento desbocado de la superficie. Esto conduce a un aumento en el contenido de vapor atmosférico, lo que a su vez eleva de forma acelerada la temperatura de la superficie. En este escenario, cuando hay suficiente flujo estelar incidente sobre el planeta, los océanos se evaporan por completo. La pérdida de agua en la atmósfera superior debido a la fotodisociación se acelera irreversiblemente. Un “*efecto invernadero descontrolado*” es el nombre que recibe este criterio cuando la radiación estelar es $S_{\text{eff}}=1.06$ a una distancia de 0.95 UA (Kopparapu et al., 2013). En contraste, el modelo climatológico de Kasting et al.

¹⁸ El ciclo carbono-silicato es el proceso mediante el cual el carbono, que se encuentra en la atmósfera, es absorbido por las rocas y liberado nuevamente a través de la actividad volcánica. Este ciclo se mide en escalas de tiempo mayores a 10^6 años.

¹⁹ Es decir, se refiere a una estrella cuya temperatura, tamaño y edad sean similares a la de nuestra estrella

²⁰ También definida como la constante solar, es el flujo de radiación que llega a la parte superior de la atmósfera terrestre.

(1993) predice que este fenómeno ocurre cuando la radiación es $S_{\text{eff}}=1.41$ cuando el planeta se encuentra a una distancia de 0.84UA.

El límite interno más optimista de la Zona Habitable es conocido como "*Venus Reciente*", que se basa en las observaciones de radar de la nave espacial Magellan en Venus. Estas observaciones sugieren que no ha habido agua líquida en la superficie del planeta durante al menos mil millones de años, aunque pudo haber habido condiciones favorables en el pasado. Los modelos predicen que este escenario ocurre a una distancia de 0.75 UA y una radiación solar $S_{\text{eff}}=1.76$, cuando la luminosidad solar era aproximadamente un 92% de la actual (Kasting et al, 1993; Kopparapu et al., 2013).

A continuación, Kasting et al. (1993) determinan el límite externo de la ZH a una distancia de 1.37 UA, cuando el flujo de radiación estelar es $S_{\text{eff}}=0.53$ para una estrella como el Sol, es decir, se reduce a un 53% la cantidad de radiación solar que incide sobre la atmosfera de la Tierra hoy en día (Porto de Mello et al. 2006). Bajo estas condiciones de distancia y radiación estelar incidente, el criterio para definir el límite externo de la ZH se conoce como "*primera condensación de dióxido de carbono*", y sucede cuando la temperatura superficial del cuerpo planetario alcanza los 273K, lo que influye en la formación de las primeras nubes de CO₂. En estas circunstancias, las nubes de CO₂ modifican el albedo atmosférico y reducen la temperatura superficial del planeta (Underwood et al., 2003). Sin embargo, modelos climatológicos actuales sugieren que este criterio es pesimista y debería ser descartado puesto que no considera el efecto invernadero generado por las nubes de CO₂, es decir, la capacidad de reflejar parte de la radiación térmica de vuelta a la superficie, contribuyendo al incremento de la temperatura superficial y evitando de este modo una glaciación irreversible (Kopparapu et al, 2013).

De este modo, si la temperatura superficial del planeta permanece por encima de los 273K, la emisión de gases volcánicos puede equilibrarse mediante la meteorización²¹ de la superficie. En estas circunstancias, los planetas cercanos al borde externo de la zona habitable podrían mantener atmósferas densas y ricas en CO₂ (Kopparapu et al., 2013). Sin embargo, el efecto invernadero causado por el CO₂ comienza a ser insuficiente a

²¹ Este proceso se da cuando el CO₂ atmosférico se disuelve en agua de lluvia y es transportado hacia las rocas silicatadas. Esta forma de eliminación de CO₂ de la atmosfera contribuye a la disminución del efecto invernadero causado por este gas.

determinada distancia de la estrella. Esto debido a que las nubes de CO₂ inician un proceso de condensación fuera de la atmosfera, contribuyendo a una caída en la temperatura superficial. A este límite de la ZH se le conoce con el nombre de “*máximo efecto invernadero*”, y ocurre a una distancia de 1.7 UA cuando $S_{\text{eff}} = 0.343$ (Kopparapu et al., 2013). Cabe señalar que Marte, al encontrarse a una distancia de 1.52 UA del Sol, actualmente se encuentra dentro de la ZH tomando como referente este criterio. Estimaciones anteriores a Kopparapu et al. (2013), situaban este limite a una distancia de 1.67 UA cuando la radiación solar $S_{\text{eff}} = 0.36$ (Kasting et al, 1993; Underwood et al., 2003).

El criterio que describe el límite exterior más optimista de la ZH se conoce como “*Marte primitivo*”. Esto se basa en evidencias de que, en el pasado, Marte pudo ser lo suficientemente cálido como para permitir que el agua líquida fluyera en su superficie. Si asumimos que los lechos de los ríos secos y las redes de valles en la superficie de Marte tienen una antigüedad de 3,8 mil millones de años, entonces la radiación solar en ese momento habría sido alrededor del 75% del valor actual. Esto significa que Marte hace 3.8 mil millones de año solar recibía un flujo de radiación $S_{\text{eff}} = 0.36$. Por tanto, el límite externo optimista de un “Marte primitivo” se ubica a 1.77 UA (Kasting et al, 1993; Kopparapu et al., 2013).

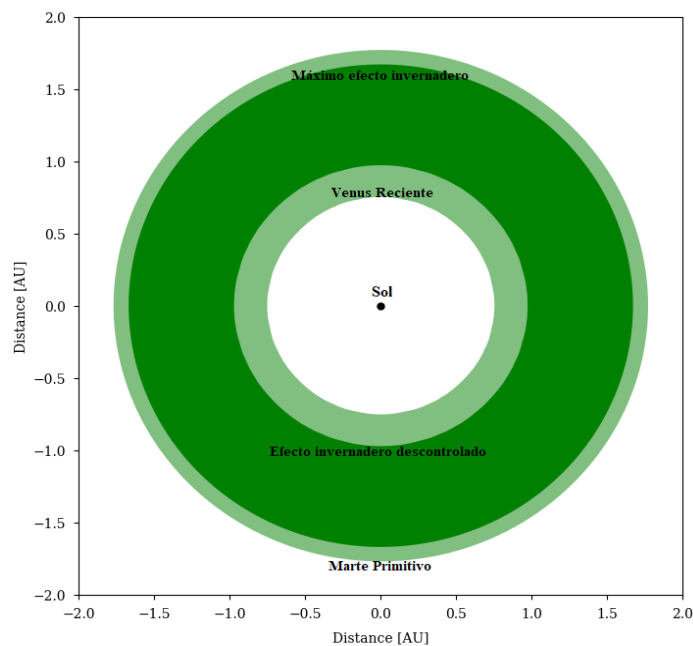


figura 9 Se muestra la representación de las zonas habitables conservadoras (en tono verde claro) y optimistas (verde oscuro), junto con las etiquetas que definen sus límites según Kopparapu et al. (2013). Imagen adaptada y elaborada de la web interactiva desarrollada por Müller & Haghighipour (2014) Fuente: <http://astro.twam.info/hz/>

Como puede observarse, los bordes internos y externos de la ZH más optimista, se fundamentan sobre parámetros que corresponden a la ZHC del sistema Solar, es decir, se encuentran en función de la variación de la luminosidad del Sol desde el inicio de su ciclo en la secuencia principal hasta la actualidad (figura 9). Por lo tanto, los criterios “*Venus reciente*” y “*Marte primitivo*”, determinan la extensión de la ZH en la cual la vida tendría más tiempo para surgir y evolucionar en un planeta con condiciones potenciales de habitabilidad (Underwood et al., 2003). En la siguiente tabla se muestran los criterios más optimistas y conservadores de la zona habitable del sistema solar, a partir del modelo climatológico de Kasting et al. (1993) y las nuevas estimaciones realizadas por Kopparapu et al. (2013) para este modelo.

Tabla 2 Se presentan las distancias de la zona habitable alrededor del Sol, a partir del modelo climático de Kasting et al. (1993) con estimaciones actualizadas. Fuente: realizada por los autores.

Modelo	ZH interior						ZH exterior					
	Venus reciente		Efecto invernadero descontrolado		Pérdida de agua		Primera condensación de CO ₂		Máximo efecto invernadero		Marte primitivo	
	UA	S _{eff}	UA	S _{eff}	UA	S _{eff}	UA	S _{eff}	UA	S _{eff}	UA	S _{eff}
<i>Kasting et al. (1993)</i>	0.75	1.76	0.84	1.41	0.95	1.10	1.37	0.53	1.67	0.36	1.77	0.32
<i>Kopparapu et al. (2013)</i>	0.75	1.76	0.97	1.06	0.99	1.015	-----	-----	1.70	0.343	1.77	0.32

Ciencia Exoplanetaria: Planeta ricitos de oro

A finales del siglo XIX y principios del siglo XX, los estudios acerca de la formación, caracterización y detección de planetas fuera del sistema solar comienzan a ser tema de investigación. En 1885, el astrónomo inglés William Stephen Jacob informó sobre la detección de anomalías orbitales alrededor de la estrella binaria 70 Ophiuchi. En su investigación, Jacob sugirió que estas anomalías podrían deberse a la presencia de un cuerpo planeta en ese sistema (Kitchin, 2011). Sin embargo, el astrónomo estadounidense

Forest Ray Moulton planteó dudas sobre la existencia de un cuerpo planetario en 70 Ophiuchi, demostrando que su órbita sería altamente inestable en un artículo publicado en el *Astronomical Journal* en 1899 (Peña, 2012). La primera detección definitiva de la existencia de cuerpos planetarios fuera del sistema solar fue anunciada en enero de 1992 por el astrofísico polaco Aleksander Wolszczan y el radioastrónomo canadiense Dale Frail. Haciendo uso del radiotelescopio de Arecibo (Puerto Rico), descubrieron dos planetas rocosos orbitando alrededor del pulsar²² Lich (PSR 1257+12) que se encuentra situado aproximadamente a 2300 años luz de distancia. En su investigación, los astrofísicos descubrieron anomalías²³ en los periodos de llegada de las señales de radio provenientes del pulsar (Peña, 2012). La explosión de una supernova alrededor de un pulsar destruiría cualquier cuerpo planetario en órbita. Esto sugiere que los posibles planetas podrían ser los restos rocosos de antiguos gigantes gaseosos cuyas atmósferas fueron eliminadas por la explosión estelar. Además, para planetas similares a la Tierra, sería improbable la existencia de vida debido a la cercanía con el pulsar, lo que resultaría en una exposición intensa a la radiación ionizante y la pérdida de la atmósfera en unos pocos cientos de años (Patruno & Kama, 2017). (Patruno & Kama, 2017).

Tres años después, el 5 de octubre de 1995, se anunció el primer hallazgo de un planeta orbitando una estrella de secuencia principal similar al Sol, marcando así el comienzo de un nuevo campo de investigación en astrofísica conocido como la ciencia de los exoplanetas (Zuluaga Callejas, 2015). Los responsables de este importante descubrimiento fueron los astrofísicos suizos Michael Mayor y Didier Queloz²⁴ del observatorio de Ginebra. El exoplaneta descubierto, es un gigante gaseoso llamado Dimidio²⁵ (previamente catalogado como 51 Pegasi b) que se encuentra a una distancia de 51 años luz de la Tierra.

²² Un pulsar es una estrella de neutrones altamente compacta y densa que emite radiación electromagnética desde sus polos magnéticos. Estas estrellas de neutrones son remanentes estelares que se forman después de la explosión de una estrella supergigante (denominada en astrofísica como supernova), luego de que el núcleo colapsado de la estrella masiva se comprime bajo la fuerza de la gravedad.

²³ Estas anomalías se refieren a perturbaciones o “tironeos gravitacionales” causados por los planetas, lo cual influye levemente en el periodo del pulsar.

²⁴ Este hallazgo generó tal impacto en la comunidad científica que, en 2019, ambos astrofísicos reciben de manera conjunta el premio nobel de física por dicho descubrimiento.

²⁵ En julio de 2014, la Unión Astronómica Internacional lanzó la campaña NameExoWorlds para nombrar exoplanetas y sus estrellas anfitrionas. Tras una votación pública, en diciembre de 2015, se seleccionó el nombre Dimidio para este exoplaneta.

El brillo de las estrellas puede ser mil millones de veces más intenso que el de los exoplanetas, lo que ha llevado al desarrollo de diversas técnicas de detección exoplanetaria. Una de ellas es el método de velocidad radial, utilizado para descubrir el exoplaneta Dimidio, que consiste en medir las variaciones de velocidad de la estrella observada desde la Tierra. Este método se basa en el cambio en los desplazamientos de las líneas espectrales de la estrella debido al efecto Doppler causado por la presencia del exoplaneta perturbando el centro de masas del sistema (Peña, 2012).



figura 10 Diversidad de exoplanetas. Tomado y adaptado de <https://exoplanets.nasa.gov/what-is-an-exoplanet/planet-types/overview/>

Otro método poderoso para detectar exoplanetas es el de tránsitos²⁶. Este se inspiró en la observación de planetas dentro de nuestro propio sistema solar. Desde las primeras observaciones del tránsito de Venus realizadas por Jeremiah Horrocks en 1639, este enfoque ha sido utilizado. En el contexto de la astronomía colombiana, José María Gonzales Benito fue el primer astrónomo en utilizar este método para registrar el tránsito de Venus en 1882 (Moreno-Cárdenas et al, 2022). Actualmente, el telescopio espacial Kepler, en órbita desde 2009 hasta 2018, y su sucesor, el satélite de sondeo de planetas en tránsito TESS, en operación desde 2018, se han convertido en referentes en la búsqueda de exoplanetas utilizando este método. Ambos tienen como objetivo principal descubrir una

²⁶ Básicamente con este método se analizan las caídas en las curvas de luz que se generan cuando la órbita de un exoplaneta se cruza entre el observador y la estrella anfitriona.

variedad de exoplanetas, incluyendo aquellos similares a la Tierra y que se encuentren dentro de su zona habitable. TESS tiene una mayor capacidad de observación, cubriendo un área 400 veces más grande que Kepler (NASA, 2023). Hasta el 24 de mayo de 2023, se ha confirmado la detección de 5419 exoplanetas gracias a las misiones espaciales mencionadas. Estos descubrimientos revelan una amplia diversidad de mundos, los cuales se clasifican en cuatro grandes grupos según su masa (Figura 10).

Los gigantes gaseosos, similares a Júpiter y Saturno, tienen atmósferas compuestas principalmente de hidrógeno y helio. Entre ellos, los "Júpiter Calientes"²⁷ son exoplanetas que orbitan muy cerca de su estrella, alcanzando temperaturas de miles de Kelvin. Por otro lado, los exoplanetas Neptunianos²⁸, similares a Urano y Neptuno, tienen atmósferas compuestas por hidrógeno y helio en menor proporción, además de agua, metano y amoníaco en estado sólido, por lo que se les denomina gigantes de hielo. Uno de especial interés en la actualidad es el exoplaneta LTT 9779b, un Neptuno ultra caliente descubierto en 2020 mediante el método de tránsito por el telescopio espacial TESS. Debido a su órbita extremadamente cercana a su estrella (0.016 UA), posee una temperatura superior a los 2000 K, lo que lo cataloga como una anomalía en el "desierto caliente de Neptuno" (Jenkins et al., 2020).

Las Super-Tierras son exoplanetas más masivos que nuestro planeta (entre el doble y diez veces la masa terrestre). Puesto que no llegan a ser exoplanetas del tipo neptuniano, su composición puede ser rocosa y gaseosa. Por lo tanto, aunque en la literatura se les denomina Super- Tierra, esto no significa que sean necesariamente similares a la Tierra en términos de habitabilidad. Los dos exoplanetas hallados en 1992 orbitando entorno al pulsar Lich, fueron las primeras super tierras descubiertas (Peña, 2012).

Finalmente, aquellos exoplanetas que tengan entre la mitad del tamaño de la Tierra y el doble de su radio se denominan de tipo terrestre. Su superficie es sólida, esencialmente rocosa, líquida o una combinación de ambas. Se componen por silicatos, agua y carbono. Este tipo de exoplanetas, son de interés especial en astrobiología, pues son candidatos a ser

²⁷ El exoplaneta Dimidio fue el primer "Júpiter caliente" descubierto.

²⁸ Son subcategorías de este tipo de exoplanetas los "Mini-neptunos", "Neptunos calientes" y "Neptunos ultracalientes"

los denominados “planetas ricitos de oro” o análogos de la Tierra, si se encuentran dentro de la ZH de su estrella anfitriona (Seager, 2009).

Del mismo modo en que los exoplanetas de tipo terrestre son los mejores candidatos para la búsqueda de vida en el universo, existen estrellas denominadas como *astrobiológicamente interesantes*, pues características como su masa y luminosidad en función de la temperatura efectiva²⁹, determinan la extensión y duración de la ZHC (Porto de Mello et al. 2006). La secuencia principal es el periodo de vida en el que las estrellas liberan radiación mediante la fusión nuclear, convirtiendo hidrógeno en helio. Los astrofísicos clasifican las estrellas de la secuencia principal según su tipo espectral³⁰ utilizando el sistema de clasificación de Harvard. En la siguiente tabla se muestra la relación entre el tipo espectral de cada estrella, su temperatura efectiva, masa y tiempo de vida en la secuencia principal

Tabla 3 Datos extraídos de Poffo (2013) y Catling & Kasting (2017).

Tipo Espectral	O5	B0	A0	F0	G0	K0	M0
Temperatura efectiva (K)	40000	25000	11000	7600	6000	5100	3600
Masa estelar☉	60	17.5	2.9	1.5	1.05	0.79	0.51
Tiempo de vida (10 ⁶ años)	0.4	8	700	3600	8900	18000	54000

En la nomenclatura estelar cada tipo espectral se subdivide en una categoría que va desde 0 a 9, siendo 0 la estrella más caliente(temprana) de la categoría principal y 9 la más fría(tardía). Por ejemplo, una estrella de tipo espectral G temprana sería G0, G1, G2, G3. Por el contrario, si fuese de tipo espectral tardío, sería G7, G8 Y G9.

²⁹ Puesto que el espectro de una estrella a determinada temperatura es una muy buena aproximación al espectro de un cuerpo negro a la misma temperatura, en astrofísica, la temperatura efectiva de estrella se refiere a la temperatura equivalente de cuerpo negro.

³⁰ Sabemos que las estrellas poseen distintos espectros continuos debido a sus líneas de absorción, con longitudes de ondas bien definidas, asociadas a su vez, con el espectro de cada elemento químico.

Para que la vida pueda emerger en un planeta, es imprescindible que el mismo proporcione un entorno sostenido con agua líquida durante miles de millones de años. Esto implica que el planeta debe permanecer dentro de una ZHC estable. Si consideramos el único caso conocido, el surgimiento de la vida procariota en la Tierra, fue un proceso que tomó casi mil millones de años para establecerse (Rushby et al, 2013). Además, el desarrollo de formas de vida complejas ha requerido períodos aún más extensos, superando los 2000 millones de años (Poffo, 2013).

Tomando en consideración lo anterior, el periodo de vida dentro de la secuencia principal para estrellas de tipo espectral O, B y A, es notablemente breve en comparación con el tiempo requerido para el surgimiento y evolución de la vida en un planeta de tipo terrestre.

En el caso de las estrellas de tipo espectral F, la situación es diferente. Estas estrellas tienen periodos de vida en la secuencia principal que superan los 2000 millones de años, lo que brinda suficiente tiempo para que se desarrolle y evolucionen formas de vida procariota. Sin embargo, existe un inconveniente: las emisiones más intensas de estas estrellas se encuentran en las regiones del espectro ultravioleta, lo cual puede ser perjudicial para el ADN resultando en tasas más altas de mutación. Para evitar esta situación desfavorable con las formas de vida que habiten la superficie, sería necesario que un exoplaneta en la zona habitable de una estrella de tipo F tuviera una densa capa de ozono (Catling & Kasting, 2017).

Antes de considerar las estrellas de tipo espectral G y K, centraremos primero nuestra atención en las estrellas de tipo espectral M y K(tardías)³¹. Estas estrellas poseen el periodo más longevo en la secuencia principal, debido a su baja masa ($\leq 0.7\odot$). Sin embargo, al poseer temperaturas efectivas bajas, la ZH además de ser muy estrecha en extensión, se encuentra bastante próxima a la estrella. En este escenario, un exoplaneta cuya orbita se encuentre dentro de la ZH, experimentará un efecto de marea lo suficientemente fuerte, a tal punto que su periodo de revolución alrededor de la estrella se sincronizara con su periodo de rotación. Como resultado, un hemisferio del planeta siempre estaría mirando

³¹ En la nomenclatura estelar cada tipo espectral se subdivide en una categoría que va desde 0 a 9, siendo 0 la estrella más caliente(temprana) de la categoría principal y 9 la más fría(tardía). Por ejemplo, una estrella de tipo espectral G temprana seria G0, G1, G2, G3. Por el contrario, si fuese de tipo espectral tardío, seria G7, G8 Y G9.

hacia la estrella, manteniendo temperaturas muy altas, mientras que el otro hemisferio estaría sumido eternamente en la sombra a temperaturas de congelación. Este aspecto, también traería consigo un campo magnético muy débil en el exoplaneta, algo que afectaría la estabilidad y presión atmosférica necesarias para mantener agua líquida durante periodos de tiempo de millones de años (Catling & Kasting, 2017).

Finalmente, tenemos que las estrellas de tipo espectral G y K (temprano e intermedio), son las de mayor interés astrobiológico, junto con las de tipo espectral F tardío (siendo las menos emisoras de radiación UV). Particularmente, las estrellas de tipo espectral K, resaltan en este último grupo ya que pueden ser candidatas para poseer la ZH más óptima. Un aspecto relacionado con ello es que tienen largos periodos de vida estables en la secuencia principal, superiores a las estrellas de tipo solar (G) y las F tardías. Esto supone un mayor tiempo para el surgimiento y evolución de vida compleja. Adicional a ello, estas estrellas emiten menor radiación en el espectro UV, siendo más hospitalarias para la vida que incluso las estrellas de tipo espectral similares al Sol (Heller, R., & Armstrong, J, 2014).

La zona habitable a través de un modelo de balance energético

Los modelos de Balance Energético, también conocidos como EBM (Energy Balance Models), son herramientas matemáticas ampliamente utilizadas en el campo de las ciencias atmosféricas. Fueron desarrollados por separado en 1969 por los climatólogos Mijaíl Budyko y William D. Sellers. Estos modelos se basan en el concepto de balance energético global, el cual establece que la cantidad de energía recibida por un planeta desde su estrella debe ser igual a la cantidad de energía que el planeta emite hacia el espacio. Los EBM permiten calcular la temperatura superficial del planeta en función de este balance energético (Martínez Rodríguez, 2021).

En esta sección, se proporciona una introducción a un modelo climático basado en los conceptos de radiación térmica y cuerpo negro, que permite adaptarse para calcular los límites de la Zona Habitable (ZH) en el sistema solar. Este es un modelo de balance

energético de dimensión cero³², es decir, se considera al planeta como una masa puntual, omitiendo de esta forma, cualquier consideración asociada con su estructura interna y variaciones espaciales en términos de su geología. Recordemos que el albedo se refiere a la capacidad del planeta para reflejar la radiación estelar incidente. Si un planeta tiene un albedo alto, reflejará más radiación solar y absorberá menos. Por otro lado, la emisividad superficial se refiere a la capacidad del planeta para emitir radiación térmica. Un cuerpo negro ideal tiene una emisividad de 1, lo que significa que emite toda la radiación térmica que absorbe (Martínez Rodríguez, 2021).

Por tanto, para este modelo se toma el planeta como un cuerpo negro ideal en equilibrio radiativo, lo cual implica que absorbe y emite radiación de manera perfecta. Se asumirá por tanto el albedo de un cuerpo negro ideal, es decir $\alpha=0$. El valor de la emisividad superficial también se corresponderá con la de un emisor perfecto, ósea $\epsilon=1$.

Para este caso, se tendrá como parámetro la temperatura de ebullición y fusión del agua sobre una superficie planetaria con el objetivo de calcular el límite interno y externo de la ZH respectivamente. Finalmente, en este modelo no serán considerados los procesos vinculados a composición atmosférica o de origen geotérmico, que influyan en un aporte al incremento o disminución de la temperatura media superficial, pues como ya se mencionó, es un modelo que depende particularmente del flujo de radiación entrante y saliente.

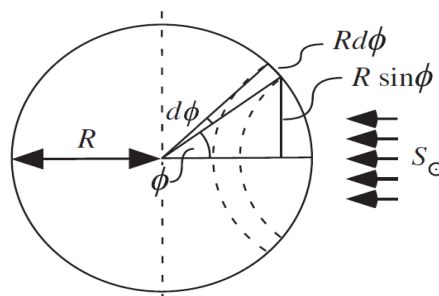


figura 11 Un planeta de radio R en que se caracteriza un anillo de elemento de superficie infinitesimal definido por un ángulo ϕ . Fuente: *Atmospheric evolution on inhabited and lifeless worlds*. Cambridge University Press. (Catling & Kasting, 2017)

³² En los modelos de balance energético de dimensión cero, no se toman en consideración elementos de latitud, longitud y altura.

Comenzamos calculando la cantidad total de flujo solar incidente sobre un planeta de radio R al considerar un anillo de elemento de superficie, definido por un ángulo α entre 0 y $\frac{\pi}{2}$ en radianes (Figura 11). De este modo, el área del elemento de superficie puede ser definida como

$$2\pi(R \sin \phi)Rd\phi \quad (7)$$

Por otro lado, la componente del flujo de radiación solar, que es normal a la superficie se define como $S_{\odot} \cos \phi$ donde

$$S_{\odot} = \frac{L_{\odot}}{4\pi d^2} \quad (8)$$

Cuando la luminosidad L_{\odot} de una estrella como el Sol, a una distancia d , que para un planeta como la Tierra ubicado a una unidad astronómica, se tiene que

$$S_{\odot} = 1370 \text{ W/m}^2 \quad (9)$$

Correspondiente a la radiación solar incidente sobre parte alta de la atmosfera terrestre (Catling & Kasting, 2017). Ahora bien, podemos calcular la integral sobre la potencial o energía total irradiada sobre un hemisferio, de modo que

$$E_{irr} = 2\pi R^2 S_{\odot} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \phi \sin \phi d\phi \quad (10)$$

Utilizando el método de integración por cambio de variable podemos hacer la siguiente sustitución

$$x = \sin \phi \quad (11)$$

Derivando

$$dx = \cos \phi d\phi \quad (12)$$

Reemplazando (9) y (10) en (8), tenemos

$$E_{irr} = 2\pi R^2 S_{\odot} \int_0^1 x dx = 2\pi R^2 S_{\odot} \left. \frac{x^2}{2} \right|_0^1 \quad (13)$$

Luego

$$E_{irr} = \pi R^2 S_{\odot} \quad (14)$$

Reemplazando (8) en (14)

$$E_{irr} = \frac{R^2 L_{\odot}}{4d^2} \quad (15)$$

En la ecuación (14), finalmente se describe el flujo solar instantáneo que incide sobre la sección transversal del planeta, es decir, la proyección de un disco de área πR^2 comparado con la superficie planetaria de área $4\pi R^2$ (Figura 12).

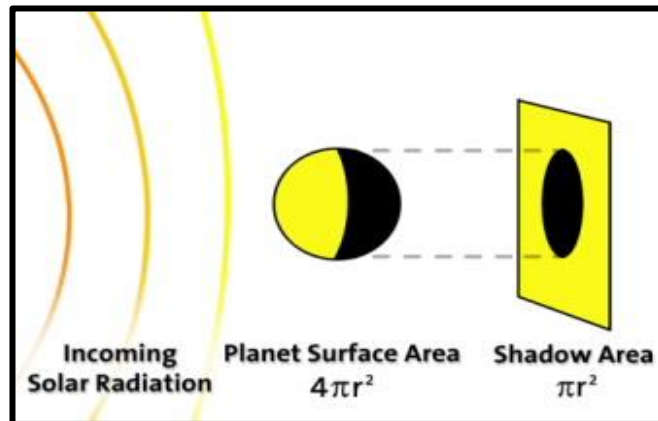


figura 12 La cantidad total de radiación solar incidente en el planeta es igual a la cantidad que el planeta intercepta para proyectar la sombra imaginaria de área πR^2 que se muestra en el diagrama. Fuente: <https://www.acs.org/climatescience/energybalance/energyfromsun.html>

Ahora bien, para conocer la potencia o energía absorbida por el cuerpo planetario, tomamos en consideración el albedo. La ecuación quedará expresada de la siguiente manera

$$E_{abs} = (1 - \alpha) \frac{R^2 L_{\odot}}{4d^2} \quad (16)$$

Si modelamos el planeta como un cuerpo negro emisor, a una temperatura T_p absoluta uniforme, la energía o potencia total emitida por unidad de área está dada por la ecuación

(3). Sin embargo, para un planeta esférico, debe tenerse en consideración que esta energía se emite en todas las direcciones desde un área de superficie total $A = 4\pi R^2$. Por lo tanto (3) puede ser reescrita como

$$E_{emi} = \varepsilon 4\pi R^2 \sigma T_p^4 \quad (17)$$

Puesto que en este modelo no se tiene en consideración la energía que es absorbida por la atmosfera debido a los gases de efecto invernadero, se asume que toda la energía es reemitida al espacio. Para un cuerpo negro en equilibrio térmico, en este caso el cuerpo planetario, la energía irradiada por la estrella que es absorbida por el planeta es igual a la energía emitida por este. Así, al igualar (15) y (16) tenemos que

$$E_{abs} = E_{emi} \quad (18)$$

$$(1 - \alpha) \frac{R^2 L_{\odot}}{4d^2} = \varepsilon 4\pi R^2 \sigma T_p^4 \quad (19)$$

Donde al despejar d se obtiene la distancia media de la ZH

$$d = \left((1 - \alpha) \frac{L_{\odot}}{16\varepsilon\pi\sigma T_p^4} \right)^{1/2} \quad (20)$$

Puesto que la luminosidad de una estrella está dada por la expresión

$$L_{\odot} = 4\pi R_{\odot}^2 \sigma T_{\odot}^4 \quad (21)$$

Podemos reescribir la ecuación (19) en términos del radio y la temperatura de la estrella, en este caso particular para el Sol. Así

$$d = \frac{R_{\odot}}{2} \left(\frac{T_{\odot}}{T_{eff}} \right)^2 \left(\frac{1 - \alpha}{\varepsilon} \right)^{1/2} \quad (22)$$

A partir de esta ecuación es posible determinar una aproximación de los bordes internos y externos de la ZH. Para ello, vamos a suponer el rango de distancias dentro de las que el agua se encontraría en estado líquido sobre la superficie del cuerpo planetario.

La distancia del borde externo de la ZH del sistema solar será calculada tomando en consideración punto de congelación del agua, es decir 273.15 K. Así

$$d = \frac{(695700km)(5772K)^2}{2(273.15K)^2} = 155325314.9km = 1.04 UA \quad (23)$$

A continuación, la distancia del borde interno de la ZH del sistema solar será calculada tomando en consideración punto ebullición del agua, es decir 373.15K. Así

$$d = \frac{(695700km)(5772K)^2}{2(373.15K)^2} = 0.55UA \quad (24)$$

Resulta interesante contrastar estos resultados con los obtenidos en los estudios de M. Hart y Kasting et al. (1993), que se presentan en este documento. En el caso de los límites de la ZH propuestos por Hart, nuestra estimación de la extensión de la ZH es considerablemente más optimista, aproximadamente 0.49 unidades astronómicas, en comparación con las 0.052 unidades astronómicas pronosticadas por su modelo (González, 2005). En relación con los límites de la ZH de Kasting et al (1993), podemos notar que el borde externo determinado mediante el modelo de balance energético se sitúa aproximadamente entre las 0.95 UA y 1.37 UA. Estos valores corresponden a las regiones donde se produce la *pérdida de agua* y la *primera condensación de dióxido de carbono*, respectivamente. Por otro lado, el límite interno se encuentra más próximo a la estrella, lo cual demuestra ser menos conservador que la estimación más optimista (basada en *Venus reciente*) del límite interior en el modelo de Kasting et al. (1993). En términos de amplitud, la zona habitable es mucho más restringida en comparación con los cálculos de Kasting et al. (1993) y Kopparapu et al. (2013), tanto en relación con la extensión más optimista (1.02 UA) como con la más conservadora (0.73 UA). Para la región conservadora se toman como referentes las nuevas estimaciones incorporadas por el trabajo de Kopparapu et al. (2013).

A lo largo del presente capítulo, hemos venido construyendo, desde aspectos históricos y matemáticos (de forma introductoria) el concepto zona habitable alrededor de una estrella, particularmente nuestro Sol. También se discutió, que, para el desarrollo de la vida terrestre, es necesario que sea un planeta rocoso como la Tierra capaz de sustentar agua líquida por periodos de tiempo geológico (millones de años).

En nuestro sistema solar, además de la Tierra, existen otros tres planetas de tipo terrestre: Mercurio, Venus y Marte. El planeta Mercurio se encuentra a una distancia media de 0.38 UA del Sol, algo que lo deja fuera del límite interno más optimista de la ZH. Venus por su parte, a una distancia de 0.72 UA del Sol, aunque se encuentra dentro de la ZH calculada a través del modelo de balance energético presentado en esta sección, también se encuentra por fuera de los límites optimistas de Kasting et al (1993) y Kopparapu et al (2013).

En el caso de Marte, al situarse a una distancia media del Sol de 1.52 UA, se encuentra dentro del límite externo de la ZH conservadora, sin embargo, en la actualidad Marte es un planeta que no puede sustentar océanos de agua en estado líquido, ya que su núcleo se encuentra geológicamente inactivo. Esto impide la existencia de un campo magnético³³ necesario para mantener una atmósfera cuya presión sea la suficiente para mantener el agua líquida sobre la superficie del planeta (Peña, 2012). Los otros planetas del sistema solar, es decir, los gigantes gaseosos (Júpiter y Saturno) y los gigantes de hielo (Urano y Neptuno), además de no cumplir con el criterio de habitabilidad de poseer una superficie rocosa, no se encuentran dentro de la zona habitable.

En la figura 13 (derecha), se observa la variación de los límites de la ZH en relación con el tipo espectral. Se han considerado las estrellas de mayor relevancia en el ámbito astrobiológico actual. Como se puede apreciar, a medida que la temperatura efectiva de la estrella aumenta, la ZH se desplaza hacia la región exterior de la estrella. Además, se observa que a medida que la temperatura de la estrella disminuye, la extensión de la ZH se vuelve considerablemente más estrecha.

³³ En el caso de Marte, la falta de un campo magnético ha llevado a la pérdida gradual de su atmósfera y a la presencia predominante de agua en forma de hielo en los polos y subsuelo. Aunque se han encontrado indicios de que en el pasado Marte pudo haber tenido agua líquida en su superficie, lo que lo convierte en un objeto de interés astrobiológico en el sistema solar.

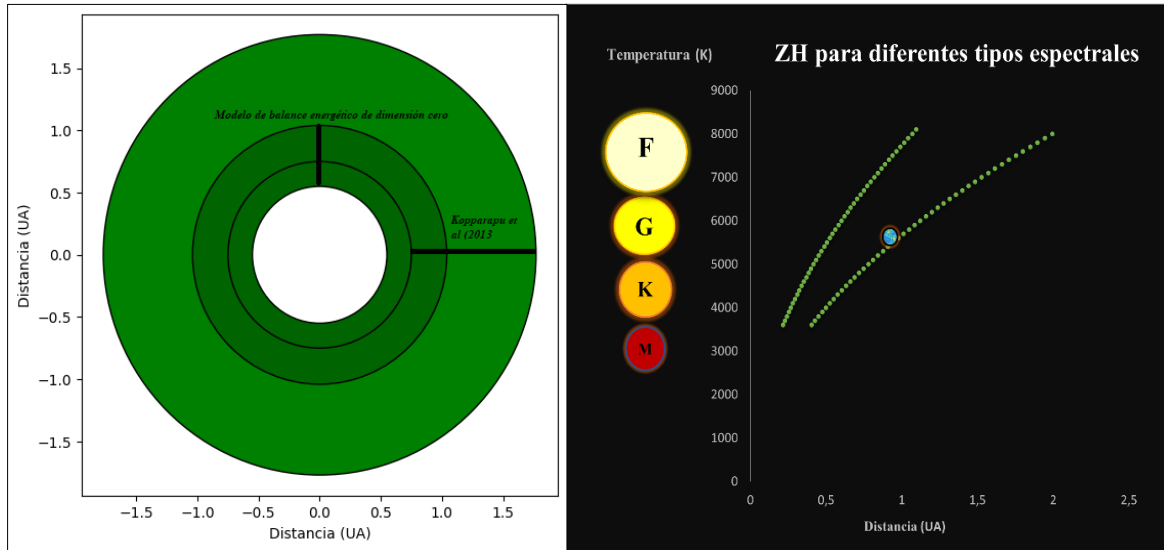


figura 13 Izquierda: La región de la ZH habitable del sistema solar. Una comparación de la región de la ZH obtenida a partir del modelo de balance energético de dimensión cero (verde oscuro) con la obtenida por el modelo radiativo-convectivo 1D (Verde claro) de Kopparapu et al (2013). Derecha: Límites internos y externos de la ZH para estrellas de diferente tipo espectral, imagen construida por el autor, usando el modelo de balance energético.

Factores adicionales como criterios de habitabilidad

En astrobiología y ciencias planetarias el término habitabilidad se refiere, al potencial o capacidad que un entorno, en este caso, un cuerpo planetario posee para brindar los requerimientos mínimos necesarios que permiten la actividad metabólica de un organismo vivo. Puesto que el único ejemplo de actividad biológica del que se tiene certeza es la que se encuentra presente en la Tierra, la definición de habitabilidad se restringe a un paradigma geocéntrico, es decir, a cualquier forma de vida conocida en este planeta, desde organismos unicelulares hasta formas de vida compleja (Cockell et al, 2016).

Los requerimientos necesarios para la existencia de la vida en un entorno planetario dependen de aspectos esenciales como: A) una fuente de energía primaria para la actividad metabólica de los organismos (radiación estelar, energía geotérmica, energía química); B) la existencia de seis elementos químicos (CHONPS)³⁴ que constituyen la molécula del ADN presente en todas las formas de vida terrestre y cuya bioquímica se basa en el carbono; C) y finalmente la existencia de un solvente como el agua en estado líquido, que

³⁴ El carbono(C), el hidrogeno (H), el oxígeno (O), el nitrógeno (N), el fosforo (P) y el azufre (S), son actualmente considerados por los biólogos, como los bloques fundamentales para el sostenimiento de la vida

para el caso de la vida en el planeta Tierra, ha permitido que se propicien las reacciones bioquímicas necesarias para la aparición de organismos biológicos (Domagal-Goldman et al., 2016).

La habitabilidad de un planeta no solo depende de su ubicación en la ZH alrededor de su estrella. En la búsqueda de un *planeta ricitos de oro*, es importante considerar otros factores además de estar dentro de los límites de la ZH. En la siguiente tabla se describen brevemente los criterios astrofísicos y planetarios que son clave para la existencia de océanos de agua líquida a lo largo de períodos de tiempo geológico, lo cual resulta crucial para el desarrollo de vida basada en la química del carbono. (Cockell et al., 2016).

Tabla 4 Estos criterios se obtienen de la investigación documental realizada en trabajos como (Cockell et al., 2016), (Gonzalez et al., 2001), (Kopparapu et al., 2013) y (Peña, 2012).

Criterios de tipo astrofísico	Criterios de tipo planetario
<p>❖ Excentricidad orbital: una órbita elíptica en lugar de circular es posible que experimente períodos de tiempo en los que se encuentre fuera de la zona habitable y, por lo tanto, experimente cambios extremos en la temperatura de su superficie y atmósfera. Estos cambios de temperatura podrían resultar muy problemáticos y restrictivos para la evolución de formas de vida compleja.</p>	<p>❖ Relación masa-radio planetaria: La existencia de una atmósfera que contenga una mezcla adecuada de gases de efecto invernadero que regulen la temperatura global de un cuerpo planetario y a su vez contribuya con presencia de agua líquida. Para ello, se requiere que planeta rocoso tipo Tierra cuente con una masa entre 0.5 y 2 veces la masa de la Tierra, y un radio que no supere 1.3 radios terrestres.</p>

❖ **Zona de Habitabilidad Galáctica (ZHG):**

Para que la vida perdure, es necesario que el sistema estelar esté alejado del centro galáctico, donde hay fuentes de radiación ionizante y explosiones de supernovas que podrían aniquilar cualquier forma de vida. La formación de un planeta rocoso similar a la Tierra requiere que la estrella alrededor de la cual orbita tenga una alta metalicidad, es decir, una abundancia de elementos químicos pesados que favorezcan la creación de sistemas planetarios. La ZHG es la región donde este proceso puede tener mas posibilidad de darse. Muy lejos del núcleo, la concentración de elementos pesados disminuye progresivamente, muy cerca del núcleo, como ya se explicó, puede resultar hostil para la vida.

❖ **Actividad geológica:** El campo magnético terrestre, generado por las corrientes eléctricas en el núcleo metálico (Efecto dinamo), es crucial para proteger la atmósfera de los flujos de radiación estelar energética, los cuales, al ser ionizantes, pueden ser perjudicial para los seres vivos. Además, la tectónica de placas, donde la litosfera se mueve sobre el manto terrestre, desempeña un papel fundamental en la sostenibilidad de la vida en la Tierra a largo plazo, influyendo en la densidad, temperatura, disponibilidad de agua líquida y ciclo del carbono, todos ellos factores clave para la formación de organismos biológicos.

➤ CAPITULO IV

Reflexiones y consideraciones finales

Durante el proceso escritural del presente documento, fueron diversos aspectos los que influyeron en su construcción final. Este resultado deriva, en principio, de una extensa investigación documental, basada en la indagación de fuentes primarias con el objetivo de rastrear los orígenes y fundamentos del concepto de zona habitable.

Un primer abordaje se centró en el contexto histórico de los estudios sobre la radiación térmica entre los siglos XVII y XIX, desde las relaciones entre temperatura y color elaboradas por Thomas Wedgwood, hasta la solución propuesta por Planck para la catástrofe ultravioleta, quien introduce una interpretación cuántica de la radiación. Con este primer abordaje se buscó poner de manifiesto una narrativa que resalte cómo la actividad científica a lo largo de la historia se ha edificado como una actividad cultural desfragmentada, es decir, un diálogo de saberes disciplinares que no se restringe a problemas aislados en cada esfera de la ciencia natural. Esto puede hacerse evidente por ejemplo con J. Stefan cuando dedujo una aproximación del valor de la temperatura en la superficie solar a partir de la relación $T^4 \propto E$.

Resultó pertinente subrayar también desde el capítulo II, que los trabajos orientados a diseñar montajes experimentales en la Física, así como la construcción de instrumentos que conllevan al surgimiento de nuevos métodos de medición para el estudio de determinados fenómenos naturales, son parte esencial en los cambios y transformaciones de los paradigmas que son el eje central en los diálogos del saber disciplinar de las ciencias para cada contexto histórico. En particular, con la invención del bolómetro por el astrónomo Samuel Langley, no sólo se desarrolló un método instrumental para obtener las primeras mediciones de la radiación solar que llega a la Tierra, también sirvió como base para el desarrollo de los trabajos experimentales de Lummer y Pringsheim, que como sabemos, contribuyeron de forma determinante para demostrar las desviaciones significativas de las curvas teóricas de la radiación de cuerpo negro en el espectro de la región del infrarrojo.

Ahora bien, dentro del marco histórico mencionado, finalmente se buscó focalizar en el capítulo II, los conceptos del estudio de la radiación térmica que se consideraron de mayor pertinencia para el abordaje de la zona habitable de una estrella desde el análisis térmico.

Sin embargo, puesto que apelar a la indagación de los conceptos desde una mirada histórica fue uno de los elementos metodológicos que se buscó en la realización de este trabajo, el concepto de la zona habitable fue explorado y analizado desde la construcción de dicha mirada. Desde la comprensión, definición y utilidad que posee este concepto, hoy en día propio de la Astrobiología y Astrofísica, nuestra investigación documental nos remitió hasta el libro III de la obra *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* de Sir Isaac Newton. Resulta pues, de especial interés que, en primer lugar, no se encontró literatura anterior al siglo XVII, en la que se pusiera especial énfasis sobre los límites del sistema solar en los que el agua aun estuviese en estado líquido, antes de congelarse o evaporarse sobre una hipotética superficie planetaria. En segundo lugar, aunque Newton no aborda de modo explícito discusiones en torno a aspectos de habitabilidad, si le da un carácter especial al agua como referente de medida de los efectos térmicos de la radiación a distintas distancias del sol.

Ahora bien, con esta indagación histórica, se pudo encontrar que la zona habitable, en términos de su definición, fue un concepto inicialmente compartido con la ciencia de la geografía. También, se pudo constatar que, de acuerdo con cada autor, tuvo amplias variaciones respecto a los términos con los que fue descrita. Resulta llamativo observar que antes de los planteamientos de M. Hart o Kasting et al (1993), se asumía una perspectiva tanto geocéntrica como antropocéntrica del lugar en el que se encontraba la Tierra, o debería encontrarse dentro de la zona habitable del sistema solar.

El punto de convergencia de la zona habitable, desde el rastreo inicial de su concepción a lo largo de la historia, hasta su uso y definición actual, es el agua. Bien como parámetro de medida térmico respecto a los efectos de la radiación solar en función de la distancia, o bien como el solvente que favorece la química que subyace a la vida basada en el carbono. Sin embargo, aunque la definición conceptual de la ZH parece a primera vista, relativamente simple, si se caracteriza desde los aspectos puramente térmicos vinculados con las fases del agua, lo cierto es que, su definición y caracterización va tomando mayor complejidad en la

medida en que se le van asignando variables distintas a considerar. De hecho, uno de los resultados logrados con nuestra revisión histórica lo evidenció de ese modo.

Tal vez, en primera instancia podría verse que, su caracterización y complejidad se va modelando como un conjunto lineal de conocimientos a lo largo de la historia. Sin embargo, es el conocimiento científico y el avance tecnológico de cada contexto histórico, lo que finalmente modela y caracteriza la definición de la ZH.

No fue hasta la década de los 90 que los modelos climatológicos, además de establecer los criterios modernos de tipo atmosférico que determinan la extensión de la ZH, también comenzaron a explorar la ZH en distintos tipos de estrellas, poniendo énfasis particular en el tipo estelar más adecuado para el surgimiento y evolución de la vida. Esto fue posible dado el estado tecnológico de aquel momento, en el cual ya habían sido superadas diversas crisis de la física relacionada con la objetividad de las observaciones astronómicas. Esto es: El estudio espectral de las estrellas y la relación color/temperatura. Sin este baluarte del saber astronómico, no podríamos inferir la temperatura de estrellas, y, por tanto, datar la probabilidad asociada a su habitabilidad. Esto coincide con el descubrimiento de los primeros exoplanetas, y la consolidación de un nuevo campo investigación, la Astrobiología. La década de los 90, fue, por tanto, el inicio a una nueva interpretación de la ZH, caracterizándose ahora, no solo en función del tipo estelar, sino del tipo de exoplaneta que orbite esta región. Todo ello, sin embargo, adquiere sentido también, gracias al desarrollo de nuevos métodos de investigación, dados por el progresivo avance en el diseño instrumental que ha permitido el descubrimiento de miles de exoplanetas en la galaxia.

La ZH es pues, vista desde un enfoque moderno, una condición necesaria pero no suficiente para determinar el potencial de habitabilidad que un cuerpo planetario podría llegar a ofrecer. Puede entenderse como un criterio de habitabilidad que necesariamente debe combinarse con otros criterios de habitabilidad de tipo planetario y astrofísico, que, aunque hacen cada vez más complejo su abordaje, ofrecen una visión más amplia y profunda de los procesos involucrados con el fenómeno de la vida no solo en la Tierra sino, eventualmente fuera de esta.

En relación con esto, el proceso escritural del presente trabajo supuso que el tratamiento metodológico se hubiese sustentado sobre un paradigma de investigación multidisciplinar.

Sin embargo, el diálogo de saberes entre las distintas disciplinas científicas (entre estas la Física) que convergen con un tema de investigación propio de la Astrobiología, hizo que el enfoque de este documento fuese de carácter interdisciplinar. Esto quiere decir que, dada la complejidad del tema propuesto, se tuvo la necesidad de ir vinculando progresivamente, conceptos y discursos de otras disciplinas científicas como la Astronomía, las Ciencias Atmosféricas y las Ciencias Planetarias.

Es importante aclarar que todo el proceso de documentación histórica de este trabajo estuvo acompañado de la participación continua en espacios académicos en donde se mostraron avances sobre la determinación de la ZH en el contexto de la enseñanza de la Astronomía como es el caso del V Congreso Internacional de Astrobiología en la Universidad del Atlántico celebrado en noviembre de 2020 (Instituto de Astrobiología de Colombia, 2021), el VII CoCoA (Congreso Colombiano de Astronomía) el del XI CNEFA (Congreso Nacional de Enseñanza de la Física y la Astronomía) en los que se participó con el taller Mapeando Exoplanetas con Curvas de Luz de Estrellas Lejanas, el cual consistía en modelar de manera análoga la curva de luz generada por el tránsito de un exoplaneta. Y finalmente la participación exitosa en el concurso de designación de exoplanetas de la IAU (Unión Astronómica Internacional), NameExoworlds 2022, como parte del equipo Orbitmautas. Particularmente bautizando el sistema exoplanetario LTT 9779-LTT 9779b como Uúba, la estrella y Cuancoá, el exoplaneta (International Astronomical Union (IAU), 2023).

Teniendo en consideración estos procesos llevados a cabo dentro de diversos escenarios de la ciencia y su enseñanza, uno de los propósitos fundamentales de la propuesta, se centró en ofrecer a los maestros en formación de la Licenciatura en Física de la Universidad Pedagógica Nacional, un contexto introductorio hacia los estudios de habitabilidad planetaria, centrados en el criterio de la ZH, y partiendo conceptualmente desde los aspectos térmicos de la radiación. Debido a la rigurosidad, tiempo, profundidad y grado de extensión documental, que exige la realización de este tipo de trabajo, no se logró construir una propuesta de enseñanza que pudiese ser implementada en el aula. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, este documento presenta una perspectiva general e introductoria hacia los estudios de habitabilidad, los cuales pueden ser abordados desde

enfoques, históricos, epistemológicos y disciplinares, abriendo la posibilidad de nuevas rutas tanto de investigación básica, como de propuestas para la enseñanza de la física en el contexto de los fenómenos que exploran el surgimiento y evolución de la vida en el cosmos.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFÍA

- Carroll, B. W., & Ostlie, D. A. (2017). *An Introduction to Modern Astrophysics*. Cambridge University Press.
- Braun, E. (2007). *Una faceta desconocida de Einstein/ An Unknow Side of Einstein*. Fondo De Cultura Economica USA.
- Bruno, G. (1981). *Sobre el infinito universo y los mundos* (Á. J. Cappelletti, Trad.). Buenos Aires, Argentina: Aguilar Argentina S.A. de Ediciones. (Título original publicado en 1584).
- Blatt, F. (1991) *FUNDAMENTOS DE FISICA*. México: Editorial Prentice Hall
- Bernal, C. (2010). *Metodología de la investigación: administración, economía, humanidades y ciencias sociales*. Colombia: PEARSON EDUCACIÓN
- Beléndez, A (2008). *La unificación de luz, electricidad y magnetismo: la "síntesis electromagnética" de Maxwell*. *Revista Brasileira de Ensino de Física*. Recuperado de: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/9175/3/RBEF_v30_n2_2601_2008.pdf
- Bigozzi, L., Tarchi, C., Falsini, P., & Fiorentini, C. (2014). 'Slow Science': *Building scientific concepts in physics in high school*. *International Journal of Science Education*, 36(13), 2221–2242. <https://doi.org/10.1080/09500693.2014.919425>
- Bueno, J. (2011). *La astrobiología para Colombia nació en la Universidad Nacional de Colombia*. *Vida sin Fronteras*, (1), p. 6.
- Castillo, J. C. (2004). *El concepto de corriente y la perspectiva dinámica*. Universidad Pedagógica Nacional. Facultad de Ciencia y Tecnología. Departamento de física, Bogotá.
- Catling, D. C., & Kasting, J. F. (2017). *Atmospheric evolution on inhabited and lifeless worlds*. Cambridge University Press.
- Çengel, Y., & Ghajar, A. (2011). *Transferencia de calor y de masa* (4th ed.). México D.F: McGraw Hill.
- Cisneros, M. (2013). *Cómo elaborar Trabajos de grado*. Bogotá: ECOE EDICIONES
- Corace, J. (2009) "UNIDAD V: MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DEL CALOR." Retomado de: <http://ing.unne.edu.ar/pub/fisica2/U05.pdf>

Cockell, C. S., Bush, T., Bryce, C., Direito, S., Fox-Powell, M., Harrison, J. P., Lammer, H., Landenmark, H., Martin-Torres, J., Nicholson, N., Noack, L., O'Malley-James, J., Payler, S. J., Rushby, A., Samuels, T., Schwendner, P., Wadsworth, J., & Zorzano, M. P. (2016). *Habitability: A review*. *Astrobiology*, 16(1), 89–117. <https://doi.org/10.1089/ast.2015.1295>

Chefer, C., & Oliveira, A. L. de. (2022). Astrobiologia e ensino de ciências: Articulações no paradigma educacional emergente. *Revista Diálogo Educacional*, 22(72). <https://doi.org/10.7213/1981-416x.22.072.ds08>

Dole, S.H. (1964). *Habitable Planets for Man*. New York: Blaisdell Pub. Co

Domingo, A. S. (2013). *Apuntes de Transmisión del Calor. E.T.S. Arquitectura (UPM) EBooks*. <http://oa.upm.es/50949>

Domagal-Goldman, S. D., Wright, K. E., Adamala, K., Arina de la Rubia, L., Bond, J., Dartnell, L. R., Goldman, A. D., Lynch, K., Naud, M.-E., Paulino-Lima, I. G., Singer, K., Walther-Antonio, M., Abrevaya, X. C., Anderson, R., Arney, G., Atri, D., Azúa-Bustos, A., Bowman, J. S., Brazelton, W. J., ... Wong, T. (2016). *The astrobiology primer v2.0*. *Astrobiology*, 16(8), 561–653. <https://doi.org/10.1089/ast.2015.1460>

Eisberg, R., & Resnick, R. (1992). *Física Cuántica - Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcl.* Adfo Books.

Erazo, Y. P. (2017). Enseñanza de astronomía estelar a docentes en formación en Ciencias Naturales. <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/handle/10893/10263>

Farias, M. L. de L., & Barbosa, M. A. A. (2017). *Integrando o ensino de astronomia e termodinâmica: explorando a zona habitável no diagrama de fases da água*. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 39(4). <https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2016-0299>

Forget, F. (2013). On the probability of habitable planets. “*International Journal of Astrobiology*”

García Castaneda, J., & De Geus, J. (2003). *Introducción a la física moderna*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

González, G. (2005). Habitable Zones in the Universe. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 35(6), 555-606. <https://doi.org/10.1007/s11084-005-5010-8>

G.A. Lemarchand & G. Tancredi (2010). *Una breve historia social de la astrobiología en Iberoamérica*. *Astrobiología: del Big Bang a las Civilizaciones, Tópicos Especiales en Ciencias Básicas e Ingeniería 1*, pp. 23-52

Gonzalez, G., Brownlee, D., & Ward, P. (2001). *The Galactic Habitable Zone I. galactic chemical evolution*. En *arXiv*. <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0103165>

Heller, R., & Armstrong, J. (2014). Superhabitable worlds. *Astrobiology*, *14*(1), 50–66. <https://doi.org/10.1089/ast.2013.1088>

Hill, M. L., Bott, K., Dalba, P. A., Fetherolf, T., Kane, S. R., Kopparapu, R. K., Li, Z., & Ostberg, C. (2023). A Catalog of Habitable Zone Exoplanets. *The Astronomical Journal*, *165*(2), 34. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/aca1c0>

Hoffman, D. (2001). On the Experimental Context of Planck's Foundation of Quantum Theory. *Centaurus* *2001*, *43*, 240-259. Dinamarca

Huggett, R. J. (1995). *GEOECOLOGY: An evolutionary approach*. Taylor & Francis.

Jenkins, J. S., Díaz, M. R., Kurtovic, N. T., Espinoza, N., Vines, J. I., Rojas, P. A. P., Brahm, R., Torres, P., Cortés-Zuleta, P., Soto, M. G., Lopez, E. D., King, G. W., Wheatley, P. J., Winn, J. N., Ciardi, D. R., Ricker, G., Vanderspek, R., Latham, D. W., Seager, S., ... Mann, A. W. (2020). *An ultra-hot Neptune in the Neptune desert*. En *arXiv [astro-ph.EP]*. <http://arxiv.org/abs/2009.12832>

Kasting, J. (2012). *How to Find a Habitable Planet*. Princeton: Princeton University Press. <https://doi.org/10.1515/9781400845088>

Kawaler, S. D., & Veverka, J. (1981). *The Habitable Sun - One of Herschel, William's Stranger Ideas*. *JRASC*, *75*, 46. <https://articles.adsabs.harvard.edu/full/1981JRASC..75..46K/0000053.000.html>

Kopparapu, R. K., Ramirez, R. M., Kasting, J. F., Eymet, V., Robinson, T. D., Mahadevan, S., Terrien, R., Domagal-Goldman, S., Meadows, V. S., & Deshpandé, R. (2013). *HABITABLE ZONES AROUND MAIN-SEQUENCE STARS: NEW ESTIMATES*. *The Astrophysical Journal*, *765*(2), 131. <https://doi.org/10.1088/0004-637x/765/2/131>

Kitchin, C. R. (2011). *Exoplanets: Finding, Exploring, and Understanding Alien Worlds*. Springer Science & Business Media.

Kuhn, T. S. (1980). *La Teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica 1894 - 1912*. Alianza Editorial.

Iglesias et al (Iglesias et al 2008) “*Astronomía en la escuela: situación actual y perspectivas futuras*”. Buenos Aires, Argentina.

Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. Pearson Educación.

Instituto de Astrobiología de Colombia. (10 de enero de 2021). Youtube. Obtenido de Youtube: <https://youtu.be/6Lg-VyUtsZM>

Jurado, Y. (2002). *Técnicas de investigación documental*. México: THOMSON

La Luz como Onda Electromagnética. (2021). Recuperado de: <https://www.fisicalab.com/apartado/luz-y-ondas-em>

Lingam M (2021). *A brief history of the term ‘habitable zone’ in the 19th century*. International Journal of Astrobiology. 1–5. <https://doi.org/10.1017/S1473550421000203>

Luque Ordoñez, J. (2012). *Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico*. Acta.es. Recuperado de: https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/062017.pdf

Maxwell, J. (1864). *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*. Royal Society. Recuperado de <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rstl.1865.0008>

Martínez Rodríguez, D. (2021) *Sensibilidad climática: análisis de balance energético. Trabajo fin de grado*. Universidad de les Illes Balears. Islas Baleares, España.

Manrique Valadez, J. (2002). *Transferencia de calor* (2nd ed.). México: Oxford University Press.

Mason, J. (2008). *Exoplanets: Detection, Formation, Properties, Habitability* (2008 ed.). Springer.

McEvoy, J. P., Zarate, O., & Appignanesi, R. (2003). *Teoría cuántica / Quantum Theory: Para Principiantes*. Errepar

Monje C. (2011). *Metodología de la investigación cuantitativa y cualitativa: Guía didáctica*. Universidad Surcolombiana. Neiva, Colombia

Moreno-Cárdenas, F., Vargas-Domínguez, S., & Cuéllar-Moyano, J. (2022). *The pioneering scientific endeavor and contributions of José María González Benito (1843-1903), the first Colombian modern astronomer*. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 46(181), 1010-1027. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1795>

Mosquera, A. F. V. (2006). La alfabetización científica y tecnológica en el proceso de enseñanza-aprendizaje de la física. Revista iberoamericana de educación (Impresa), 38(1), 1-14. <https://doi.org/10.35362/rie3812673>

NASA. (2023). *Taking the Baton: TESS*. Recuperado de https://exoplanets.nasa.gov/discovery/missions/#otp_taking_the_baton:_tess

Newton, I. (1999). *The Principia: The Authoritative Translation and Guide: Mathematical Principles of Natural Philosophy* (Cohen, I. B., Whitman, A., & Budenz, J. Trad). University of California Press. (Título original publicado en 1687).

Oreiro, R & Solves, J (2015). *Evaluación de la enseñanza de la Astrobiología en Secundaria: análisis de libros de texto y opiniones del profesorado en formación*. Universidad de Valencia. España

Patruno, A., & Kama, M. (2017). *Neutron star planets: Atmospheric processes and irradiation*. Astronomy and astrophysics, 608, A147. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731102>

Pabon, J & Sandoval, Z (2016). *Recontextualización del concepto de habitabilidad planetaria a partir de un análisis histórico epistemológico de los planteamientos de J. Kasting*. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.

Peña, I. R. (2012). *Astronomía Elemental: Volumen II: Astrofísica y Astrobiología*. Ediciones USM.

Planck, M. (1912). *The theory of heat radiation*. (M. Masius, Trad.)

Poffo, D. (2012). Determinación de la zona de habitabilidad estelar. Trabajo especial de la licenciatura en astronomía. Córdoba, Argentina

Porto de Mello, G. F. (2010). *Estrellas astrobiológicamente interesantes: criterios modernos para la habitabilidad*. En G. Lemarchand, & G. Tancredi (Ed.), *Astrobiología: del Big Bang a las Civilizaciones* (págs. 77-106). Montevideo: Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe UNESCO.

Quecedo, R & Castaño, C (2002). *Introducción a la investigación de la metodología cualitativa*. Revista de Psicodidactica. núm. 14, 2002, pp. 5-39

Rivadulla, A. *La solución revolucionaria de Planck del problema de la radiación del cuerpo negro*. In: MATAIX, C.; RIVADULLA, A. Física cuántica y realidad. Madrid: Universidad Complutense de Madrid, 2002. Cap. 2. p. 43-56

Rushby et al (2013). Habitable Zone Lifetimes of Exoplanets around Main Sequence Stars. *ASTROBIOLOGY* Volume 13, Number 9, 2013

Roy, A., & Clarke, D. (2003). *Astronomy: Principles and Practice, Fourth Edition (Pbk)* (4th ed.). CRC Press.

Rogers, L. A. (2015). *MOST 1.6 EARTH-RADIUS PLANETS ARE NOT ROCKY*. *The Astrophysical Journal*, 801(1), 41. <https://doi.org/10.1088/0004-637x/801/1/41>

Seager, S. (2009). *Is There Life Out There?: The Search for Habitable Exoplanets*.

Selsis, F., Kasting, J. F., Levrard, B., Paillet, J., Ribas, I., & Delfosse, X. (2007). *Habitable planets around the star Gliese 581? Astronomy and Astrophysics*, 476(3), 1373-1387. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20078091>

Shklovskii, I.S and Sagan, C. (1966) *Intelligent Life in the Universe*. San Francisco: Holden-Day, Inc.

Stefan, J. (1879). Über die Beziehung zwischen der Wärmestrahlung und der Temperatur [Sobre la relación entre la radiación térmica y la temperatura]. *Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften: Mathematisch-Naturwissenschaftliche Classe* (Proceedings of the Imperial Philosophical Academy [of Vienna]: Mathematical and Scientific Class) (in German). P. 391–428. Recuperado de <https://archive.org/details/sitzungsbericht543klasgoog/page/424/mode/2up?view=theater>

Strughold, H (1953). *The Green and Red Planet: A Physiological Study of the Possibility of Life on Mars*. Albuquerque: University of New Mexico Press.

Torres, N., Bolívar, A., Solbes, J., & Parada, M. (2018). Percepciones de estudiantes universitarios sobre su formación en física en educación secundaria. *Revista U.D.C.A. Actualidad & Divulgación Científica*, 21(2), 599–606. <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.975>

Underwood, D. R., Jones, B. W., & Sleep, P. N. (2003). The evolution of habitable zones during stellar lifetimes and its implications on the search for extraterrestrial life. *International Journal of Astrobiology*, 2(4), 289–299. <https://doi.org/10.1017/s1473550404001715>

Winchell, A (1883). *World-life: Or Comparative Geology*. Chicago: S. C. Griggs & Co.

Whewell, W (1855). *Of the Plurality of Worlds: An Essay: Also, a Dialogue on the Same Subject*, 4th Ed. London: John W. Parker & Son.

Zuluaga Callejas, J. (2015). Exoplanetas: escondidos en la luz. *Revista Experimenta*, (3). Recuperado de <https://revistas.udea.edu.co/index.php/experimenta/article/view/24572>

ANEXO 1

Transferencia de calor por conducción y convección

Se realizará una breve descripción acerca los otros dos mecanismos de transferencia de calor que usualmente se estudian en los cursos introductorios de termodinámica, nos referimos a la conducción y la convección. La importancia de realizar esta breve descripción radica en la forma en cómo el calor se transporta a través de un medio, puesto que como veremos, mientras que para la conducción y la convección es necesaria la existencia de materia como medio de transporte, la radiación o energía radiante no requiere de un medio material para propagarse, es decir, esta forma de energía viaja como onda electromagnética a través del espacio vacío.

Uno de los modos en los cuales se transporta el calor es a través del mecanismo de conducción térmica. Este mecanismo de transferencia de calor lo podemos experimentar cuando, por ejemplo, ponemos la punta de un tornillo metálico muy cerca de una fogata, este comenzara a calentarse bastante rápido, a tal punto que no podremos sujetarlo por mucho tiempo. Lo que ocurre en este caso particular, se debe a que existe una diferencia de temperatura, que ocasiona un transporte de calor desde la punta del tornillo hasta el extremo desde el cual lo sujetamos, dicho de otro modo, el calor se condujo a lo largo del material desde el extremo caliente hasta el extremo frío.

De acuerdo con la definición de Manrique Valadez (2002): “El fenómeno de transferencia de calor por *conducción* constituye un proceso de propagación de energía en un medio sólido, líquido o gaseoso mediante la comunicación molecular directa cuando existe un gradiente de temperatura.” (p. 2). Se evidencia que, en este primer caso, existe una dependencia de un medio material para que sea posible la transferencia de calor. Si el material es líquido o gaseoso, la transferencia de calor será debida, tanto al movimiento molecular aleatorio (difusión) como a las colisiones entre las moléculas más energéticas que se encuentran en las regiones más calientes, con las moléculas menos energéticas que se encuentran en las regiones más frías del gas. Si en cambio el material es un sólido, la transferencia de calor por conducción cobra especial importancia puesto que, no solamente el transporte de energía se deberá a las vibraciones de las moléculas que constituyen dicho

material. En este caso, a escala atómica, los átomos que se encuentran en las regiones más calientes, a través de sus vibraciones transfieren energía cinética a los átomos que se encuentran en las regiones más frías. Pero adicional a esto, los materiales metálicos, poseen unas propiedades físicas particulares en los niveles atómicos. Sus electrones se encuentran libres, transitando por la estructura cristalina del material, facilitando así, de forma mucho más rápida la transferencia de energía calórica hacia las regiones frías (Young & Freedman, 2009; Çengel & Ghajar, 2011).

Otro de los aspectos relevantes de la transferencia de calor por conducción, se refiere a la tasa de flujo o razón de conducción de calor que posee la sustancia o material en función de sus características geométricas, su composición y el gradiente de temperatura que exista entre las regiones del material. Esta razón se expresa a través de la siguiente relación

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{kA(T_1 - T_2)}{l}$$

Donde $\Delta Q/\Delta t$ es la tasa de flujo de calor por intervalo de tiempo, A es el área transversal del objeto perpendicular a la dirección del flujo de calor, $(T_1 - T_2)/l$ se denota como la diferencia de temperatura por unidad de longitud, la cual recibe el nombre de gradiente de temperatura. Finalmente, k es el valor de la constante de proporcionalidad asociada a la conductividad térmica particular en cada material, es decir, representa la medida de la capacidad que tiene el material o la sustancia para conducir calor (Çengel & Ghajar, 2011; Manrique Valadez, 2002; Young & Freedman, 2009).

Ahora bien, el segundo modo de transferencia de calor que será descrito a continuación es el mecanismo de *convección*, mediante el cual, un fluido como un líquido o un gas, transportan el calor rápidamente a través del medio.

Una forma sencilla de comprender como ocurre este mecanismo en un líquido, por ejemplo, es cuando ponemos a calentar agua dentro de un recipiente puesto sobre el quemador de la estufa. En las regiones del agua que se encuentran en el fondo de la olla, cuanto más se calientan, la densidad molecular del fluido disminuye, causando así corrientes de convección, que impulsan su elevación hacia las regiones cercanas a la superficie, desplazando hacia el fondo del recipiente, las regiones más frías y molecularmente más densas de este fluido.

De manera análoga a la situación anteriormente descrita, ocurre con las sustancias gaseosas. Por ejemplo, cuando calentamos un alimento dentro de un horno de convección, esto ocurre gracias a la circulación de aire que es acelerada por un ventilador que se encuentra al interior del horno, provocando corrientes convectivas de aire muy cálidas que facilitan el proceso de cocción del alimento.

De igual manera, sin importar la situación física en estudio, siempre que exista un gradiente de temperatura entre un fluido en movimiento (líquido o gaseoso) y una superficie sólida, habrá transferencia de calor, que dependerá tanto de mecanismos de convección como de conducción.

La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente que está en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección. En ausencia de cualquier movimiento masivo de fluido, la transferencia de calor entre una superficie sólida y el fluido adyacente es por conducción pura. La presencia de movimiento masivo del fluido acrecienta la transferencia de calor entre la superficie sólida y el fluido, pero también complica la determinación de las razones de esa transferencia. (Cengel & Ghajar, 2011, p.25)

Anexo 2

Experimento de Stefan

De acuerdo con Stefan (1879), cuando el alambre de platino se encuentra a una temperatura de 1473 K (manifestando un color blanco en su superficie), la intensidad de la radiación emitida es aproximadamente 11.7 veces mayor que cuando se encuentra a una temperatura de 798 K.

El Montaje consiste en calentar alambre de platino conectado a una fuente de corriente eléctrica, y medir con un termómetro radiante (termocupla), los cambios de voltaje que experimenta el circuito³⁵ están relacionados con cambios de Temperatura en el alambre.

Stefan obtuvo como resultado para la placa de platino, que, si había una temperatura de 798 K, el sensor registraba una medida $E_1 = \alpha$. Luego, registró de qué manera cambiaba en razón de α , la radiación emitida para diferentes temperaturas del alambre de platino.

Observo con particular interés que, a una temperatura de 1473 K, la medida en el sensor de radiación (termocupla), era de $E_2 = 11.7 \alpha$.

Posteriormente registró sus resultados como razones de temperaturas e intensidades de radiación, asociadas a un color.

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{E_2}{E_1}$$

Reemplazando, se encuentra que dicha relación no es directa, es decir:

$$\frac{1473}{798} \neq \frac{11.7\alpha}{1\alpha}$$

³⁵ Por principio de dilatación térmica que se manifiesta en grados de dilatación de un alambre muy delgado.

La forma en cómo se analiza la razón que pueda existir para las temperaturas, es, en virtud de no modificar la esencia de una razón, suponer que están relacionadas bajo una relación de potencias:

$$\left(\frac{1473}{798}\right)^n = \frac{11.7\alpha}{1\alpha}$$

Despejando n se obtiene el valor ≈ 4 , y por lo tanto se deduce el modelo:

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right)^4 = \frac{E_2}{E_1}$$

Y por lo tanto:

$$E = \sigma T^4$$