



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO
PROGRAMA DE POSGRADO EN ASTROFÍSICA

Instituto de Astronomía

Determinación numérica de la habitabilidad en la Galaxia en estrellas F, G y K: la
conexión con SETI

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS (ASTROFÍSICA)

PRESENTA:
Rodrigo Ramírez Ramírez

TUTOR
Dr. Roberto Vázquez Meza, Instituto de Astronomía - UNAM

Ensenada, Baja California, Marzo 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

Agradezco al *Instituto de Astronomía* de la *UNAM* y al programa de becas de *CONACYT* por permitirme estudiar esta increíble maestría y por los apoyos económicos que me permitieron acudir a congresos internacionales y crecer mucho personal y profesionalmente. Gracias a mis compañeros que siempre estuvieron dispuestos a ayudar cuando necesitaba.

Quisiera agradecerle en especial al Dr. *Roberto Vázquez* por haber confiado en mí desde el primer momento y haberme apoyado enteramente con la realización de este proyecto de investigación. También quiero agradecer al *M.C. Marco Antonio Gómez Muñoz* su apoyo en los problemas técnicos y a la *Dra. Patricia Guadalupe Nuñez Pérez* por las discusiones sobre los aspectos biológicos del trabajo.

Agradezco el apoyo de los proyectos *CONACYT 128563 Y UNAM-DGAPA-PAPIME PE109915*, así como a la *Agencia Espacial Mexicana*.

Finalmente, les doy las gracias a mis padres, *David y Sandra*, a mi hermano *Joaquín* que me apoyaron en todo momento.

Resumen

En este trabajo se determinó la habitabilidad en la Región Galactocéntrica Solar de estrellas F, G y K utilizando el método de Monte Carlo, guiado por los factores de la Ecuación de Drake para la consideración de los parámetros astrofísicos y biológicos necesarios para generar y mantener vida en la superficie de un planeta. Se utilizó un modelo simple, que considera la distribución estelar en la Galaxia de Jurić et al. (2008), la función inicial de masa de Kroupa (2001) y la historia de formación estelar de Snaith et al. (2015), para reproducir la distribución de las propiedades estelares de la Región Galactocéntrica Solar, la cual definimos como una región anular en el plano galáctico, de 1 kpc de altura y entre 7 y 9 kpc del centro de la Galaxia. Utilizando datos actualizados sobre exoplanetas confirmados y algunos candidatos, obtenidos por la misión Kepler, se asignaron planetas a algunas de las estrellas generadas. Los datos de exoplanetas fueron corregidos por sesgos observacionales utilizando una gráfica de completés para los radios y periodos de los planetas y por corrección geométrica. Posteriormente se siguió la evolución de la vida en aquellos planetas que cumplían con las condiciones de habitabilidad: ser un planeta dentro de la Zona Habitable Circunestelar y con un radio de $1.0 - 1.5 R_{\oplus}$. Se utilizó un modelo evolutivo imponiendo condiciones evolutivas “difíciles” para la vida, en el cual para que surgiera una civilización tecnológica se debían superar una serie de eventos de “reinicio”. Los planetas fueron clasificados dependiendo del estado evolutivo en el que se encuentra la vida en la actualidad en cada planeta. Se estima una ocurrencia de planetas tipo-Tierra en la Zona Habitable de su estrella del 28% en estrellas F, G y K de la RGS. De los resultados obtenidos se predice que el 88% de los planetas tipo-Tierra en la Zona Habitable Circunestelar están habitados por vida primitiva y 4 planetas por vida tecnológica, las cuales tienen una probabilidad menor al 1% de ser detectadas con nuestros programas de detección actuales. También se calcularon los números para el campo de visión de Kepler, y se predice que debería haber alrededor de 40,000 planetas tipo-Tierra

en la Zona Habitable Circunestelar de sus respectivas estrellas.

Índice general

Agradecimientos	2
Resumen	3
1. Introducción	7
1.1. La Ecuación de Drake	9
2. El modelo galáctico	11
2.1. La función inicial de masa y la historia de formación estelar	12
2.2. Sistemas planetarios	14
3. Criterios de habitabilidad planetaria	18
3.1. Estimación de la Zona Habitable Circunestelar	18
3.2. Propiedades físicas de las estrellas	21
3.3. Masa del planeta	22
4. Vida e inteligencia	24
4.1. Vida extraterrestre	25
4.2. Inteligencia y evolución convergente	26
4.3. Tiempo de vida de una civilización	28
5. Método	30
5.1. El Método de Monte Carlo	30
5.2. Generación de estrellas	31
5.3. Generación y completés de planetas	32
5.4. El algoritmo de la vida	34

5.5. Detectabilidad de la señal	36
6. Resultados y Discusión	40
6.1. Resultados generales	40
6.2. Comparación con el campo de Kepler	44
7. Conclusiones	45
Referencias	47
Apéndices	55
A. Código	56
B. Diagrama de flujo	71

Capítulo 1

Introducción

Saber si estamos solos en el Universo es una cuestión que a muchas personas les inquieta o al menos les causa interés. El peso de esta pregunta no recae principalmente en encontrar vida simple en otro planeta, sino en ir un paso mas allá y saber si hay o hubo alguna otra civilización tecnológica fuera de la Tierra.

Entender cómo se forman los sistemas planetarios y las condiciones de habitabilidad de un planeta, así como el surgimiento, evolución y prevalencia de la vida, es un paso necesario para poder hablar sobre la probabilidad de encontrar alguna otra civilización.

Hasta ahora los programas de búsqueda de vida inteligente extraterrestre (SETI, por sus siglas en inglés, *Search for Extraterrestrial Intelligence*) han sido muy controversiales, y todos los intentos para encontrar una civilización inteligente fuera de nuestro planeta han fallado. Esto justifica realizar estudios teóricos que nos permitan evaluar la factibilidad de la existencia de vida fuera de nuestro planeta, y poder determinar si es o no conveniente seguir invirtiendo recursos en esta área de investigación. Esta es la motivación de este trabajo.

Es importante definir algunos términos que serán utilizados continuamente durante este trabajo. Estos son:

Región Galactocéntrica Solar (RGS): Región anular entre 7 y 9 kpc del centro galáctico en el disco de la Galaxia y con una altura de 500 pc por arriba y por debajo del plano galáctico (ver Cap. 2).

Planeta tipo-Tierra: Llamaremos planetas tipo-Tierra a aquellos que tengan un radio entre 1.0 y 1.5 R_{\oplus} (phl.upr.edu, diciembre 2015). Se considera que son rocosos ya que los modelos de interiores planetarios indican que aquellos con radios en este intervalo pueden

tener esta composición (Rogers 2015). Un planeta tipo-Tierra no es necesariamente un planeta habitable.

Vida primitiva: Utilizaremos este término para referirnos a cualquier conjunto de seres vivos que, como especie, sea incapaz de construir tecnología para enviar o recibir señales interestelares. En el caso de la Tierra, esta definición incluiría a cualquier forma de vida excepto al ser humano.

Civilización tecnológica: Una civilización tecnológica o vida tecnológica es aquella capaz de mandar y recibir señales interestelares. Estas civilizaciones pasan primeramente por una etapa de “vulnerabilidad”, la cual, si es superada, la civilización se convierte en “avanzada”.

Civilización tecnológica “vulnerable”: Es aquella civilización que se encuentra en una etapa inestable, en la que puede desaparecer debido a factores producidos por la misma civilización o externos, por ejemplo: guerras nucleares, inteligencia artificial, calentamiento global, pandemias naturales, falta de recursos, impacto de asteroides, catástrofes climáticas, entre otras (Cotton-Barrat et al. 2016). La humanidad se encuentra actualmente dentro de esta definición.

Civilización tecnológica “avanzada”: Es aquella civilización que ha superado la etapa de “vulnerabilidad” y sobrevivirá por tiempo indefinido. Este tipo de civilización podría, en teoría, realizar viajes interestelares tripulados, colonizar otros sistemas planetarios, evitar catástrofes naturales, entre otras habilidades que le ayudarían a perdurar por siempre.

Ha habido una serie de trabajos teóricos que estudian cual sería la probabilidad de que exista vida tecnológica en otros planetas. Forgan (2009) utilizó por primera vez el método de Monte Carlo para calcular el número de planetas habitados y clasificarlos dependiendo el estado evolutivo en el que se encuentra la vida en ellos, desde vida primitiva a civilizaciones tecnológicas, para tres diferentes hipótesis. En ese trabajo, Forgan utilizó los datos de exoplanetas confirmados disponibles hasta ese momento, 242 planetas, para construir sus distribuciones. En sus datos no se encontraba ningún planeta tipo-Tierra ($1.0 - 1.5 R_{\oplus}$). Debido a la ausencia de planetas tipo-Tierra en sus muestras, el autor supuso que la vida evoluciona en satélites alrededor de los planetas simulados. Sus resultados muestran que entre el 1-10% de los planetas en los que surge la vida se produce una civilización tecnológica. En un trabajo subsecuente, Forgan y Rice (2010) utilizaron el mismo método pero reemplazaron los datos empíricos de exoplanetas por relaciones teóricas debido a la falta de datos observacionales de planetas tipo-Tierra.

El problema al que se enfrentaron estos dos estudios es otra motivación para la realización de este trabajo, ya que la cantidad de exoplanetas confirmados ha aumentado de 242 en aquel entonces a más de 2000 (exoplanetarchive.ipac.caltech.edu, diciembre 2017), por lo cual podemos hacer una comparación de la tendencia relativa de los resultados teóricos con el refinamiento de las distribuciones empíricas.

1.1. La Ecuación de Drake

En 1961 Frank Drake propuso una expresión algebraica simple que, de conocerse todos sus factores, daría como resultado el número de civilizaciones extraterrestres detectables en la Galaxia (Drake 1994). Esta ecuación puede ser utilizada para otras galaxias o para regiones específicas de nuestra Galaxia, siempre y cuando los valores de los factores de la ecuación reproduzcan correctamente las características de la región considerada. Nosotros modificamos la ecuación para que represente mejor nuestras consideraciones para el cálculo del número de civilizaciones tecnológicas en la RGS, expresando la ecuación como una proporcionalidad de los términos de la ecuación original, ya que el resultado de las probables civilizaciones tiene dependencia temporal y espacial, por lo cual la ecuación queda expresada de la siguiente forma:

$$N \propto N_* f_p n_p f_e f_l f_c L \quad (1.1)$$

donde:

N = el número de civilizaciones tecnológicas en la RGS.

N_* = el número de estrellas en la RGS.

f_p = la fracción de estrellas que tienen sistemas planetarios.

n_p = el número de planetas en cada sistema planetario.

f_e = la fracción de planetas que son habitables.

f_l = la fracción de los planetas habitables donde la vida se origina.

f_c = la fracción de planetas que albergan vida tecnológica.

L = el tiempo de vida promedio de una civilización tecnológica.

Esta ecuación, más que dar una respuesta definitiva, es una guía sobre los parámetros que debemos considerar si queremos investigar sobre la posible existencia de vida tecnológica en otro planeta. Por lo tanto, nuestros resultados no provienen de la ecuación en sí, sino de un algoritmo que considera todos los factores involucrados en dicha ecuación.

En años recientes, los parámetros astronómicos de la ecuación de Drake se han ido delimitando mejor debido a que ha habido avances observacionales, principalmente el descubrimiento de una gran cantidad de exoplanetas con los cuales se pueden construir funciones de distribución estadística de los diferentes parámetros involucrados. Hoy en día se tiene conocimiento de la existencia de exoplanetas orbitando estrellas tipo-Sol en nuestra Galaxia (Boruki et al. 2012, Torres et al. 2015), exoplanetas tipo-Tierra orbitando estrellas de baja masa dentro de la Zona Habitable (Quintana et al. 2014, Borucki et al. 2013), y más de 2000 exoplanetas confirmados (exoplanetarchive.ipac.caltech.edu, diciembre 2017). Con estos nuevos descubrimientos y el mejoramiento de los modelos numéricos de estudios pasados, damos una estimación del número de planetas potencialmente habitables en la RGS, así como de la probabilidad de existencia de vida extraterrestre en esta zona, desde vida simple hasta vida tecnológica.

Capítulo 2

El modelo galáctico

Esta sección trata de las consideraciones que se hicieron y los datos utilizados para simular la distribución espacial, edad y masa de las estrellas en la RGS. Esto es muy importante, debido a que estas propiedades delimitarán la capacidad de una estrella para albergar planetas en los cuales se puede generar vida, la cual puede seguir existiendo hasta el presente.

El primer factor en nuestra ecuación de Drake es el número de estrellas, N_* . Para conocer la cantidad de estrellas, primero tenemos que delimitar el volumen de la Galaxia que consideraremos. Definiremos la región de interés (RGS) a partir de la definición de vecindario solar.

El vecindario solar es el espacio asociado con un cilindro de 1 kpc de radio centrado en el Sol y perpendicular al disco de la Galaxia (Carigi 2011). Trabajar dentro del vecindario solar es apropiado debido a que las distribuciones observacionales utilizadas en este trabajo (e.g. datos de Kepler y función inicial de masa) fueron obtenidas de objetos dentro de este volumen. Suponiendo simetría azimutal podemos extender esta región para cubrir una región anular alrededor de la Galaxia. Haciendo esto obtendremos una región anular entre 7 y 9 kpc desde el centro de la Galaxia; a esta zona la llamaremos Región Galactocéntrica Solar (RGS).

Solamente se considerarán estrellas tipo-Sol entre 0.5 y 1.4 M_{\odot} (F, G y K) debido a que es al tipo de estrellas para el cual podremos completar los datos de los exoplanetas, ya que la gran mayoría de los exoplanetas confirmados por Kepler hasta la fecha de escritura de este trabajo se encuentra orbitando alrededor de este tipo de estrellas (exoplanetarchive.ipac.caltech.edu, diciembre 2017).

Así mismo solamente se consideran sistemas estelares simples, apesar de que existen estudios sobre la Zona Habitable en sistemas binarios (e.j. Jaime et al. 2014). En el estudio de Jaime et al. (2014) se propone una formulación similar a la hecha por Kopparapu et al. (2013), en el cual además de las consideraciones de flujo radiativo, se toma en cuenta la estabilidad de las órbitas de los planetas. El no considerar estrellas binarias en este trabajo es debido a la poca cantidad de exoplanetas encontrados en este tipo de sistemas, por lo cual es difícil hacer estadística adecuada.

Ahora que está definido el volumen galáctico de interés, necesitamos conocer la distribución de frecuencia de la masa de las estrellas al nacer (función inicial de masa) y la cantidad de estrellas que nacen en cada intervalo de tiempo durante la existencia de la Galaxia (historia de formación estelar).

2.1. La función inicial de masa y la historia de formación estelar

La función inicial de masa (FIM) nos dice el número de estrellas que se generan en cada intervalo de masa estelar. La FIM puede ser inferida de la función de luminosidad actual utilizando una relación de masa-luminosidad junto con un modelo de la tasa de formación estelar y convolucionando el tiempo de vida de las estrellas. Existen diferentes modelos de la FIM (e.g. Miller y Scalo 1979; Kroupa 2001; Chabrier 2003; estas tres funciones están graficadas en la Figura 2.1). En este trabajo utilizamos la FIM de Kroupa (2001).

Para reproducir la distribución de la masa de las estrellas en la RGS, utilizamos la FIM de Kroupa (2001) en su forma de ley de potencias (ver Fig. 2.1):

$$\xi(m) = m_i^\alpha \quad (2.1)$$

donde

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= +1.3 \pm 0.5, & 0.1 \leq m/M_\odot < 0.5 \\ \alpha_1 &= +2.3 \pm 0.3, & 0.5 \leq m/M_\odot < 1.0 \\ \alpha_2 &= +2.3 \pm 0.7, & 1.0 \leq m/M_\odot \end{aligned} \quad (2.2)$$

y $\xi(m)dm$ es el número de estrellas en el intervalo de masa m a $m + dm$. La FIM se normalizó

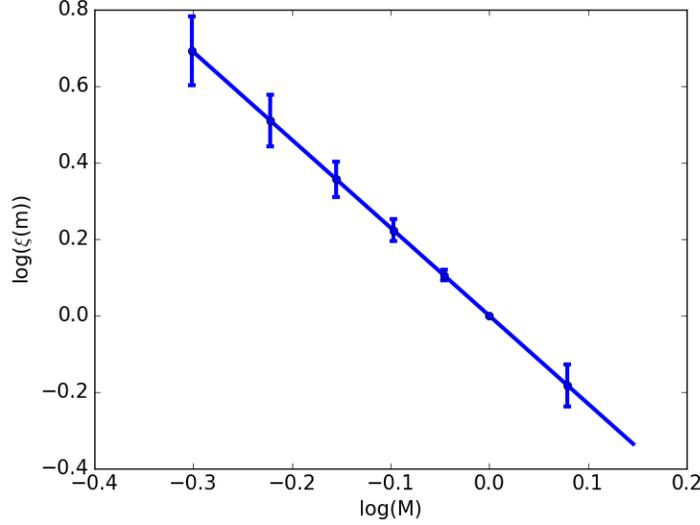


Figura 2.1: Función inicial de masa de Kroupa (2001) en el rango de masas de interés.

basada en una masa estelar total del disco de la Galaxia de $5.17 \times 10^{10} M_{\odot}$ estimada por Licquia y Newman (2015). El número total de estrellas en el disco se calculó integrando la ecuación 2.1 sobre un rango de masas estelares de 0.1 a $100 M_{\odot}$, llevando a un total de 5.94×10^{10} estrellas. La distribución espacial de las estrellas no es uniforme, por lo tanto es necesario calcular el número de estrellas que se encuentran en la RGS utilizando una distribución de densidad de número de estrellas. Utilizamos la distribución de Jurić et al. (2008), la cual nos da la distribución de estrellas arriba del plano medio y radialmente del centro de la Galaxia:

$$\rho_D(R, Z) = \rho_D(R, Z; L_1, H_1) + f \rho_D(R, Z; L_2, H_2) \quad (2.3)$$

donde

$$\rho_D(R, Z; L, H) = \rho_D(R_{\odot}, 0) e^{R_{\odot}/L} \times e^{(-\frac{R}{L} - \frac{Z+Z_{\odot}}{H})} \quad (2.4)$$

La cantidad ρ_D es el número de estrellas por unidad de volumen (pc^3). Se utilizaron los valores $H_1 = 300 \text{ pc}$, $L_1 = 2600 \text{ pc}$, $H_2 = 900 \text{ pc}$, $L_2 = 3600 \text{ pc}$ y $f = 0.12$, correspondientes a la escala de altura y longitud del disco delgado, la escala de altura y longitud del disco grueso y a la normalización de la densidad entre el disco delgado y el grueso. La variable Z es la altura arriba del plano medio y R es la distancia radial desde el centro de la Galaxia. La cantidad $\rho_D(R_{\odot}, 0)$ es la constante de normalización que se obtiene al integrar la ec. 2.3 sobre

el volumen completo del disco galáctico, con $2.5 \text{ kpc} \leq R \leq 15 \text{ kpc}$ y dos veces $0 \leq z \leq 500 \text{ pc}$ y utilizando el número total de estrellas calculado anteriormente con la FIM de Kroupa.

Se integró la función para la RGS completa entre 7 y 9 kpc, lo que llevó a un total de 5.932×10^9 estrellas en la RGS. Por último, calculamos la cantidad de esas estrellas que son F, G y K utilizando la FIM, lo cual llevó a tener 1,867 millones de estrellas. Debido a que solamente consideraremos sistemas estelares, el número total de estrellas a considerar será una fracción de esta cantidad. Raghavan et al. (2010) realizaron un estudio de completitud de los porcentajes de sistemas estelares simples, dobles, triples y de mayor orden observados en estrellas tipo-Sol del vecindario solar y su análisis sugiere que el 54% de las estrellas tipo-Sol en el vecindario solar son sistemas simples. Aplicando este porcentaje obtenemos aproximadamente 1,000 millones de estrellas, que equivalen a una masa estelar de $7.21 \times 10^8 M_{\odot}$ al utilizar la FIM de Kroupa.

La historia de formación estelar (HFE) de la Galaxia fue tomada del trabajo realizado por Snaith et al. (2015), por lo cual se utiliza una edad de la Galaxia de 14 Gyr (Fig. 2.2). Esta historia de formación estelar es ligeramente descendente en el tiempo. Existen otras HFEs reportadas en la literatura (Rocha-Pinto et al., 2000; Aumer y Binney, 2009; Fu et al. 2009), las cuales no modelamos en este estudio, ya la HFE utilizada aquí es de las más recientes y bastante citada. Esta distribución describe cuando las estrellas se forman en nuestro modelo de la RGS.

Con las distribuciones vistas en este capítulo ahora podemos saber cuantas estrellas de cada masa debemos generar y en que momento de la historia de la Galaxia nacieron. Lo que procede es conocer como se generarán y asignarán planetas a estas estrellas.

2.2. Sistemas planetarios

En febrero del 2014, la misión Kepler de la NASA anunció el mayor descubrimiento de exoplanetas, alrededor de 700, y desde entonces el número de exoplanetas confirmados se incrementa rápidamente, siendo ~ 2300 confirmados y más de 2000 candidatos al tiempo de escribir este trabajo (exoplanetarchive.ipac.caltech.edu, diciembre 2017), ver Figura 2.3. En este trabajo utilizamos datos de 1952 exoplanetas confirmados y 1100 candidatos del catálogo de Kepler para construir la distribución de radios y periodos orbitales de los planetas. El último estudio similar, hecho por Forgan (2009), tenía información de sólo 300 exoplanetas,

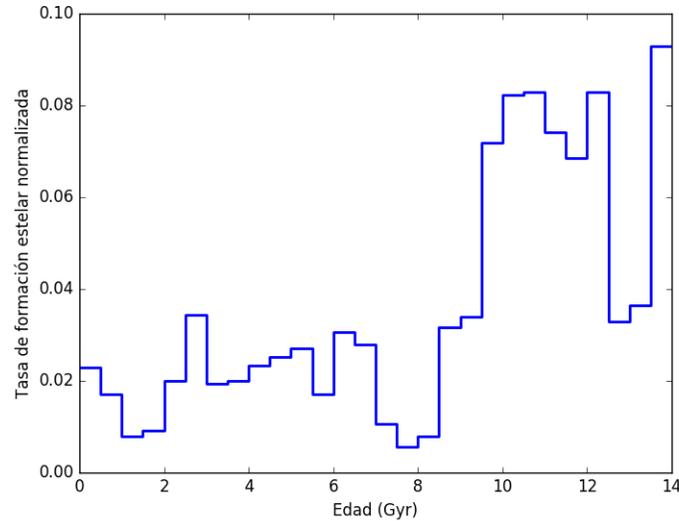


Figura 2.2: Historia de formación estelar de Snaith et al. (2015)

ninguno de ellos planetas tipo-Tierra. Las nuevas determinaciones de exoplanetas nos han permitido construir funciones de distribución realistas. Esto no evita que haya sesgos observacionales, por lo cual es importante realizar algunas correcciones para obtener resultados más significativos. Utilizamos datos de candidatos a exoplanetas debido a que se necesitaba una mayor cantidad de datos para realizar un mejor estudio de completés de los exoplanetas. Fressin et al. (2013) estableció que a una señal a ruido de $\text{SNR} > 12$ la tasa de falsos positivos en los candidatos a exoplanetas era muy bajo, por lo cual utilizamos está condición a la hora de escoger los candidatos a utilizar en este trabajo.

La misión Kepler lanzada en el 2009 tuvo como objetivo buscar planetas que transiten sus estrellas. La misión estuvo monitoreando alrededor de 100,000 estrellas durante 4 años (Borucki, 2016). Debido a las características del instrumento y su método de detección, los datos obtenidos tienen sesgos observacionales que se tienen que tomar en cuenta.

Uno de los métodos que usa Kepler para confirmar la detección de un planeta consiste en observar 3 tránsitos de un exoplaneta. Ya que la misión tuvo una duración de 4 años, planetas con periodos orbitales mayores a 1 año son difíciles de detectar por los algoritmos de la misión y para estrellas tipo-Sol, la Zona Habitable puede comprender periodos orbitales de planetas en este rango (Kasting et al. 1993).

Debido a que la misión Kepler detecta planetas por tránsitos, solamente los planetas que

cruzan frente a la estrella respecto a nuestra línea de visión podrán ser detectados. Cuando nuestra línea de visión es perpendicular al plano de la órbita tenemos el caso extremo de no-detección. Hay que considerar que el ángulo de inclinación de órbita con la línea de visión es un factor importante (Petigura et al. 2013). Debido a esto, es necesario hacer una corrección por la probabilidad geométrica de tránsito. La probabilidad geométrica de que un planeta transite su estrella es (Winn, 2010):

$$p = \frac{R_{\star}}{a} \frac{1 + e \sin w}{1 - e^2} \quad (2.5)$$

donde a es el semieje mayor, e es la excentricidad de la órbita y w es el argumento del periastro. Debido a que la gran mayoría de las excentricidades de las órbitas de los planetas de Kepler son desconocidas, tomaremos el límite de $e = 0$ (órbita circular) lo cual resulta en una probabilidad de tránsito:

$$p = \frac{R_{\star}}{a} \quad (2.6)$$

Además, por el método de tránsitos es más fácil detectar planetas entre mayor es su radio o entre menor sea el radio de la estrella que lo alberga. Esto debido a que el decremento en el flujo fotométrico observado de la estrella es proporcional al cuadrado del radio del planeta e inversamente proporcional al cuadrado del radio de la estrella.

Silburt et al. (2015) realizó un estudio de completez de los datos de Kepler hasta febrerero del 2014, de planetas con periodos entre 6.3 y 400 días y radios entre 0.5 y 16 R_{\oplus} . Sus resultados se muestran en la Fig. 2.4. En este trabajo solo consideramos planetas con radios entre 1.0 y 16 R_{\oplus} , ya que la completés en radios menores no está definida para períodos mayores a 100 días. Esta corrección junto con la corrección geométrica de tránsito, nos dará una distribución más confiable de los exoplanetas. La implementación de estas correcciones por incompletez se verá a detalle en la sección 5.3.

Con esto podemos conocer la distribución de radios y períodos orbitales de los planetas, los cuales serán asignados a algunas de las estrellas generadas. En el siguiente capítulo se analizarán los criterios necesarios para que un planeta sea habitable a partir de sus propiedades y las de su estrella.

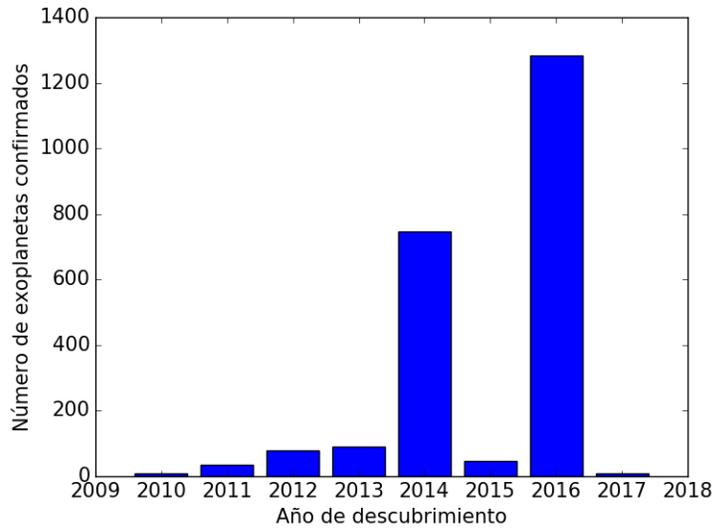


Figura 2.3: Número de exoplanetas confirmados detectados por año por la misión Kepler. Datos de la Enciclopedia de Planetas Extrasolares (exoplanet.eu, diciembre del 2017).

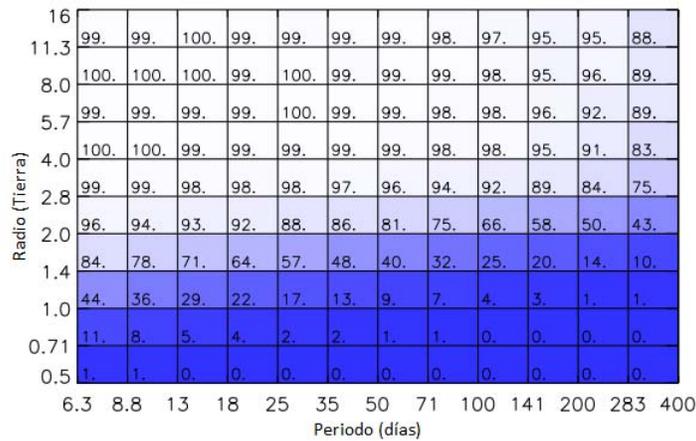


Figura 2.4: Valores de completéz obtenidos por Silburt et al. (2015) para los datos de Kepler del catálogo Solar76k. Los valores indican el porcentaje de completéz de cada bin.

Capítulo 3

Criterios de habitabilidad planetaria

La habitabilidad planetaria define la capacidad de un planeta de desarrollar y mantener vida. A pesar de que hay estudios sobre habitabilidad de exolunas (Heller et al. 2014), no las tomaremos en cuenta debido a que las condiciones para que surja y evolucione vida en esos sistemas no están bien entendidas, mientras que con los planetas tenemos el ejemplo de la Tierra. La Tierra presenta dos singularidades: vida (basada en el carbono) y agua líquida abundante y estable. Hay tres características principales que se deben cumplir para tener agua líquida: que el planeta este dentro de la zona habitable circunestelar, que el planeta tenga una atmósfera y que la masa del planeta sea la adecuada para poder retener dicha atmósfera. Dado que el carbono y el agua son abundantes en los lugares donde se forman los planetas este concepto tiene aplicabilidad más allá del sistema solar.

3.1. Estimación de la Zona Habitable Circunestelar

La zona habitable circunestelar (ZHC) está definida como la región dentro de un sistema planetario donde un planeta rocoso (planeta tipo-Tierra), con atmósfera, puede mantener agua líquida en su superficie (Kasting et al. 1993). Primero hay que entender lo que es el efecto invernadero para definir los límites de la ZHC.

El efecto invernadero es un proceso en el cual la radiación térmica que es emitida por la superficie de un planeta es absorbida por gases atmosféricos y es reirradiada de vuelta a la superficie y a la atmósfera inferior provocando un incremento en la temperatura superficial. En el caso de la Tierra, la atmósfera es transparente para la radiación solar en el rango visible,

lo cual permite que llegue a la superficie la mayor parte de esta radiación la cual calienta la superficie planetaria. Esta última emite radiación infrarroja, para la cual la atmósfera es opaca debido a la presencia de gases de efecto invernadero tales como el CO_2 , el O_3 y el CH_4 . Sin embargo, la Tierra se encuentra en un balance energético, es decir, el flujo de energía entrante al planeta es el mismo que sale de él, por lo cual la temperatura de la Tierra se mantiene en un rango estrecho que permite la vida.

La ZHC tiene dos fronteras, el borde interno y el externo. Kasting et al. (2014) definen ambos límites como se explica a continuación.

El límite interior está definido como la distancia a la que los océanos se evaporarían por completo (considerando la cantidad total de agua en los océanos de la Tierra). Cuando el flujo de energía entrante al planeta es mayor al flujo saliente, la temperatura superficial del planeta comienza a incrementarse, esto provocaría que en un planeta con un océano el agua se evapore. A este proceso se le conoce como efecto invernadero desbocado. El agua de la atmósfera se perdería posteriormente debido a la fotodisociación del agua y al escape del hidrógeno al espacio.

Al límite exterior se le llama de “máximo invernadero”. Este límite supone que los planetas tipo-Tierra son volcánicamente activos y producen grandes cantidades de CO_2 . El CO_2 es un gas invernadero y es parte responsable del calentamiento global en la Tierra (Falkowski et al. 2000), así como posiblemente lo fue en Marte (e.g. Pollack et al. 1987, Tian et al. 2010). Sin embargo, para planetas que reciben poca insolación, el CO_2 se acumula y se comienza a condensar en la atmósfera debido a las bajas temperaturas (Walker et al. 1981).

La estimación de los límites de la ZHC que utilizamos está basada en un modelo 1D radiativo-convectivo, sin nubes, el cual fue mejorado por Kopparapu et al. (2013). Estos autores presentaron una ecuación paramétrica para calcular la relación entre los flujos estelares (S_{eff}) que alcanzan la parte superior de la atmósfera de un planeta tipo-Tierra, de la siguiente forma:

$$S_{\text{eff}} = S_{\text{eff}\odot} + aT_{\star} + bT_{\star}^2 + cT_{\star}^3 + dT_{\star}^4 \quad (3.1)$$

donde $T_{\star} = T_{\text{eff}} - 5780 \text{ K}$, siendo T_{eff} la temperatura efectiva de la estrella, y los coeficientes a, b, c y d se muestran en la Tabla 3.1 para diferentes límites de habitabilidad. Para el propósito de este estudio, utilizamos los límites conservadores de la ZH (escape invernadero y máximo invernadero)(ver Fig. 3.1). Las distancias correspondientes a los bordes de la ZH

se calcularon usando la relación dada por Kopparapu et al. (2013):

$$d = \left(\frac{L/L_{\odot}}{S_{\text{eff}}} \right)^{0.5} \text{ AU} \quad (3.2)$$

Con este modelo, la ZHC para nuestro sistema solar está entre 0.97-1.70 AU.

Tabla 3.1: Coeficientes de la ecuación 3.1 para calcular los flujos estelares de habitabilidad (Kopparapu et al. 2013).

Constante	Escape invernadero	Máximo invernadero
$S_{\text{eff}\odot}$	1.107	0.356
a	1.332×10^{-4}	6.171×10^{-5}
b	1.580×10^{-8}	1.698×10^{-9}
c	-8.308×10^{-12}	-3.198×10^{-12}
d	-1.931×10^{-15}	-5.575×10^{-16}

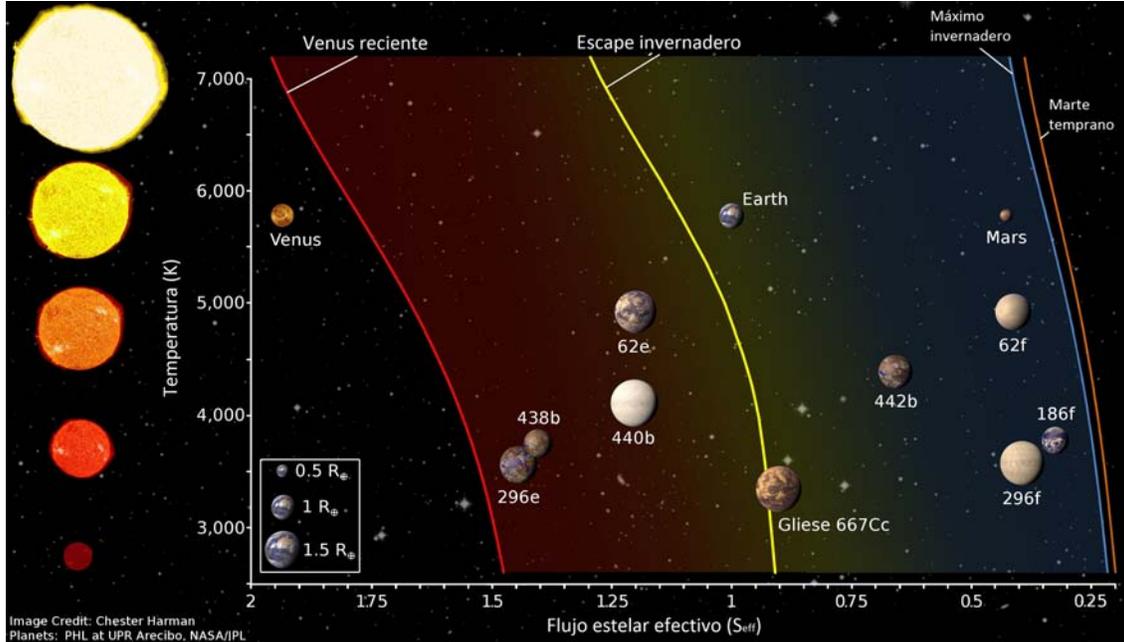


Figura 3.1: Zona habitable calculada por Kopparapu et al. (2013), donde las líneas amarilla y azul son los límites conservadores utilizados en este trabajo.

3.2. Propiedades físicas de las estrellas

Una condición para la habitabilidad es el tipo de estrella alrededor de la cual se encuentra un planeta, ya que puede afectar el surgimiento y permanencia de la vida en él, aunque sea potencialmente habitable.

Las estrellas de secuencia principal están clasificadas en función de su temperatura, o clase espectral. Esta clasificación es, de las más calientes a las más frías, O, B, A, F, G, K, M. La temperatura superficial de las estrellas más calientes, estrellas O, es de alrededor de 35,000 Kelvin, y de las más frías, estrellas M, menor a 3,000 K.

Basados en el ejemplo de la Tierra, para que la vida evolucione a una civilización tecnológica se requiere una cantidad considerable de tiempo (~ 3800 millones de años), por lo cual es deseable enfocarse en estudiar estrellas que se mantengan estables del orden de este tiempo o mayor. La fase más larga y estable de una estrella es cuando se encuentra en la secuencia principal. Esta etapa corresponde alrededor del 90 % del tiempo de vida de la estrella.

El Sol por ejemplo, es una estrella de masa intermedia, nació hace aproximadamente 4.5 Gyr y vivirá alrededor de otros 5.5 Gyr más (Schroder y Smith 2008). La vida surgió en la Tierra hace 3.8 Gyr (Mojzsis et al. 1996) y la vida tecnológica, capaz de mandar y recibir señales al espacio, surgió hace menos de 100 años con la invención de los radiotelescopios. Por esta razón temporal, la masa de la estrella es un factor importante en la búsqueda de vida, y más en la búsqueda de vida extraterrestre inteligente.

Entre más masiva es una estrella, el tiempo de vida en secuencia principal es menor. Estrellas con $M > 4M_{\odot}$ tienen un tiempo de vida en secuencia principal ($t_{ms} < 300$ millones de años) menor al tiempo que le tomó a la vida surgir en la Tierra, por lo cual, si pensamos que la vida en la Tierra muestra tiempos típicos, la probabilidad de encontrar vida tecnológica en un sistema planetario de una estrella masiva será probablemente muy baja.

Además, las estrellas más masivas en secuencia principal radían mayormente en longitudes de onda ultravioletas (UV). Así que el planeta debería tener una atmósfera opaca a la radiación UV o la vida estar de alguna forma adaptada a estas condiciones, pero la vida como la conocemos en la Tierra no podría sobrevivir con tales cantidades de radiación UV ya que esta radiación puede destruir las paredes celulares de los seres vivos y dañar el material genético. Afortunadamente, las estrellas masivas son las menos comunes en la galaxia, las estrellas de baja masa y masa intermedia sobrepasan por mucho el número de estrellas

masivas.

Por otro lado, las estrellas más frías en la secuencia principal son las estrellas M (0.08-0.45 M_{\odot} , Habets y Heintze 1981), y también son las más numerosas en nuestra Galaxia. Debido a que este tipo de estrellas son menos luminosas, la zona habitable se encuentra muy cerca de la estrella. Esto puede llegar a ser un problema, ya que debido a esta cercanía el planeta puede moverse en co-rotación, es decir, cuando el periodo de rotación del planeta es el mismo que su período orbital, tal como la Luna en relación a la Tierra. Esto provocará que una cara del planeta siempre este dando hacia la estrella, por lo cual ese lado se sobrecalentaría mientras que el lado opuesto sería muy frío. Sin embargo, se han propuesto mecanismos de redistribución de calor que podría estabilizar el clima en ciertas regiones y hacerlas aptas para la vida (Kite et al. 2011). También hay efectos de variabilidad que podrían afectar la habitabilidad de planetas alrededor de estas estrellas (e.g. Khodachenko et al. 2007).

Cabe recordar que en este trabajo sólo se utilizan estrellas F, G y K debido, principalmente, a que es donde hay suficientes datos de exoplanetas confirmados de la misión Kepler.

3.3. Masa del planeta

Para un planeta, un factor importante para la retención de agua líquida, además de la distancia a su estrella, es la presión atmosférica, para lo cual se requiere la existencia de una atmósfera. En el caso de la Tierra la actividad volcánica es fundamental para formar y reciclar la atmósfera. Si un planeta es muy poco masivo, no podrá retener una atmósfera masiva ni agua líquida en su superficie, ya que la velocidad de la mayoría de las moléculas sería mayor que la velocidad de escape del planeta, por lo cual la atmósfera se escaparía. Por otro lado, si un planeta es muy masivo, puede retener H y He en su atmósfera, y por lo tanto construir una atmósfera muy masiva (i.e. planeta gaseoso), calentando demasiado la superficie y teniendo presiones muy altas, no aptas para la presencia de agua líquida (Mackwell et al. 2013). Por lo tanto, para saber si un planeta puede albergar vida y saber si es rocoso o gaseoso es importante conocer su masa. Definir cuando un planeta es rocoso o gaseoso es complicado ya que aún no se puede determinar un límite de masa entre los planetas rocosos y sub-Neptunos, si es que existe.

Suponiendo que los planetas rocosos tienen una composición similar a la Tierra, podemos utilizar el radio del planeta en vez de su masa para este estudio.

Rogers (2015) mostró que la mayoría de los planetas con $1.6 R_{\oplus}$ tienen una densidad muy baja para estar formados de sólo Fe y silicatos, y sugieren una definición para planeta tipo-Tierra como aquellos planetas con $R_p < 1.6 R_{\oplus}$. Por lo cual, siendo más conservadores, para fines de este trabajo definiremos a un planeta tipo-Tierra como aquel con un radio entre 1.0 y $1.5 R_{\oplus}$. Esta clasificación está basada únicamente en el tamaño del planeta, pero esto no asegura que el planeta sea un análogo de la Tierra, ya que para eso debemos conocer otras propiedades como, por ejemplo, la densidad y composición del planeta. Conocer y simular todas estas propiedades es complejo y actualmente no hay suficientes datos de estos parámetros para los exoplanetas encontrados, pero podemos hacer una (sobre)estimación haciendo simplificaciones y considerando la definición por su tamaño.

Ahora, conociendo las dos condiciones que tomaremos en cuenta para la habitabilidad de un planeta: que se encuentre en la zona habitable circunestelar y que tenga un radio entre 1.0 y $1.5 R_{\oplus}$, veremos, en el siguiente capítulo, la definición de vida e inteligencia como la conocemos, justificar como puede ser aplicado más ampliamente a otros planetas y como se aplicará a este trabajo.

Capítulo 4

Vida e inteligencia

La definición de vida ha sido largamente debatida sin llegar a ningún consenso general. Un problema al tratar de definir la vida es que los sistemas vivos utilizan compuestos que son abundantes en su entorno ambiental y realizan procesos que no son intrínsecamente diferentes a reacciones que ocurren de manera abiótica. Hasta ahora, no parece existir una única propiedad característica que sea intrínseca y única a la vida (Tsokolov 2009).

Podemos hablar de algunas propiedades extraordinarias de las entidades vivas: la capacidad metabólica y la transferencia de información. La aparición de estas características marcan el tránsito desde la química inorgánica a la bioquímica, de lo inerte a lo vivo.

Estudios recientes (e.g. Baross 2007) han identificado los siguientes atributos compartidos por la vida como la conocemos: (1) Debe explotar el desequilibrio termodinámico del entorno a fin de perpetuar su propio estado de desequilibrio; (2) debe consistir mayormente de conjuntos interactuantes de moléculas unidas covalentes que incluyan una diversidad de átomos adicionales al carbono e hidrógeno (e.g. nitrógeno, oxígeno, fósforo, etc.) que promuevan reactividad química; (3) requiere un solvente líquido que ayude la interacción entre estas moléculas; y (4) emplea un sistema molecular capaz de evolución Darwiniana.

Esta lista implica las siguientes funciones básicas universales: (1) La vida recolecta energía de su entorno y la convierte en formas de energía química que mantiene sus otras funciones; (2) mantiene un “metabolismo”, es decir, una red de reacciones químicas que sintetizan todos los compuestos químicos claves que son requeridos para mantenimiento, crecimiento y auto-replicación; y (3) la vida soporta un sistema multi-componente que es esencial para auto-replicación (von Neumann 1966).

Probablemente el atributo más distintivo para definir a la vida, es la capacidad de auto-replicación generando poblaciones que evolucionan mediante selección natural.

4.1. Vida extraterrestre

Según el astrónomo y escritor Paul Davies (Clark 2000), hay tres principios que deben ser invocados antes de que se pueda creer que podemos encontrar vida fuera de la Tierra: El Principio de Uniformidad de la Naturaleza, el Principio Copernicano y el Principio de Plenitud. Cada uno de estos principios es supuesto implícitamente por la mayoría de los astrónomos y cosmólogos debido a que, sin ellos, el estudio generalizado del Universo sería imposible.

El Principio de Uniformidad de la Naturaleza dice básicamente que las leyes de la naturaleza son las mismas a través del Universo. Este principio está bastante bien sustentado y no es tema de controversia. No importa a donde veamos en el espacio, observamos galaxias y estrellas. Si las leyes de la naturaleza fuera diferentes a través del espacio, esperaríamos observar fenómenos inexplicables o muy distintos a los que conocemos.

El Principio Copernicano postula que la Tierra no ocupa una posición privilegiada en el Universo. Aplicando este principio a la vida, podríamos llegar a decir que tampoco somos privilegiados con el surgimiento de vida. No debería haber ninguna razón para suponer que la vida es exclusiva del planeta Tierra.

El último principio es el de Plenitud. En pocas palabras enuncia que cualquier cosa que sea posible que pase, pasará. Si combinamos el Principio Copernicano con el de Plenitud, se podría hacer la siguiente predicción: teniendo las condiciones correctas en una planeta tipo-Tierra habrá gran probabilidad de que se genere vida en ellos.

Mediante observaciones se ha encontrado una gran variedad de moléculas orgánicas fuera de la Tierra, desde aminoácidos y otros compuestos orgánicos extraídos de material meteorítico (Pizzarello 2007) hasta moléculas prebióticas (e.g. E-Cianometanimina) en el medio interestelar (Sagittarius B2(N)), las cuales son importantes bloques para la construcción del ADN y ARN (Zaleski et al. 2013).

Algunos estudios sugieren que teniendo las condiciones e ingredientes correctos, moléculas como el ARN pueden formarse puramente como un camino en una reacción química (e.g. Patel et al. 2015). Así que suponemos que si todos los criterios de habitabilidad se cumplen, la

probabilidad, P_{life} , de que un planeta albergue vida es 1, habiendo el tiempo necesario. Si este valor fuera diferente, la cantidad de planetas que alberga vida se reduciría proporcionalmente a P_{life} . Por ejemplo, si $P_{\text{life}}=0.5$, el número de planetas con vida se reduciría a la mitad.

4.2. Inteligencia y evolución convergente

La pregunta de cómo la inteligencia evoluciona en diferentes planetas es un factor central en la ecuación de Drake ya que el surgimiento de inteligencia es una suposición necesaria para la búsqueda vida tecnológica extraterrestre.

La definición de inteligencia es un problema el cual no cuenta con el consenso general. Hay algunos investigadores que la relacionan con la habilidad y rapidez de resolver problemas para sobrevivir tanto en ambientes naturales como sociales (Roth y Dicke, 2005). Sin embargo, el cómo medir el nivel de inteligencia es complicado ya que los animales se desarrollan en ambientes con retos diferentes. Una de las habilidades ms citadas para diferenciar la inteligencia humana de la no-humana es el desarrollo del lenguaje (Macphail y Bolhuis, 2001; Pinker 1997; Fitch y Hauser, 2004). Apesar de esto, habilidades que se consideraban únicas de los seres humanos se han encontrado en otras especies de animales, lo que vuelve más compleja la distinciones principales entre las diferentes inteligencias encontradas entre los animales. Estudios recientes nos han permitido ampliar nuestra vision sobre la inteligencia en distintas especies de animales (China 2017).

La búsqueda de inteligencia extraterrestre se ha enfocado en buscar inteligencia tipo-humana, ya que somos la única especie en la Tierra capaz de enviar señales electromagnéticas al espacio. Este es un enfoque muy antropocéntrico y puede llegar a generar la idea de que la inteligencia es algo único del ser humano y que ningún otro ser vivo en nuestro planeta la tiene. A pesar de esto, la inteligencia humana es sólo un resultado de una red interdependiente de inteligencia que necesariamente incluye otras formas de vida en la Tierra. La inteligencia humana no surgió de la nada, sino que es el producto de miles de millones de años de evolución empezando con el primer organismo del planeta.

Charles Darwin estableció que todas las especies descendieron a través del tiempo de un ancestro común y, en su libro *El origen de las especies*, introdujo una teoría científica sobre el mecanismo principal que maneja la evolución biológica: la selección natural (Darwin 1859). Tiempo después, en *El origen del hombre*, Darwin explica cómo los humanos descendemos,

junto a otros animales, de un ancestro común, y que somos parte de una forma no separada del reino animal (Darwin 1871).

A pesar de que estas teorías van en contra de la noción de la superioridad humana y su separación del resto de la naturaleza, persistieron por mucho tiempo ideas antropocéntricas. Por ejemplo en 1904, Alfred Russell Wallace se opuso fuertemente a la idea de inteligencia extraterrestre con el argumento de que el número de pasos necesarios para crear inteligencia tan compleja como la de los humanos es muy improbable (Crowe 2013). Pero argumentos contrarios también se han expresado (e.g. Sagan 1995; de Duve 1998; Conway Morris, 2011). Sin embargo estos debates se centran en una noción antropocéntrica de la inteligencia, dejando poco espacio a considerar la relevancia de las habilidades encontradas en otros animales de este planeta y que son indicios de niveles de inteligencia altos. Para recalcar este punto y ver la importancia de estudiar la inteligencia en otros animales del planeta, es interesante estudiar algo llamado evolución convergente.

Hay muchos estudios que hablan acerca de la inteligencia de monos y simios, en los cuales se muestra el alto nivel cognitivo de éstos, como la capacidad de desarrollar herramientas y el entendimiento de conceptos numéricos, entre otras habilidades (e.g. Tomasello y Call 1997, Itakura y Tanaka 1998). Debido a que los primates tienen la relación evolutiva más cercana a los humanos, no son una buena justificación de que la inteligencia es algo que siempre aparecerá cuando la vida surge en un planeta. Sin embargo, las habilidades cognitivas complejas no son únicas de los primates.

La evolución convergente es el surgimiento de estructuras o características similares en organismos que no comparten un ancestro común con dichas características, es decir, surgieron de manera independiente en diferentes organismos (Reece et al. 2011). Un ejemplo importante de este fenómeno es observado con los córvidos y los primates. Los córvidos, como los primates, utilizan las mismas herramientas cognitivas, tales como: razonamiento casual, flexibilidad, imaginación y prospección. Ambas familias desarrollaron estas cualidades independientemente. Aún más sorprendente es que la estructura de los cerebros de los primates y los córvidos es muy diferente, lo cuál tiene grandes implicaciones debido a que, a pesar de tener estructuras cerebrales muy diferentes a la de los humanos, los córvidos pueden desarrollar habilidades cognitivas complejas (Emery y Clayton 2004).

En el ámbito de la búsqueda de vida tecnológica, esto apoya la factibilidad de la existencia de otra civilización, ya que se observa que el surgimiento de una inteligencia básica es algo

común en la evolución de la vida. Debe de notarse que a pesar de esto, la inteligencia en humanos sumada con nuestras características morfológicas nos permite ser los únicos seres vivos de la Tierra con la capacidad de desarrollar tecnología y comunicarse con el cosmos.

Podemos suponer un valor para la probabilidad de surgimiento de una civilización inteligente, basado en la cantidad de especies en el planeta Tierra. Se estima que en la Tierra hay alrededor de 8.7 millones de especies (Mora et al. 2011), de las cuales sólo una (homo sapiens) se desarrolló como una civilización tecnológica, por lo cual podemos tomar el valor $P_{\text{int}}=1/8,700,000=1.15 \times 10^{-7}$, así mismo se pueden tomar otros valores para P_{int} considerando más especies (p.ej. delfines o cuervos) y analizar como afecta el resultado.

Esta es una suposición muy delicada, pero si no consideramos que el surgimiento de la inteligencia es solamente cuestión de tiempo en la evolución de la vida, no habría ningún parámetro para estimar una incertidumbre. Cualquier factor que reduzca o aumente la probabilidad del surgimiento de la inteligencia afectaría linealmente el número de civilizaciones tecnológicas en el resultado final.

4.3. Tiempo de vida de una civilización

El último término de la ecuación de Drake, L , se refiere al tiempo de vida de las civilizaciones. Una civilización tecnológica puede no durar para siempre. Una civilización puede morir debido a la falta de recursos energéticos para sobrevivir (e.g. agua, comida), sobrepoblación o guerras, entre otros factores. Calculamos la probabilidad de que una civilización tecnológica sobreviva basados en el estudio sobre la historia de las civilizaciones en la Tierra. Examinando algunas de las civilizaciones tempranas, éstas parecen tener un tiempo de vida de alrededor de 1000 años (Blaha 2007), estas civilizaciones y sus tiempos de vida se muestran en el Tabla 4.1.

A pesar de que la desaparición de estas civilizaciones no significó el fin de la humanidad, estamos estudiando el tiempo de vida de las civilizaciones, no el de la especie en sí. El colapso de una civilización antigua no impactaba globalmente a la humanidad, ya que las civilizaciones eran más independientes la una de la otra. Hoy en día, el colapso de una civilización tecnológica o una decisión de unos cuantos países (e.g. comenzar una guerra nuclear), podría crear una catástrofe global. Por lo cual, el colapso de una civilización actual podría significar el fin de la especie humana.

Tabla 4.1: Ejemplo de civilizaciones tempranas y sus tiempos de vida (adaptada de Blaha 2007).

Civilización	Tiempo de vida (años)
Sumerios	1100
Mayas clásicos	1123
Civilización Moche	1150
Civilización Caral	900
Egipcios	934
Nubia del Sur: Reino de Kush	1004
Mauritania y Mali	950
Zimbabue	1000
China: Civilización del Río Amarillo	1083
Japón	846
Anatolia	1500

La probabilidad de que una civilización inteligente sobreviva tiempo suficiente para convertirse en una civilización avanzada fue calculada por nosotros como el promedio de la división del tiempo de vida de cada civilización individual entre el tiempo total de existencia de la vida civilizada en la Tierra, que es de aproximadamente $t_{\text{civ}} = 9000$ años (Kapitza 2010), dando como resultado un 11 % de probabilidad de supervivencia ($P_{\text{adv}}=0.11$).

Capítulo 5

Método

Para nuestras simulaciones realizamos un código en *Python* y, utilizando las funciones de muestro aleatorio de la librería *numpy*, se fueron generando las estrellas, planetas y los diferentes parámetros físicos estelares y planetarios. Con las bases discutidas en los capítulos anteriores, generamos la simulación de la Región Galactocéntrica Solar y seguimos la evolución de la vida en aquellos planetas donde se originó. El procedimiento con el cual se generaron las simulaciones se explicará en los siguientes párrafos. Se realizaron un total de 50 simulaciones de Monte Carlo para obtener la estadística de los resultados.

5.1. El Método de Monte Carlo

El método de Monte Carlo es un método de simulaciones estadísticas. La característica que lo define es el uso de números aleatorios. En general, obtenemos una expresión que nos genera números aleatorios con pesos estadísticos que se ajustan a las distribuciones observacionales o teóricas. Este método es adecuado para resolver problemas donde está involucrado un gran número de parámetros, cuando la complejidad del modelo vuelve impráctica una solución directa, o los elementos involucrados no están bien determinados (Kroese et al. 2014).

Para obtener una realización aleatoria de una función de distribución arbitraria, $f(x)$, primero tenemos que obtener su función de distribución acumulada, $F(x)$, de la siguiente forma:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x')dx'. \quad (5.1)$$

Después, sacamos la inversa de la función para tener a x , con lo cual obtenemos nuestro generador de números aleatorios de la función $f(x)$ como:

$$x_i = F^{-1}[ran()], \quad (5.2)$$

donde $ran()$ será un generador de números aleatorios definido según la distribución utilizada.

El método de Monte Carlo se ha utilizado en el pasado para estudiar la hipótesis sobre la existencia de vida extraterrestre inteligente (Forgan 2009, Forgan y Rice 2010), pero ha tenido limitantes en los datos de entrada utilizados, ya que fueron realizados antes de conocerse los datos sobre exoplanetas, obtenidos por la misión Kepler. En este trabajo se propone expandir el uso del método de Monte Carlo para estudiar la Ecuación de Drake, motivados por los nuevos descubrimientos de exoplanetas.

5.2. Generación de estrellas

La base de este proyecto es determinar la masa de las estrellas mediante el método de Monte Carlo (Sección 1.1). Las 400 millones de estrellas, calculadas en la sección 2.1, son individualmente generadas una por una, por lo cual se necesita una función aleatoria que reproduzca la FIM. Para lograr esto, generamos estrellas individuales utilizando una función generadora extraída de la Ec. 2.1, como:

$$M(X) = \frac{0.81724}{(1.894 - X)^{10/13}} \quad (5.3)$$

donde X es un número aleatorio entre 0 y 1.3974 para cubrir todo el rango de masas entre 0.5 y 1.4 M_{\odot} . Todos los sistemas tendrán una sola estrella, no se consideran sistemas binarios. Una vez determinada la masa, podemos calcular algunas de las propiedades estelares utilizando las relaciones de homología (Hansen et al. 2004):

$$R_{\star} = R_{\odot} \left[\frac{M_{\star}}{M_{\odot}} \right]^{\frac{n-1}{n+3}} \quad (5.4)$$

donde $n = 4$ si el mecanismo de fusión primario es la cadena p-p ($M_{\star} \leq 1.1 M_{\odot}$) y $n = 16$ si el mecanismo de fusión principal es el ciclo CNO ($M_{\star} > 1.1 M_{\odot}$). La luminosidad es calculada

utilizando una relación simple de masa-luminosidad (Salaris y Cassisi 2005):

$$L_{\star} = L_{\odot} \left[\frac{M_{\star}}{M_{\odot}} \right]^3 \cdot 5 \quad (5.5)$$

El tiempo de vida en secuencia principal se puede calcular como el cociente entre la masa de la estrella y la tasa de consumo de esta (luminosidad) como (Hansen et al. 2004):

$$t_{\text{MS}} = t_{\text{MS},\odot} \left[\frac{M_{\star}}{M_{\odot}} \right] \left[\frac{L_{\star}}{L_{\odot}} \right]^{-1} \quad (5.6)$$

Sustituyendo la ec. 5.5 en la ec. 5.6 nos dá que el tiempo de secunecia princial es:

$$t_{\text{MS}} = t_{\text{MS},\odot} \left[\frac{M_{\star}}{M_{\odot}} \right]^{-2.5} \quad (5.7)$$

La temperatura efectiva de la estrella puede ser calculada con:

$$T_{\star} = \left[\frac{L_{\star}}{4\pi R_{\star}^2 \sigma_{SB}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (5.8)$$

Las propiedades de mayor interés son la temperatura y el tiempo de vida en secuencia principal ya que éstas nos darán información acerca de la zona habitable estelar y el tiempo que tendrán los planetas potencialmente habitables para desarrollar vida (ver Fig. 2.5), respectivamente.

Las estrellas fueron generadas cronológicamente en bins de 400 millones de años para reconstruir la historia de formación estelar (HFS) de la Vía Láctea (Snaith et al. 2015; ver Fig. 2.2). Para hacer esto, normalizamos la HFS con respecto al número total de estrellas que generaríamos. Así, cada intervalo temporal de la HFS nos daría la cantidad de estrellas en el bin definido por ese intervalo. De esta manera, le asignamos la fecha de nacimiento a cada estrella, dependiendo en que intervalo se generó.

5.3. Generación y completés de planetas

La probabilidad de que una estrella albergue planetas fue obtenida del campo de Kepler. En este campo se estima que hay aproximadamente 138,611 estrellas de F,G y K que fueron

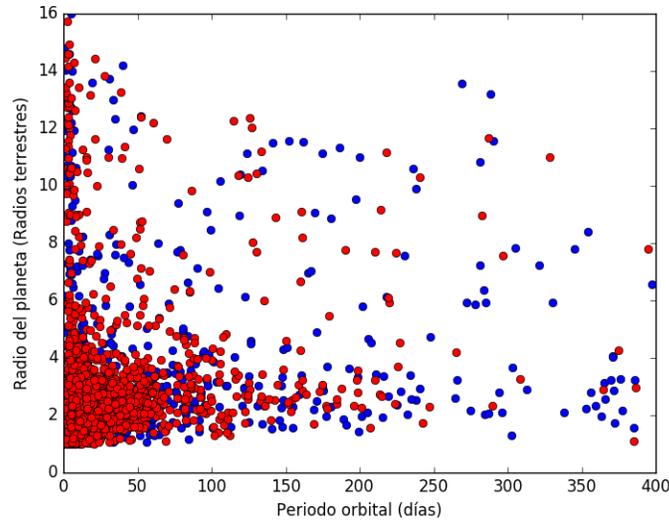


Figura 5.1: Distribución de periodos orbitales contra radios planetarios de los planetas candidatos (puntos azules) y planetas confirmados (puntos rojos) de Kepler.

objetivos prioritarios de la misión Kepler (Batalha et al, 2010). De acuerdo con la información de exoplanetas disponible al momento de escribir este trabajo, hay 1,636 diferentes estrellas tipo-Sol albergando al menos un exoplaneta. Por lo tanto, si dividimos el número de estrellas tipo-Sol que alberga planetas en el campo de Kepler entre el número total de estrellas tipo-Sol en el mismo campo, obtenemos una probabilidad de 1.18 % de que una estrella albergue al menos un planeta.

A las estrellas sólo se les asignará un planeta a cada una. El radio y el periodo orbital de cada planeta fueron obtenidos aleatoriamente de la distribución mostrada en la en la Fig. 5.1, construidas a partir del catálogo de exoplanetas de Kepler.

Los datos de exoplanetas de nuestro trabajo fueron corregidos utilizando por la probabilidad geométrica de tránsito y con el estudio de completéz de la Fig. 2.5. Después de generar el número total de planetas en nuestra simulación, los planetas se ubicaron dentro del mapa de completés de la Fig. 2.5 y se dividió la cantidad de planetas en un bin dado entre la fracción de completés, por ejemplo, si hay 100 planetas en un bin con completés de 50, el número total de planetas en el intervalo sería $100/0.5=200$. Este proceso se hará para cada bin, para obtener la proporción de planetas según su periodo y su radio. Todos los planetas generados por realizar la completés se reasignaron aleatoriamente entre el total de estrellas generadas.

5.4. El algoritmo de la vida

El único lugar en el universo donde sabemos que existe vida es la Tierra. Por lo tanto, es razonable aplicar el principio Copernicano a la vida (Sec. 4.1), y suponer que la vida en la Tierra no es especial, sino que pudo haberse originado de igual forma en cualquier lugar de la Galaxia, si se tienen las condiciones que tuvo la Tierra (Clark 2000). Habiendo dicho esto, tomamos las escalas de tiempo de surgimiento de vida y de la historia de evolución de la Tierra para modelar cómo la vida puede surgir y evolucionar en otros planetas.

Si después de la generación de estrellas y asignación de planetas con sus respectivos parámetros físicos, un planeta se encuentra dentro de la zona habitable y su radio es $R_p \leq 1.5 R_{\oplus}$, entonces entrará al algoritmo de la vida. Suponemos que la vida puede evolucionar hasta convertirse en una civilización tecnológica, siempre y cuando supere una serie de pasos evolutivos y sobreviva posibles eventos de extinción o “reinicio”. A esto se le llama el escenario evolutivo “difícil” (Carter 2008). El algoritmo en el que nos basamos fue desarrollado por Forgan (2009), el cual considera algunos parámetros biológicos clave que dictan la evolución de la vida en un planeta. Para evitar la elección arbitraria de estos parámetros, nos apegamos a los utilizados por Forgan (2009).

Primero, el número de pasos necesarios para que la vida en un planeta surja y evolucione hasta convertirse en una civilización tecnológica, N_{stages} , es muestreado aleatoriamente a partir de una distribución Gaussiana con media de 6 y desviación estándar de 1. Valores que reflejan de los mayores escenarios que la vida pasó en la Tierra: biogénesis, la aparición de las bacterias, la aparición de los eucariontes, combigénesis (reproducción con material genético de dos individuos), la aparición de los metazoos (animales) y el nacimiento de la civilización tecnológica (Carter 2008). Después la vida puede presenciar una serie de eventos de extinción o de “reinicio” (tales como supernovas locales, brotes de rayos gamma, impactos de asteroides, etc.). Se calculó como una función decreciente con la distancia al radio galactocéntrico como:

$$N_{\text{resets}} = \mu_{\text{resets},0} \left(\frac{r_{\text{gal}}}{r_{\text{gal},\odot}} \right)^{-1} \quad (5.9)$$

donde $\mu_{\text{resets},0}$ es 5, reflejando las 5 grandes extinciones masivas ocurridas en la Tierra (Raup y Sepkoski 1982). Cada evento de “reinicio” tiene una probabilidad de aniquilar por completo la vida en un planeta. Esta fracción es muestreada aleatoriamente de una distribución Gaussiana con media de 0.5 Gyr y desviación estándar de 0.25 Gyr. Si esta fracción es mayor a 1, la vida

del planeta es destruida completamente, de otra forma la vida sobrevivirá. Luego, el tiempo necesario para completar cada etapa, t_i , es muestreado de una distribución Gaussiana con media 0.8 Gyr y desviación estándar de 0.25 Gyr. Al final del algoritmo habrá transcurrido un tiempo total, t_{int} , que será el tiempo que requirió el planeta para generar una civilización tecnológica desde el surgimiento de la vida.

Al tener muestreado N_{stages} y N_{resets} y t_i ocurrirá lo siguiente para cada paso i (i es el contador de N_{stages}):

1. i aumenta por 1 a partir de 0
2. Si $N_{\text{resets}} > 0$, se muestrea P_{end} . Si $P_{\text{end}} \geq 1$, ocurre aniquilación y el algoritmo termina. Si $P_{\text{end}} < 1$, i y N_{resets} decrecen por 1.
3. t_{int} incrementa por t_i si no hubo un “reinicio”, o una fracción de t_i si lo hubo.

El algoritmo continuará mientras se cumplan las siguientes condiciones:

1. $i < N_{\text{stages}}$;
2. t_{int} sea menor que el tiempo de vida en secuencia principal de la estrella anfitriona;
3. no haya ocurrido aniquilación;
4. t_{int} más la edad de la estrella no sea mayor al tiempo presente (14 Gyr).

Después de que el algoritmo termina cada planeta es clasificado con un Índice Evolutivo de Inteligencia (IEI, Tabla 5.3), dependiendo de su historia biológica.

Si todas las etapas se completaron (no se cumple condición 1 de la lista anterior), se ha alcanzado la vida tecnológica “vulnerable” (IEI 2) y se tiene un 11 % de probabilidad de sobrevivir, P_{adv} . Si sobrevive, se vuelve estable, civilización “avanzada” (IEI 4), en una escala de tiempo t_{adv} , de lo contrario se destruye (IEI 3). Si la condición 2 mencionada anteriormente no se cumple, la biosfera del planeta ha sido aniquilada (IEI -1) debido a la salida de secuencia principal de su estrella si la edad de nacimiento de la estrella más el tiempo de secuencia principal es < 14 Gyr, de otra forma, si la suma de la edad de nacimiento más el tiempo en secuencia principal es > 14 Gyr, entonces el planeta tiene vida primitiva (IEI 1). Si la condición 3 no se cumple, entonces la vida ha sido aniquilada (IEI -1). Si el algoritmo terminó debido a que no se cumplió la condición 4, entonces decimos que el planeta tiene vida primitiva (IEI 1). El resto de los planetas en los que nunca surgió vida se clasifica con el índice 0.

Este proceso se hizo para cada uno de los planetas que se encontraban en la ZHC de su estrella.

Incrementar N_{stages} y/o t_i llevará a un incremento de los planetas con vida primitiva, ya que el tiempo necesario para que la vida se convierta en una civilización tecnológica será mayor. Si se incrementa N_{resets} aumentarían la cantidad de planetas donde la vida es aniquilada.

Un resumen de los parámetros utilizados y sus valores es presentado en la Tabla 5.1 y 5.2, respectivamente. El código utilizado, así como el diagrama de flujo del algoritmo se presentan en detalle en los apéndices A y B, respectivamente.

Cada planeta es clasificado con un Índice Evolutivo de Inteligencia (Tabla 5.3), dependiendo de su historia biológica. Se realizaron un total de 100 simulaciones de Monte Carlo para tener resultados estadísticamente significativos. Este número de simulaciones fue más que suficiente, debido a que la variación de la desviación estándar de los resultados con 50 simulaciones comparada con la de 100 simulaciones era despreciable.

Tabla 5.1: Parámetros utilizados en el algoritmo de vida

Parámetro	Descripción
N_{stages}	Número de pasos evolutivos requeridos para formar una civilización tecnológica
N_{resets}	Número de eventos de “reinicio”
t_i	Tiempo requerido para completar cada paso evolutivo
t_{int}	Tiempo que requirió el planeta para generar una civilización tecnológica desde el surgimiento de la vida
t_{adv}	Tiempo que le toma a una civilización “vulnerable” convertirse en civilización “avanzada”
P_{life}	Probabilidad que surja vida en un planeta
P_{adv}	Probabilidad de que una civilización “vulnerable” sobreviva lo suficiente como para convertirse en “avanzada”
P_{end}	Probabilidad de que un evento de reinicio extermine por completo la vida en el planeta

5.5. Detectabilidad de la señal

Para que podamos detectar una señal de una civilización extraterrestre necesitamos considerar dos cosas al menos: ¿cuando surgió la civilización? y ¿que tan lejos está de nosotros?

Tabla 5.2: Valores de los parámetros utilizados en el algoritmo de vida

Parámetro	Media	Desviación estándar
N_{stages}	6	1
t_i	0.8 Gyr	0.25 Gyr
t_{adv}	2.5×10^{-4} Gyr	1.0×10^{-4} Gyr
P_{end}	0.5 Gyr	0.25 Gyr

Parámetro	Valor
P_{life}	1 (si todas la condiciones se cumplen)
P_{int}	1.15×10^{-7}
P_{adv}	0.11

Tabla 5.3: Índice Evolutivo de Inteligencia

I_{inhabit}	Definición
-1	Biósfera que ha sido aniquilada
0	Planeta sin vida
1	Planeta tiene vida primitiva
2	Planeta tiene vida inteligente
3	Planeta tuvo vida inteligente, pero se autodestruyó
4	Planeta tiene una civilización avanzada

Para que una civilización tecnológica viva pueda ser detectada por nosotros, la siguiente condición tiene que ser cierta:

$$14.0 - (t_0 + t_{\text{int}}) \geq t_{\text{lt}} \quad (5.10)$$

donde 14.0 Gyr es la edad de la Galaxia, t_0 es el año de nacimiento de la estrella y t_{lt} es el tiempo que la luz tarda en recorrer la distancia entre la civilización y nosotros.

Para una civilización que murió la siguiente condición también se necesita cumplir:

$$14.0 - (t_0 + t_{\text{int}} - t_1) \geq t_{\text{lt}} \quad (5.11)$$

donde t_1 es el tiempo de vida de la civilización.

Estas condiciones nos darán el número total de señales que podrían alcanzar a la Tierra considerando únicamente la distancia entre la civilización y nosotros, y el tiempo que tarda en viajar una señal tal distancia. Siendo más realistas, no todas las señales serían detectadas

por los radiotelescopios. Loeb y Zaldarriaga (2007) calcularon la distancia máxima a la que podríamos detectar una civilización tecnológica que produce señales de radio similares a las producidas por los radares militares de la Tierra, usando algunos de los radiotelescopios que podrían realizar estudios de SETI.

Estos autores mostraron que, para una distancia dada a la fuente d , la potencia mínima requerida del transmisor para ser detectado en la Tierra es:

$$P_{\min} = C \times 3.5 \times 10^{12} \text{W} \times \left(\frac{d}{100 \text{pc}} \right)^2 \times \left(\frac{\Delta\nu}{8 \text{kHz}} \right)^{1/2} \times \left(\frac{t_o}{\text{month}} \right)^{-1/2} \quad (5.12)$$

donde C es una constante que depende del área colectora del telescopio, $\Delta\nu$ es el ancho de banda y t_o es el tiempo de observación. Para el Murchinson Widefield Array (MWA) $C = 1$ (Loeb y Zaldarriaga 2007).

La figura 5.3 muestra la potencia mínima de radio detectable, P_{\min} , para el MWA, calculada por Loeb y Zaldarriaga (2007), para el Green Bank Telescope (GBT), un radiotelescopio de 100 m de diámetro que es parte del programa “Breakthrough Listen Project” dedicado a SETI, y el Telescopio esférico de quinientos metros de apertura (FAST) que consiste en una antena fija de 500 m de diámetro con un área 25 veces mayor que la del GBT y del MWA.

El MWA debería ser capaz de detectar una señal extraterrestre a distancias de hasta 25 pc con 1 mes de tiempo de observación, el GBT hasta distancias de 12 pc con 20 segundos de tiempo de observación y el FAST hasta 60 pc con 20 segundos y hasta 220 pc con 1 hora de observación. Se calculará cuantas civilizaciones extraterrestres, generadas en la simulación, caen dentro de estos límites.

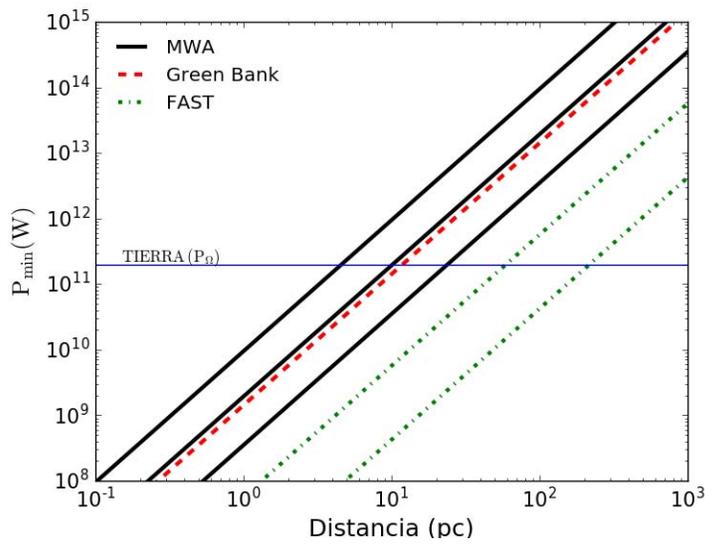


Figura 5.2: Potencia mínima de radio detectable P_{\min} para varios radiotelescopios y tiempo de observación como función de la distancia a la fuente: el MWA con tiempos de observación de 1 hora, 1 día y 1 mes (líneas sólidas de arriba a abajo, Loeb y Zaldarriaga (2007)), el Green Bank Telescope con $\Delta\nu=1$ Hz y tiempo de observación de 20 segundos (línea punteada roja) y el FAST con tiempo de observación de 20 segundos y 1 hora (línea verde punteada, de arriba a abajo). La línea azul horizontal delimita el potencia por ángulo sólido de los radares militares y la intersección con las líneas delimita la distancia máxima a una civilización para que sea detectable con tal instrumento en la Tierra.

Capítulo 6

Resultados y Discusión

6.1. Resultados generales

La Tabla 6.1 muestra la descripción de las variables que se utilizarán en los siguientes párrafos para la discusión de los resultados.

Tabla 6.1: Variables resultantes del modelo galáctico

Variable	Descripción
N_{stars}	Número de estrellas utilizadas en cada simulación
N_{planets}	Número de planetas generados
$N_{\text{HZplanets}}$	Número de planetas en la Zona Habitable Circunestelar de su estrella
N_{\oplus}	Número de planetas tipo-Tierra
$N_{\text{HZ}\oplus}$	Número de planetas tipo-Tierra en la Zona Habitable Circunestelar de su estrella generadas durante toda la vida de la RGS
$N_{\text{PHZ}\oplus}$	Número de planetas tipo-Tierra que actualmente se encuentran en la Zona Habitable Circunestelar de su estrella

En la Tabla 6.2 mostramos las estadísticas del modelo galáctico, con los datos de Kepler y con la corrección por completés para estrellas F, G y K de secuencia principal. Los resultados muestran que la fracción de estrellas con planetas ($f_p = N_{\text{planets}}/N_{\text{stars}}$) aumentó de 1.18% a 79% después de las correcciones por completés. La fracción de estrellas que albergan planetas tipo-Tierra ($f_p \times N_{\oplus}/N_{\text{stars}}$) resultó de 0.2% sin correcciones y 67% con correcciones.

La fracción de planetas que orbitan en la ZHC de su estrella ($N_{\text{HZplanets}}/N_{\text{planets}}$) es de 33% después de las correcciones. De ese 33%, el 71% de los planetas es tipo-Tierra ($N_{\text{HZ}\oplus}/N_{\text{HZplanets}}$), es decir, los planetas tipo-Tierra son más de doble de frecuentes que planetas más masivos en las ZHCs. Estos resultados llevan a que la fracción de estrellas que albergan al menos un planeta habitable ($f_e = f_p \times N_{\text{HZ}\oplus}/N_{\text{stars}}$) sea del 28%. Estimaciones hechas por otros autores (e.g. Petigura et al. 2013, Silburt et al. 2015) predicen una fracción menor de planetas tipo-Tierra en la ZHC (5.5% y 6.4% respectivamente), esto se puede deber a la diferencia en datos de entrada (información de exoplanetas disponibles) y la completés más rigurosa.

Tabla 6.2: Estadísticas del modelo galáctico

Variable	Sin Corrección	Corregidos
N_{stars}		$9.24 \times 10^8 \pm 29,158$
N_{planets}	$1.09 \times 10^7 \pm 8,197$	$1.41 \times 10^9 \pm 1.5 \times 10^6$
$N_{\text{HZplanets}}$	$355,979 \pm 1539$	$4.64 \times 10^8 \pm 2.0 \times 10^6$
N_{\oplus}	$2.10 \times 10^6 \pm 4,273$	$7.85 \times 10^8 \pm 1.6 \times 10^6$
$N_{\text{HZ}\oplus}$	$21,252 \pm 445$	$3.3 \times 10^8 \pm 6.9 \times 10^6$

En la figura 6.1 se muestra una clasificación de planetas según su radio y la fracción correspondiente del total de planetas antes y después de las corrección por completés. Se observa que antes de las correcciones, el mayor número de planetas eran planetas de tamaño-Neptuno, mientras que las Tierras eran los segundos menos frecuentes. Aplicando las correcciones por completés se observa un aumento considerable en los planetas tamaño-Tierra, y un decremento hacia radios mayores. Con los datos de Kepler sin corregir las fracciones de planetas Tierras, Súper Tierras, Neptunos y Júpiteres son de 19.3%, 40.0%, 32.3% y 8.4% respectivamente, mientras que después de la corrección cambió a 55.9%, 24.4%, 14.7% y 5.0% en el mismo orden.

La figura 6.2 muestra la cantidad de planetas por estrella en nuestra muestra de estrellas de la RGS. El 21% de las estrellas no generaron ningún planetas, el 33%, 26%, 13%, 5%, 1.5% tiene uno, dos, tres, cuatro o cinco planetas respectivamente, mientras que el 0.5% de las estrellas tiene seis o más, por lo que en promedio las estrellas con planetas contienen 2 planetas.

En la Tabla 6.3 se muestra la cantidad de planetas que cumplen con cada condición defi-

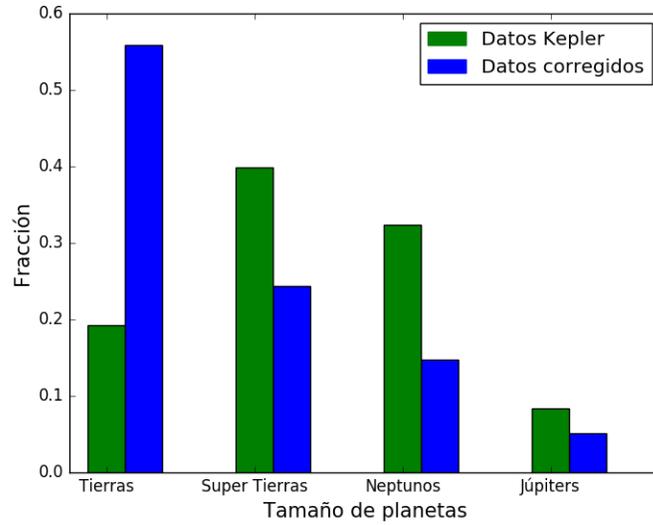


Figura 6.1: Fracción de planetas según su clasificación por tamaño: Tierras ($1-1.5 R_{\oplus}$), Super Tierras ($1.5-2.5 R_{\oplus}$), Neptunos ($2.5-6 R_{\oplus}$) y Júpiteres ($6-16 R_{\oplus}$). Se compara las fracciones de los datos de la misión Kepler (barras verdes) con los datos después de la corrección por completés (barras azules).

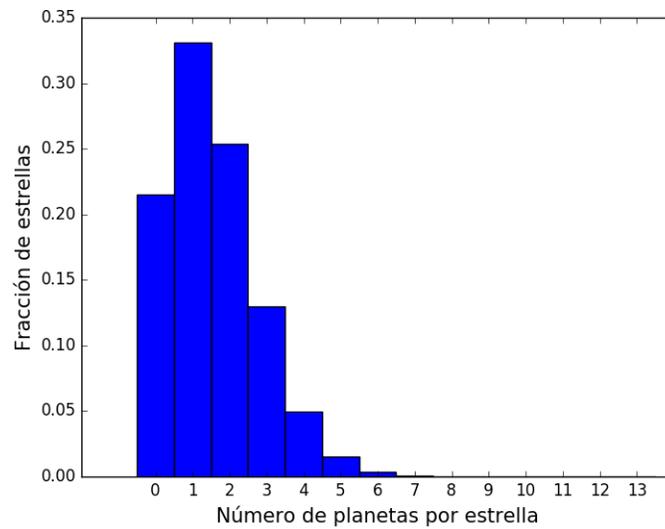


Figura 6.2: Fracción de estrellas que contienen entre 0 a 13 planetas orbitandolas.

nida por el Índice Evolutivo de Inteligencia (IEI), de la cual podemos observar los siguientes resultados interesantes. Alrededor del 88 % de los planetas tipo-Tierra en la ZHC ($N_1/N_{\text{HZ}\oplus}$) podrían tener vida primitiva (IEI 1), esto apoya la hipótesis de que la vida primitiva es común en el universo si las condiciones de habitabilidad se cumplen.

Tabla 6.3: Resultados estadísticos del algoritmo de vida. Se muestra el número de planetas que hay con cada Índice Evolutivo de Inteligencia (Tabla 5.3). Valores redondeados al entero próximo.

Variable	Media	Desviación estándar
N_{-1}	3.7×10^7	7.62×10^5
N_0	1.08×10^9	4.56×10^6
N_1	2.9×10^8	1.56×10^6
N_2	1	
N_3	22	1
N_4	3	1

El modelo predice que debería de haber 1 civilización tecnológica vulnerables (IEI 2), lo cual coincide con nuestra propia existencia, 22 civilizaciones tecnológicas extintas (IEI 3) y 3 civilizaciones avanzadas (IEI 4) en la RGS hasta este momento, esto equivale a una probabilidad de 7.87×10^{-8} de que surja una civilización tecnológica en un planeta tipo-Tierra en la ZHC. El hecho de que haya más civilizaciones avanzadas que inteligentes es debido a que el tiempo necesario para convertirse de una civilización vulnerable a una avanzada es mucho menor que el tiempo necesario para evolucionar de vida primitiva a tecnológica, y debido a que una civilización avanzada puede sobrevivir por siempre mientras que la vulnerable puede destruirse a si misma (IEI 3). Esto quiere decir que el mayor cuello de botella se encuentra en la progresión de vida primitiva (IEI 1) a vida tecnológica vulnerable (IEI 2), con los parámetros utilizados en nuestro modelo.

Se observa que la vida primitiva (IEI 1) es el tipo de vida más común, mientras la menos común son las civilizaciones tecnológicas vulnerables (IEI 2), siendo los seres humanos la única civilización de este tipo.

Las civilizaciones que surgieron les tomó alrededor de 7 Gyr para evolucionar de vida primitiva a inteligente (civilización tecnológica). Esto coloca a la Tierra como un planeta en el cual la vida evolucionó a una civilización tecnológica más rápido que la mayoría de las civilizaciones existentes. El siguiente gran cuello de botella se encuentra en la progresión de ci-

vilización inteligente a avanzada. Sagan y Shklovsky (1966), especularon que las civilizaciones tecnológicas tienden a destruirse a si mismas o sobrepasan sus tendencias auto-destructivas y sobreviven en escalas de tiempo de millones de años.

Observando por 1 mes con el radiotelescopio MWA no se podrían detectar civilizaciones. Utilizando el Green Bank Telescope, que es el radiotelescopio más grande dedicado actualmente a estudios de SETI no podría detectar ninguna señal procedente de alguna civilización tecnológica con los 20 segundos de observación que actualmente tiene asignado por objeto. Por otro lado, el telescopio FAST de China tiene una probabilidad de detectección de una señal de una civilización de 0.26 % y 3.2 % con 20 segundos y 1 hora de observación respectivamente. Un estudio similar con el Square Kilometre Array (SKA) fue realizado por Forgan y Nichol (2011) y mostraron que la probabilidad de que dos civilizaciones se detecten la una a la otra es de $\sim 10^{-7}$.

6.2. Comparación con el campo de Kepler

Hemos aplicado los resultados a los datos del Campo de Visión de Kepler. En este campo se estima que hay aproximadamente 138,611 estrellas de F,G y K que fueron objetivos prioritarios de la misión Kepler (Batalha et al, 2010). Comparando los números, debería haber 38,800 planetas tipo-Tierra en la ZHC orbitando estrellas de secuencia principal F, G ó K dentro del campo de Kepler. De acuerdo con nuestros resultados, hay una gran posibilidad de encontrar vida primitiva en la gran mayoría de ellos, y en 13 de ellos encontrar una civilización tecnológica. Al tiempo de escribir esta investigación, solo hay dos exoplanetas tipo-Tierra en la ZHC orbitando una estrella tipo-Sol. Estos planetas son Kepler-452b y Kepler-62f, los cual tiene un radio de $1.6R_{\oplus}$ y $1.41R_{\oplus}$, con edades de 6 y 7 Gyr respectivamente (Jenkins et al. 2015, Borucki et al. 2013).

Capítulo 7

Conclusiones

Hemos estimado el número de planetas habitables, su ocurrencia dentro de la Región Galactocéntrica Solar (RGS) y la probabilidad de que estos planetas alberguen vida desde primitiva hasta civilizaciones tecnológicas “avanzadas”, utilizando el método de Monte Carlo aplicado a un modelo galáctico simple, datos actualizados sobre exoplanetas, correcciones por completés de la muestra de exoplanetas, condiciones conservadoras de habitabilidad y un escenario evolutivo “difícil” para simular la evolución de la vida.

Haciendo referencia a algunos de los factores de la ecuación de Drake, encontramos que: la fracción de estrellas que tienen sistemas planetarios, f_p , es del 79 %; el número de planetas en cada sistema planetario, n_p , es de 2 planetas; la fracción de planetas que son habitables, $f_e (N_{\text{HZ}\oplus})$, es del 28 %.

El 55.9 % de los planetas son tipo-Tierra, mientras que el 22.4 %, 14.7 % y 5 % corresponden a Súper Tierras, Neptunos y Júpiteres respectivamente.

Nuestro modelo predice que alrededor del 88 % de los planetas tipo-Tierra en la Zona Habitable Circunestelar (ZHC) de su estrella están habitados donde prácticamente casi el total por vida primitiva (no tecnológica). Al la mayoría de la vida en la RGS le toma más tiempo en evolucionar a una civilización tecnológica que lo que le tomó a la vida en la Tierra, aunque esto depende fuertemente del modelo que se tome para algoritmo de vida.

También predecimos que debería haber alrededor de 40,000 planetas tipo-Tierra en la ZHC de sus respectivas estrellas dentro del campo de Kepler. La probabilidad de encontrar vida en estos planetas es muy alta, 35,000 podrían tener vida primitiva, pero sólo habría un 0.3 % de probabilidad de encontrar vida tecnológica.

Se debe considerar que los parámetros astrofísicos aún necesitan mejorar y los parámetros biológicos son muy difíciles de estimar con certeza, por lo tanto cualquier cambio en ellos modificará el resultado final.

Nuestros resultados apoyan dos posibles soluciones a la Paradoja de Fermi: 1. Somos la única civilización tecnológica en nuestra Galaxia, o una de las pocas, ya que a la mayoría de la vida en nuestro modelo es incapaz de desarrollar tecnología para comunicarse fuera de su planeta. 2. No podemos detectar otras civilizaciones ya que, como mostramos, la probabilidad de detectar una civilización tecnológica tipo-humana es baja con los actuales instrumentos y programas de observación.

A pesar de que la probabilidad de encontrar una civilización tecnológica parece baja, no es nula. Considero que son necesarios más estudios para discutir la probabilidad de éxito de los proyectos actuales de SETI. Para esto es necesario invertir mayor tiempo de observación y la participación de más radiotelescopios y de mayor tamaño.

Es importante recalcar que esto sólo es un modelo, y los resultados no deben ser tomados como valores absolutos, sino como tendencias relativas con la mejora de los parámetros de entrada. Nuestro modelo tiene limitaciones debido a la incompletés de los datos observacionales de exoplanetas, y simplificaciones en el modelo galáctico tales como no considerar la evolución química de la Galaxia y sus consecuencias en la generación de planetas tipo-Tierra, no considerar sistemas estelares binarios, y las pocas propiedades planetarias tomadas en cuenta. Lo que se logra con este trabajo de tesis es plantear un modelo y algoritmo que pueda ser fácilmente refinado con consideraciones más profundas.

Estudios futuros son necesarios para mejorar el modelo. Los parámetros astrofísicos están siendo mejor delimitados, especialmente todo lo que tiene que ver con datos de exoplanetas. Misiones próximas a iniciarse, tales como los telescopios espaciales TESS y PLATO, darán más detalle acerca de las propiedades y características de los exoplanetas y su potencial habitabilidad. Por otro lado, los parámetros biológicos seguirán siendo el problema principal a la hora de hacer este tipo de modelos, sin embargo el encontrar vida en cualquier lugar fuera de nuestro planeta, así como entender la vida de la Tierra en su totalidad (e.g. extremófilos) nos permitirá hacer suposiciones más precisas sobre los factores biológicos de la ecuación de Drake.

Referencias

Aumer, M., Binney, J.J. (2009). Kinematics and history of the solar neighbourhood revisited. *MNRAS* **397**, 9.

Ayala, F.J. (1974). The concept of biological progress. En *Studies in the Philosophy of Biology*, ed. Ayala, F.J. & Dobzhansky, T., 357-376.

Baross, J.A. (2007). *The Limits of Organic Life in Planetary Systems*. Washington, DC: National Academies Press.

Batalha, N.M., Borucki, W.J., Koch, D.G. et al. (2010). Selection, Prioritization, and Characteristics of Kepler Target Stars. *ApJ Letters* **713**, L109-L114.

Binney, J., Tremaine, S. (2008). *Galactic Dynamics*, Princeton University Press.

Blaha, S. (2007). The origins and sequence of civilization. *Comparative Civilizations Review* **57**, 70-91.

Borucki, W.J., Agol, E., Fressin, F., et al. (2013). Kepler-62: A Five-Planet System with Planets of 1.4 and 1.6 Earth Radii in the Habitable Zone. *Science* **340**, 587-590.

Borucki, W.J., Koch, D.G., Batalha, N., et al. (2012). Kepler-22b: A 2.4 Earth-radius Planet in the Habitable Zone of a Sun-like Star. *ApJ* **745**, 120.

Borucki, W.J. (2016). KEPLER Mission: development and overview. *Rep. Prog. Phys.* **79**.

- Brin, G.D. (1983). The “Great Silence”: the controversy concerning extraterrestrial intelligent life. *Q. J. R. Astr. Soc.* **24**, 283-309.
- Carigi, L. (2015). Solar Neighborhood, in *Encyclopedia of Astrobiology*, Gargaud, Amils, Cernicharo Cleaves, Irvine, Pinti, Viso (eds.), Springer, Berlin-Heidelberg, pp 2286-2287.
- Carroll, B.W., Ostlie, D.A. (2006). *An Introduction to Modern Astrophysics and Cosmology*, Addison-Wesley, Reading.
- Carter, B. (2008). Five- or six-step scenario for evolution? *Int. J. Astrobiol.* **7**, 177-182.
- Chabrier, G. (2003). Galactic stellar and substellar initial mass function. *PASP* **115**, 763795.
- Chinae, A. (2017). Is Cetacean Intelligence Special? New Perspectives on the Debate. *Entropy* **19**, 543.
- Clark, S. (2000). *Life on other worlds and how to find it*, Springer, Cornwall, UK.
- Conway Morris, S. (2011). Predicting what extra-terrestrials will be like: and preparing for the worst. *Phil. Trans. Royal Soc. A* **369**, 555-571.
- Cotton-Barratt, O., Farquhar, S., Snyder-Beattie, A. (2016). Beyond risk-benefit analysis: pricing externalities for gain-of-function research of concern.
- Crowe, M.J., Dowd, M.F. (2013). *The Extraterrestrial Life Debate from Antiquity to 1900*. In *Astrobiology, History, and Society: Life Beyond Earth and the Impact of Discovery*, ed. Douglas A. Vakoch, 356. Heidelberg: Springer.
- Darwin, C. (1859). *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*, 1st ed., John Murray, London.

Darwin, C. (1871). *The Descent of Man, and Selection in Relation to Sex*, 1st ed. John Murray, London.

de Duve, C. (1998). Réflexions sur l'origine et l'évolution de la vie. *C. R. Soc. Biol.* **192**, 893-901.

Drake, F., Sobel D. (1994). *Is anyone out there?*, Delta.

Emery, N.J., Clayton, N.S. (2004). The mentality of crows: convergent evolution of intelligence in corvids and apes. *Science* **306**, 1903-1907.

Falkowski, P., Scholes, R.J., Boyle, E., Canadell, J., et al. (2000). The Global Carbon Cycle: A test of our knowledge of Earth as a System. *Science* **290**, 291-296.

Fitch, W.T., Hauser, M.D. (2004). Computational constraints on syntactic processing in a nonhuman primate. *Science* **303**, 377-380.

Forgan, D.H. (2009). A numerical testbed for hypotheses of extraterrestrial life and intelligence. *Int. J. Astrobiol.* **8**, 121-131.

Forgan, D.H., Rice, K. (2010). Numerical testing of the Rare Earth Hypothesis using Monte Carlo realization techniques. *Int. J. Astrobiol.* **9**, 73-80.

Forgan, D.H., Nichol, R.C. (2011). A failure of serendipity: the Square Kilometre Array will struggle to eavesdrop on human-like extraterrestrial intelligence. *Int. J. Astrobiol.* **10**, 77-81.

Fressin, F., Torres, G., Charbonneau, D. et al. (2013). The False Positive Rate of Kepler and the Occurrence of Planets. *ApJ* **766**, 81.

Fu, J., Hou, J.L., Yin, J., Chang, R.X. (2009) Origin and evolution of the abundance gradient along the Milky Way disk. *ApJ* **696**, 668-675.

Gould, S.J. (1996). *Full house*. Harmony Books, New York.

Habets, G.M.H.J., Heintze, J.R.W. (1981). Empirical bolometric corrections for main-sequence. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **46**, 193-237.

Hansen, C.J., Kawaler, S.D., Trimble, V. (2004). *Stellar interiors*, pp. 23-30. Springer, New York.

Heller, R., Williams, D., Kipping, D., Limbach, M.A., Turner, E., Greenberg, R., Sasaki, T., Bolmont, ., Grasset, O., Lewis, K., Barnes, R., Zuluaga J. (2014). Formation, habitability and detection of extrasolar moons. *Astrobiology* **14**, 798-835.

Itakura, S., Tanaka, M. (1998). Use of experimenter-given cues during object-choice tasks by chimpanzees (*Pan troglodytes*), an orangutan (*Pongo pygmaeus*), and human infants (*Homo sapiens*). *Journal of Comparative Psychology* **112**, 119126.

Jaime, L.G., Aguilar, L., Pichardo, B. (2014). Habitable zones with stable orbits for planets around binary systems. *MNRAS* **443**, 260-274.

Jenkins, J.M., Twicken, J.D., Batalha, N.M., Caldwell, D.A., Cochran, W.D., Endl, M., Latham, D.W., Esquerdo, G.A., Seader, S., Bieryla, A., Petigura, E., Ciardi, D.R., Marcy, G.W., Isaacson, H., Huber, D., Rowe, J.F., Torres, G., Bryson, S.T., Buchhave, L., Ramirez, I., Wolfgang, A., Li, J., Campbell, J.R., Tenenbaum, P., Sanderfer, D., Henz, C.E. (2015). Discovery and validation of Kepler-452b: a $1.6 R_{\oplus}$ super Earth exoplanet in the habitable zone of G2 star. *Astron. J.* **150**, 56.

Jurić, M., Ivezić, Z., Brooks, A. et al. (2008). The Milky Way Tomography with SDSS. I. Stellar Number Density Distribution. *ApJ* **673**, 864-914.

Kapitza, S.P. (2010). On the theory of global population growth. *Phys. Usp.* **53**, 1287-1296.

Kasting, J.F., Whitmire, D.P., Reynolds, R.T. (1993). Habitable Zones around main sequence

stars. *Icarus* **101**, 108-128.

Kasting, F.J., Kopparapu, R., Ramirez, R.M., Harman, C.E. (2014). Remote life-detection criteria, habitable zone boundaries, and the frequency of Earth-like planets around M and late K stars. *PNAS* **111**, 12641-12646.

Kite, E.S., Gaidos, E., Manga, M. (2011). Climate instability on tidally locked exoplanets. *ApJ* **743**, 41-53.

Khodachenko, M.L., Ribas, I., Lammer, H., et al. (2007). *Astrobiology* **7**,167-184.

Kopparapu, R.K., Ramirez, R., Kasting, J.F., Eymet, V., Robinson, T.D., Mahadevan, S., Terrien, R.C., Domagal-Goldman, S., Meadows, V., Deshpande, R. (2013). Habitable Zones around Main-sequence stars: New estimates. *Astrophys. J.* **765**, 131.

Kroese, D. P., Brereton, T., Taimre, T., Botev, Z. I. (2014). Why the Monte Carlo method is so important today. *WIREs Comp Stat* **6**, 386392.

Kroupa, P. (2001). On the variation of the initial mass function. *MNRAS* **322**, 231246.

Licquia, T.C., Newman, J.A. (2015). Improved Estimates of the Milky Way's Stellar Mass and Star Formation Rate from Hierarchical Bayesian Meta-Analysis. *ApJ* **806**, 96.

Loeb, A., Zaldarriaga, M. (2007). Eavesdropping on Radio Broadcasts from Galactic Civilizations with Upcoming Observatories for Redshifted 21cm Radiation. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*.

Mackwell, S.J., Simon-Miller, A.A., Harder, J.W., Bullock, M.A. (2013). *Comparative climatology of terrestrial planets*, The Univ. of Arizona Press.

Macphail, E.M., Bolhuis, J.J. (2001). The evolution of intelligence: adaptive specializations versus general process. *Biol. Rev.* **76**, 341-364.

Miller, G.E., Scalo, J.M. (1979). The initial mass function and stellar birthrate in the solar neighborhood. *Astrophys. J. Supp. Ser.* **41**, 513-547.

Mora, C.T., Tittensor, D.P., Adl, S., Simpson, A.G.B., Worm, C. (2011). How Many Species Are There on Earth and in the Ocean?. *PLOS Biol.* **9**, 8.

Mojzsis, S.J., Arrhenius, G., Mckeeagan, K.D., Harrison, T.M., Nutman, A.P., Friend, C.R.L. (1996). Evidence for life on Earth before 3,800 million years ago. *Nature* **384**, 55-59.

NASA Exoplanet Archive (<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>, consultada en diciembre de 2017).

Patel, B.H., Percivalle, C., Ritson, D.J., Duffy, C.D., Sutherland, J.D. (2015). Common origins of RNA, protein and lipid precursors in a cyanosulfidic protometabolism. *Nature Chemistry* **7**, 301-307.

Petigura, E.A., Howard, A.W., Marcy, G.W. (2013). Prevalence of Earth-size planets orbiting Sun-like stars. *PNAS* **110**, 19273-19278.

Pinker, S. (1997). *How the Mind Works*, W.W. Norton & Co.

Pizzarello, S. (2007). Question 2: why astrobiology? *Orig. Life Evol. Biosph.* **37**, 341-344.

Planetary Habitability Laboratory (Univ. of Puerto Rico at Arecibo, <http://phl.upr.edu>) Consultada en diciembre del 2015.

Pollack, J.B., Kasting, J.F., Richardson, S.M., Poliakoff, K. (1987). The case for a wet, warm climate on early Mars. *Icarus* **71**, 203.

Raghavan, D., McAlister, H.A., Henry, T.J. et al. (2010). A Survey of Stellar Families: Multiplicity of Solar-type Stars. *ApJ Sup. Ser.* **190**, 1-42.

- Raup, D.M., Sepkoski, J.J. (1982). Mass extinctions in the marine fossil record. *Science* **215**, 1501-1503.
- Reece, J.B., Urry, L.A., Cain, M.C., Wasserman, S.A., Minorsky, P.V., Jackson, R.B. (2011). *Campbell Biology*, Pearson.
- Rocha-Pinto, H.J., Scalo, J.M., Maciel, W.J., Flynn, C. (2000). Chemical enrichment and star formation in the Milky Way disk. II. Star formation history. *Astron. Astrophys.* **358**, 869-885.
- Rogers, L.A. (2015). Most 1.6 Earth-radius planets are not rocky. *Astrophys. J.* **801**, 43.
- Roth, G., Dicke, U. (2005). Evolution of the brain and intelligence. *TRENDS in Cog. Sci.* **9**.
- Sagan, C., Shklovskii, I.S. (1966). *Intelligent life in the Universe*, Holden-Day.
- Sagan, C. (1995). The abundance of life-bearing planets. *Bioastron. News* **7**, 1-4.
- Salaris, M., Cassisi, S. (2005). *Evolution of stars and stellar populations*. John Wiley and Sons, Ltd. England.
- Schroder, K.P., Smith, R.C. (2008). Distant future of the Sun and Earth revisited. *MNRAS* **386**, 155-163.
- Silburt, A., Gaidos, E., Wu, Y. (2015). A statistical reconstruction of the planet population around Kepler solar-type stars. *ApJ* **799**, 180-192.
- Simpson, G.G. (1964). The nonprevalence of humanoids. *Science* **43**, 769-775.
- Snaith, O., Haywood, M., Di Matteo, P., Lehnert, M.D., Combes, F., Katz, D., Gomez, A. (2015). Reconstructing the star formation history of the Milky Way disc(s) from chemical abundances. *AA* **578**, A87.

Tomasello, M., Call, J. (1997). *Primate Cognition*, Oxford Univ. Press.

Torres, G., Kipping, D.M., Fressin, F., Caldwell, D.A., et al. (2015). Validation of 12 small Kepler transiting planets in the habitable zone. *ApJ* **800**, 99-123.

Tsokolov, S.A. (2009). Why is the definition of life so elusive? Epistemological considerations. *Astrobiology* **9**, 401-412.

Tian, F., Claire, M.W., Haqq-Misra, J.D., et al. (2010). Photochemical and climate consequences of sulfur outgassing on early Mars. *Earth and Planetary Science Letters* **295**, 412.

von Neumann, J. (1966). *Theory of Self-Reproducing Automata*, ed. A. Burks. Urbana: University of Illinois Press.

Walker, J.C.G., Hays, P.B., Kasting, J.F. (1981). A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of Earth's surface temperature. *J. Geophys. Res.* **86**, 9776-9782.

Winn, J. N. 2010, arXiv:1001.2010

Zaleski, D.P., Seifert, N.A., Steber, A.L., Muckle, M.T., Lommis, R.A., Corby, J.F., Martinez, O., Crabtree, K.N., Jewell, P.R., Hollis, J.M. (2013). Detection of E-cyanomethanimine toward Sagittarius B2(N) in the Green Bank Telescope PRIMOS Survey. *Astrophys. J. Lett.* **765**, 10.

Apéndice

Apéndice A

Código

```
#El siguiente codigo fue desarrollado en Python y solo muestra el procedimiento para
    calcular
#el numero de planetas con su respectivo indice de evolutivo de inteligencia
import numpy as np
import math
import matplotlib.pyplot as plt
import scipy.special as special
import random as rand
#Constantes
Msun=1.989*10**30 #Masa Solor
Rsun=6.9598*10**8 #Radio Soloar
Lsun=3.846*10**26 #Luminosidad Solar
sigma=5.67037*10**-8 #Constante de Stefan-Boltzmann
G=6.67408*10**-11 #Constante de gravitacion
AU=1.495*10**11 #Metros en 1 UA
#Star Formation History (Rocha-Pinto 2000b)
sfrx=0
sfra=[]
sfr=[1.75,1.16,1.312,0.48,0.56,2.46,1.93,1.78,1.175,1.312,1.687,1.562,1.53,0.875,0.968,1.03
,0.5,1.562,1.843,1.593,1.0,1.125,1.375,1.6,0.25,0.218,1.0,0.281,0.531,1.09,0.312,0.062,1.393]

sfrr=[x/37.306 for x in sfr]
for i in range(0,33):
    sfrx=sfrx+sfrr[i]
    sfra.append(sfrx)
#Habitability Coefficients (Kopparapu 2013-2014)
distance=[0,0,0,0,0,0]
seff = [0,0,0,0,0,0]
seffsun = [1.776,1.107, 0.356, 0.320, 1.188, 0.99]
a = [2.136e-4, 1.332e-4, 6.171e-5, 5.547e-5, 1.433e-4, 1.209e-4]
b = [2.533e-8, 1.580e-8, 1.698e-9, 1.526e-9, 1.707e-8, 1.404e-8]
c = [-1.332e-11, -8.308e-12, -3.198e-12, -2.874e-12, -8.968e-12, -7.418e-12]
```

```
d = [-3.097e-15, -1.931e-15, -5.575e-16, -5.011e-16, -2.084e-15, -1.713e-15]
```

```
#Constantes de la funcion generadora de la IMF
B=0.5550381
C=0.629743
D=0.037827
F=0.453417
A1=D/F
B1=B/C
Mt=3.36074*10**8 #Masa total contenida en la Region Galactocentrica Solar
g1=[]
thet1=[]
g2=[]
thet2=[]
g3=[]
thet3=[]
g4=[]
thet4=[]
Ts=[]
Tsms=[]
Ms=[]
Tos=[]
Ls=[]
Np=[]
HZPlanets=0
HZPlanetsP=0
HZPlanets2=0
cont=0
m=0
Aliens=0
N=0
Nm1=0
NO=0
N1=0
N2=0
N3=0
N4=0
Nptotal=0
Tierras=0
HZPlanetsTierra=0
k=0
q=0
imf=open("Mass4.txt","w")
Pimf=open("Pmass4.txt","w")
Ppp=open("Ppp4.txt","w")
yea=open("yea4.txt","w")
dis=open("dis4.txt","w")
det=open("det4.txt","w")
distdet=open("disdet4.txt","w")
```

```

#Generacion de estrellas individuales
while (m<Mt):
    mass=np.exp(A1)*np.exp(-special.erfinv(B1-rand.uniform(0.3148,0.61256)/C)/F)
    m=m+mass
    cont=float(cont+1)
    #Tiempo de nacimiento de las estrellas
    if(m>sfra[k]*Mt):
        k=k+1
        ta=((k+1)*0.4)-0.2
        tb=rand.uniform(ta-0.2,ta+0.2)
        t0=13.2-tb #Fechas de nacimiento desde t=0

    #Radio de la estrella
    if (mass<=1.1):
        R=Rsun*(mass)**(3./7.)
    else:
        R=Rsun*(mass)**(15./19.)
    #Luminosidad
    L=Lsun*(mass)**3
    #Tiempo de vida en secuencia principal
    t=10**10*(mass)**(-2.5)
    tms=t/10**9 #Expresada en Gyr
    #Temperatura efectiva de la estrella
    T=(L/(4*math.pi*sigma*R**2))**(1./4.)
    #Radio galactrocentrico
    gal=rand.uniform(7000,9000)
    #Posicion en brazo espiral
    theta=rand.uniform(0,2*math.pi)
    #Probabilidad de la estrella de albergar planetas
    Pplanets=0.0473

    # "Dado" para determinar si una estrella tiene planetas o no
    a0=[0,1]
    b0=[Pplanets,1-Pplanets]
    Planets=np.random.choice(a0,1,p=b0)

    #Numero de planetas
    if(Planets==0):
        Nplanets=1
    else:
        Nplanets=0

    Ts.append(T)
    Ms.append(mass)
    Tos.append(t0)
    Tsms.append(tms)
    Ls.append(L)
    Np.append(Nplanets)

```

```

q=q+1
Nptotal=Nptotal+Nplanets #Contador de planetas generados
#Generacion de planetas individualmente
if (Nplanets==1):

#Masa de exoplaneta estrellas FGK (0.5-1.3 Msol)

a1=np.arange(1.2,16.2,0.2)
b1=[133.,151.,169.,166.,136.,131.,152.,121.,116.,101.,72.,45.,28.,30.,
    14.,17.,10.,6.,8.,7.,4.,9.,5.,3.,4.,8.,3.,4.,1.,5.,6.,2.,0.,3.
    ,0.,1.,5.,4.,0.,4.,4.,3.,5.,2.,1.,3.,1.,2.,5.,2.,2.,1.,3.,2.,2.,2.,1.
    ,0.,1.,1.,3.,2.,2.,1.,2.,2.,0.,1.,1.,2.,0.,0.,0.,1.,1.]
b2=[x/1745 for x in b1]
new_random=np.random.choice(a1,1,p=b2)
Rp=rand.uniform(new_random-0.2,new_random)
#Planetas que cumplen la condicion de ser rocosos
if(Rp<1.6):
    Tierras=Tierras+1
#Periodo del exoplaneta
a3=np.arange(20,420,20)
b3=[1163.,270.,115.,49.,42.,23.,19.,11.,13.,9.,9.,4.,4.,2.,4.,1.,2.,0.,2.,3.]
b4=[x/1745 for x in b3]
new_random=np.random.choice(a3,1,p=b4)
Pp=rand.uniform(new_random-20,new_random)
M=mass*Msun
Pps=Pp*86400
Sp=(G*M*Pps**2/(4*math.pi**2))**(1./3.)/AU

Pimf.write(str(Rp) + "\n")
Ppp.write(str(Pp)+ "\n")
#Zona habitable Kopparapu et al. 2013
seff=[0,0,0,0,0,0]
distance=[0,0,0,0,0,0]
seffsun = [1.776,1.107, 0.356, 0.320, 1.188, 0.99]
a = [2.136e-4, 1.332e-4, 6.171e-5, 5.547e-5, 1.433e-4, 1.209e-4]
b = [2.533e-8, 1.580e-8, 1.698e-9, 1.526e-9, 1.707e-8, 1.404e-8]
c = [-1.332e-11, -8.308e-12, -3.198e-12, -2.874e-12, -8.968e-12, -7.418e-12]
d = [-3.097e-15, -1.931e-15, -5.575e-16, -5.011e-16, -2.084e-15, -1.713e-15]

teff=T
tstar = teff - 5780.0
for i in range(len(a)):
    seff[i] = seffsun[i] + a[i]*tstar + b[i]*tstar**2 + c[i]*tstar**3 + d[i]*tstar
    **4
    distance[i]=math.sqrt(L/Lsun)/math.sqrt(seff[i])
#ZH Conservativa
if (Sp>=distance[1] and Sp<=distance[2]):
    HZPlanets=HZPlanets+1

```

```

if (Rp<1.6):
    HZPlanetsTierra=HZPlanetsTierra+1

#Algoritmo de la vida
Nstages=rand.gauss(6,1) #Numero de pasos evolutivos
Nstagesr=round(Nstages) #Tomar un numero entero de pasos
Nresets=5*(gal/8340)**-1 #Numero de eventos de reinicio
Nresetsr=round(Nresets)
tadv=rand.gauss(2.5*10**-4,1.0*10**-4) #Tiempo requerido para una
    civilizacion inteligente en convertirse en avanzada
N=0
stage=0
tint=0 #Contador del tiempo
i=1
annihilation=0
while (tint<tms and stage<Nstagesr and annihilation!=1 and (t0+tint)<=13.2):
    ti=rand.gauss(0.8,0.25) #Tiempo requerido en este paso evolutivo
    stage=stage+1
    Pend=rand.gauss(0.5,0.25)

    if (i<=Nresetsr):
        i=i+1
        if (Pend>1):
            annihilation=1
            Nm1=Nm1+1 #Planetas cuya bioesfera fue destruida.
            stage=50
        else:
            fraccion=rand.uniform(0,ti)
            tint=tint+fraccion
            stage=stage-1
    else:
        tint=tint+ti

if(tint>=tms):
    if((tms+t0)>13.2):
        N1=N1+1 #Planetas con vida primitiva
    else:
        Nm1=Nm1+1 #Planetas donde la bioesfera murio por la muerte
            de la estrella

if (stage==Nstagesr):
    a10=[0,1]
    b10=[.11,.89] #Probabilidad de auto-destruccion
    Pdestroy=np.random.choice(a10,1,p=b10)
    yea.write(str(tint)+"\n")
    imf.write(str(mass) + "\n")
    d=math.sqrt(8340**2+gal**2-(2*8340*gal*math.cos(theta)))
    dly=d*3.2616
    dlgyr=dly/10**9

```

```

dis.write(str(d)+ "\n")

if (Pdestroy==1):
    N3=N3+1 #Planetas que tuvieron vida inteligente pero se auto
            -destruyeron
    ttot=tint+rand.uniform(0,tadv)
    Tvida=ttot-tint
    N=3
else:

    if ((t0+tint+tadv)<=13.2):
        N4=N4+1 #Planetas con vida avanzada
        ttot=tint+tadv
        N=4
    else:
        N2=N2+1 #Planetas con vida inteligente
        ttot=tint
        N=2

if (stage!=50 and (t0+tint)>=13.2 and tint<=tms and stage<Nstagesr):
    N1=N1+1 #Planeta tiene vida primitiva
if ((t0+tms)>=13.2):
    HZPlanetsP=HZPlanetsP+1 #Numero de planetas en la ZH que existen en
    el presente

#Condiciones para detectar una civilizacion
if (N==2 or N==4):
    if ((13.2-(t0+tint))>=dlgyr):
        deteccion=1
        det.write(str(deteccion)+ "\n")
        distdet.write(str(dly)+ "\n")

elif (N==3):
    if ((13.2-(t0+tint)-L)<=dlgyr and (13.2-(t0+tint))>=dlgyr):
        deteccion=2
        det.write(str(deteccion)+ "\n")
        distdet.write(str(dly)+ "\n")

#Completes de los exoplanetas
if (Rp<=1.4):
    if (Pp<=8.8):
        comp[0]=comp[0]+1
    elif (Pp<=13):
        comp[1]=comp[1]+1
    elif (Pp<=18):
        comp[2]=comp[2]+1
    elif (Pp<=25):
        comp[3]=comp[3]+1

```

```
elif (Pp<=35):
    comp [4]=comp [4]+1
elif (Pp<=50):
    comp [5]=comp [5]+1
elif (Pp<=71):
    comp [6]=comp [6]+1
elif (Pp<=100):
    comp [7]=comp [7]+1
elif (Pp<=141):
    comp [8]=comp [8]+1
elif (Pp<=200):
    comp [9]=comp [9]+1
elif (Pp<=283):
    comp [10]=comp [10]+1
elif (Pp<=400):
    comp [11]=comp [11]+1
elif (Rp<=2.0):
    if (Pp<=8.8):
        comp [12]=comp [12]+1
    elif (Pp<=13):
        comp [13]=comp [13]+1
    elif (Pp<=18):
        comp [14]=comp [14]+1
    elif (Pp<=25):
        comp [15]=comp [15]+1
    elif (Pp<=35):
        comp [16]=comp [16]+1
    elif (Pp<=50):
        comp [17]=comp [17]+1
    elif (Pp<=71):
        comp [18]=comp [18]+1
    elif (Pp<=100):
        comp [19]=comp [19]+1
    elif (Pp<=141):
        comp [20]=comp [20]+1
    elif (Pp<=200):
        comp [21]=comp [21]+1
    elif (Pp<=283):
        comp [22]=comp [22]+1
    elif (Pp<=400):
        comp [23]=comp [23]+1
elif (Rp<=2.8):
    if (Pp<=8.8):
        comp [24]=comp [24]+1
    elif (Pp<=13):
        comp [25]=comp [25]+1
    elif (Pp<=18):
        comp [26]=comp [26]+1
    elif (Pp<=25):
```

```
        comp [27]=comp [27]+1
elif (Pp<=35):
    comp [28]=comp [28]+1
elif (Pp<=50):
    comp [29]=comp [29]+1
elif (Pp<=71):
    comp [30]=comp [30]+1
elif (Pp<=100):
    comp [31]=comp [31]+1
elif (Pp<=141):
    comp [32]=comp [32]+1
elif (Pp<=200):
    comp [33]=comp [33]+1
elif (Pp<=283):
    comp [34]=comp [34]+1
elif (Pp<=400):
    comp [35]=comp [35]+1
elif (Rp<=4.0):
    if (Pp<=8.8):
        comp [36]=comp [36]+1
    elif (Pp<=13):
        comp [37]=comp [37]+1
    elif (Pp<=18):
        comp [38]=comp [38]+1
    elif (Pp<=25):
        comp [39]=comp [39]+1
    elif (Pp<=35):
        comp [40]=comp [40]+1
    elif (Pp<=50):
        comp [41]=comp [41]+1
    elif (Pp<=71):
        comp [42]=comp [42]+1
    elif (Pp<=100):
        comp [43]=comp [43]+1
    elif (Pp<=141):
        comp [44]=comp [44]+1
    elif (Pp<=200):
        comp [45]=comp [45]+1
    elif (Pp<=283):
        comp [46]=comp [46]+1
    elif (Pp<=400):
        comp [47]=comp [47]+1
elif (Rp<=5.7):
    if (Pp<=8.8):
        comp [48]=comp [48]+1
    elif (Pp<=13):
        comp [49]=comp [49]+1
    elif (Pp<=18):
        comp [50]=comp [50]+1
```

```
elif (Pp<=25):
    comp [51]=comp [51]+1
elif (Pp<=35):
    comp [52]=comp [52]+1
elif (Pp<=50):
    comp [53]=comp [53]+1
elif (Pp<=71):
    comp [54]=comp [54]+1
elif (Pp<=100):
    comp [55]=comp [55]+1
elif (Pp<=141):
    comp [56]=comp [56]+1
elif (Pp<=200):
    comp [57]=comp [57]+1
elif (Pp<=283):
    comp [58]=comp [58]+1
elif (Pp<=400):
    comp [59]=comp [59]+1
elif (Rp<=8.0):
    if (Pp<=8.8):
        comp [60]=comp [60]+1
    elif (Pp<=13):
        comp [61]=comp [61]+1
    elif (Pp<=18):
        comp [62]=comp [62]+1
    elif (Pp<=25):
        comp [63]=comp [63]+1
    elif (Pp<=35):
        comp [64]=comp [64]+1
    elif (Pp<=50):
        comp [65]=comp [65]+1
    elif (Pp<=71):
        comp [66]=comp [66]+1
    elif (Pp<=100):
        comp [67]=comp [67]+1
    elif (Pp<=141):
        comp [68]=comp [68]+1
    elif (Pp<=200):
        comp [69]=comp [69]+1
    elif (Pp<=283):
        comp [70]=comp [70]+1
    elif (Pp<=400):
        comp [71]=comp [71]+1
elif (Rp<=11.3):
    if (Pp<=8.8):
        comp [72]=comp [72]+1
    elif (Pp<=13):
        comp [73]=comp [73]+1
    elif (Pp<=18):
```

```
        comp [74]=comp [74]+1
elif (Pp<=25):
    comp [75]=comp [75]+1
elif (Pp<=35):
    comp [76]=comp [76]+1
elif (Pp<=50):
    comp [77]=comp [77]+1
elif (Pp<=71):
    comp [78]=comp [78]+1
elif (Pp<=100):
    comp [79]=comp [79]+1
elif (Pp<=141):
    comp [80]=comp [80]+1
elif (Pp<=200):
    comp [81]=comp [81]+1
elif (Pp<=283):
    comp [82]=comp [82]+1
elif (Pp<=400):
    comp [83]=comp [83]+1
elif (Rp<=16.0):
    if (Pp<=8.8):
        comp [84]=comp [84]+1
    elif (Pp<=13):
        comp [85]=comp [85]+1
    elif (Pp<=18):
        comp [86]=comp [86]+1
    elif (Pp<=25):
        comp [87]=comp [87]+1
    elif (Pp<=35):
        comp [88]=comp [88]+1
    elif (Pp<=50):
        comp [89]=comp [89]+1
    elif (Pp<=71):
        comp [90]=comp [90]+1
    elif (Pp<=100):
        comp [91]=comp [91]+1
    elif (Pp<=141):
        comp [92]=comp [92]+1
    elif (Pp<=200):
        comp [93]=comp [93]+1
    elif (Pp<=283):
        comp [94]=comp [94]+1
    elif (Pp<=400):
        comp [95]=comp [95]+1

#Algoritmo para la muestra completa
completeness=np.divide(comp,por)
```

```

Nctotal=0
for i in range(len(completeness)):
    Nc[i]=completeness[i]-comp[i]
    Nctotal=Nctotal+Nc[i]
Nctotalr=int(round(Nctotal))
print Nctotalr
print Nptotal
z=0
h=0
Ncm1=0
Nc0=0
Nc1=0
Nc2=0
Nc3=0
Nc4=0
Tierrasc=0
HZPlanetsTierrac=0
HZPlanetsc=0
HZPlanetsPc=0
print len(Nc)
print len(Rpc)
print len(Ppc)
print q
print len(Ts)
for i in range(Nctotalr):
    x=rand.randint(0,q-1)
    T=Ts[x]
    mass=Ms[x]
    t0=Tos[x]
    tms=Tsms[x]
    L=Ls[x]
    Np[x]=Np[x]+1
    if (h<Nc[z]):
        Rp1=Rpc[z]
        Pp1=Ppc[z]
        h=h+1
    else:
        if (z!=95):
            h=0
            z=z+1
            Rp1=Rpc[z]
            Pp1=Ppc[z]

    if (Rp1==1.4):
        Rp=rand.uniform(1.0,1.4)
    elif (Rp1==2.0):
        Rp=rand.uniform(1.4,2.0)
    elif (Rp1==2.8):
        Rp=rand.uniform(2.0,2.8)

```

```

elif (Rp==4.0):
    Rp=rand.uniform(2.8,4.0)
elif (Rp==5.7):
    Rp=rand.uniform(4.0,5.7)
elif (Rp==8.0):
    Rp=rand.uniform(5.7,8.0)
elif (Rp==11.3):
    Rp=rand.uniform(8.0,11.3)
elif (Rp==16.0):
    Rp=rand.uniform(11.3,16.0)

if (Pp1==8.8):
    Pp=rand.uniform(1.0,8.8)
elif (Pp1==13.0):
    Pp=rand.uniform(8.8,13.0)
elif (Pp1==18.0):
    Pp=rand.uniform(13.0,18.0)
elif (Pp1==25.0):
    Pp=rand.uniform(18.0,25.0)
elif (Pp1==35.0):
    Pp=rand.uniform(25.0,35.0)
elif (Pp1==50.0):
    Pp=rand.uniform(35.0,50.0)
elif (Pp1==71.0):
    Pp=rand.uniform(50.0,71.0)
elif (Pp1==100.0):
    Pp=rand.uniform(71.0,100.0)
elif (Pp1==141.0):
    Pp=rand.uniform(100.0,141.0)
elif (Pp1==200.0):
    Pp=rand.uniform(141.0,200.0)
elif (Pp1==283.0):
    Pp=rand.uniform(200.0,283.0)
elif (Pp1==400.0):
    Pp=rand.uniform(283.0,400.0)

Pimf.write(str(Rp) + "\n")
Ppp.write(str(Pp)+ "\n")
M=mass*Msun
Pps=Pp*86400
Sp=(G*M*Pps**2/(4*math.pi**2))*(1./3.)/AU
if (Rp<1.6):
    Tierrasc=Tierrasc+1
#Zona habitable Kopparapu et al. 2013
seff=[0,0,0,0,0,0]
distance=[0,0,0,0,0,0]
seffsun = [1.776,1.107, 0.356, 0.320, 1.188, 0.99]
a = [2.136e-4, 1.332e-4, 6.171e-5, 5.547e-5, 1.433e-4, 1.209e-4]
b = [2.533e-8, 1.580e-8, 1.698e-9, 1.526e-9, 1.707e-8, 1.404e-8]

```

```

c = [-1.332e-11, -8.308e-12, -3.198e-12, -2.874e-12, -8.968e-12, -7.418e-12]
d = [-3.097e-15, -1.931e-15, -5.575e-16, -5.011e-16, -2.084e-15, -1.713e-15]

teff=T
tstar = teff - 5780.0
for i in range(len(a)):
    seff[i] = seffsun[i] + a[i]*tstar + b[i]*tstar**2 + c[i]*tstar**3 + d[i]*
        tstar**4
    distance[i]=math.sqrt(L/Lsun)/math.sqrt(seff[i])
#ZH Conservativa
if (Sp>=distance[1] and Sp<=distance[2]):
    HZPlanetsc=HZPlanetsc+1

if (Rp<1.6):
    HZPlanetsTierrac=HZPlanetsTierrac+1

#Algoritmo de la vida
Nstages=rand.gauss(6,1) #Numero de pasos evolutivos
Nstagesr=round(Nstages) #Tomar un numero entero de pasos
Nresets=5*(gal/8340)**-1 #Numero de eventos de reinicio
Nresetsr=round(Nresets)
tadv=rand.gauss(2.5*10**-4,1.0*10**-4) #Tiempo requerido para una
    civilizacion inteligente en convertirse en avanzada
N=0
stage=0
tint=0 #Contador del tiempo
i=1
annihilation=0
while (tint<tms and stage<Nstagesr and annihilation!=1 and (t0+tint)<=13.2):
    ti=rand.gauss(0.8,0.25) #Tiempo requerido en este paso evolutivo
    stage=stage+1
    Pend=rand.gauss(0.5,0.25)

    if (i<=Nresetsr):
        i=i+1
        if (Pend>1):
            annihilation=1
            Ncm1=Ncm1+1 #Planetas cuya bioesfera fue destruida.
            stage=50
        else:
            fraccion=rand.uniform(0,ti)
            tint=tint+fraccion
            stage=stage-1
    else:
        tint=tint+ti

if(tint>=tms):
    if((tms+t0)>13.2):

```

```

        Nc1=Nc1+1 #Planetas con vida primitiva
    else:
        Ncm1=Ncm1+1 #Planetas donde la biosfera murio por la muerte
            de la estrella
if (stage==Nstagesr):
    a10=[0,1]
    b10=[.11,.89] #Probabilidad de auto-destruccion
    Pdestroy=np.random.choice(a10,1,p=b10)
    yea.write(str(tint)+"\n")
    imf.write(str(tint)+"\n")
    gal=rand.uniform(7000,9000)
    theta=rand.uniform(0,2*math.pi)
    d=math.sqrt(8340**2+gal**2-(2*8340*gal*math.cos(theta)))
    dly=d*3.2616
    dlgyr=dly/10**9
    dis.write(str(dly)+ "\n")

    if (Pdestroy==1):
        Nc3=Nc3+1 #Planetas que tuvieron vida inteligente pero se
            auto-destruyeron
        ttot=tint+rand.uniform(0,tadv)
        Tvida=ttot-tint
        N=3
    else:

        if ((t0+tint+tadv)<=13.2):
            Nc4=Nc4+1 #Planetas con vida avanzada
            tint=tint+tadv
            N=4
        else:
            Nc2=Nc2+1 #Planetas con vida inteligente
            N=2

if (stage!=50 and (t0+tint)>=13.2 and tint<=tms and stage<Nstagesr):
    Nc1=Nc1+1 #Planeta tiene vida primitiva
if ((t0+tms)>=13.2):
    HZPlanetsPc=HZPlanetsPc+1 #Numero de planetas en la ZH que existen
        en el presente

if (N==2 or N==4):
    if ((13.2-(t0+tint))>=dlgyr):
        deteccion=1
        det.write(str(deteccion)+ "\n")
        distdet.write(str(dly)+ "\n")

elif (N==3):
    if ((13.2-(t0+tint)-Tvida)<=dlgyr and (13.2-(t0+tint))>=dlgyr):

```

```
deteccion=2
det.write(str(deteccion)+ "\n")
distdet.write(str(dly)+ "\n")
```

```
NO=Nptotal-Nm1-N1-N2-N3-N4 #Numero de planetas que nunca tuvieron vida.
```

```
Nc0=Nctotalr-Ncm1-Nc1-Nc2-Nc3-Nc4 #Numero de planetas que nunca tuvieron vida.
```

Apéndice B

Diagrama de flujo

En la siguiente figura se muestra el diagrama de flujo del algoritmo utilizado para simular la evolución de la vida en aquellos planetas que cumplían con los criterios de habitabilidad, esquematizando lo dicho en la sección 6.2. De este algoritmo se obtienen los resultados de la Tabla 7.2. Las variables utilizadas en el diagrama de flujo se muestran a continuación.

Tabla B.1: Parámetros utilizados en el algoritmo de vida

Parámetro	Descripción
stage	Contador de la etapa actual
t_{int}	Tiempo que requirió el planeta para generar una civilización tecnológica desde el surgimiento de la vida
i	Contador de eventos de “reinicio”
annihilation	Variable lógica que determina si la vida se aniquila en un “reinicio”
N_{stages}	Número de pasos evolutivos requeridos para formar una civilización tecnológica
N_{resets}	Número de eventos de “reinicio”
t_i	Tiempo requerido para completar cada paso evolutivo
t_{adv}	Tiempo que le toma a una civilización “vulnerable” convertirse en civilización “avanzada”
t_{ms}	Tiempo de vida en secuencia principal de la estrella
t_0	Tiempo de nacimiento de la estrella
P_{end}	Probabilidad de que ocurra aniquilación en un “reinicio”
P_{destroy}	Probabilidad de que una civilización “vulnerable” sobreviva lo suficiente como para convertirse en “avanzada”
N_x	Número de planetas con el x Índice Evolutivo de Inteligencia

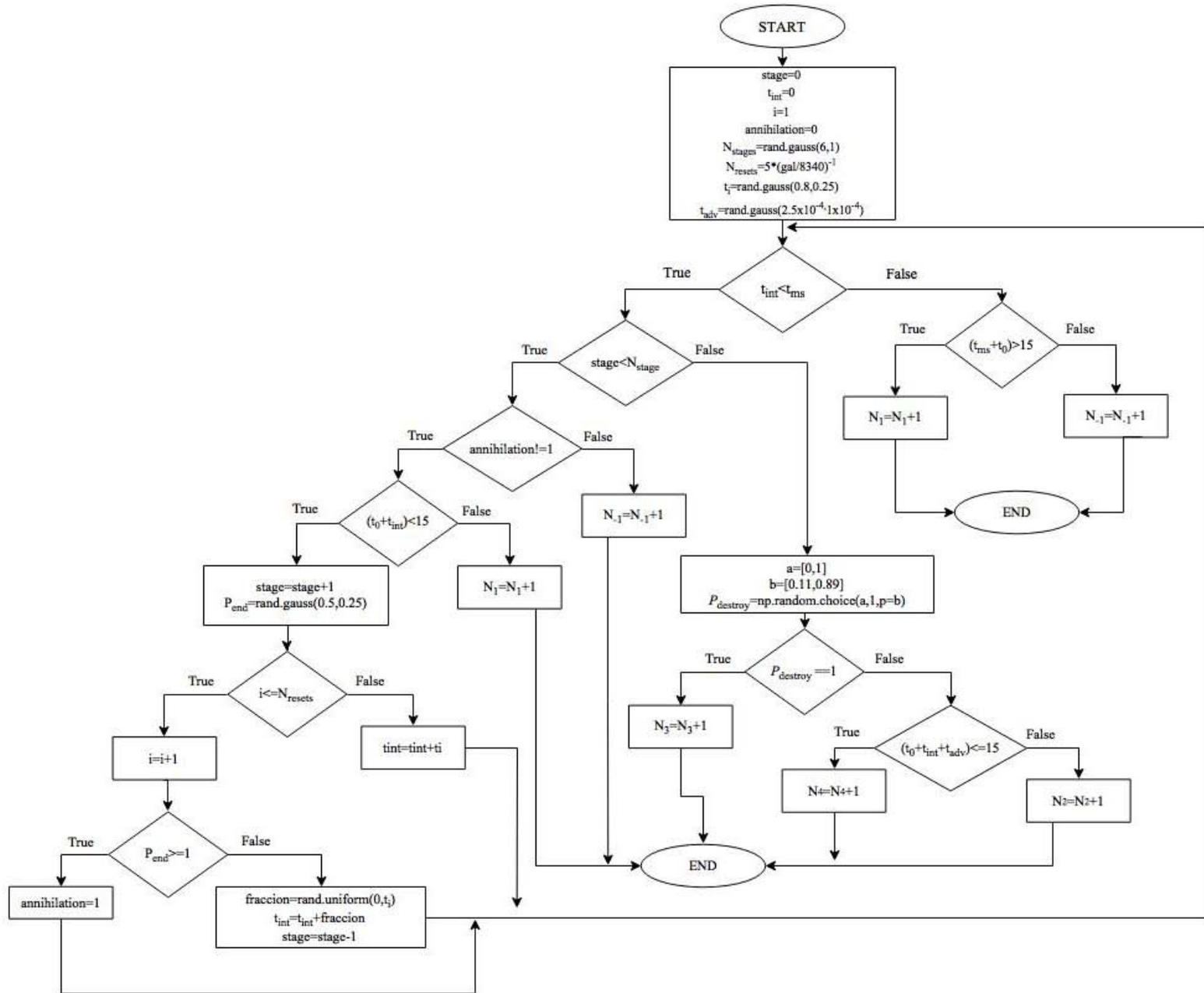


Figura B.1: Diagrama de flujo.