



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

ZONA DE HABITABILIDAD GALÁCTICA EN LA GALAXIA M33

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO EN FÍSICA APLICADA

PRESENTA:

INGRID RUTH VÁSQUEZ BÁEZ

DIRECTOR: JUAN RAMÓN TIJERINA GONZALEZ

HUAJUAPAN DEL LEÓN, OAXACA.

MAYO 2015

A mis padres, Mercedes y Roberto, por su amor, el esfuerzo y apoyo incondicional que me brindaron todos estos años y que me hicieron mantenerme en el camino aún en los momentos más difíciles.

A mis hermanos, Rachel e Irvin, por su amor incondicional y por estar siempre conmigo a pesar de la distancia.

Y a Alfonso por amarme tal cual soy, un poco extraña, por ser mi refugio y estar a mi lado siempre y sin condiciones. Te amo.

Agradecimientos

Doy gracias:

A Dios por ser mi apoyo y mi fortaleza para poder llegar al final de esta etapa.

A mis padres Mercedes y José por su apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida, por sus enseñanzas y consejos en momentos difíciles, por no dejarme caer nunca, por su amor y paciencia y sobre todo por creer en mí, gracias infinitas.

A mis hermanos Rachel e Irvin por llenar mi vida de grandes momentos, por escucharme y por ser mi alegría en tiempos difíciles.

A Alfonso, por ser una parte muy importante de mi vida, por llegar en el momento preciso y estar conmigo en las buenas y en las malas, sobre todo por su paciencia y su amor incondicional.

A mis amigos y compañeros Víctor, JC, Magy, Jonatan, Marichuy, Olaf y Moy, por recorrer conmigo este largo camino, por todas las alegrías y aventuras que vivimos juntos, siempre estarán en mi corazón.

A Leti, mi asesora, por darme la oportunidad de adentrarme en este mundo maravilloso de la investigación, la astrofísica y la astrobiología. Por su sinceridad, por su paciencia y por compartir conmigo sus conocimientos.

A Erika y Sonia, por ser mis compañeras de tesis, mis amigas, por

escucharme, por darme fuerza para salir adelante en momentos de desesperación, por hacer de mi estancia en el D.F. uno de los mejores momentos de mi vida.

A Fabiola, por su apoyo incondicional en todo el proceso de la elaboración de esta tesis, por compartir su conocimiento conmigo, por estar pendiente de mí y por mostrarme siempre una sonrisa.

A las chicas cosmoquímicas Fátima, Nancy, Gloria, Lili, por ser tan buenas personas conmigo, por confiar en mí y darme su amistad.

A mi asesor, M.C. Juan Ramón Tijerina Gonzalez, por apoyarme para que este trabajo de tesis fuera posible y por brindarme sus conocimientos durante estos 5 años en la universidad.

Al Dr. Rafael Martínez Martínez, quien me dio la oportunidad de acercarme al mundo de la investigación, por brindarme su amistad, por compartir su experiencia y conocimientos conmigo y sobre todo por confiar en mí durante toda mi estancia en la universidad.

A mis sinodales Dr. Raúl Juárez Amaro, Dr. Ricardo Rosas y M.C. Juan Carlos Mendoza Santos, por aceptar con gusto este trabajo de tesis.

A todos los amigos y compañeros que me acompañaron en este proceso de formación universitaria, por sus palabras, por los momentos, por las risas, no los olvidaré.

A mi alma máter, la Universidad Tecnológica de la Mixteca, por cobijar mis estudios durante estos 5 años.

Índice general

Agradecimientos	III
Índice de figuras	VII
Introducción	IX
1. Fundamentos teóricos	1
1.1. Astrobiología	1
1.2. Evolución química del universo	2
1.3. Abundancia de elementos químicos	6
1.4. Metalicidad	7
1.4.1. La metalicidad y su relación con la formación de planetas	8
1.4.2. La metalicidad y su relación con la masa de las galaxias	9
1.5. Galaxia M33 o galaxia del triángulo	10
1.6. Escalas de tiempo	10
2. Modelo de Evolución Química	13
2.1. Restricciones observacionales	14
2.1.1. Distribución radial de la densidad superficial de masa de gas, $M_{gas}(r)$	14
2.1.2. Distribución radial de la densidad superficial de masa estelar total $M_{stars}(r)$	14
2.1.3. Distribución radial de la densidad superficial de la masa bariónica total $M_{tot}(r)$	15
2.1.4. Distribución radial de la SFR, $SFR(r)$	15

2.1.5. Abundancias químicas	16
2.2. Características del CEM	16
2.3. Resultados del CEM	18
3. Zona de habitabilidad galáctica	23
3.1. Características y restricciones para la GHZ	25
3.1.1. Características Astrofísicas	25
3.1.2. Características Geofísicas	26
3.1.3. Características Biogénicas	27
3.1.4. Restricciones para la GHZ	28
4. Resultados y discusión	31
4.1. Probabilidad de formación estelar, P_{SF}	31
4.2. Probabilidad de formación de planetas, P_Z	32
4.3. Probabilidad de que un planeta albergue vida básica y vida compleja, P_{BL} , P_{CL}	35
4.4. Probabilidad de sobrevivir a supernovas, P_{SN}	35
4.5. Zona de Habitabilidad Galáctica de la Galaxia M33	40
4.6. Efectos de la SNR en la GHZ	43
4.7. Comparación de la GHZ de M33 con las GHZs de la MW y M31	45
5. Conclusiones	49
Bibliografía	51
A.	53
A.1. Tasa de formación estelar, SFR	53
A.2. Función de masa inicial, IMF	53
B.	55
B.1. Glosario	55

Índice de figuras

2.1. Distribuciones radiales de M33 en el tiempo presente.	15
2.2. Distribución radial de la SFR en tiempo presente.	16
2.3. Distribución radial en tiempo presente de la relación O/H. . .	17
2.4. Distribución radial de Z/Z_{\odot}	19
2.5. Distribución radial de la SFR.	20
2.6. Evolución de la SFR para $r= 2, 4$ y 6 kpc	21
2.7. Evolución de la SFR para $r = 6,7,8$ y 9 kpc.	21
2.8. Evolución de la SNRII en la Galaxia M33.	22
2.9. Evolución de la SNRIa en la Galaxia M33.	22
4.1. Probabilidad de formación estelar.	32
4.2. Histograma de exoplanetas	33
4.3. Probabilidad de formación de exoplanetas en M33.	34
4.4. Probabilidad de formación de planetas.	34
4.5. Probabilidad de que emerja vida básica.	36
4.6. Probabilidad de que emerja vida compleja.	36
4.7. Función de probabilidad de sobrevivir a una tasa de super- novas.	38
4.8. Probabilidad de sobrevivir a supernovas tipo II.	38
4.9. Probabilidad de sobrevivir a supernovas tipo Ia.	39
4.10. Probabilidad de sobrevivir a supernovas tipo II y tipo Ia. . .	39
4.11. Zona de habitabilidad galáctica en la galaxia M33, para la existencia de vida básica	40
4.12. Zona de habitabilidad galáctica en la Galaxia M33, para la existencia de vida compleja	41
4.13. Evolución en el tiempo de $\langle SNRII \rangle$	44

4.14. Evolución en el tiempo de $\langle SNRIa \rangle$	44
4.15. Zona de Habitabilidad Galáctica de M31, MW y M33	47

Introducción

El universo está conformado por un vasto número de galaxias, las cuales se forman a partir de la conglomeración de miles de millones de estrellas y sistemas planetarios. La existencia de esta gran cantidad de galaxias, estrellas y planetas, hace difícil mantener la idea de que en nuestra galaxia, la Vía Láctea (MW, por sus siglas en inglés, Milky Way), exista el único lugar habitable en el cosmos, es decir, el planeta Tierra, que a su vez forma parte de nuestro Sistema Solar. Debido a la incertidumbre de si nuestro planeta es el único lugar capaz de sustentar vida, la búsqueda de lugares habitables en el universo se ha ido extendiendo durante las últimas décadas.

Hace aproximadamente 50 años, surgió el concepto de Zona Habitable Circumestelar (CHZ, por sus siglas en inglés, Circumstellar Habitable Zone), limitado a establecer la zona habitable en sistemas planetarios y definido como aquella región alrededor de una estrella, en donde planetas terrestres pueden mantener agua en estado líquido sobre su superficie por un largo periodo de tiempo. Posteriormente, en años más recientes, se propuso que dentro de las galaxias existen regiones favorables para el desarrollo y mantenimiento de la vida a largo plazo, comparable a la vida en la Tierra [1], por lo cual se definió el concepto de Zona de Habitabilidad Galáctica (GHZ, por sus siglas en inglés, Galactic Habitable Zone), el cual es análogo a la CHZ pero extrapolado a toda una galaxia.

El concepto de GHZ fue introducido por primera vez por Gonzalez et al. en el año 2001 y se define como la región con suficiente abundancia de elementos químicos para formar sistemas planetarios en los que se puedan formar planetas tipo Tierra que sean capaces de sustentar vida.

Las mayoría de las investigaciones sobre la GHZ se han centrado en nuestra galaxia, ya que en la MW se encuentra el único lugar habitable

conocido. Sin embargo, recientemente se ha calculado la GHZ para dos galaxias elípticas y para la galaxia más masiva del Grupo Local de galaxias (LG, por sus siglas en inglés, Local Group), la galaxia de Andrómeda o M31 [2].

Todos estos estudios han permitido establecer los factores y restricciones que permitan generar las condiciones adecuadas para sustentar la vida, los cuales tienen que ver con la cantidad de elementos químicos necesarios para la formación de planetas, el lugar y el tiempo en el que son formados los sistemas planetarios en las galaxias y las amenazas a las que están expuestos estos sistemas; ya que cabe mencionar que el hecho de que exista una gran cantidad de estrellas y planetas dentro de una galaxia, no es condición suficiente para determinar la habitabilidad.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, en este trabajo nos dimos a la tarea de calcular la GHZ de la galaxia M33 o galaxia del Triángulo, que es una galaxia espiral perteneciente al LG. Nuestro interés particular para determinar la GHZ en M33, radica en que esta galaxia consta de una masa intermedia entre las galaxias masivas y las galaxias enanas del LG, lo que hace interesante calcular su GHZ y así conocer la capacidad que tiene una galaxia pequeña de formar planetas sólidos que puedan albergar vida.

Así entonces, esta tesis está organizada de la siguiente manera:

En el capítulo 1 se describen los fundamentos teóricos necesarios para la comprensión y desarrollo de este trabajo.

En el capítulo 2 se presenta el Modelo de Evolución Química (CEM, por sus siglas en inglés, Chemical Evolution Model) construido en el año 2013 por Robles-Valdez et al. para la galaxia M33, el cual permite inferir la historia de las abundancias químicas del gas contenido en la galaxia y proporciona los datos necesarios para el cálculo de la GHZ.

En el capítulo 3 se dan a conocer los trabajos previos sobre la GHZ en nuestra galaxia y en la galaxia de Andrómeda, los cuales representan las bases y fundamentos de este trabajo. Además en este capítulo se exponen cada una de las restricciones que se tomaron en cuenta para calcular la GHZ en M33.

El capítulo 4 está destinado a presentar los resultados obtenidos a partir de los datos proporcionados por el CEM y bajo las restricciones mostradas en el capítulo 3. Se muestra de manera gráfica la GHZ calculada para M33 y se realiza una comparación de las GHZs de la galaxia M33 y las galaxias

del LG, M31 y MW respectivamente.

Finalmente en el capítulo 5 se exponen las conclusiones de todo el trabajo realizado.

Capítulo 1

Fundamentos teóricos

En el presente capítulo se dan a conocer los fundamentos teóricos más importantes y necesarios para comprender de una mejor manera lo que implica el concepto de GHZ, así como también para entender todo el proceso que se llevó a cabo para calcular la zona de habitabilidad galáctica en la galaxia M33 o galaxia del triángulo.

1.1. Astrobiología

Una de las ciencias que está estrechamente relacionada con el estudio de la Zona de Habitabilidad Galáctica es la Astrobiología, la cual es una ciencia multidisciplinaria que integra conocimientos de distintas áreas tales como: la astronomía, la física, la química, la biología, la geología e incluso la ingeniería (específicamente en el ámbito de la instrumentación astronómica).

Dicha relación entre la GHZ y la astrobiología, se debe a que esta disciplina se encarga de estudiar el origen, evolución, distribución y futuro de la vida en la Tierra y en el universo, dándose además a la tarea de buscar y definir los mejores ambientes habitables tanto en nuestro Sistema Solar como fuera de él. Esto debido a que actualmente se ha detectado una cantidad de 1918 exoplanetas, los cuales son planetas que se encuentran orbitando alguna estrella distinta del Sol, es decir, que no pertenecen a nuestro sistema solar y que pueden ser candidatos a ser habitables.

La observación directa de exoplanetas es de gran dificultad ya que se encuentran a grandes distancias respecto de la Tierra y, en consecuencia, suelen utilizarse técnicas de detección indirecta, es decir, a través de la medición de los efectos que tienen los planetas sobre las estrellas que los albergan. Algunas de estas técnicas son: velocidad radial, astrometría, tránsitos y microlentes gravitacionales.

Actualmente aún no se tienen exactamente bien definidos los requisitos necesarios para que la vida emerja, sin embargo diversos autores coinciden en que uno de los principales requerimientos para que un planeta sea habitable y que la vida pueda surgir tal y como la conocemos, es la presencia de agua líquida [1–3].

Cabe mencionar que el hecho de que el agua pueda mantenerse en estado líquido sobre la superficie de algún posible astro, implica que se cumplan otras condiciones las cuales tienen que ver con la temperatura, la presencia de una atmósfera, el tamaño y la posición relativa a la estrella anfitriona; si estas condiciones son las adecuadas, permitirán además la presencia de moléculas orgánicas simples que puedan dar paso a moléculas orgánicas más complejas. En sí, para que un astro pueda considerarse habitable, debe ser semejante a la Tierra, ya que nuestro planeta y su posición en el Sistema Solar, se consideran como las principales referencias para establecer las restricciones necesarias para el surgimiento y evolución de la vida como la conocemos, puesto que es el único lugar con vida en el universo conocido actualmente.

Como es sabido, la vida en la Tierra se fundamenta en el ácido desoxirribonucleico o ADN, formado por 6 elementos químicos: carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), azufre (S) y fósforo (P). Las cantidades de estos elementos químicos, al igual que la mayoría de los que aparecen en la tabla periódica, han ido incrementando durante toda la vida del universo. Es por eso que la búsqueda de zonas habitables en el cosmos se cimienta en su evolución química [4].

1.2. Evolución química del universo

Los seis elementos más abundantes en el universo son hidrógeno, helio, oxígeno, carbono, neón y nitrógeno, los cuales, junto con los demás elementos restantes que se encuentran registrados en la tabla periódica, se

encuentran presentes en estrellas, galaxias y nubes de materia interestelar. Sin embargo, con base en observaciones más precisas y detalladas acerca de la composición química del universo, se ha concluido que esta composición no es uniforme.

Todos los átomos, incluyendo aquellos que conforman a todos los seres vivos existentes en la Tierra, fueron creados durante los primeros cuatro minutos del universo observable y posteriormente en el interior de las estrellas [5].

El universo se creó hace 13.75 mil millones de años o 13.75 Giga años (Ga, $1 \text{ Ga} = 1 \times 10^9$ años), a partir de un evento singular denominado Big Bang o Gran Explosión, la cual es la teoría más aceptada sobre el origen del universo. La composición química por masa del universo está constituida mayoritariamente por hidrógeno (75 %) y helio (25 %), junto a otros elementos químicos mucho menos abundantes.

Existen dos situaciones donde se forman los núcleos de todos los átomos (proceso conocido como nucleosíntesis¹): en los primeros minutos de vida del universo (nucleosíntesis primigenia o primordial) y durante la vida y muerte de las estrellas (nucleosíntesis estelar y nucleosíntesis explosiva).

A la creación de elementos químicos en el universo temprano se le denomina *nucleosíntesis primigenia*. Después de haber ocurrido la Gran Explosión, a los primeros segundos de iniciar la expansión del universo la temperatura era del orden de 10^{10} K, lo cual permitió reacciones nucleares para formar átomos de hidrógeno y deuterio (^2H o D), sin embargo, debido a la alta temperatura, no era posible la estabilización del deuterio causando su destrucción. Posteriormente la temperatura fue disminuyendo ($T \sim 3 \times 10^9$ K) permitiendo que el ^2H se mantuviera estable. La estabilidad del deuterio dio paso a otras reacciones nucleares permitiendo la formación de isótopos y otros elementos químicos ligeros tales como ^3He , ^4He , ^7Be y ^7Li [6].

A los cuatro minutos del inicio de la expansión, la temperatura del universo disminuyó ($T \sim 8 \times 10^8$ K) y las reacciones nucleares cesaron impidiendo la formación de elementos químicos más pesados. A partir de ese momento la composición química del universo se mantuvo constante,

¹Es el proceso mediante el cual se forman nuevos elementos químicos a partir de reacciones nucleares. La nucleosíntesis se lleva a cabo principalmente en el interior de las estrellas y durante las explosiones de supernovas.

formado fundamentalmente por átomos de H, ${}^4\text{He}$ y pequeñas trazas de D y ${}^7\text{Li}$.

Alrededor de unos 200 millones de años después del inicio de la expansión y de la formación de los primeros elementos químicos, se constituyeron las primeras estrellas y galaxias, dando paso a la *nucleosíntesis estelar*.

La *nucleosíntesis estelar* toma lugar en el momento en que una nube de gas se contrae para crear una estrella. Cuando el centro de la nube contraída alcanza una $T \sim 1 - 2 \times 10^8$ K, ocurre la fusión de 4 núcleos de H para formar ${}^4\text{He}$, siendo el H el combustible principal de la estrella. Todas las estrellas pasan la mayor parte de sus vidas llevando a cabo este proceso de fusión nuclear durante toda la etapa de su existencia.

La evolución de las estrellas depende directamente de su masa y a su vez todo ese proceso de evolución estelar va enriqueciendo el medio interestelar (ISM, por sus siglas en inglés, Interstellar Medium) con elementos químicos más pesados.

Las estrellas están distribuidas en un intervalo de masa entre 0.01 y 100 masas solares (M_{\odot}) y suelen clasificarse en *estrellas de baja masa* si tienen aproximadamente una masa inferior a $8 M_{\odot}$ y *estrellas masivas*, si su masa se encuentra por encima de ese valor.

Las *estrellas de baja masa* producen principalmente He, C y N, los cuales son expulsados al ISM por medio de vientos estelares y en la etapa final de la estrella, denominada nebulosa planetaria. En el centro de esa nebulosa planetaria queda el núcleo desnudo de la estrella, llamado enana blanca, con masa y radio semejantes a la de la Tierra.

Las *estrellas masivas* sintetizan, además de los elementos generados por estrellas de baja masa, la mayoría de los elementos químicos, entre los cuales se encuentran O, Ne, Mg, Si, P, S y Fe. La producción nucleosintética de estos elementos se realiza en dos periodos: desde el nacimiento de la estrella hasta la etapa de supernova (en el interior estelar) y en sus últimos segundos de vida (en la etapa de supernova). Los elementos generados son expulsados al ISM mediante vientos estelares y en el momento en que terminan su vida como supernovas tipo II (SNI) principalmente. Estas supernovas no solamente enriquecen el medio interestelar sintetizando nuevos materiales, sino que son lo suficientemente energéticas como para afectar la estructura del ISM y por ende la estructura de una atmósfera planetaria. Por otro lado, el núcleo desnudo de la estrella se convierte en una estrella de neutrones

si la masa del cadáver estelar se encuentra entre 1.4 y 3 masas solares, mientras que si la masa es mayor a $3 M_{\odot}$, el cadáver se convierte en un hoyo negro [6].

Particularmente, existen estrellas que integran sistemas binarios y que están formados por estrellas de baja masa. En estos sistemas se lleva a cabo la llamada *nucleosíntesis en sistemas binarios en contacto*, la cual ocurre cuando ambas estrellas intercambian material entre sí, produciendo elementos pesados como Si, Ar, Ca, Ti, O, Ne, Mg, S y principalmente ^{56}Fe . Cabe mencionar que los sistemas binarios son los progenitores de las supernovas tipo Ia (SNIa), las cuales son el resultado de la acreción de masa por parte de la estrella de baja masa (generalmente una enana blanca) desde su estrella compañera (generalmente una gigante roja).

Para los fines de este trabajo, en el Cuadro 1.1, se muestra la aportación de la Gran Explosión y los diferentes tipos de estrellas a las abundancias actuales de los principales elementos biogénicos (C, H, O, N, S, P) y geofísicos (Fe, O, Si, Mg).

Elemento químico	Gran explosión	Estrellas masivas	Estrellas de baja masa	Supernovas tipo Ia
C	0	48	50	2
H	100	0	0	0
O	0	98	0	2
N	0	22	78	0
S	0	84	0	16
P	0	100	0	0
Fe	0	38	0	70
Si	0	85	0	15
Mg	0	96	0	4

Cuadro 1.1: Distribución en porcentajes del origen cósmico de los principales elementos biogénicos y geofísicos [6].

Hasta aquí, todo lo explicado en este apartado nos conduce a inferir que la existencia y evolución de los elementos químicos, es una consecuencia de procesos nucleares que han tenido lugar desde los primeros segundos en que se inició la expansión del universo hasta la formación de las estrellas en donde aún estos procesos continúan.

1.3. Abundancia de elementos químicos

El cálculo de abundancias químicas en el universo, proporciona información importante para conocer la historia de la evolución de las galaxias, la cual está relacionada directamente con las diferentes historias de formación estelar ocurridas en cada galaxia a lo largo del tiempo.

La abundancia química de un determinado elemento se puede medir en la fotosfera estelar a partir de la intensidad de las líneas de absorción. La intensidad de estas líneas en un espectro estelar depende de la abundancia del elemento responsable, de la temperatura efectiva de la estrella, de la aceleración debida a la gravedad en su superficie y de la turbulencia, en pequeña escala, en la atmósfera de la estrella. Igualmente, la abundancia se puede determinar a partir de la intensidad de las líneas de emisión de gas interestelar, sobre todo de las regiones H_{II} [7].

La abundancia de un elemento químico X_i (o isótopo), se define como la cantidad relativa de dicho elemento en una muestra dada.

Debido a que el hidrógeno (H) es el elemento químico más abundante en el universo, en astronomía, la abundancia de un determinado elemento X_i se expresa con respecto a H.

Por otro lado, dado que el Sol es la estrella más cercana a la Tierra y por lo tanto la estrella que mejor conocemos, todas las abundancias químicas medidas en el universo toman como referencia a las propiedades solares (masa, luminosidad y composición química); por lo que las abundancias químicas en estrellas se expresan como:

$$[X_i/H] = \log(X_i/H) - \log(X_i/H)_\odot \quad (1.1)$$

donde X_i/H y $(X_i/H)_\odot$ son los cocientes de la abundancia por número de un elemento X_i y del H presente en la estrella de estudio y en el Sol, respectivamente.

La composición química por masa del universo cuando se formó, hace 13.7 Ga, era de 75.23 % de H, 24.77 % de ⁴He y trazas de deuterio, ³He y ⁷Li. En cuanto al Sol, la abundancia química con la que se formó hace 4.6 Ga (abundancia protosolar), era de 71.54 % de H, 27.03 % de He y 1.43 % de metales (en astronomía se les denomina metales a todos aquellos elementos químicos más pesados que el He). Las abundancias en la fotosfera solar, por masa, de H, He y de metales son 73.81 %, 24.85 % y 1.34 %, respectiva-

mente. Es importante mencionar que la composición química protosolar es ligeramente mayor a la composición química que se observa en la fotosfera del Sol, debido al asentamiento gravitacional que han sufrido el He y los metales desde que se creó el Sol hasta el día de hoy.

Mientras que la nube molecular donde se creó el Sol y el Sistema Solar presentaba la composición química protosolar, los planetas del Sistema Solar tienen una composición química diferente: los planetas interiores son rocosos, con alto contenido de Si y Fe, a diferencia de los planetas exteriores que son gaseosos y líquidos, formados principalmente por H y He. La Tierra en particular, tiene un contenido de metales superior al 99 %, está compuesta por 33 % de Fe, 30 % de O, 15 % de Si, 13 % de Mg, 3 % de S, 2 % de Ni, 1.5 % de Ca, 1 % de Al y 1.5 % de otros elementos pesados.

A pesar de que el Sol es utilizado como el estándar fundamental en los estudios de abundancias químicas, no todas las estrellas tienen su misma composición química y por lo tanto, posibles exoplanetas que puedan existir alrededor de alguna estrella, no comparten necesariamente las mismas abundancias químicas de los planetas del Sistema Solar.

Cabe mencionar que las estrellas más viejas de la vecindad solar tienen un contenido de elementos pesados 10^5 veces menor que el Sol, dificultando la formación de planetas, mientras que las estrellas más jóvenes, en la misma vecindad, presentan una metalicidad 3 veces mayor que el Sol [6]

1.4. Metalicidad

Como se describió en la sección 1.2, todos los elementos químicos sintetizados por las estrellas son eyectados al medio interestelar cuando las estrellas mueren. Los elementos nuevos al ser expulsados, se mezclan con el gas existente entre las estrellas y lo van enriqueciendo químicamente. De ese gas más rico en helio y metales nace una nueva generación estelar, la cual vuelve a sintetizar y arrojar elementos químicos al ISM. Este ciclo de reciclaje de elementos, se ha venido repitiendo desde el nacimiento de las primeras estrellas hasta la actualidad, permitiendo un enriquecimiento químico del universo y el aumento de la abundancia de metales en las galaxias a lo largo del tiempo.

Por simplicidad, a la abundancia de metales se le conoce como metalicidad (Z) y la metalicidad solar es designada como Z_{\odot} , la cual tiene un

valor fotosférico de $Z_{\odot} = 0.0134$ y un valor protosolar de $Z_{\odot} = 0.0142$.

Cuando se formó el universo hace unos 13.7 Gaños, el material bariónico^{II} del cosmos estaba constituido por H y He, llamado gas primigenio. En ese gas fueron formadas las primeras estrellas, la mayoría de alta masa, cuyas primeras generaciones se encargaron de enriquecer el gas primigenio con C, N y O. En el momento en que la metalicidad del ISM alcanzó unas milésimas de la metalicidad solar (cuando el universo tenía 10^{-1} Gaños) se formaron las primeras generaciones estelares completas, las cuales están conformadas por estrellas de baja masa y estrellas masivas [6].

1.4.1. La metalicidad y su relación con la formación de planetas

Cuando el gas del ISM llega a tener una metalicidad mayor que un décimo de la metalicidad solar protosolar ($Z_{\odot} = 0.0142$), la probabilidad de que se creen en él estrellas con planetas tipo Tierra, es mayor. Por otro lado, a metalicidades más bajas, la probabilidad de formación de planetas tipo Tierra se reduce, especialmente si el contenido de elementos geofísicos es bajo. Así pues, si se desea inferir químicamente la formación de planetas tipo Tierra en algún grupo de estrellas localizado en una zona del universo, se requiere que el medio interestelar en donde las estrellas se formaron presente abundancias de elementos pesados relativamente altas.

En general, observaciones de los discos protoplanetarios alrededor de estrellas jóvenes en regiones de formación estelar, apoyan la idea ampliamente aceptada de que la formación de planetas es un producto común de la formación de estrellas y así, un ejemplo clásico de la conexión estrella-planeta es la correlación entre el número de planetas formados y la metalicidad existente en estrellas tipo solar que orbitan, lo que indica que a una mayor abundancia de metales, aumenta la probabilidad de formación de planetas [8].

Específicamente el impacto de la metalicidad sobre la formación de planetas tipo Tierra no está definida actualmente, sin embargo los metales (en forma de polvo) está bien claro que son necesarios para la formación de

^{II}La materia bariónica es la materia que forma todo lo que nos rodea y podemos ver, incluidos nosotros mismos.

planetesimales^{III}, sin embargo la cantidad de metales requerida depende del escenario que se suponga y de las condiciones iniciales, como por ejemplo el tamaño del disco protoplanetario [3].

1.4.2. La metalicidad y su relación con la masa de las galaxias

Como hemos visto hasta ahora, a través del continuo nacimiento y muertes de generaciones de estrellas, la abundancia de metales en el ISM incrementa con el tiempo. A parte de que la composición química del universo no es uniforme, es importante señalar que no todas las galaxias en el cosmos han tenido la misma evolución química.

El ejemplo más común que tenemos acerca de la evolución química de una galaxia es la MW. En nuestra galaxia, las zonas centrales se beneficiaron con una formación estelar más activa, más breve y más antigua que en las zonas exteriores debido a que las partes internas se ensamblaron más rápido y con mayor cantidad de gas. Esta diferencia en la formación de la galaxia, originó el gradiente químico observado en el disco galáctico, de tal manera que las zonas internas tienen un contenido de metales unas 3 veces mayor que el solar, mientras que las partes externas presentan una metalicidad 10 veces menor que la solar [6].

La Vía Láctea es una galaxia espiral barrada, con su propia evolución química. Así como la MW, cada una de las galaxias en el universo se diferencian en forma, masa, dimensiones y metalicidad, lo cual apunta a que cada galaxia ha tenido una historia de formación estelar individual y por lo tanto una evolución química propia. De manera general, existe una relación directa entre la masa de una galaxia y su contenido de metales, ya que mientras mas masiva es la galaxia, mas estrellas se han formado y como los metales son producidos por las estrellas, por lo tanto la metalicidad de la galaxia es mayor.

Lo anterior implica que cada galaxia podría tener una zona habitable específica, ya que el gradiente químico y la historia de formación estelar en cada una de las galaxias, son factores que influyen en el cálculo de las

^{III}Planetesimal es el nombre que se aplica siempre a pequeños cuerpos durante el proceso de formación de los planetas, aunque también este término es utilizado para referirse a cuerpos menores del Sistema Solar.

zonas de habitabilidad galáctica.

1.5. Galaxia M33 o galaxia del triángulo

Como vimos en la sección anterior, cada galaxia tiene una evolución química propia y por ende una GHZ específica.

Este trabajo está dedicado a calcular la Zona de Habitabilidad Galáctica en la galaxia M33, la cual es la tercer galaxia en tamaño del Grupo Local de galaxias (LG), después de la galaxia de Andrómeda y la Vía Láctea.

M33 es una galaxia Sc^{IV} tipo tardía de baja luminosidad, aproximadamente 20 veces más baja que la luminosidad de la MW. A pesar de ser una galaxia espiral, M33 no presenta barra como otras galaxias espirales. Esta galaxia se localiza a una distancia de 840 kpc; tiene un semieje mayor de ~ 9 kpc y su masa bariónica corresponde a un décimo de la masa de la MW [9].

Es importante el estudio de M33 ya que consta de una masa intermedia entre las galaxias grandes del LG, las cuales pueden ser explicadas con un escenario de formación dentro-fuera (M31 y MW) y las galaxias enanas del LG, las cuales se explican con un escenario de formación fuera-dentro. Estas características son lo que hace interesante calcular su GHZ ya que así se puede conocer la capacidad de una galaxia pequeña de formar planetas sólidos que puedan albergar vida y dar las bases para el estudio de zonas habitables galácticas en galaxias enanas.

Cabe mencionar que el estudio de la GHZ en M33 es el primero en su género y tendrá un impacto importante, ya que con él se podrá determinar una relación entre la masa galáctica y las propiedades de la GHZ en otras galaxias.

1.6. Escalas de tiempo

Es importante ubicar en el tiempo los acontecimientos más relevantes que han ocurrido en el universo, desde la gran explosión hasta la actualidad.

^{IV}Sc hace referencia a galaxias espirales con brazos muy sueltos y definidos en la secuencia de Hubble para galaxias.

Como se ha venido mencionando a lo largo de este capítulo, la única referencia que tenemos de existencia de vida en el cosmos es el planeta Tierra, por lo tanto los eventos más importantes que han sucedido durante toda la historia del universo, giran en torno a nuestro planeta y el Sistema Solar.

El universo se creó hace aproximadamente 13.75 Gaños. Alrededor de 9 mil millones de años después de haber ocurrido la Gran Explosión, es decir, hace aproximadamente unos 4.6 mil millones de años, se formó el Sol a partir de una nube conformada por H, He y elementos pesados.

Actualmente, la edad del Sol se ha calculado a partir de modelos teóricos que explican los sismos frecuentes observados en la superficie de esta estrella, arrojando un valor de aproximadamente 4.6 Gaños; sin embargo la forma más común de obtener la edad del Sol es suponer que tanto nuestra estrella como el sistema solar son casi coetaneos y, por lo tanto, la edad del Sol es semejante a aquella que presentan los meteoritos más antiguos encontrados hasta hoy.

El sistema solar y la Tierra se conformaron hace unos 4.54 Gaños. Es posible conocer esta fecha a partir del decaimiento radioactivo de algunos isótopos presentes en meteoritos y en rocas terrestres.

Finalmente, la vida en la Tierra se originó hace aproximadamente unos 3.8 Gaños, los fósiles más antiguos encontrados (de cianobacterias) datan de unos 3.5 Gaños, los animales primitivos aparecieron hace unos 0.7 Gaños, los primeros mamíferos surgieron unos 0.2 Gaños atrás, la extinción de los dinosaurios aconteció unos 0.065 Gaños antes de la actualidad y el origen de las especies Homos sucedió hace unos 2.5 millones de años, o sea, hace 0.0025 Gaños [6].

Con base en la información presentada en esta sección, se genera una de las condiciones principales para el cálculo de la GHZ en M33, la cual está relacionada con el tiempo que le tomó a la Tierra ser un planeta capaz de albergar vida básica y su evolución a vida compleja (ver capítulo 3).

Capítulo 2

Modelo de Evolución Química

Un modelo de evolución química o CEM, estudia los cambios en espacio y tiempo de: a) las abundancias químicas presentes en el medio interestelar, b) la masa de gas y c) la masa bariónica total de las galaxias en el medio intergaláctico [2]. Un CEM debe ser capaz de reproducir un número mínimo de restricciones observacionales, a su vez, este número de restricciones observacionales debe ser mayor o igual que el número de parámetros libres. Por lo tanto, si el número de restricciones observacionales es alto y los datos observacionales son precisos, puede proponerse un modelo más sólido y entonces se puede obtener una mejor estimación de la Zona de Habitabilidad Galáctica.

Con el objeto de estudiar la evolución química de la galaxia M33, en el año 2013 Robles-Valdez et al., construyeron un modelo de evolución química para inferir la historia de las abundancias químicas del gas contenido en el disco de la galaxia. En comparación con datos observacionales recientes de la densidad superficial de la masa de gas (M_{gas}), Robles-Valdez et al., presentan valores más exactos de abundancias químicas de regiones H_{II} ¹ y estrellas, lo cual les permiten inferir una historia química de M33 más exacta [9].

¹Una región H_{II} es una nube de gas brillante en la que se forman estrellas masivas azules (tipo OB), esta región es llamada así por la gran cantidad de hidrógeno ionizado que contiene.

2.1. Restricciones observacionales

El CEM fue construido para reproducir tres restricciones observacionales importantes del disco de M33: la distribución radial de la masa bariónica total, la masa de gas y la abundancia de oxígeno. Este modelo fue probado además con otras restricciones observacionales del disco, tales como: las distribuciones radiales de la tasa de formación estelar, la masa estelar, las abundancias químicas de nueve elementos y la metalicidad.

2.1.1. Distribución radial de la densidad superficial de masa de gas, $M_{gas}(r)$

$M_{gas}(r)$, representa el gas atómico y molecular en forma de todos los elementos presentes en el disco de M33, eso es:

$$M_{gas}(r) = M_X(r) + M_Y(r) + M_Z(r), \quad (2.1)$$

donde M_X , M_Y y M_Z corresponden a la masa de gas en forma de hidrógeno, helio y elementos pesados, respectivamente.

En la figura 2.1 se muestra la $M_{gas}(r)$, representada en círculos negros, la cual presenta un perfil doblemente exponencial que incrementa para $r > 6$ kpc.

2.1.2. Distribución radial de la densidad superficial de masa estelar total $M_{stars}(r)$

$M_{stars}(r)$ se considera la distribución radial de la densidad superficial de masa de estrellas vivas ($M_{starL}(r)$) y masa estelar de remanentes estelares ($M_{starR}(r)$) y se expresa como la suma de estas dos contribuciones de masa:

$$M_{stars}(r) = M_{starsL}(r) + M_{starsR}(r), \quad (2.2)$$

donde $M_{starR}(r)$ tiene un valor igual al 13 % de la masa de estrellas vivas. En la Figura 2.1 se muestra $M_{stars}(r)$ representada en triángulos rojos, la cual presenta un único perfil exponencial.

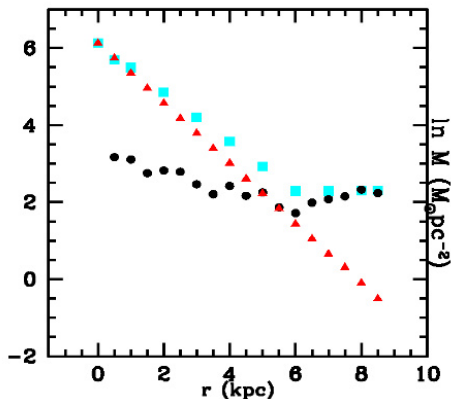


Figura 2.1: Distribuciones radiales en el tiempo presente de: a) la masa de gas (círculos negros): hidrógeno atómico y molecular incluyendo la contribución del helio y elementos pesados, b) la masa estelar total (triángulos rojos): masa de estrellas con vida y remanentes estelares, c) la masa bariónica total (cuadrados azules) [9].

2.1.3. Distribución radial de la densidad superficial de la masa bariónica total $M_{tot}(r)$.

M_{tot} es la suma de la masa de gas y la masa estelar:

$$M_{tot}(r) = M_{gas}(r) + M_{stars}(r) \quad (2.3)$$

En la figura 2.1 se observa $M_{tot}(r)$ representada en cuadrados azules. $M_{tot}(r)$ muestra un perfil doblemente exponencial debido a la M_{gas} y que decae exponencialmente para $r \leq 6 \text{ kpc}$ e incrementa ligeramente para $r > 6 \text{ kpc}$.

2.1.4. Distribución radial de la SFR, $SFR(r)$

M33 es una galaxia activa en cuanto a formación estelar en el tiempo presente como lo demuestra la gran muestra de regiones H_{II} y estrellas tipo OB^{II} analizadas en este modelo, ver figura 2.2.

¹¹Las estrellas tipo OB son estrellas jóvenes, calientes, masivas y luminosas, destacando en brillantes colores azules.

Para restringir el CEM se consideraron las distribuciones radiales de la tasa de formación estelar (SFR, por sus siglas en inglés, Stellar Formation Rate) obtenidas en el año 2009 por Verley et al. [9], ver figura 2.2.

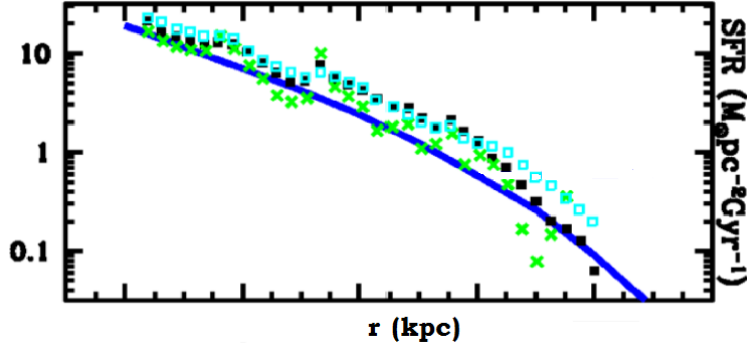


Figura 2.2: Distribución radial de la SFR en tiempo presente (línea azul). Las distribuciones radiales de la SFR obtenidas por Verley et al. están representadas con cruces verdes, cuadros negros rellenos y cuadros azules.

2.1.5. Abundancias químicas

Existen diversos estudios sobre las abundancias químicas de las regiones H_{II} y las estrellas OB en M33. Estos estudios representan la química en tiempo presente del gas.

Como restricciones observacionales del CEM, se consideraron valores de O/H de regiones H_{II} y estrellas supergigantes tipo B. Cabe mencionar que los datos de regiones H_{II} utilizados para construir este modelo fueron aumentados por la cantidad de elementos químicos atrapados en partículas de polvo y por variaciones de temperatura en la región, ver figura 2.3.

2.2. Características del CEM

Como ya se mencionó anteriormente, el CEM fue construido para reproducir $M_{tot}(r)$, $M_{gas}(r)$ y $O/H(r)$. A continuación se describen las características del modelo:

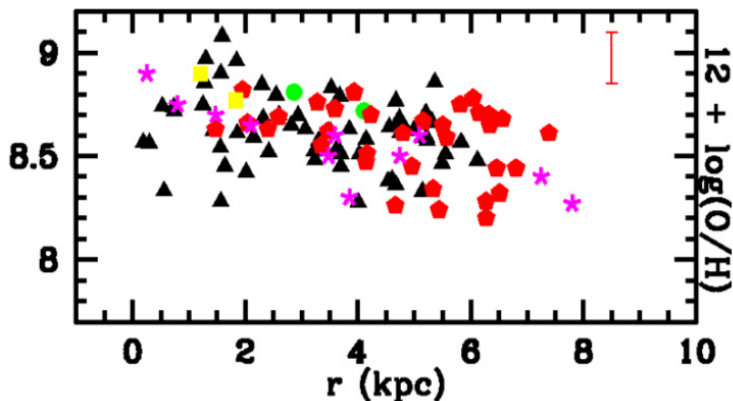


Figura 2.3: Distribuciones radiales observadas en tiempo presente de la relación O/H. Los valores gaseosos procedentes de regiones H_{II} están representados por las figuras de color negro, rojo, verde y amarillo, mientras que los valores estelares procedentes de supergigantes tipo B se representan con asteriscos color rosa.

- (i) El halo y el disco se proyectan en un solo disco de anchura despreciable suponiendo simetría azimutal, por lo tanto, todas las funciones dependen solamente de la distancia galactocéntrica r y del tiempo t . El disco se visualiza como una serie de anillos concéntricos independientes que van de 0 a 9 kpc.

Cabe mencionar que debido a que se supone simetría azimutal, se modela un pc^2 de cada anillo, extrapolando las propiedades de ese pc^2 a todo el anillo correspondiente.

- (ii) M33 fue formada en un escenario dentro-fuera con una doble acreciónⁱⁱⁱ de abundancias primordiales ($Y_P = 0.2477$ y $Z = 0.00$), ya que se considera que la formación del halo y parte del disco grueso de la galaxia ocurrió durante el primer Giga año (Ga), mientras que la formación del disco delgado tomó lugar desde 1 Ga hasta 13 Ga, que es la edad del modelo.

ⁱⁱⁱEl término acreción se refiere a la tasa de caída de materia dentro de la galaxia, lo cual contribuye a su formación. En los CEMs este material es sólo gas.

- (III) La SFR fue parametrizada con base a la ley de Kennicutt-Schmidt: $SFR(r, t) = \nu M_{gas}(r, t)^{1.4}$, donde ν es la eficiencia de formación estelar obtenida mediante el ajuste de la distribución radial de la masa de gas (ver Apéndice A).
- (IV) El CEM asume una función de masa inicial (IMF, por sus siglas en inglés, Initial Mass Function, ver Apéndice A) considerando un intervalo de masa desde $0.08M_{\odot}$ a una masa superior, m_{up} , donde $m_{up} = 50M_{\odot}$ fue elegida para reproducir el valor absoluto del gradiente de O/H.
- (v) El modelo considera un arreglo de yields estelares^{IV} para estrellas de masa baja e intermedia ($0.08 \leq m/M_{\odot} \leq 8$) y para estrellas masivas ($8 < m/M_{\odot} \leq m_{up}$). Todos estos yields dependen tanto de la metalicidad inicial como de la masa inicial de las estrellas.

2.3. Resultados del CEM

Con base en las restricciones observacionales y las características para el CEM descritas en las secciones 2.1 y 2.2, F. Robles-Valdez et al., finalmente construyeron un CEM para M33 considerando una eficiencia de formación estelar, ν , variable en espacio y tiempo para $r > 6$ kpc.

Mientras que para $r \leq 6$ kpc una ν constante reproduce muy bien las restricciones observacionales de la M_{gas} y la O/H(r) de acuerdo al escenario de formación dentro-fuera de la galaxia, para $r > 6$ kpc la M_{gas} , M_{stars} y la SFR no son consistentes con una ν constante (ver sección 2.2) y por lo tanto no pueden ser reproducidas simultáneamente. Debido a este comportamiento se consideró una eficiencia de formación estelar variable solamente para radios mayores a 6 kpc.

El CEM predice los gradientes químicos para 9 elementos y para Z/Z_{\odot} . Z/Z_{\odot} es uno de los factores importantes para el cálculo de la GHZ en M33, por lo que se muestra gran interés en conocer su distribución radial, ver figura 2.4.

^{IV}Los yields estelares representan la eficiencia estelar de formación y eyección de elementos químicos.

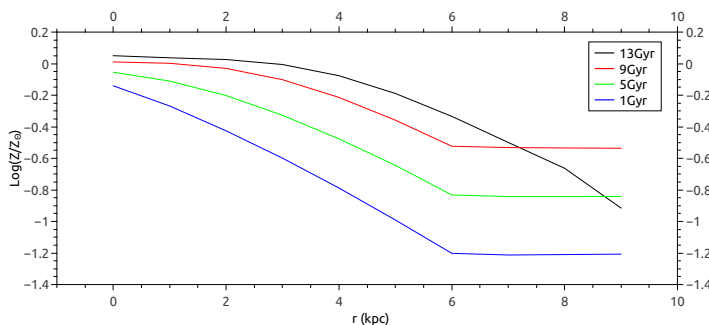


Figura 2.4: Distribución radial de la abundancia Z/Z_{\odot} para diferentes tiempos $t=1,5,9$ y 13 Ga.

De los principales resultados obtenidos por el modelo: acreción, M_{gas} , SFR y M_{stars} , se retomó el de la SFR para el cálculo de la GHZ en M33. En la figura 2.5 se representa la evolución de la SFR para cuatro tiempos: 1, 5, 9 y 13 Ga.

En la gráfica mostrada en la Figura 2.5, se observa que para $r < 6$ kpc, la distribución radial de la SFR se comporta como predice un modelo de formación dentro-fuera. El alto incremento en el valor absoluto de la SFR, entre 1 y 5 Ga es debido a la enorme cantidad de material que cae para formar el disco durante esos 4 Ga. Cabe mencionar que la formación del disco se inició en 1 Ga. Para $r > 6$ kpc y $t = 9$ y 13 Ga, la SFR decrece con r .

En las Figuras 2.6 y 2.7 se presenta nuevamente la evolución de la SFR, pero esta vez para seis distancias galactocéntricas: 2, 4, 6, 7,8 y 9 kpc. Para $r < 6$ kpc la formación estelar sigue un escenario dentro-fuera. Para $r > 6$ kpc, la formación estelar sigue un escenario fuera-dentro.

Una SFR baja y variable en tiempo y espacio, puede explicar de una mejor manera el comportamiento de radios exteriores. La reducción de la SFR puede deberse a la reducción de gas molecular necesario para formar estrellas en los radios externos o a los efectos de deformación en la galaxia.

Otro de los resultados obtenidos por el CEM de Roblez-Valdez et al., fueron los de la evolución de la tasa de supernovas (SNR, por sus siglas en

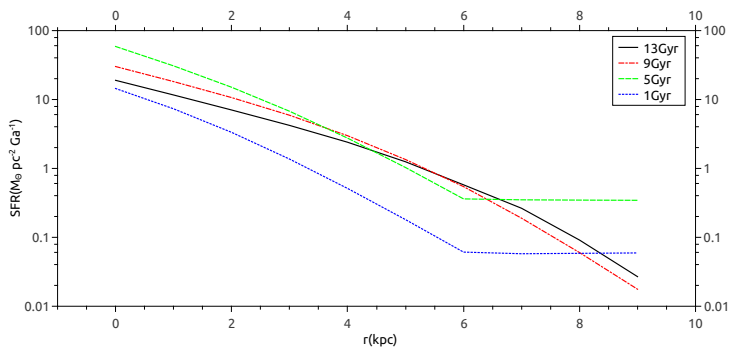


Figura 2.5: Distribución radial de la SFR para $t=1,5,9$ y 13 Ga.

inglés, Supernova Rate) tipo II (SNRII) y tipo Ia (SNRIa) (ver capítulo 1, sección 1.2), los cuales no están reportados en su artículo, sin embargo son de vital importancia para el cálculo de la GHZ en M33.

A continuación se presentan las gráficas que muestran la evolución de la SNR en comparación con la tasa de supernovas para la vecindad solar, es decir, para un $r = 8$ kpc y un $t = 8.5$ Ga en la Vía Láctea, ver figuras 2.8 y 2.9.

En las gráficas mostradas en las figuras 2.8 y 2.9 se puede observar que para tiempos muy tempranos ($t \leq 1$ Ga) y radios pequeños ($r \leq 1$ kpc), en ambos tipos de supernovas, existe una alta actividad de explosiones de SN y que va decreciendo para tiempos y radios mayores. Por otro lado, para $r \geq 3$ kpc la tasa de supernovas, para ambos casos, es mucho mayor que la tasa de supernovas que se presenta en la vecindad solar (línea negra punteada), mientras que para $r \leq 4$ kpc la SNR está por debajo de la SNR de la vecindad solar.

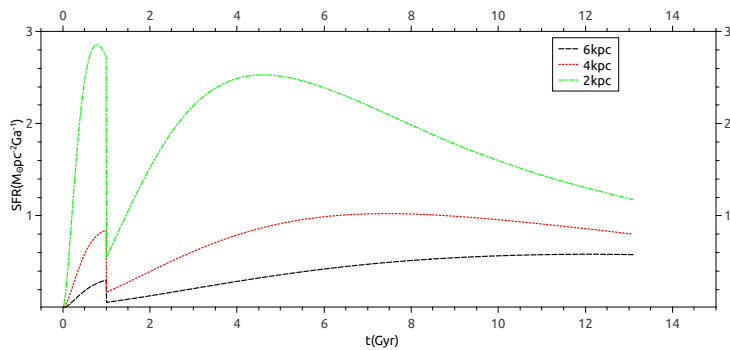


Figura 2.6: Evolución de la SFR para $r=2, 4$ y 6 kpc. Para el caso de $r=2$ y 4 kpc, la SFR se dividió entre 6 y 3 , respectivamente.

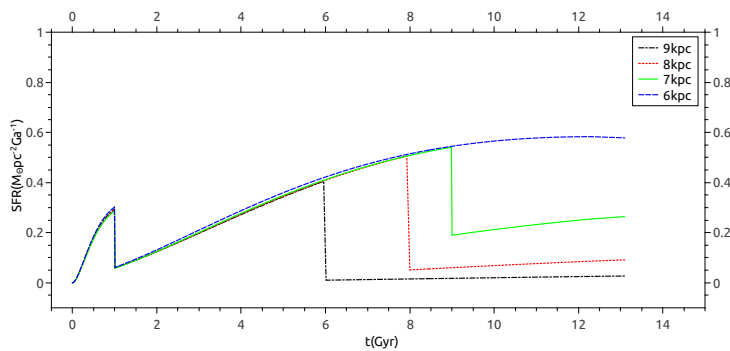


Figura 2.7: Evolución de la SFR para $r=6, 7, 8,$ y 9 kpc.

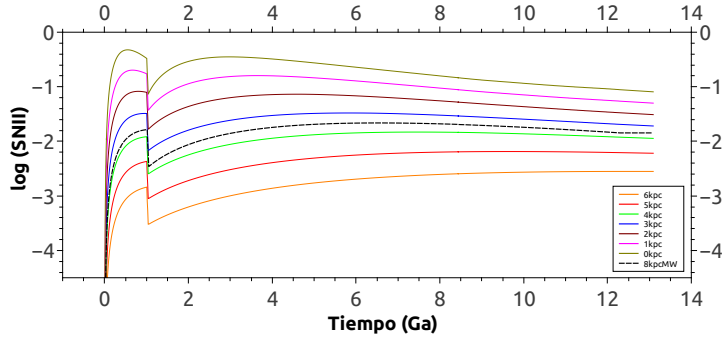


Figura 2.8: Evolución de la SNRII en la Galaxia M33 para $r=0,1,2,3,4,5$ y 6 kpc y para $0 \text{ Ga} \leq t(\text{Ga}) \leq 13 \text{ Ga}$, comparada con la evolución de la SNRII en la vía Láctea para $r=8$ kpc, a un $t=8.5$ Ga (línea negra punteada).

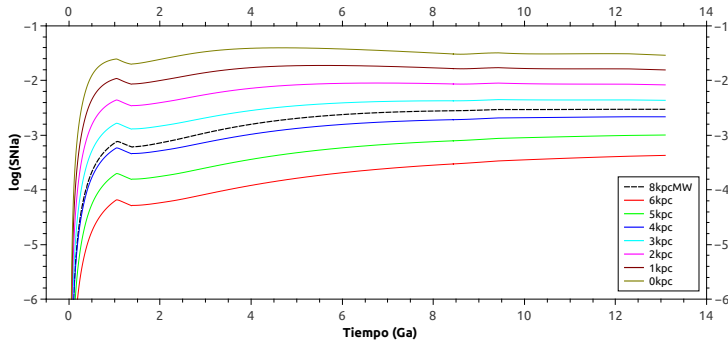


Figura 2.9: Evolución de la SNRIa en la Galaxia M33 para $r=0,1,2,3,4,5$ y 6 kpc y para $0 \text{ Ga} \leq t(\text{Ga}) \leq 13 \text{ Ga}$, comparada con la evolución de la SNRIa en la Vía Láctea para $r=8$ kpc, a un $t=8.5$ Ga (línea negra punteada).

Capítulo 3

Zona de habitabilidad galáctica

El concepto de Zona de Habitabilidad Galáctica, fue introducido por primera vez por Gonzalez et al. en el año 2001, quien la definió como una región en la Vía Láctea donde planetas tipo Tierra pueden retener agua líquida sobre su superficie y proporcionar un hábitat a largo plazo para la vida aeróbica animal [1].

Recientemente se ha optado por una definición más general, la cual define a la GHZ como la región con suficiente abundancia de elementos químicos para formar sistemas planetarios en los cuales se puedan encontrar planetas tipo Tierra¹ capaces de sustentar la vida. Por lo tanto, se requiere de una metalicidad mínima para la formación de este tipo de planetas y de un CEM que proporcione la distribución de elementos pesados en la Galaxia (ver capítulo 2).

Se conoce con poca certeza la metalicidad idónea que requiere el gas interestelar para formar de manera eficiente planetas tipo Tierra y hasta el presente sólo es posible estimar la metalicidad de los planetas del Sistema Solar. Debido a que la estrella central del sistema planetario presenta la misma abundancia de elementos químicos que el material interestelar donde se crearon los planetas, se toma como referencia las abundancias químicas

¹Entendemos como planeta tipo Tierra a un planeta terrestre o acuático que presente una superficie sólida, atmósfera y un contenido de agua tal que la vida pueda desarrollarse.

determinadas en estrellas con planetas. A estos planetas orbitando otras estrellas se les denominan planetas extrasolares o simplemente exoplanetas [4].

Las investigaciones sobre la GHZ se han centrado principalmente en nuestra galaxia, la Vía Láctea:

- I) En el año 2001, Gonzalez et al. fueron los primeros en proponer el concepto de una GHZ, la cual es un anillo localizado en el disco delgado que migra hacia el exterior con el tiempo. La ubicación de esta GHZ se debe a que ellos suponen que la mayor probabilidad, para que un planeta terrestre se forme, se encuentra a metalicidades superiores a $0.5Z_{\odot}$ [1].
- II) En el año 2004, Lineweaver et al. proponen que la GHZ de la Vía Láctea es un anillo localizado en el disco Galáctico, dentro de un intervalo de radio de 7 a 9 kpc desde el centro de la Vía Láctea, y que el área de este anillo incrementa con la edad de la Galaxia. La ubicación de esta GHZ se debe a que ellos consideran una distribución de probabilidad dependiente de Z , para formar planetas terrestres con un máximo $\sim 0.8Z_{\odot}$. También descartan zonas con un alto número de supernovas (SN) cercanas, nocivas para la vida [10].
- III) En el año 2008, Prantzos concluye que la actual GHZ cubre prácticamente el disco entero de la Vía Láctea, debido a que él supone una distribución de probabilidad de Z , para formar planetas tipo Tierra, casi igual para $Z > 0.1Z_{\odot}$. Cuando se considera el número de estrellas la GHZ se ubica en los anillos interiores del disco galáctico [3].
- IV) Para el año 2011, Gowanlock et al., proponen que la GHZ más probable se encuentra entre 2 y 4 kpc, ya que la distribución de probabilidad de Z es semejante a la usada por Prantzos y a la alta densidad estelar en el disco interior de la galaxia [11].

Ya que el Sol se encuentra a 8 kpc desde el centro de la Galaxia, los primeros estudios ubican al Sistema Solar dentro de la GHZ más probable, mientras que los segundos estudios, lo ubican fuera de la GHZ más probable.

Recientemente se ha obtenido la GHZ con una alta probabilidad para la Galaxia de Andrómeda localizada entre 3 y 7 kpc. Suponiendo la química y la densidad estelar por área de cada anillo y el número máximo de estrellas de todas las edades, la GHZ se encuentra en un anillo localizado entre 12 y 14 kpc [2].

Estos estudios sobre la GHZ, tanto de la Vía Láctea como de M31, se extendieron con esta tesis a una galaxia más pequeña, la galaxia M33 (NGC 598 o galaxia del triángulo).

Algo que tienen en común los trabajos mencionados anteriormente es que para poder determinar la GHZ de una galaxia, es necesario tener en cuenta ciertas características astrofísicas, geofísicas y biogénicas, las cuales tienen que ver con la metalicidad, la SFR y la tasa de SN. A continuación se describen cada una de éstas.

3.1. Características y restricciones para la GHZ

Es importante tener en mente las propiedades y características que un planeta tipo Tierra y su entorno necesitan para ser considerados habitables o dar lugar a la habitabilidad. Debido a que nuestro planeta Tierra es el único que conocemos actualmente con vida, dichas propiedades y características deben ser muy similares a éste para que un planeta pueda considerarse habitable.

3.1.1. Características Astrofísicas

1. *Formación de planetas*: La metalicidad en el medio donde el planeta puede formarse (disco protoplanetario) debe ser tal que permita la condensación de materia y por lo tanto la formación de protoplanetas [12]. Cabe mencionar que la Z estelar se asocia con la Z del planeta debido a que los planetas se crean a partir de la misma nebulosa gaseosa de la estrella.
2. *Sobrevivir a SN*: Cuando una supernova explota, emite una fuerte radiación que puede ionizar la atmósfera del planeta causando la reducción del ozono estratosférico. Entonces el flujo ultravioleta desde la estrella anfitriona alcanza la superficie del planeta y los océanos,

originando daño al material genético o ADN, lo que podría inducir la mutación o muerte celular, y por lo tanto la esterilización del planeta [13]. Dado que la Tierra es el único planeta conocido con vida, se supone que representa el patrón de sobrevivir a las explosiones de SN.

3.1.2. Características Geofísicas

Para que un planeta sea considerado tipo Tierra es necesario que cuente con los suficientes elementos biogénicos y geofísicos (ver capítulo 1, sección 1.2) para sustentar y permitir la vida tal y como la conocemos en nuestro planeta, además de que éste debe satisfacer las siguientes condiciones:

1. *Tectónica de placas*: Una corteza formada principalmente de Si constituye la tectónica de placas. Ésta es necesaria ya que la actividad tectónica de larga vida ayuda a regular el clima del planeta a través del ciclo de meteorización de silicatos¹¹, es decir, mantiene la densidad y la temperatura de la atmósfera planetaria y la cantidad de agua líquida y carbono necesarios para la vida [14].
2. *Agua*: Sobre la superficie de la tectónica de placas se encuentran los océanos, formados por H_2O . Mientras la vida sobre la Tierra es el modelo para la vida, el agua es un recurso importante para el surgimiento y supervivencia de la misma [15].
3. *Atmósfera*: La atmósfera de un planeta debe ser lo suficientemente densa como para proteger al planeta de la radiación UV y los impactos de meteoritos, y lo suficientemente delgada para permitir la evolución de la vida en la superficie del planeta. La composición atmosférica de la Tierra primitiva permitió el origen de la vida y tener abundancias de CO, CO_2 , H_2O , N_2O y NO_2 . Tales compuestos fueron cruciales para el origen de la actual atmósfera [16–20].

¹¹El ciclo de meteorización del silicato ayuda a dar forma a la superficie de la tierra, regular los ciclos globales y químicos e incluso a determinar el aporte de nutrientes a los ecosistemas.

3.1.3. Características Biogénicas

La GHZ está basada en el modelo de la vida en la Tierra. Con el fin de determinar el tiempo, tanto del origen como del desarrollo de la vida en la Tierra, diversos estudios se han tenido en cuenta:

1. *Elementos biogénicos*: Existen diversas teorías sobre las maneras y los lugares donde la vida se originó en nuestro planeta. Algunas de éstas se basan en fuentes hidrotermales del lecho marino, donde existe una interacción entre el manto terrestre y el océano [15, 16, 21, 22]. La teoría que asume que la vida se originó fuera de nuestro planeta, también conocida como Panspermia, supone la migración de la vida desde otras regiones del espacio a la Tierra. Otras teorías explican el efecto catalítico de rayos o meteoritos metálicos [17, 19, 20] en la atmósfera primitiva y/o en los océanos. Sin embargo, independientemente de cómo surgió la vida, todas estas teorías están de acuerdo en que los seres vivos en la Tierra comparten los mismos elementos químicos llamados biogénicos, es decir, C, H, O, N, P y S, los cuales son elementos más pesados que el He.
2. *Tiempo mayor a 1 Ga para surgimiento de vida básica*: La evidencia más antigua de la vida en la Tierra es de hace unos 3.5 Ga aproximadamente (fósiles de cianobacterias) [16], o 3.8 Ga (pruebas de isótopos de carbono) [20], existe pues un acuerdo general de que la vida inició hace 3.7 Ga. Considerando que la Tierra tiene aproximadamente 4.6 Ga de edad [16], se concluye que a la vida le tomó alrededor de 0.9 Ga para emerger. Con base en lo anterior, en este trabajo se supone 1Ga como la edad mínima para que un planeta sea capaz de albergar vida básica, es decir, vida unicelular en su superficie.
3. *Tiempo mayor a 4.5 Ga para desarrollo de vida compleja*: Si consideramos que la evolución de la vida básica a vida compleja se asocia con los seres humanos, otro parámetro con respecto a ésta debe ser considerado. Tomando en cuenta que la especie *Homos* apareció en la Tierra hace unos 0.002 Ga [23], se supone entonces que la edad mínima para que un planeta sea capaz de albergar y sustentar vida compleja es de 4.5 Ga, es decir, 1Ga para que la vida básica emerja más 3.5 Ga para que ésta evolucione a vida compleja.

3.1.4. Restricciones para la GHZ

Con base en la información anterior, la Zona de Habitabilidad Galáctica está definida bajo las siguientes restricciones astrofísicas y biogénicas [2]:

1. Cada estrella es capaz de albergar al menos un planeta tipo Tierra.
2. Planetas tipo Tierra se forman a partir del gas circunestelar con probabilidades dependientes de Z específicas de la nube progenitora.
3. Los planetas tipo Tierra requieren de 1.0 Ga para crear vida básica (BL, por sus siglas en inglés, Basic Life).
4. Los planetas tipo Tierra necesitan 4.5 Ga para evolucionar a vida compleja (CL, por sus siglas en inglés, Complex Life).
5. La vida en los planetas tipo Tierra formados es aniquilada para siempre por las explosiones de SN si durante los primeros 4.5 Ga de vida del planeta la RSN promedio es igual o mayor que 2 veces el promedio de la tasa de SN en la vecindad solar ($\langle RSN_{SV} \rangle$).

Considerando las restricciones anteriores, la probabilidad $P(r, t)$, para formar planetas tipo Tierra, orbitando estrellas, los cuales sobrevivan a explosiones de SN y donde tanto la vida básica como la vida compleja pueda surgir, está dada como:

$$P_{GHZ}(r, t) = P_{SF}(r, t) \times P_Z(r, t) \times P_{BL}(t) \times P_{CL}(t) \times P_{SN}(r, t), \quad (3.1)$$

donde:

1. $P_{SF}(r, t)$ es la probabilidad de formar estrellas, por unidad de superficie (pc^2), en un tiempo determinado.
2. $P_Z(r, t)$ es la probabilidad dependiente de Z , de formar planetas terrestres.
3. $P_{BL}(t)$ y $P_{CL}(t)$ son las probabilidades de que emerja vida básica y ésta evolucione a vida compleja.

4. $P_{SN}(r, t)$, es la probabilidad de sobrevivir a explosiones de supernovas.

En el siguiente capítulo se describe el proceso mediante cual se generó cada una de las probabilidades descritas anteriormente.

Capítulo 4

Resultados y discusión

En este capítulo se presentan tanto el procedimiento como las condiciones utilizadas para obtener cada una de las probabilidades descritas en el capítulo 3. Estas probabilidades están directamente relacionadas con la tasa de formación estelar, la abundancia de elementos químicos pesados (o metalicidad) para formar planetas, el tiempo necesario que requiere un planeta para que surja vida básica y evolucione a vida compleja y el peligro que representan para la vida las explosiones de supernovas.

Se muestra también de manera gráfica los resultados obtenidos para cada probabilidad y su análisis. Cabe mencionar que la información para realizar los cálculos correspondientes se obtuvo del modelo de evolución química para M33 descrito en el capítulo 2.

4.1. Probabilidad de formación estelar, P_{SF}

P_{SF} es la probabilidad de formar nuevas estrellas y depende directamente de la tasa de formación estelar. La importancia de calcular esta probabilidad para determinar la GHZ reside en que si se presenta una mayor formación de estrellas, se tendrá en consecuencia un número mayor de lugares potenciales para la vida, ya que con base en las restricciones para la zona de habitabilidad galáctica mencionadas en el capítulo 3, cada estrella puede albergar al menos un planeta tipo Tierra.

Para visualizar esta probabilidad se normalizó la SFR con respecto a

su valor máximo, $SFR_{max} = 98.70 M_{\odot} Ga^{-1} pc^2$, el cual se presenta a un $r = 0.00$ kpc y a un $t = 0.529$ Ga.

$$P_{SF}(r, t) = \frac{SFR(r, t)}{SFR_{max}} \quad (4.1)$$

La figura 4.1 muestra la gráfica correspondiente a la $P_{SF}(r, t)$. Se observa que la probabilidad más alta de formación estelar se encuentra en la parte central de la galaxia ($0 \leq r(\text{kpc}) \leq 1$) cuando se forma el halo, a tiempos muy tempranos ($0 \leq t(\text{Ga}) \leq 1$). Una segunda zona se encuentra en la misma parte central, pero a tiempos relativamente más recientes ($2 < t(\text{Ga}) < 4$), en el segundo y tercer Giga año de vida del disco. Esta eficiencia de formación estelar se debe al escenario de formación galáctico dentro-fuera propio de M33 para $r < 6$ kpc (ver capítulo 2).

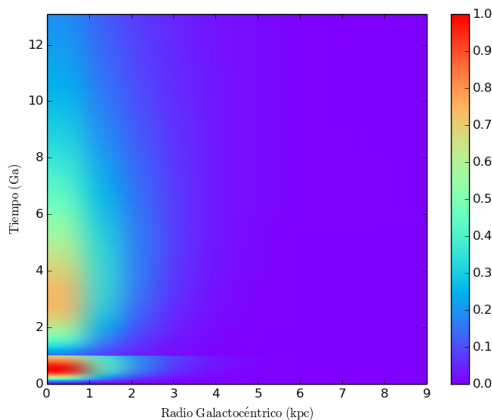


Figura 4.1: Probabilidad de formación estelar.

4.2. Probabilidad de formación de planetas, P_Z

P_Z es la probabilidad para la formación de planetas tipo Tierra, según el contenido de metales del gas donde los planetas y su estrella se formaron.

Para calcular P_Z se utilizaron los datos disponibles en el catálogo de exoplanetas www.exoplanet.eu del mes de octubre del año 2014. De este

catálogo se generó un histograma considerando sólo aquellos exoplanetas con la metalicidad conocida de su estrella anfitriona ($\log(Z/Z_\odot)$), los cuales resultaron ser 1563 de un total de 1832 exoplanetas, ver figura 4.2.

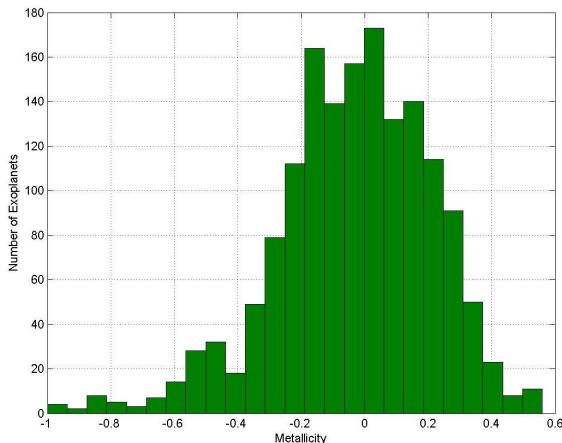


Figura 4.2: Histograma de exoplanetas con la metalicidad de su estrella anfitriona conocida (<http://exoplanet.eu/>, octubre 2014).

Con base en el histograma mostrado en la figura 4.2 se calculó P_Z bajo la siguiente consideración:

$$P_Z = \frac{N_P}{N_{Tot}}, \quad (4.2)$$

donde N_P es el número de exoplanetas por cada bin de metalicidad y N_{Tot} es el número total de exoplanetas con metalicidad conocida de su estrella.

La figura 4.3 representa la probabilidad de formación de planetas tipo Tierra. Se observa que la mayoría de las estrellas que albergan exoplanetas muestran una amplia gama de metalicidad estelar, $-1 \leq \log(Z/Z_\odot) \leq +0.56$, con un valor máximo en $\log(Z/Z_\odot) \sim +0.02$.

Para conocer la probabilidad de formación de planetas en M33 se comparó la abundancia de $(Z(r, t)/Z_\odot(r, t))$ inferida por el modelo de evolución química, a cada r y t , con la metalicidad estelar obtenida del catálogo de exoplanetas, asignando a cada valor que estuviera contenido en el rango de $-1 \leq \log(Z/Z_\odot) \leq +0.56$ la probabilidad correspondiente mostrada en la

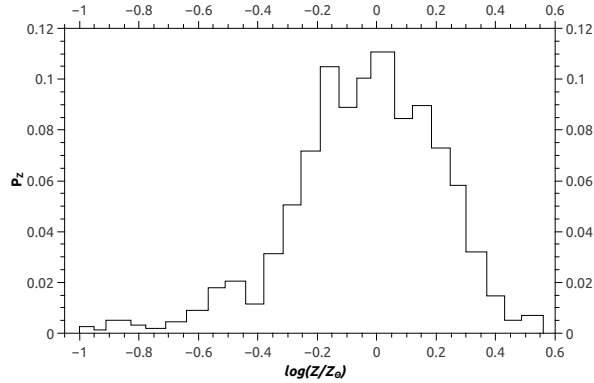


Figura 4.3: Probabilidad de formación de exoplanetas en M33.

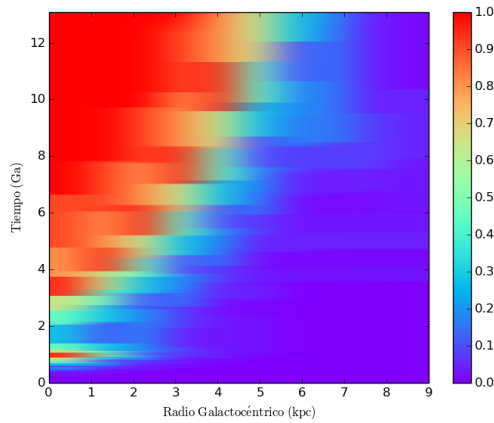


Figura 4.4: Probabilidad de formación de planetas.

figura 4.3.

La figura 4.4 muestra la probabilidad de formación de planetas en M33 inferida para toda la galaxia. Se observa que P_Z resulta mayor para $r \leq 6$ kpc y para tiempos largos $t \geq 3$ Ga, además existe también una alta probabilidad para $t \sim 1$ Ga y $r \leq 1$ kpc.

4.3. Probabilidad de que un planeta albergue vida básica y vida compleja, P_{BL} , P_{CL}

P_{BL} y P_{CL} son las probabilidades que tiene un planeta para que en él surja vida básica (vida unicelular) y evolucione a vida compleja (vida capaz de manipular las ondas electromagnéticas como medio de comunicación, caso de los seres humanos). Se consideraron estas probabilidades ya que diversos autores sugieren que para tener una mejor estimación de la GHZ es necesario incluir el tiempo suficiente para permitir la evolución biológica de la vida en un planeta [2, 3, 11, 12].

Debido a que la Tierra es el único ejemplo de vida en el universo, se estableció como referencia el tiempo que le tomó desarrollar vida básica y su evolución a vida compleja, los cuales corresponden a 1 y 4.5 Ga respectivamente.

En las ecuaciones 4.3 y 4.4 se muestran las funciones que se adoptaron para calcular P_{BL} y P_{CL} . Para ambos casos se consideró $t_{actual} = 13$ Ga.

$$P_{BL}(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } t \leq t_{actual} - 1 \text{ Ga} \\ 0 & \text{si } t > t_{actual} - 1 \text{ Ga} \end{cases} \quad (4.3)$$

$$P_{CL}(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } t \leq t_{actual} - 4.5 \text{ Ga} \\ 0 & \text{si } t > t_{actual} - 4.5 \text{ Ga} \end{cases} \quad (4.4)$$

En las figuras 4.5 y 4.6 se muestran dichas probabilidades.

4.4. Probabilidad de sobrevivir a supernovas, P_{SN}

P_{SN} es la probabilidad que tiene un planeta de sobrevivir a explosiones de supernovas. Es muy importante tomar en cuenta esta probabilidad para calcular la GHZ, ya que una alta tasa de SN puede esterilizar un planeta.

Debido a que el tiempo de vida de la Tierra es de 4.5 Ga y la vida sobre ella sobrevivió a las explosiones de SN cercanas, para el cálculo de P_{SN} se consideró el promedio de la tasa de supernovas en la vecindad solar durante los últimos 4.5 Ga ($\langle SNR_{VS} \rangle$).

$\langle SNR_{SV} \rangle$ es el valor promedio de la tasa de supernovas en la vecindad solar, $r = 8$ Ga, durante la vida de la Tierra, es decir desde $t' = 8.5$ Ga hasta $t' = 13$ Ga.

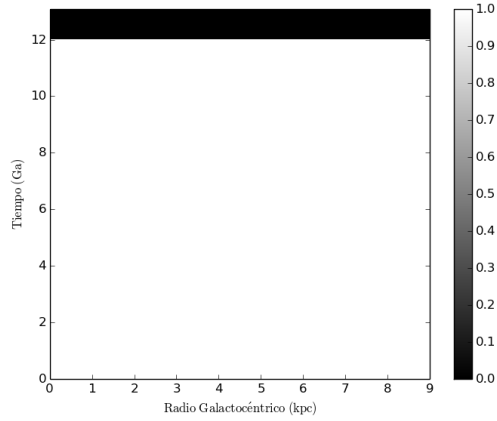


Figura 4.5: Probabilidad de que emerja vida básica.

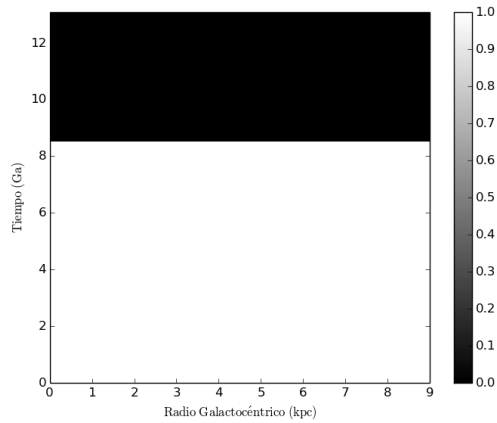


Figura 4.6: Probabilidad de que emerja vida compleja.

En cuanto al valor promedio de la tasa de supernovas en la vecindad solar, se consideraron valores para dos tipos de supernovas, SNII y SNIa, los cuales fueron obtenidos de la tesis de maestría, Zona de Habitabilidad Galáctica, realizada por Fajardo, F. en el año 2015, ver ecuación 4.5.

$$\begin{aligned}\langle SNRII_{SV} \rangle &= 0.0168 \text{ Ga}^{-1} \text{ pc}^{-2} \\ \langle SNRIa_{SV} \rangle &= 0.0029 \text{ Ga}^{-1} \text{ pc}^{-2}\end{aligned}\quad (4.5)$$

Con base en lo mencionado anteriormente, se obtuvo el promedio de la tasa de supernovas en M33 ($\langle SNR \rangle$) integrado para cualquier radio y tiempo de la tasa de SN durante los primeros 4.5 Ga después de haberse formado el sistema planetario a un tiempo t , ver ecuación 4.6.

$$\langle SNR \rangle(r, t) = \frac{\int_t^{t+4.5\text{Ga}} SNR(r, t') dt'}{4.5\text{Ga}} \quad (4.6)$$

Tomando en cuenta de que la vida subterránea o acuática profunda está más protegida que la vida terrestre o aérea, se construyó la función para calcular P_{SN} mostrada en la ecuación 4.7, donde el $\langle SNR \rangle$ límite para sobrevivir a SN se ha extendido a 2 veces el $\times(\langle SNR_{SV} \rangle)$.

$$P_{SN}(r, t) = \begin{cases} 1 & \text{si } \langle SNR \rangle(r, t) \leq 0.5 \langle SNR_{SV} \rangle \\ f(\langle SNR_{SV} \rangle(r, t)) & \text{si } 0.5 \langle SNR_{SV} \rangle < \langle SNR \rangle(r, t) < 2 \langle SNR_{SV} \rangle \\ 0 & \text{si } \langle SNR \rangle(r, t) \geq 2 \langle SNR_{SV} \rangle \end{cases} \quad (4.7)$$

De la ecuación 4.7 tenemos que $P_{SN}(r, t)$ es la probabilidad de que un planeta que se haya formado a un r y un t determinado sobreviva a las supernovas que se presenten en ese mismo r en los siguientes 4.5 Ga después de su formación.

$\langle SNR \rangle(r, t)$ es el promedio de la tasa de supernovas integrado para cualquier radio y tiempo durante los primeros 4.5 Ga del planeta.

$f(\langle SNR_{SV} \rangle(r, t))$ es una función de transición entre los valores extremos de la ecuación 4.7, ver figura 4.7, basada en que la supervivencia a explosiones de SN depende de varios factores astronómicos, geofísicos y biológicos más complejos que los considerados en este trabajo, ver ecuación 4.8.

$$f(\langle SNR_{SV} \rangle(r, t)) = \frac{4}{3} - \frac{\langle SNR \rangle(r, t)}{1.5 \langle SNR_{SV} \rangle} \quad (4.8)$$

En las figuras 4.8 y 4.9 se muestra la probabilidad de sobrevivir a supernovas tipo II y tipo Ia, respectivamente, en función del radio y del tiempo.

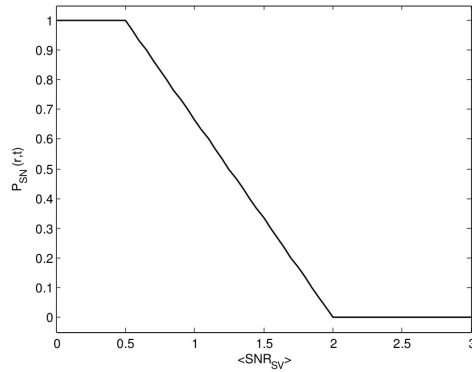


Figura 4.7: Función de probabilidad de sobrevivir a una tasa de supernovas.

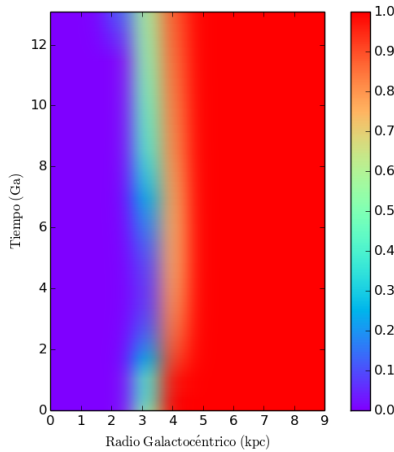


Figura 4.8: Probabilidad de sobrevivir a supernovas tipo II.

La figura 4.10 muestra el producto de la probabilidad de ambas supernovas $P_{SN} = P_{SNII} \times P_{SNIa}$, esta última probabilidad es la que representa a P_{SN} en la ecuación 3.1, ya que la vida puede ser esterilizada por cualquiera de los dos tipos de SN.

En la figura 4.10 se puede observar que para radios menores a 4 kpc la probabilidad de sobrevivir a supernovas va disminuyendo considerable-

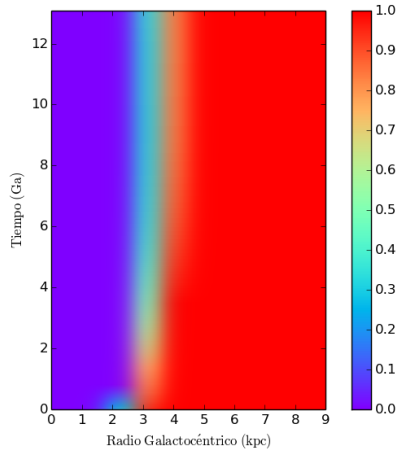


Figura 4.9: Probabilidad de sobrevivir a supernovas tipo Ia.

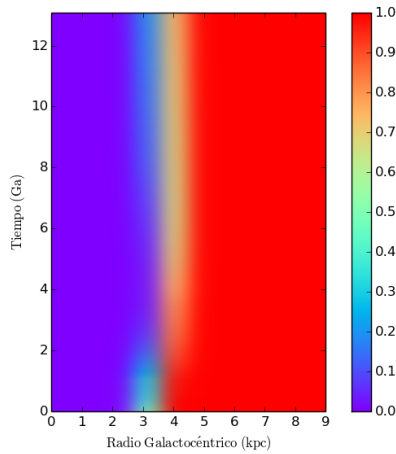


Figura 4.10: Probabilidad de sobrevivir a supernovas tipo II y tipo Ia.

mente, siendo $P_{SN} = 0$ para $r \leq 2.5$ kpc. Este resultado es consecuencia de que la P_{SN} es dependiente de la SFR (ver figuras 2.5 y 2.6 del capítulo

2), ya que una mayor tasa de formación estelar, implica un mayor número de SN y por tanto la probabilidad de sobrevivir a supernovas disminuye.

4.5. Zona de Habitabilidad Galáctica de la Galaxia M33

En base a las probabilidades mencionadas anteriormente, se construyó la Zona de Habitabilidad Galáctica para M33 (ver ecuación 3.1 del capítulo 3), indicando en colores las diferentes probabilidades de la GHZ. Las figuras 4.11 y 4.12 muestran la GHZ en función del radio galactocéntrico y del tiempo; las zonas de color negro entre 12 y 13 Ga y entre 8.5 y 13 Ga, corresponden a los radios y tiempos en donde los planetas no son capaces de albergar vida básica y vida compleja respectivamente.

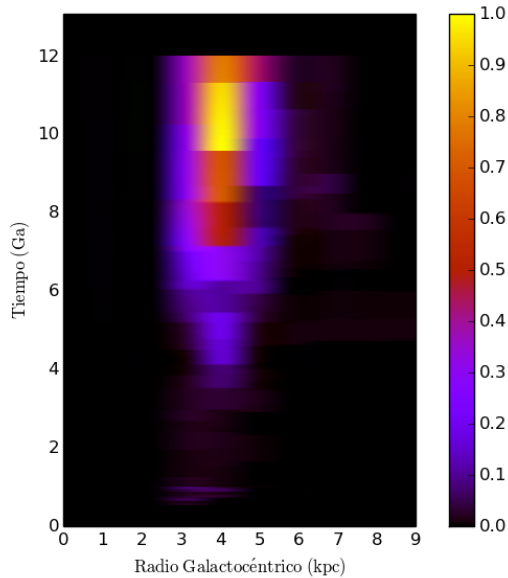


Figura 4.11: Zona de Habitabilidad Galáctica para M33 suponiendo la existencia de vida básica.

4.5. ZONA DE HABITABILIDAD GALÁCTICA DE LA GALAXIA M3341

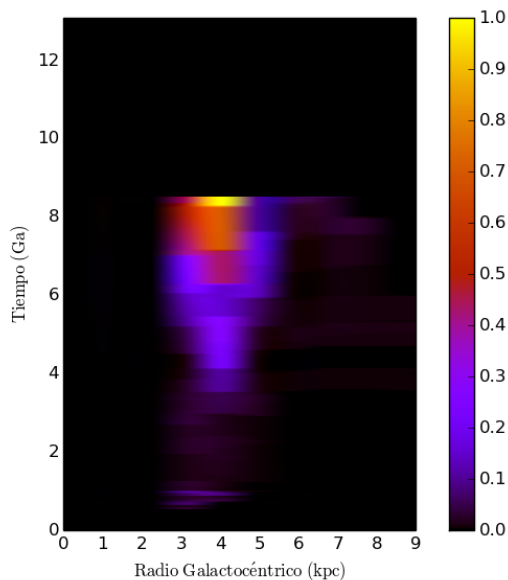


Figura 4.12: Zona de Habitabilidad Galáctica para M33, suponiendo la existencia de vida compleja.

En la figura 4.11 se muestra la GHZ por unidad de superficie (pc^2), considerando el número de sistemas estelares formados, la distribución de metalicidad mostrada por exoplanetas, la existencia de vida básica y el hecho de que la esterilización de la vida en un planeta ocurre cuando el promedio de la SNR, durante los primeros 4.5 Ga del planeta, es más alta que $2 \times \langle SNR_{SV} \rangle$.

La gráfica muestra el tiempo en el que un planeta tipo Tierra no es capaz de albergar vida básica, es decir, para $t \geq 12$ Ga (parte superior negra). Por otro lado, la probabilidad que existe para que planetas tipo Tierra sobrevivan a explosiones de SN y orbiten sin perturbaciones alrededor de una estrella y en ellos pueda emerger vida básica, está indicada con diferentes colores, siendo las zonas amarillas y negras la máxima y la mínima probabilidad respectivamente.

Podemos observar que la GHZ con más alta probabilidad, indicada en

color amarillo y con valores entre $0.9 \leq P_{GHZ} \leq 1$, se encuentra ubicada entre $3.5 < r(\text{kpc}) \leq 4.5$, para tiempos entre $9.5 < t(\text{Ga}) < 11.5$.

La GHZ con una probabilidad media, indicada en color rojo y con valores entre $0.5 \leq P_{GHZ} \leq 0.8$, se encuentra entre $3.5 < r(\text{kpc}) \leq 4.5$, para tiempos entre $7 < t(\text{Ga}) < 9.5$. Una segunda zona con probabilidad media, indicada en color naranja y con valores entre $0.8 \leq P_{GHZ} \leq 0.85$, se puede apreciar entre $3.5 < r(\text{kpc}) \leq 5.5$, para tiempos entre $11.5 < t(\text{Ga}) < 12$.

La figura 4.12 muestra la GHZ por unidad de superficie (pc^2), considerando el número de sistemas estelares formados, la distribución de metalicidad mostrada por exoplanetas, la existencia de vida compleja y el hecho de que la esterilización de vida en un planeta ocurre cuando el promedio de la SNR durante los primeros 4.5 Ga del planeta es más alta que $2 \times \langle SNR_{SV} \rangle$

A diferencia de la GHZ mostrada en la figura 4.11, en esta gráfica se muestra el tiempo en el cual un planeta no es capaz de albergar vida compleja, $t \geq 8.5$ Ga (parte superior negra). Bajo esta restricción, la probabilidad que existe para que planetas tipo Tierra sobrevivan a explosiones de SN y orbiten sin perturbaciones alrededor de una estrella y en ellos pueda evolucionar vida compleja, está indicada en diferentes colores, siendo igualmente las zonas amarillas y negras la máxima y la mínima probabilidad respectivamente.

Se puede observar que la GHZ mas probable, indicada en color amarillo y con valores entre $0.9 \leq P_{GHZ} \leq 1$, se ubica entre $3.5 < r(\text{kpc}) \leq 4.5$, para tiempos entre $8.3 < t(\text{Ga}) < 8.5$. Esta probabilidad es mucho menor que la GHZ suponiendo la existencia de vida básica mostrada en la figura 4.11.

La GHZ con una probabilidad media, indicada en color naranja y con valores entre $0.5 \leq P_{GHZ} \leq 0.8$, se encuentra entre $2.5 < r(\text{kpc}) \leq 4.5$, para tiempos entre $7 < t(\text{Ga}) < 8$. Una segunda zona con probabilidad media, indicada en color magenta y con valores entre $0.4 \leq P_{GHZ} \leq 0.5$, se puede apreciar entre $3.5 < r(\text{kpc}) \leq 4.5$, para tiempos entre $6 < t(\text{Ga}) < 7$.

En ambas gráficas (figuras 4.11 y 4.12), se puede apreciar que para las partes internas de la galaxia, $r \leq 2.5$ kpc y para las partes externas, $r \geq 5.5$ kpc, a tiempos tempranos, $0 \leq t(\text{Ga}) < 3$, la probabilidad de que exista una GHZ es nula, ya que en las zonas internas de la galaxia las explosiones de

SN son muy altas, mientras que para las zonas externas, la Z y el número de planetas formados es bajo.

4.6. Efectos de la SNR en la GHZ

La condición de que explosiones de SN provoquen la extinción de la vida en un planeta, es la restricción con mayor incertidumbre debido a que es difícil estimar con exactitud la resistencia que tiene la vida a dichas explosiones, ya que depende de factores astrofísicos, geofísicos y biogénicos desconocidos, tales como la distancia mínima a la que un planeta debe estar de una SN y que permita a la vida sobrevivir, el tipo de atmósfera y los océanos donde la vida podría evolucionar y las propiedades biológicas de los diferentes tipos de vida, entre otros factores. Puesto que la vida en la Tierra ha sido capaz de recuperarse de extinciones masivas, causadas por diferentes eventos, entre ellos explosiones de SN vecinas, en este trabajo consideramos que el doble de $\langle SNR_{SV} \rangle$ a partir de la formación de la Tierra (4.5 Ga), es el promedio máximo que la vida existente en un planeta puede soportar (ver capítulo 3). Así pues, analizando los dos tipos de tasas de supernovas, SNII y SNIa respectivamente, en comparación con la tasa de supernovas de la vecindad solar, nos encontramos con un resultado interesante.

Las figuras 4.13 y 4.14 muestran la evolución en el tiempo de $\langle SNRII \rangle$ y $\langle SNRIa \rangle$, las cuales se comparan con $\langle SNRII_{SV} \rangle$ y $\langle SNRIa_{SV} \rangle$ respectivamente. Podemos observar que para $r = 3.5$ kpc y $t > 4$ Ga, $\langle SNRII \rangle$ es cercana a la evolución de $\langle SNRII_{SV} \rangle$, mientras que $\langle SNRIa \rangle$ es muy similar a $\langle SNRIa_{SV} \rangle$. Con base en lo anterior podemos suponer que el promedio de la tasa de supernovas en la galaxia M33 es similar al promedio de la tasa de supernovas de la vecindad solar, lo que implica que para $3.5 < r(\text{kpc}) < 4.5$ la probabilidad de que existan planetas tipo Tierra capaces de albergar vida y que sobreviva a explosiones de SN es alta. Este resultado coincide con las graficas de la GHZ mostradas en las figuras 4.11 y 4.12, en donde la GHZ más probable se encuentra ubicada entre $3.5 < r(\text{kpc}) \leq 4.5$.

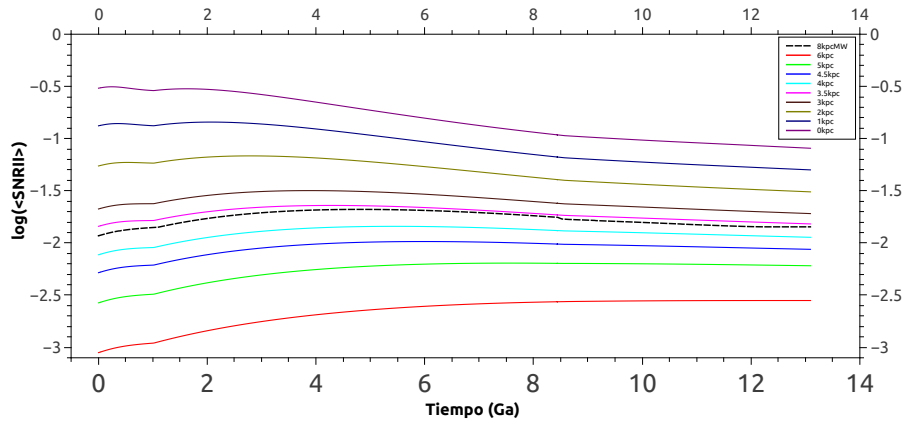


Figura 4.13: Evolución en el tiempo de $\langle \text{SNRI} \rangle$ comparada con la $\langle \text{SNRI} \rangle_{SV}$, línea negra punteada.

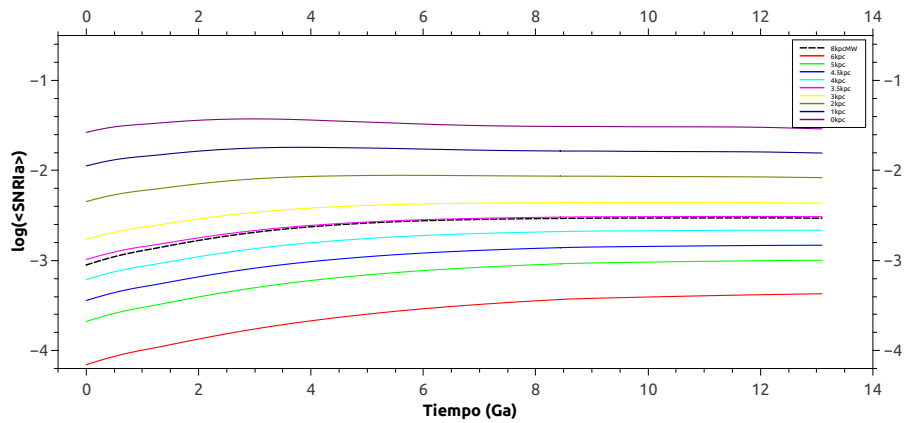


Figura 4.14: Evolución en el tiempo de $\langle \text{SNRI}_a \rangle$ comparada con la $\langle \text{SNRI}_a \rangle_{SV}$, línea negra punteada.

4.7. Comparación de la GHZ de M33 con las GHZs de la MW y M31

Como vimos en el capítulo 3, la GHZ para la Vía Láctea, MW, fue calculada a partir del año 2001 por diversos autores, cuyos resultados difieren a consecuencia de las probabilidades que suponen en cada uno de sus trabajos, principalmente en las distribuciones de Z para formar planetas terrestres.

Las condiciones utilizadas en esta tesis para el cálculo la GHZ en M33 son similares a las condiciones utilizadas por Lineweaver et al. en el año 2004, por lo que decidimos comparar nuestra GHZ con la GHZ de la MW obtenida por este autor.

Lineweaver et al. encontraron que la GHZ para la MW con mayor probabilidad $P_{GHZ} > 70\%$, para vida compleja o vida básica, se encuentra localizada en el disco galáctico central como un anillo delgado entre $7 \leq r(\text{kpc}) \leq 9$ con un área de $\sim \pi[9^2 - 7^2] \text{ kpc}^2$, la cual corresponde al 8% del área del disco galáctico considerado por estos autores ($\sim \pi[20^2 - 3.5^2] \text{ kpc}^2$) [10], (ver figura 4.15, disco medio).

En cuanto a la galaxia M31, en el año 2013, Carigi et al. calcularon la GHZ de la galaxia suponiendo las mismas probabilidades utilizadas en este trabajo. Carigi et al. dedujeron que la GHZ con una $P_{GHZ} > 70\%$ se encuentra en un anillo localizado entre $3 \leq r(\text{kpc}) \leq 9$ con un área de $\sim \pi[9^2 - 3^2] \text{ kpc}^2$, correspondiente a un 8% del área del disco galáctico de M31 considerado por los autores ($\sim \pi[30^2 - 3^2] \text{ kpc}^2$) [2], (ver figura 4.15, disco superior).

En nuestro trabajo, la GHZ con mayor probabilidad $P_{GHZ} > 90\%$ para la existencia de vida básica y compleja, se encuentra en un anillo entre $3.5 \leq r(\text{kpc}) \leq 4.5$ con un área de $\sim \pi[4.5^2 - 3.5^2] \text{ kpc}^2$ y que corresponde al 10% del área del disco galáctico considerado ($\sim \pi[9^2] \text{ kpc}^2$), (ver figura 4.15, disco inferior).

La figura 4.15 muestra de manera gráfica las zonas en las que se encuentran ubicadas las GHZs de M31, MW y M33 con respecto al tamaño de cada galaxia. Podemos observar que la GHZ con mayor porcentaje corresponde a M33, el cual equivale a un 10% de su disco galáctico, mientras que las GHZs de M31 y la MW corresponden a un 8% del disco galáctico de cada galaxia. Con base en lo anterior, podemos suponer que una galaxia

pequeña, como lo es M33, tiene la capacidad de albergar una GHZ mayor, con respecto a su tamaño y en comparación con otras galaxias masivas.

Sin embargo, con respecto al área de las GHZs, se relaciona directamente con el tamaño del disco de la galaxia y, para este caso, la GHZ con mayor área corresponde a M31 al ser la galaxia más masiva, mientras que la galaxia con la GHZ de menor área corresponde a M33, al ser la más pequeña de las 3 galaxias del GL.

Esta comparación entre las 3 galaxias del Grupo Local de Galaxias, nos muestra de una manera general la capacidad que tiene una galaxia pequeña de tener una GHZ considerable en la que puedan existir planetas tipo Tierra capaces de albergar vida y que sobrevivan a explosiones de SN. Sin embargo, es necesario generar los CEMs para las 3 galaxias utilizando el mismo código y recalculando sus respectivas GHZs bajo idénticas condiciones de probabilidad, con el fin de poder realizar una comparación más exacta de las GHZs de estas 3 galaxias espirales del GL y así conocer de una manera más precisa si las dimensiones de una galaxia es un factor determinante para el tamaño de su GHZ.

4.7. COMPARACIÓN DE LA GHZ DE M33 CON LAS GHZS DE LA MW Y M31

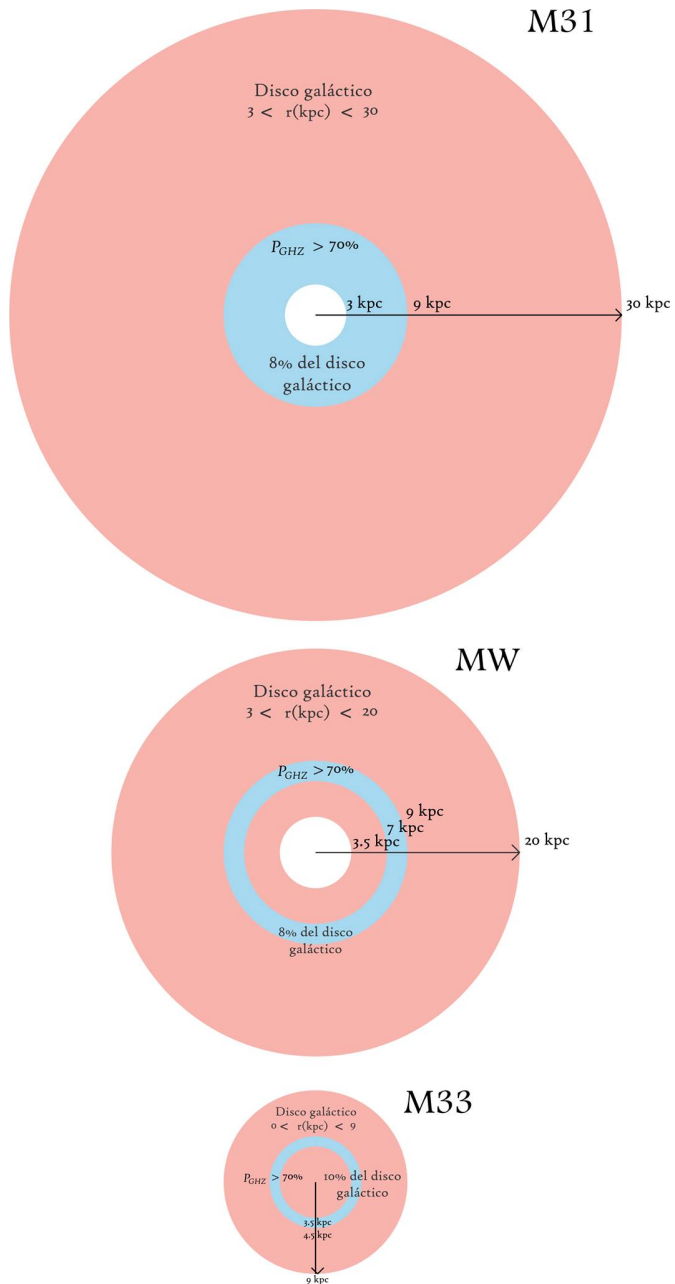


Figura 4.15: Representación gráfica del bulbo (color blanco) y las zonas de habitabilidad galáctica de M31, MW y M33 (color azul), con respecto al disco galáctico de cada galaxia (color rosa).

Capítulo 5

Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos por el CEM construido por Robles-Valdez en el año 2013, se calculó por primera vez la Zona de Habitabilidad Galáctica para la galaxia M33.

La GHZ se obtuvo considerando tres restricciones espaciales: (i) número de sistemas planetarios formados rotando alrededor de estrellas, los cuales pueden ser lugares potenciales para la vida, (ii) la distribución de metalicidad mostrada por exoplanetas, la cual proporciona la probabilidad para que planetas tipo Tierra sean formados y (iii) el promedio de una tasa de SN similar a la que permite la existencia de vida en la Tierra; y dos restricciones temporales: el tiempo necesario para el surgimiento de vida básica (vida unicelular) y el tiempo necesario para que la vida básica evolucione a vida compleja (vida capaz de manipular las ondas electromagnéticas como medio de comunicación, caso de los seres humanos).

La GHZ más probable en M33 se encuentra entre $3.5 < r(\text{kpc}) \leq 4.5$ considerando vida básica y vida compleja, para tiempos entre $9.5 < t(\text{Ga}) < 11.5$ y $8.3 < t(\text{Ga}) < 8.5$ respectivamente.

La GHZ con probabilidad media en M33, suponiendo vida básica, se encuentra entre $3.5 < r(\text{kpc}) \leq 5.5$, para tiempos entre $11.5 < t(\text{Ga}) < 12$.

La GHZ con probabilidad media en M33, suponiendo vida compleja, se encuentra entre $2.5 < r(\text{kpc}) \leq 4.5$, para tiempos entre $7 < t(\text{Ga}) < 8$.

La GHZ en M33 con una $P_{GHZ} > 70\%$, suponiendo vida básica y vida compleja se encuentra localizada en un anillo entre $3.5 \leq r(\text{kpc}) \leq 4.5$, dicha región anular corresponde a un 10% del área del disco galáctico considerado

en esta tesis ($\sim \pi[9^2]$ kpc²).

El promedio de la tasa de supernovas en la galaxia M33 es similar al promedio de la tasa de supernovas de la vecindad solar, lo cual implica que para $3.5 < r(\text{kpc}) < 4.5$ la probabilidad de que existan planetas tipo Tierra capaces de albergar vida y que sobreviva a explosiones de SN es alta.

La comparación en cuanto a porcentajes y de manera gráfica de las GHZs entre las 3 galaxias espirales del Grupo Local de galaxias, nos permite tener idea general de la capacidad que tiene una galaxia pequeña de tener una GHZ en la cual se puedan formar planetas sólidos capaces de albergar vida, siendo la GHZ de la galaxia M33 aquella con un porcentaje mayor (10 %) con respecto a su disco galáctico ($\sim \pi[9^2]$ kpc²) y acorde al tamaño de la galaxia.

No es posible comparar de una manera más exacta las GHZs de las 3 galaxias espirales, ya que cada una de estas GHZs fueron calculadas con diferentes condiciones de probabilidad y en base a modelos de evolución química generados con distintos códigos.

Bibliografía

- [1] Gonzalez, G., Brownlee, D., & Ward, P. 2001, *Icarus*, **152**,185.
- [2] Carigi L., Meneses-Goytia S., García-Rojas J., 2013, *RevMexAA*, **49**, 253-273.
- [3] Prantzos, N. 2008, *Space Science Reviews*, **135**, 313.
- [4] Carigi L. La química y el universo. Capitulo 2: Evolución química y zonas habitables en el Universo. Colegio Nacional 2012.
- [5] Carigi L. La química y el universo. Capitulo 1: Evolución de la composición química del universo. Colegio Nacional 2012. ISBN: 978-607-724-028-0.
- [6] G. Cordero Tercero, L. Carigi, S. I. Ramírez, *Astrobiología: una visión transdisciplinaria de la vida en el universo*. Capítulo 2: El universo, 2014, UNAM-UAEM, por publicar.
- [7] Dr. Will Sutherland, The Galaxy (ASTM002 / PHY7012U / MTH726U) ; 2012/13, (Disponible en: <http://www.maths.qmul.ac.uk/wjs/MTH726U/chap4.pdf>. Consultado el 27 de mayo de 2014).
- [8] Melendez, J., 2013 International Astronomical Union, Setting the scene for Gaia and LAMOST - the current and next generations of surveys and models Proceedings IAU Symposium No. 298.
- [9] F. Robles-Valdez, L. Carigi and M. Peimbert, 2013, *MNRAS* **429**, 2351-2360.

- [10] Lineweaver, C. H., Fenner, Y., & Gibson, B. K. 2004, *Science*, **303**, 59.
- [11] Gowanlock, M. G., Patton, D. R., & McConnell, S. M. 2011, *Astrobiology*, **11**, 855.
- [12] Lineweaver, C. H.: 2001, *Icarus*, **151**, 307.
- [13] Gehrels, N. et al. 2003, *ApJ*, **585**,1169.
- [14] Scalo, J., Kaltenegger, L., Segura A., Fridlund, M., Ribas, I., Kulikov, Y., Grenfell, J., Rauer, H., Oder, P., Leitzinger, M., Selsis, F., Khodachenko, M., Eiroa, C., Kasting J., & Lammer H., 2007, *Astrobiology*, **7**, 85-166.
- [15] McClendon, J. H. 1999, *Earth-Science Reviews*, **47**, 71.
- [16] Bada, J. L. 2004, *Earth. Planet. Sci. Lett.*, **226**, 1.
- [17] Chyba, C., & Sagan, C. 1991, *Origins Life Evol. Biosphere*, **21**, 3.
- [18] Maurette, M., Brack, A, Kurat, G., Perreau, M., & Engrand, C. 1995, *Adv. Space Res.*, **15**, 113
- [19] Navarro-Gonzalez, R., McKay, C. P., & Nna-Mvondo, D. 2001, *Nature*, **412**, 61.
- [20] Sekine, Y., Sugita, S., Kadono, T., & Matsui, T. 2003, *J. Geophys Res.*, **108**.
- [21] Hazen, R. M., Boctor, N., Brandes, J., Cody, G. D., Hemley, R. J., Sharma, A., & Yoder, H. S., 2002, *J. Phys.: Condens. Matter*, **14**, 11489.
- [22] Chang, S. 1982, *Phys. Earth Planet In.*, **29**, 261.
- [23] Gomez-Caballero, J. A., & Pantoja-Alor, J. 2003, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, **LVI**, 56.

Apéndice A

A.1. Tasa de formación estelar, SFR

La tasa de formación estelar (SFR, por sus siglas en inglés, Star Formation Rate), indica cuántas masas solares de gas se transforman en estrellas por unidad tiempo y para galaxias espirales se expresa en términos de $M_{\odot} \text{ pc}^{-2} \text{ Ga}^{-1}$.

La parametrización más común de la SFR es la ley de Kennicutt-Schmidt:

$$SFR(r, t) = \nu \sigma_{gas}^k \quad (\text{A.1})$$

donde σ_{gas} es la densidad superficial de gas y $k = 1-2$ con una preferencia para $k = 1.4 \pm 0.15$ para discos espirales y ν es un parámetro que describe la eficiencia de formación estelar.

A.2. Función de masa inicial, IMF

La función de masa inicial (IMF, por sus siglas en inglés, Initial Mass Function), describe la distribución en masa de las estrellas formadas en un brote estelar de $1M_{\odot}$.

Las parametrización más común de la IMF es:

$$\varphi(m) = am^{-(1+x)}, \quad (\text{A.2})$$

generalmente definida en un intervalo de masas de $0.1 M_{\odot}$ a una masa superior (*msup*) determinada, donde a es la constante de normalización obtenida a partir de $\int_{0.1}^{msup} m\varphi(m)dm = 1$.

Apéndice B

B.1. Glosario

Disco protoplanetario: Es un disco plano y extenso de hielo, polvo y partículas rocosas supendidas en gases orbitando alrededor de una estrella. A partir de las aglomeraciones de estos materiales pueden formarse planetas.

Escenario de formación estelar dentro-fuera: El escenario de formación estelar dentro-fuera hace referencia a que las estrellas que se encuentran en el centro de una galaxia, son mas viejas que aquellas que se encuentran en la periferia.

Escenario de formación estelar fuera-dentro: El escenario de formación estelar fuera-dentro hace referencia a que las estrellas que se encuentran en el centro de una galaxia, son más jóvenes que aquellas que se encuentran en la periferia.

Fotósfera: Es la superficie visible del Sol y las estrellas; es la capa externa de las estrellas de la cual emerge el espectro continuo y las líneas de absorción. Es la región de donde se irradia la mayor parte de la luz.

Medio interestelar: El medio interestelar, o ISM por sus siglas en inglés, es el contenido de materia y energía que existe entre las estrellas dentro de una galaxia. Dicho medio lo conforman tres constituyentes básicos: materia ordinaria, rayos cósmicos y campos magnéticos. El medio en sí es una mezcla heterogénea de polvo, compuesto alrededor de un 99 % en masa por partículas de gas y un 1 % por polvo.

Masa Solar (M_{\odot}): Es una unidad de medida, la cual es igual a la masa del Sol, su símbolo convencional y su valor son:

$$M_{\odot} = 1.9891 \times 10^{30} \text{ kg} \quad (\text{B.1})$$

Es utilizada en astronomía para medir comparativamente la masa de las estrellas y otros objetos astronómicos muy masivos, como galaxias.

Materia interestelar: Es la materia que se encuentra en el medio interestelar. En las galaxias elípticas la materia interestelar es relativamente pobre en gas y polvo, en cambio en las galaxias espirales la materia interestelar es abundante y se concentra sobre todo en el disco de la galaxia y en los brazos espirales. Debido a la materia interestelar las estrellas suelen verse más débiles y enrojecidas. Las nebulosas son las zonas en las que la materia interestelar se hace evidente, ya que la densidad de la materia interestelar es tal que absorben y esparcen la luz de las estrellas de manera muy eficiente impidiendo su paso (nebulosas oscuras), o bien reflejan la luz de las estrellas cercanas (nebulosas de reflexión).

Nebulosa protosolar: La nebulosa protosolar fue la nube de gas o disco de acrecimiento en la que se formó el Sistema Solar. Esta nebulosa solar se fue condensando al enfriarse y aplanando gradualmente por el efecto combinado de las fuerzas de gravedad y centrípeta formando, con el tiempo, la estrella central y los planetas.

Nube molecular: Una nube molecular es un conglomerado de gas y polvo. Dentro de las nubes moleculares se forman las estrellas nuevas. Están compuestos principalmente de hidrógeno molecular y otras moléculas como el CO, su temperatura promedio es de 10 K.

Parsec (pc): Es el nombre de una unidad de medida astronómica correspondiente a la distancia que hay a una estrella que tuviera un paralaje de un segundo.

Un parsec equivale a 30.86×10^{12} kilómetros, o bien 3.26 años luz, o 206.265 unidades astronómicas (UA). Múltiplos del parsec son el kiloparsec (kpc), equivalente a mil parsec y un megaparsec (Mpc), equivalente a un millón de parsec.

Cuando la paralaje de una estrella observada desde lados opuestos de la órbita de la Tierra es de dos segundos de arco, se dice que dicha estrella está situada a un parsec de distancia respecto a la Tierra.