



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS QUÍMICAS**

**EVOLUCIÓN DE LOS ELEMENTOS QUÍMICOS Y REGIONES QUÍMICAMENTE  
APTAS PARA LA FORMACIÓN DE PLANETAS QUE ALBERGUEN VIDA EN LA  
GALAXIA DE ANDRÓMEDA**

TESIS  
PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
**MAESTRO EN CIENCIAS**

PRESENTA  
QUÍM. SOFÍA MENESES GOYTIA



TUTOR: DR. MANUEL PEIMBERT SIERRA

AÑO: 2009

El presente proyecto de tesis, se realizó en el Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), bajo la guía y orientación académica del Dr. Manuel Peimbert, la Dra. Leticia Carigi y el Dr. Octavio Valenzuela.

Así mismo, se contó con la cuidadosa asesoría y colaboración del Dr. Jorge García-Rojas del Instituto de Astrofísica de Canarias (España) y la participación de la Dra. Elisabeth Berkhuijsen del Instituto Max Planck para Radioastronomía (Alemania).

Los profesores que formaron parte del jurado y participaron en la mejora de este trabajo son el Dr. Anatoly Yatsimirsky, el Dr. Hugo Torrens, la Dra. Alicia Negrón, el Dr. Raymundo Cea y la Dra. Sandra Ramírez.

A mi faro de luz, mi madre. A mi ejemplo, mi padre. A mis ángeles de la guarda, mis hermanos.

A mis incondicionales cómplices, mis amigos.

A aquél que está presente sin estarlo, de liefde van mijn leven.

## RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue determinar las Zonas de Habitabilidad Galáctica en la galaxia de Andrómeda y para ello, se requirió conocer las regiones en las cuales, los elementos químicos se han movilizad y en consecuencia, concentrado. Así mismo, al existir movimiento dentro de la galaxia misma, las abundancias de los elementos químicos pueden verse modificadas o no, y se desea conocer cómo afecta esto en las Zonas de Habitabilidad Galáctica, siendo éste el segundo objetivo de la presente investigación. Es importante mencionar que el estudio de Zonas de Habitabilidad Galáctica sólo se había enfocado en nuestra Galaxia utilizando como único patrón de habitabilidad la Tierra en condiciones ideales.

Ahora bien, dado a que la Zona de Habitabilidad Galáctica requiere conocer las abundancias químicas, se desarrolló un modelo de Evolución Química para conocer no sólo el comportamiento en el espacio tiempo de los elementos químicos sino también, la densidad de la ocurrencia de supernovas ya que de ambos parámetros depende la formación planetaria y la supervivencia de los planetas.

El segundo objetivo del trabajo fue determinar el efecto de la migración radial estelar sobre la galaxia de Andrómeda por lo que se utilizó un modelo de n-cuerpos que simuló la evolución cosmológica de una galaxia en espiral, con características similares a la galaxia en estudio, con lo cual se lo logró determinar el efecto de la migración sobre las abundancias químicas y en consecuencia, la Zona de Habitabilidad Galáctica.

# CONTENIDO

<b>PREFACIO</b>	<b>3</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>4</b>
PRESENTACIONES EN CONGRESOS Y REUNIONES	4
<b>1. ANTECEDENTES</b>	<b>5</b>
<b>1.1 ORIGEN DEL UNIVERSO</b>	<b>5</b>
1.1.1 NUCLEOSÍNTESIS PRIMIGENIA	5
1.1.2 NUCLEOSÍNTESIS ESTELAR	6
<b>1.2 GALAXIA DE ANDRÓMEDA, M31</b>	<b>8</b>
1.2.1 COMPONENTES GALÁCTICAS	9
<b>1.3 EVOLUCIÓN QUÍMICA</b>	<b>12</b>
1.3.1 RESTRICCIONES OBSERVACIONALES	12
1.3.2 MODELO DE EVOLUCIÓN QUÍMICA	15
<b>1.4 ZONA DE HABITABILIDAD GALÁCTICA</b>	<b>17</b>
1.4.1 CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES PARA LA ZONA DE HABITABILIDAD GALÁCTICA	18
<b>1.5 MIGRACIÓN RADIAL ESTELAR</b>	<b>23</b>
1.5.1 GALAXIAS ESPIRALES Y BARRAS GALÁCTICAS	23
1.5.2 LA BARRA GALÁCTICA Y SUS CONSECUENCIAS	25
<b>2. EVOLUCIÓN QUÍMICA DE LA GALAXIA DE ANDRÓMEDA</b>	<b>26</b>
<b>2.1 SUPOSICIONES DEL MODELO DE EVOLUCIÓN QUÍMICA Y SU RESOLUCIÓN</b>	<b>26</b>
<b>2.2 BULBO Y SU EVOLUCIÓN QUÍMICA</b>	<b>28</b>
2.2.1 RESTRICCIONES OBSERVACIONALES	28
2.2.2 MODELO DE EVOLUCIÓN QUÍMICA DEL BULBO	29
<b>2.3 HALO-DISCO Y SU EVOLUCIÓN QUÍMICA</b>	<b>32</b>
2.3.1 RESTRICCIONES OBSERVACIONALES	32
2.3.2 MODELO DE EVOLUCIÓN QUÍMICA DEL HALO-DISCO	40
<b>2.4 MODELO DE EVOLUCIÓN QUÍMICA DE M31</b>	<b>43</b>
<b>3. ZONA DE HABITABILIDAD GALÁCTICA DE LA GALAXIA DE ANDRÓMEDA</b>	<b>55</b>
<b>3.1 RESTRICCIONES PARA LA ZONA DE HABITABILIDAD GALÁCTICA</b>	<b>55</b>
3.1.1 RESTRICCIONES QUÍMICO-FÍSICAS	55
3.1.2 RESTRICCIONES BIOGÉNICAS	67

<b>3.2 COMPARACIÓN LAS DIFERENTES ZONAS DE HABITABILIDAD GALÁCTICA</b>	<b>72</b>
<b>3.3 ANILLOS DE LA ZONA DE HABITABILIDAD GALÁCTICA A DISTINTOS TIEMPOS</b>	<b>75</b>
<b><u>4. MIGRACIÓN RADIAL ESTELAR</u></b>	<b><u>77</u></b>
4.1 SIMULACIONES Y MIGRACIÓN	77
4.2 MIGRACIÓN RADIAL ESTELAR Y EVOLUCIÓN QUÍMICA	79
4.3 MIGRACIÓN RADIAL ESTELAR Y MIGRACIÓN DE SISTEMAS PLANETARIOS	81
4.4 MIGRACIÓN RADIAL ESTELAR Y ZONA DE HABITABILIDAD GALÁCTICA	82
<b>4.5 ANILLOS DE LA ZONA DE HABITABILIDAD GALÁCTICA A DISTINTOS TIEMPOS</b>	<b>85</b>
<b><u>5. REGIONES QUÍMICAMENTE APTAS PARA LA FORMACIÓN DE PLANETAS QUE ALBERGUEN VIDA EN LA GALAXIA DE ANDRÓMEDA (CONCLUSIONES)</u></b>	<b><u>87</u></b>
<b><u>GLOSARIO DE ACRÓNIMOS Y TÉRMINOS</u></b>	<b><u>89</u></b>
<b><u>ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS</u></b>	<b><u>90</u></b>
<b><u>REFERENCIAS</u></b>	<b><u>92</u></b>

## PREFACIO

En los últimos años, a pesar de la especialización de la ciencia, el conocimiento ha requerido la participación de diversas disciplinas para entender fenómenos cada vez más complejos del y en el Universo.

Como en el caso de la Química, existen varias ciencias en las que sus conocimientos son cruciales para lograr un mejor entendimiento del Universo, como lo son la Astrofísica y la Astronomía desde 1878 (Esteban, 2005). Algunos ejemplos de las aplicaciones de la Química en estas ciencias son la determinación de la composición y el comportamiento químico de regiones en donde se dé la formación de estrellas y planetas, los requerimientos químicos y su interacción para dar origen a la vida y su evolución. Debido a que la Química no sólo es el estudio de reacciones químicas, con ella se pueden crear modelos que permiten conocer la evolución y composición tanto elemental como molecular de algún objeto en el Universo, además de observar la composición como tal por medio de la espectroscopia, una de las ramas de la Química. Por lo tanto, la Química es la memoria de la evolución del Universo mismo ya que las abundancias químicas son indicios de las condiciones y los procesos que han ocurrido en él.

Ahora bien, una de las áreas de la ciencia, a la que pertenece parte de la investigación realizada en esta tesis, que combina a la Química con la Astrofísica y la Astronomía, es la Cosmoquímica ya que esta relaciona el origen del Universo con el origen de la vida aplicando sus resultados a la Astrobiología. La Evolución Química, una herramienta astronómica de modelaje empleada en este trabajo, permite rastrear las abundancias de especies químicas desde el inicio de los tiempos cuando sólo existían hidrógeno y helio hasta la nucleosíntesis del resto de los elementos químicos (los cuales se originan de la vida o la muerte de las estrellas) e inclusive las moléculas existentes en el medio interestelar. En este proyecto, sólo se realizó con el rastreo de los elementos químicos en general y no de moléculas específicas.

La otra rama de la ciencia a la que pertenece el presente proyecto, es la Astrobiología que básicamente utiliza a la Biología, la Química y la Astronomía para determinar los procesos necesarios para el origen y evolución de la vida así como también los lugares propicios para dicho evento. En el caso de esta tesis, se estudiaron las regiones químicamente aptas para la formación de planetas que alberguen vida como la conocemos actualmente, en la galaxia de Andrómeda, ya que es la galaxia más grande del Grupo Local al que pertenece nuestra Galaxia y como esta última, también es una galaxia espiral.

“...we are all made of stars...”

– Letra de la canción “We are all made of stars” de Moby –

“...every atom in our bodies was once part of a star...”

– Monólogo de Vincent Freeman (Ethan Hawk) de la película GATTACA –

## AGRADECIMIENTOS

La presente investigación surgió del interés de la Dra. Leticia Carigi por orientar a una estudiante que deseaba incursionar en un campo novedoso que lograra unificar a la Química con la Astronomía, y que en consecuencia, enriqueciera ambas ciencias. Gracias al apoyo académico y personal que se ha tenido por parte de la Dra. Carigi, la posibilidad de avanzar y profundizar en un futuro en la investigación, se ha convertido en una realidad.

La aportación recibida por el Dr. Jorge García-Rojas hacia este proyecto fue crucial, ya que su experiencia académica en la obtención de las abundancias químicas como restricciones observacionales, permitió mejorar enormemente el aprendizaje y la calidad de este trabajo. Gracias a la colaboración de la Dra. Elisabeth Berkhuijsen, la sección de la distribución radial de la densidad superficial de la masa de gas como restricción observacional, fue mejorada ya que proporcionó datos actualizados y mejorados. Por otro lado, por el mismo interés de interdisciplinariedad de la ciencia, el Dr. Octavio Valenzuela colaboró con los conocimientos de Cosmología para estudiar un aspecto importante de la evolución de las galaxias, la Migración Radial Estelar y sus enseñanzas permitieron desarrollar una parte del proyecto de tesis.

Así mismo, el apoyo incondicional que se ha recibido del Dr. Manuel Peimbert a lo largo de todo el proyecto de investigación, tanto académicamente como económica y personalmente, ha sido invaluable.

## PRESENTACIONES EN CONGRESOS Y REUNIONES

Las oportunidades académicas que se han dado gracias a esta investigación a nivel internacional, por medio de la presentación en congresos, demuestran que el interés hacia un proyecto interdisciplinario como éste, tiene cabida en el mundo moderno de la ciencia. Debido a la interdisciplinariedad del proyecto, se encontraron diversos foros para la presentación de la investigación, como poster en:

- 64a Conferencia de Astronomía Neederlandesa (Dutch Astronomy Conference, NAC). Mayo 13 - 15, 2009; Kerkrade, Países Bajos.
- 2a Conferencia de estudiantes de Posgrado en Astrobiología (Astrobiology Graduate Student Conference 2009, AbGradCon). Julio 17 - 20, 2009; Seattle, Estados Unidos.
- XXIII Congreso Nacional de Astronomía (CNA). Septiembre 1 – 4, 2009; Ensenada, México.

Y como plática en:

- 6ta reunión de la Sociedad Mexicana de Astrobiología (SOMA). Junio 16 - 17, 2009; Ciudad de México, México.
- Super Escuela de Verano del Observatorio del Vaticano (Super Vatican Observatory Summer School 2009, SuperVOSS). Junio 21 - 27, 2009; Roma, Italia.



# 1. ANTECEDENTES

En las secciones que se desarrollan a continuación, se encuentran los conceptos necesarios para dar un entendimiento claro tanto de los métodos utilizados para la predicción de las abundancias químicas y las regiones químicamente aptas para la formación planetaria, como de las restricciones astrofísicas de las regiones mismas.

## 1.1 ORIGEN DEL UNIVERSO

De acuerdo al modelo estándar de la Cosmología, hace 13.7 mil millones de años, el Universo inició a partir de la expansión de una singularidad infinitesimalmente pequeña, en donde toda la energía-materia y el espacio-tiempo se encontraban contenidos. A dicha explicación se le denomina la Gran Explosión<sup>1</sup>. En los primeros momentos de la expansión, i. e. en tiempos menores a tres minutos, las fuerzas débiles, electromagnéticas y fuertes así como la gravedad aparecen y los electrones, neutrones, positrones y protones son formados a partir de colisiones de fotones por lo que hasta ese momento el Universo era químicamente pobre. A partir de los tres minutos de haber iniciado la expansión, comienza a llevarse a cabo la Nucleosíntesis Primigenia (ver *sección 1.1.1*) (Karttunen, 2003; Shaw, 2006). Después de 300 o 500 mil millones de años, como consecuencia de la atracción gravitacional entre las partículas sintetizadas, inició a la formación de cuerpos más grandes como nubes moleculares, estrellas y protogalaxias que a su vez, fueron las semillas de entidades masivas como las galaxias actuales, e. g. nuestra Galaxia, Andrómeda, etc. Finalmente, una de las formas en que se ha comprobado la teoría de la Gran Explosión es la observación del alejamiento que tienen las galaxias lo que implica una expansión, así como también la llamada radiación cósmica de fondo la cual es el residuo de la energía emitida por la expansión de la singularidad (Bradley & Ostlie, 2007; Karttunen, 2003; Shaw, 2006).

### 1.1.1 NUCLEOSÍNTESIS PRIMIGENIA

Como se mencionó anteriormente, a los tres minutos de haber comenzado la Gran Explosión, se inició lo que se llama Nucleosíntesis Primigenia la cual implica la formación de los primeros elementos químicos (i.e. H, He y Li) y sus isótopos. El proceso por el que estos elementos químicos fueron sintetizados es descrito por medio de las reacciones nucleares entre neutrones y protones que dieron como resultado átomos de deuterio a una temperatura promedio de  $10^9$  K. Sin embargo la temperatura del medio era muy alta para mantener estos núcleos en forma estable y permitir la síntesis de átomos más pesados y solamente hasta que la temperatura llegó a  $\sim 3000$  K, como consecuencia de la expansión del Universo, el deuterio pudo estabilizarse y reaccionar con otros protones sintetizando así el isótopo helio-3, el cual reaccionó a su vez con otro núcleo de deuterio dando paso al núcleo de helio-4. Así mismo, a

---

<sup>1</sup> Término que por sí mismo es incorrecto ya que no hubo una explosión sino una expansión adiabática, es decir, una expansión sin intercambio de calor con los alrededores.

partir de los isótopos del helio, se pudo sintetizar el isótopo del litio-7. Dichas reacciones continuaron hasta que la temperatura disminuyó logrando así, una composición química en el Universo de 75% de hidrógeno, 25% de helio con trazas de deuterio y litio. Esta composición se mantuvo inmutable hasta el inicio de la formación estelar que se estima fue entre 0.5 y 1.0 Ga<sup>2</sup> posterior al inicio de la Gran Explosión (Mason, 1991; Shaw, 2006).

### 1.1.2 NUCLEOSÍNTESIS ESTELAR

La síntesis de los elementos químicos, distintos al hidrógeno y deuterio, se realiza en las estrellas, tanto en su “vida” (núcleos) como en su “muerte” (estallidos de supernovas). Debido a las reacciones nucleares que tienen lugar en los interiores estelares, elementos químicos son sintetizados bajo el proceso llamado Nucleosíntesis Estelar. Otro sitio de nucleosíntesis son las supernovas (SN), las cuales se producen a partir de la explosión de una Estrella Masiva<sup>3</sup> (EM) y el tipo de nucleosíntesis que se lleva a cabo es llamada Nucleosíntesis Explosiva (Mason, 1991; Shaw, 2006). Los factores físicos generales que ambas nucleosíntesis requieren para llevarse a cabo son altas densidades y temperaturas, las cuales son necesarios para que el rompimiento de la barrera coulóbica entre los núcleos logre ocurrir y así, sintetizar el núcleo de un elemento químico más pesado (Arnett, 1996; Clayton, 1983; Cowley, 1995).

La Nucleosíntesis Estelar consta de diversos procesos, el principal de ellos es la Cadena p-p (ver *Figura 1*). Dicho proceso es llevado a cabo por todas las estrellas durante el 90 – 99% de su tiempo de vida y su objetivo principal es la fusión de átomos de H para sintetizar núcleos de He. Otro de los procesos de nucleosíntesis del He es aquel llamado ciclo del CNO (ver *Figura 2*), el cual requiere la presencia de C, N y O, que actúan como “reactivos” junto con otras partículas para sintetizar núcleos de He a partir de H. Los elementos requeridos para esta reacción, i. e. C, N y O tienen un origen primario y otro secundario. El origen Primario implica que dichos elementos fueron sintetizados por la estrella misma, el producto principal es N. Por otro lado, el origen secundario involucra al C, N y O que fueron tomados del Medio Interestelar (MIE) donde la estrella se formó, los cuales fueron sintetizados previamente por estrellas anteriores, lo que permite que sean utilizados como “reactivos” por la estrella que ahora los contiene (Arnett, 1996; Clayton, 1983; Cowley, 1995).

La Nucleosíntesis Explosiva ocurre durante la etapa final de una EM, la cual es un estallido llamado Supernova (SN) que dura alrededor de un segundo y debidas a las altas temperaturas y energías de la explosión, ocurren fusiones nucleares del material eyectado del interior de la estrella produciendo elementos químicos pesados hasta llegar al Fe. Existe otro tipo de Nucleosíntesis Explosiva que se origina en sistemas binarios de Estrellas de Baja Masa<sup>4</sup> (EBM). Cuando la estrella de mayor masa del sistema muere, deja un cadáver estelar el cual consiste de un núcleo de C y O. Debido a la cercanía de ambas estrellas, el cadáver recibe material de su compañera y se sintetizan elementos pesados a partir del C y O, principalmente Fe. Los procesos anteriores describen la síntesis de elementos químicos desde He hasta Fe sin embargo, el resto de los elementos químicos, se originan por otros métodos como son la fusión

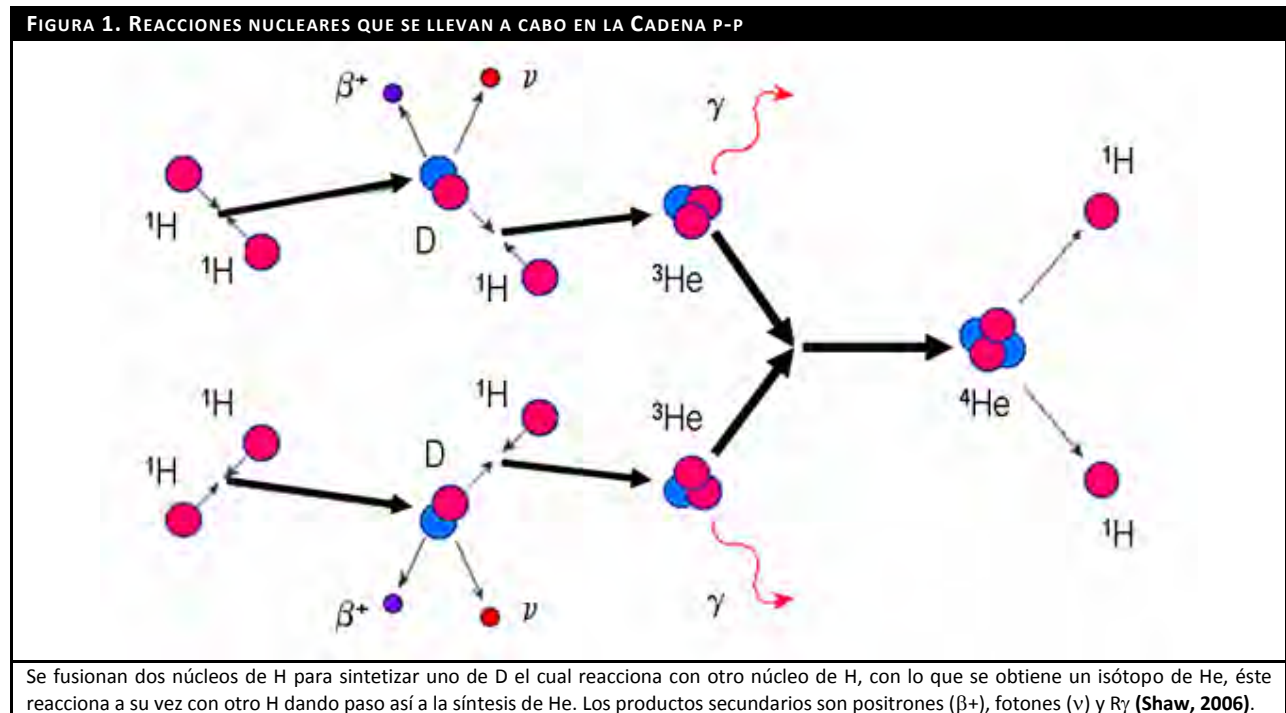
---

<sup>2</sup> 1 Ga = 10<sup>9</sup> años

<sup>3</sup> Estrellas mayores a 8 masas solares. Una masa solar (1 M<sub>☉</sub>) = 1.99 x 10<sup>30</sup> kg

<sup>4</sup> Estrellas menores a 8 masas solares.

de elementos cada vez más pesados o por la captura de  $n^+$ , que también se llevan a cabo dentro de las estrellas (Arnett, 1996; Clayton, 1983; Cowley, 1995).

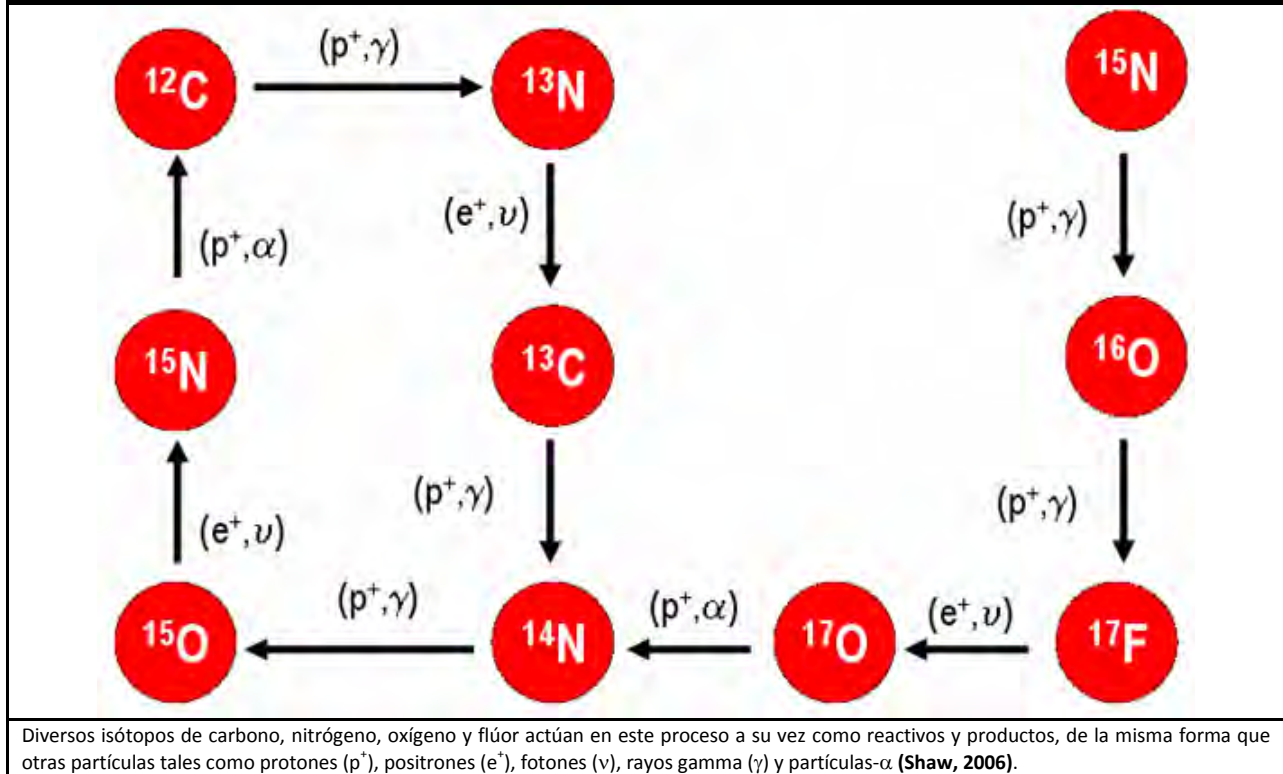


En la *Tabla 1*, se encuentra una compilación sobre el tipo de estrellas y los elementos químicos que sintetizan, así como también características generales de las mismas (e.g. temperatura, masa en función de masas solares y tipo espectral) (Arnett, 1996; Clayton, 1983; Cowley, 1995; Shaw, 2006). Las estrellas se clasifican de acuerdo a la masa que tienen con respecto a la masa solar siendo EM y EBM. La edad o tiempo de vida de una estrella se encuentra también en función de su masa<sup>5</sup>, por lo que la edad de las EBM está entre 0.5 y 30 Ga, y la de las EM entre unos cuantos millones de años y 0.5 Ga.

TABLA 1. ELEMENTOS QUÍMICOS Y PROPIEDADES DE LAS ESTRELLAS QUE LOS SINTETIZAN				
Tipo espectral	Masa mínima ( $M_{\odot}$ )	Temperatura estelar (K)	Combustible	Productos
K, M	0.1	$T > 5\,000$	H	He
G	1.0	$5\,000 \geq T \geq 6\,000$	He	C, O
F	1.4	$6\,000 \geq T \geq 8\,000$	C	O, Ne, Na y Mg
A	5.0	$8\,000 \geq T \geq 10\,000$	Ne	O, Mg
B	10	$10\,000 \geq T \geq 30\,000$	O	Mg, Al, Si, P y S
O	20	$T > 30\,000$	Mg, Al, Si, P y S	Elementos cercanos al Fe

<sup>5</sup> Es inversamente proporcional a su masa,  $t \approx 10\text{ Ga} \times M^{-2.5} (M_{\odot})$ .

FIGURA 2. REACCIONES NUCLEARES QUE SE LLEVAN A CABO EN EL CICLO CNO



## 1.2 GALAXIA DE ANDRÓMEDA, M31

El objeto de estudio de este trabajo de investigación es la galaxia de Andrómeda (M31 o NGC 224) la cual es una galaxia espiral clasificada como Sb en el sistema extendido de clasificación Vaucoulers–Sandage (Base de datos extragalácticas NASA/IPAC). M31 es 1.8 veces más grande que nuestra Galaxia, la Vía Láctea (VL) (Karachentsev, Karachentseva, Hutchmeier, & Makarov, 2004; Karachentsev & Kashibadze, 2006) y se encuentra a  $783 \pm 30$  kilo-pársecs (kpc)<sup>6</sup> de distancia de la Tierra (Holland, 1998) lo cual indica que toda la luz (i.e. la información) que llega de M31 tiene una antigüedad de casi tres millones de años<sup>7</sup>.

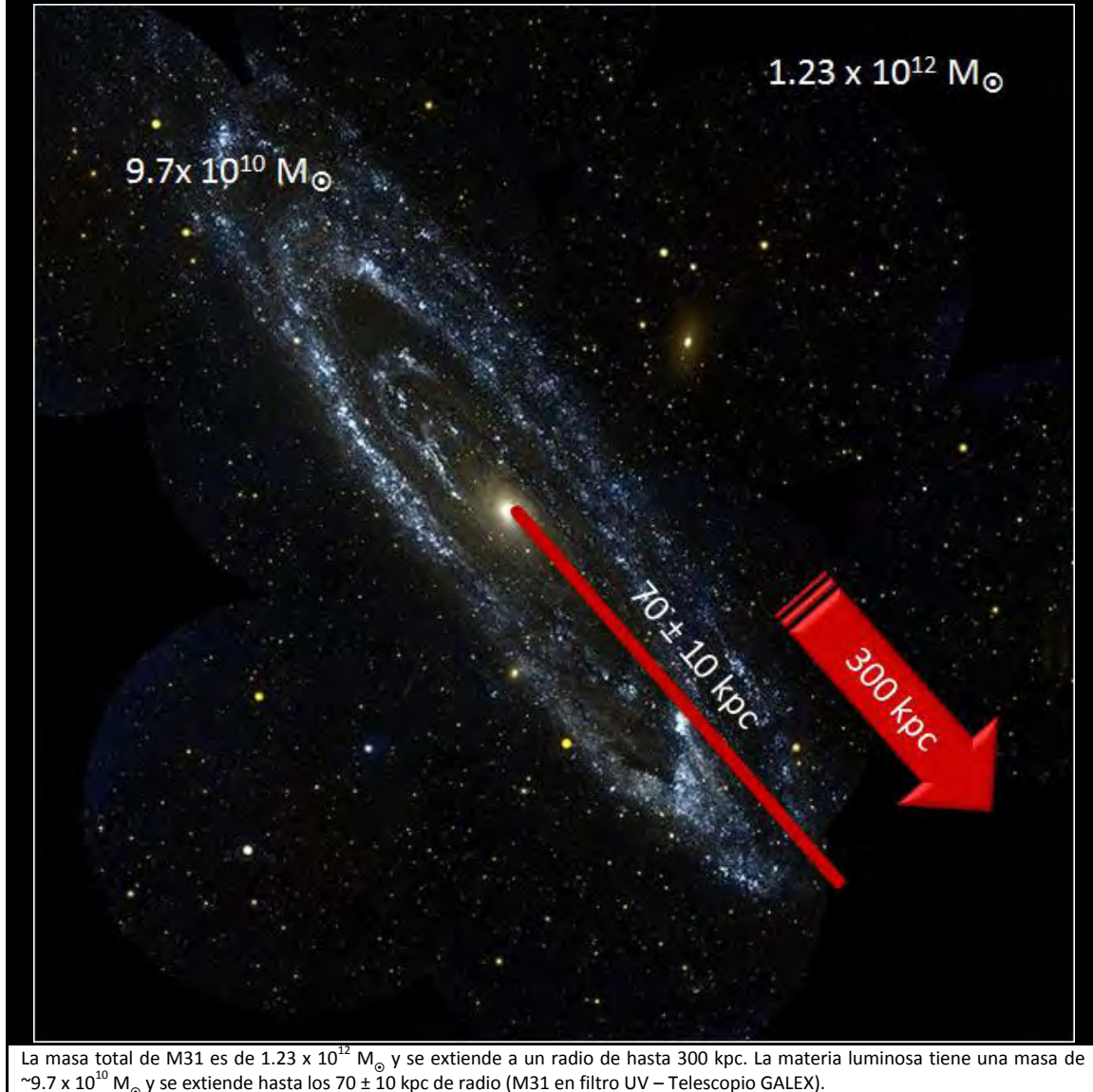
La masa total que conforma a M31 es de  $1.23 \times 10^{12} M_{\odot}$  (Evans & Wilkinson, 2000) y ésta, como a cualquier otra galaxia, se encuentra dividida en dos categorías de materia: oscura y luminosa. La materia oscura constituye alrededor del 92% de la galaxia extendiéndose en un radio de hasta 300 kpc y está conformada por partículas desconocidas cuya inferencia sólo ha sido posible por medio de la interacción gravitacional que tiene con la materia luminosa (Bellazzini, Cacciari, Federici, Pecci, & Rich, 2003; Hodge, 1992).

La materia luminosa por su parte, tiene una masa de aproximadamente  $9.7 \times 10^{10} M_{\odot}$  y se extiende hasta los  $70 \pm 10$  kpc de radio (Widrow, Perrett, & Suandu, 2003). En la *Figura 3*, se muestra a M31 con sus dimensiones.

<sup>6</sup> 1 kpc =  $3.1 \times 10^{16}$  km

<sup>7</sup>  $786 \text{ kpc} \times (3.7 \times 10^{16} \text{ km/kpc}) \times (1 \text{ s} / 3 \times 10^5 \text{ km}) \times (1 \text{ año} / 3.15 \times 10^7 \text{ s}) = 2.58 \times 10^6 \text{ años}$

FIGURA 3. GALAXIA DE ANDRÓMEDA Y SUS DIMENSIONES



### 1.2.1 COMPONENTES GALÁCTICAS

La materia luminosa de M31 se encuentra distribuida, como cualquier galaxia espiral, en tres componentes galácticas: *bulbo*, *disco* y *halo*. Dichas componentes están formadas por gas y estrellas y no cuentan con límites definidos por lo que se traslapan entre ellas, sin embargo cada una de las componentes tiene características propias.

#### 1.2.1.1 HALO

El *halo* es una componente galáctica esferoidal que se extiende alrededor de toda la galaxia (ver *Figura 4*). Según el modelo de formación jerárquica de galaxias, el *halo* fue la

primera región de la galaxia y en este trabajo, se considera que se forma a través de un colapso monolítico, i. e. gas primordial<sup>8</sup> que colapsa rápidamente (durante 1 Ga) acumulándose en una componente esferoidal (Widrow, Perrett, & Suandu, 2003).

El *halo* cuenta con estrellas solitarias y pequeñas poblaciones de estrellas viejas de muy baja metalicidad<sup>9</sup> y órbitas aleatorias que llegan a atravesar al *disco*. La Z del *halo* llega a ser un tercio de la Z Solar<sup>10</sup> (Koch, et al., 2008) y se encuentra alrededor de la galaxia (Widrow, Perrett, & Suandu, 2003).

### 1.2.1.2 DISCO

---

El *disco* es una componente plana que se ubica a radios galactocéntricos<sup>11</sup> mayores a 3 – 4 kpc (ver *Figura 4*) (Bellazzini, Cacciari, Federici, Pecci, & Rich, 2003). Siguiendo el modelo de formación jerárquica de galaxias, el *disco* se forma del gas primordial y del material que le cayó del *halo*. Debido que el colapso es más lento, el momento angular tiene mayor importancia por lo que el material fue formando un *disco*, con una estabilidad de órbitas estelares que se encuentran en el plano del *disco* (Widrow, Perrett, & Suandu, 2003). Las estrellas que forman actualmente al *disco*, son estrellas tanto jóvenes como viejas, que tienen gran variedad de Z.

El *disco* al llegar a regiones centrales se combina con el *bulbo* y el centro galáctico; al dirigirse a zonas periféricas pierde su densidad mezclándose con el *halo*. La masa que conforma al *disco* es de  $7.2 \times 10^{10} M_{\odot}$  (Widrow, Perrett, & Suandu, 2003).

Tanto la densidad estelar como la Z del *disco*, son mayores en partes centrales que en la periferia, creando un perfil de densidad y un gradiente de abundancias químicas y este se encuentra entre  $-0.4$  y  $0.5 Z_{\odot}$  (ver *sección 2.2.1*).

### 1.2.1.3 BULBO + BARRA-BULBO

---

El bulbo es una componente esferoidal muy brillante ubicada en las regiones centrales de la galaxia. En este trabajo, se asumió que la formación del *bulbo* también se da a través de un colapso monolítico (en un periodo de 0.5 Ga) que acumula gran cantidad del gas primordial al centro de la galaxia formando estrellas con muy alta eficiencia, prácticamente consumiendo todo el gas original (Sparke & Gallagher, 2000).

Las características generales que distinguen al *bulbo* son su alta densidad estelar que está conformada por estrellas jóvenes y viejas de alta Z y órbitas aleatorias, su visible forma esferoidal (ver *Figura 4*, es la región más brillante que se encuentra en regiones centrales) y se

---

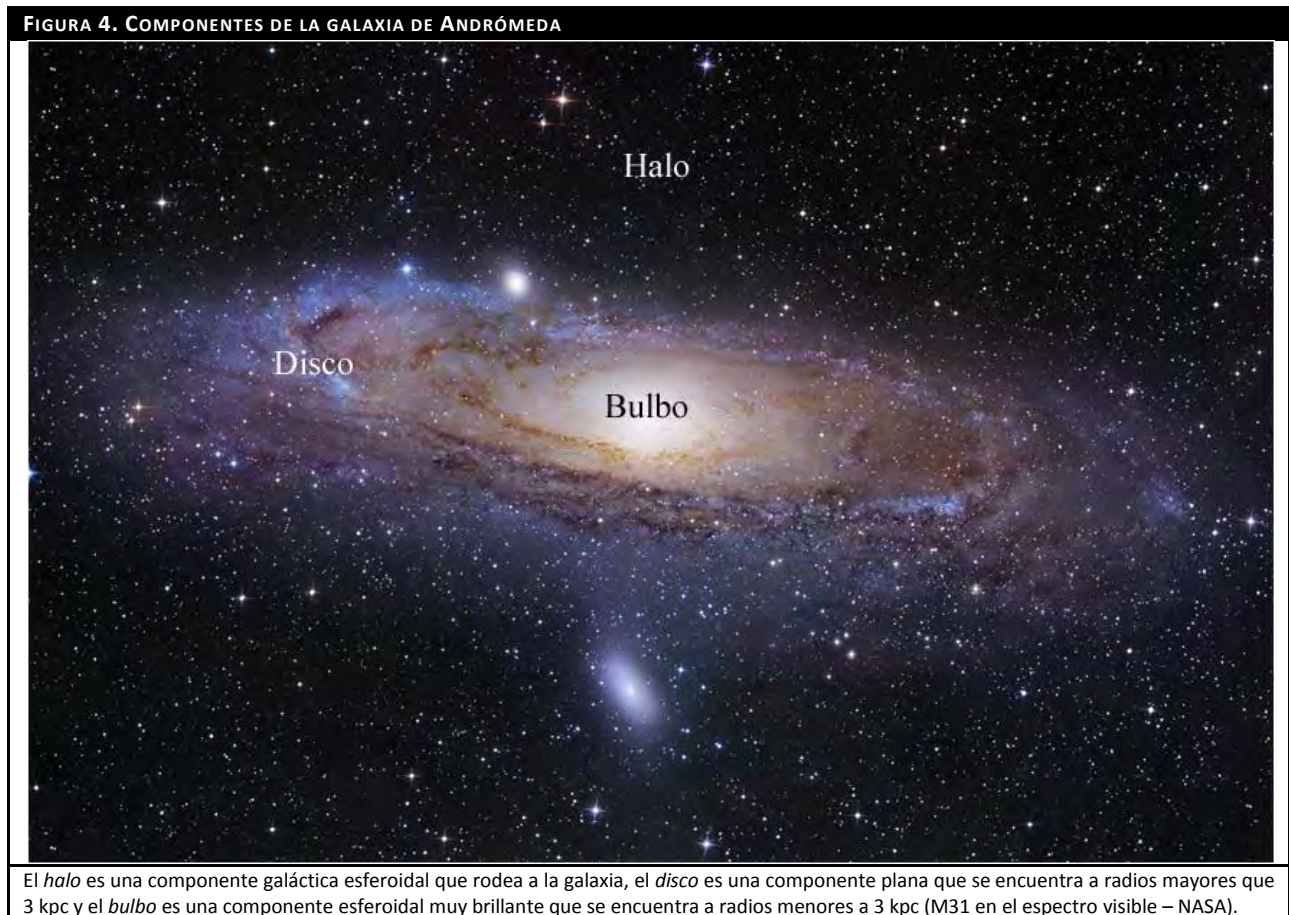
<sup>8</sup> Gas formado por 75% de H y 25% de He, por masa.

<sup>9</sup> La metalicidad, Z, está definida como la abundancia de elementos químicos más pesados que el hidrógeno y helio.

<sup>10</sup> La metalicidad Solar,  $Z_{\odot}$ , tiene un valor de 0.0122 dex (Grevesse, Asplund, & Sauval, 2007).

<sup>11</sup> Distancia medida desde el centro de la galaxia

localiza a radios menores a 3 kpc (Bellazzini, Cacciari, Federici, Pecci, & Rich, 2003; Sarajedini & Jablonka, 2005).



La masa que conforma al *bulbo* es de  $2.5 \times 10^{10} M_{\odot}$  (Widrow, Perrett, & Suandu, 2003) y su  $Z$  promedio actual es de más de 6 veces  $Z_{\odot}$  (Sarajedini & Jablonka, 2005) (estos últimos datos serán tratados con profundidad en la *sección 3.1.1*).

Por otro lado, alrededor de dos tercios de la población de galaxias presentan *barra* y en un 30% de ellas, esta es pronunciada en las regiones centrales, pudiendo contener así un *bulbo* esferoidal en el centro (Sellwood & Wilkinson, 1993).

Sin embargo, no es claro aún, si el *bulbo* y la *barra* son componentes distintas, conjuntas o una sola, inclusive en las imágenes obtenidas de M31 enfocando la región central, no existe diferencia visible (ver *sección 2.5.2.1*) ya que el radio promedio en el que se localiza la *barra* es de hasta 5 kpc (Beaton R. L., et al., 2007).

Así mismo, algunas de las consecuencias de la existencia de *barra* (o *barra-bulbo*) en una galaxia son el posible surgimiento de *brazos espirales* y la modificación de los gradientes de abundancias químicas en el *disco*, siendo esto último, uno de los objetivos del presente trabajo.

## 1.3 EVOLUCIÓN QUÍMICA

La Evolución Química (EQ) estudia los cambios temporales de las abundancias de los elementos químicos presentes en el gas interestelar. Los modelos de EQ dependen de la formación y evolución estelar debido a que la mayoría de los elementos químicos se originan en las estrellas. Así mismo, estos dependen de los flujos de gas ya que las galaxias se forman por acreción, principalmente, de este material. Por lo tanto, esta clase de estudios tiene un número considerable de parámetros libres y las restricciones observacionales permiten conocer el valor de dichos parámetros.

### 1.3.1 RESTRICCIONES OBSERVACIONALES

Se llaman restricciones observacionales (observables) a los datos obtenidos de las observaciones astronómicas que permiten delimitar un modelo y ajustarlo al objeto de estudio. La mayoría de los datos observacionales se obtienen por medio de la espectroscopia a distintas longitudes de onda en todo el espectro electromagnético. Los espectros son logrados por medio de telescopios y detectores que se encuentran tanto en la Tierra como en satélites que orbitan alrededor de la misma. Posteriormente, los datos espectroscópicos son interpretados por procesadores que permiten un análisis directo de la información y tal información es estudiada para determinar propiedades del objeto que emite esa luz (Karttunen, 2003).

Los espectros adquiridos desde la Tierra tienen problemas de interferencia y detección debido a la presencia de la atmósfera, que absorbe y refleja casi todas las energías, excepto aquellas que se encuentran en el intervalo del espectro visible y las ondas de radio. Por otro lado, los espectros adquiridos desde el espacio no tienen esas limitantes particulares permitiendo la recepción de  $R\gamma$ , RX, UV, IR, microondas y ondas de radio, así como también otras formas de energía como los rayos cósmicos (Karttunen, 2003). Además, la luz emitida por un objeto, desde que sale de este y llega al receptor, sufre de interferencias debidas a objetos que se encuentran en la trayectoria de observación y la ampliación y destrucción de ondas debido a otros objetos (e.g. polvo cósmico, nubes moleculares, entre otros). Como consecuencia de lo anterior, la mayoría de los observables tienen incertidumbres que aumentan, en general, con la lejanía del objeto.

Debido a que las estrellas se forman en y del Medio Interestelar (MIE), la manera en que se puede obtener la composición química del medio es a partir del estudio de la distribución de las abundancias químicas en distintos cuerpos como regiones de hidrógeno ionizado (HII), nebulosas planetarias (PNe) y estrellas (Karttunen, 2003). Una región HII es aquella zona de alta luminosidad y gran nubosidad formada por conglomerados de gas y polvo. En la región HII, el gas es, mayormente, hidrógeno ionizado ( $H^+$ ) y no existen átomos neutros (HI) ni hidrógeno molecular ( $H_2$ ) debido a ionización por estrellas que emiten radiación ultravioleta. Estas regiones de gas se encuentran asociadas con zonas de formación estelar. El hecho de que las partículas están ionizadas permite que dichas zonas sean fácilmente



detectables, obteniéndose intensos espectros de emisión<sup>12</sup> para la identificación de los elementos químicos del MIE. Las regiones HII son importantes porque nos muestran la abundancia actual del gas y por lo tanto, los elementos químicos que han dejado las poblaciones estelares que murieron antes de la formación de la región HII (Karttunen, 2003).

Las PNe son nubes brillantes que consisten de capas de gas y plasma formadas durante la muerte de EBM ya que al final de la vida de este tipo de estrella, las capas externas de la estrella son expulsadas por medio de pulsaciones y vientos estelares fuertes. El núcleo remanente, el cual es muy caliente, ioniza por medio de radiación UV, a las capas expulsadas obteniéndose así una PNe. Estos objetos son importantes para la determinación de la EQ de una galaxia porque regresan el material al MIE el cual ha sido enriquecido por elementos pesados y otros productos de nucleosíntesis (e.g C, N, O y Ca), i. e. contienen tanto gas original como gas procesado por las estrellas (Karttunen, 2003).

Otros objetos que permiten conocer las abundancias de los elementos químicos son las estrellas. La relevancia de las estrellas radica en que al formarse recompilan del MIE los elementos sintetizados por estrellas de generaciones anteriores y por lo tanto nos permiten conocer las propiedades de las generaciones estelares previas así como también, las abundancias químicas en el momento de su formación. Las estrellas emiten radiación que abarca casi todo el espectro electromagnético y la mayoría son muy luminosas, por lo que son también relativamente fáciles de detectar (Karttunen, 2003; Torres-Peimbert & Peimbert, 1977).

### **1.3.1.1 PERFIL DE BRILLO, DISTRIBUCIÓN RADIAL DE DENSIDAD SUPERFICIAL DE MASA TOTAL**

---

El perfil de luminosidad (o brillo) es producido por las estrellas y el gas ionizado de una galaxia. En galaxias espirales evolucionadas, como M31, la luminosidad actual se debe principalmente a las estrellas y por lo tanto, el perfil de brillo da información de la distribución radial de densidad superficial de masa total luminosa. Las distribuciones de los discos de este tipo de galaxias siguen un comportamiento exponencial con la distancia galactocéntrica.

### **1.3.1.2 ABUNDANCIAS QUÍMICAS**

---

Las abundancias químicas son obtenidas mediante razones de intensidad de líneas por medio de excitación colisional o de recombinación. Las zonas de detección en el espectro electromagnético de dichas líneas son en el IR (750 nm – 106 nm), en el visible (Vis, 450 nm – 750 nm) y en el UV (750 nm – 40 nm). Las especies que se detectan en cada región son las que se muestran en la *Tabla 2* (Bradley & Ostlie, 2007). La notación [XI] implica el átomo X neutro; [XII] indica X<sup>+</sup>; [XIII] es X<sup>2+</sup>, etc.

---

<sup>12</sup> Las líneas de emisión son únicas para cada elemento y transición electrónica del mismo.

Tabla 2. Especies observadas	
En regiones HII y PNe	En estrellas
HI, HII, H $\beta$	C, N, O
[CIII]	Na, Mg, Al, Si y S
[NII]	Ca, Fe
[OII], [OIII]	H $_2$ O, CH $_4$ , N $_2$ y otras moléculas
[SI], [SII]	SiO $_4$ , TiO, VO y otros óxidos
[CIII]	FeH, CrH y otros hidruros
	NaCl y otras sales alcalinas

La manera en que se detectan las abundancias en regiones HII y PNe es con espectrógrafos ubicados en telescopios de gran apertura que captan líneas en las regiones del UV y el IR, también por medio de la observación de H $\beta$ <sup>13</sup>, el empleo de líneas de diagnóstico (para la temperatura e.g. [OIII] $\lambda$ 5007/4363; para la densidad e.g. [SII] $\lambda$ 6716/6730) y relaciones de O $^{++}$ /H $^+$ , O $^+$ /H $^+$ , C $^{++}$ /H $^+$ . Sin embargo, en la detección de dichas abundancias en estas regiones, se deben tomar en cuenta factores de corrección por ionización para tener presentes estados de ionización no observados (Peimbert & Torres-Peimbert, 1977; Peimbert, 1990; Torres-Peimbert & Peimbert, 1977).

Las estrellas relevantes para los estudios de EQ son las estrellas tipo B (estrellas jóvenes que permiten el estudio del presente), F y G (estrellas viejas que permiten un estudio del pasado). La determinación que se realiza en estas estrellas se realiza por medio de un ordenamiento de líneas con respecto a su energía. Las líneas observadas son debidas a la absorción de hidrógeno en las regiones del Vis y del UV. De la misma forma en que para las regiones HII y PNe, en las estrellas también se requieren realizar ciertas correcciones y consideraciones ya que existe una sobresaturación de líneas en las zonas azules del Vis y UV del espectro. La intensidad de las líneas está en función de la atmósfera estelar y a la opacidad debida al contenido de metales en la estrella (Torres-Peimbert & Peimbert, 1977).

#### 1.3.1.2.1 GRADIENTES

En este trabajo, las abundancias químicas son expresadas, relativas al Sol, como:

$$\left[ \frac{O}{H} \right] = \log \left( \frac{O}{H} \right)_{obs} - \log \left( \frac{O}{H} \right)_{\odot} \quad (1)$$

Donde (O/H)<sub>obs</sub> representa a la abundancia por número de oxígeno sobre hidrógeno que existe en el objeto estudiado y (O/H)<sub>⊙</sub> es dicho cociente en el Sol. El log(O/H)<sub>⊙</sub> tiene un valor de -3.34 dex (Grevesse, Asplund, & Sauval, 2007).

Por otro lado, los gradientes de abundancias son expresados por las pendientes de la recta que se ajusta a la relación de abundancias en función de la distancia galactocéntrica y la ordenada al origen de este ajuste.

<sup>13</sup> La línea H $\beta$  es emitida por átomos de hidrogeno cuyos electrones han subido a niveles superiores de energía, y tienen que saltar para bajar a niveles menores.

### 1.3.2 MODELO DE EVOLUCIÓN QUÍMICA

En la siguiente sección, se muestran las ecuaciones generales del modelo que explican el comportamiento del gas, estrellas y abundancias químicas de la galaxia (Matteucci, 2001; Mateucci, 2004).

#### 1.3.2.1 ECUACIONES GENERALES DE UN MODELO DE EVOLUCIÓN QUÍMICA

---

La masa total bariónica,  $M_T$ , está conformada por estrellas ( $M_*$ ) y gas ( $M_{gas}$ ) de manera que:

$$M_T(t) = M_*(t) + M_{gas}(t) \quad (2)$$

Los cambios que sufre  $M$  con respecto al tiempo son:

$$\dot{M}_T(t) = \frac{dM_T(t)}{dt} = A(t) - W(t) \quad (3)$$

Donde  $A(t)$  es la acreción, la cual se define como la tasa de caída de material hacia la galaxia desde el medio intergaláctico.  $W(t)$  es el viento galáctico, el cual se representa por la tasa de pérdida de material de la galaxia hacia el medio intergaláctico.

En regiones con gas, se origina la formación de una población estelar bajo una tasa de nacimiento estelar dada por:

$$\frac{dN(t)}{dt} = \left[ \int_{m_{inf}}^{m_{sup}} \phi(m) dm \right] \Psi(t) \quad (4)$$

Donde  $\Psi(t)$  es la Tasa de Formación Estelar (TFE) y representa la  $M_{gas}$  que se transforma en estrellas por unidad de tiempo.  $\phi(m)$  es la Función de Masa Inicial (FMI) y representa la distribución en masa de las estrellas formadas con una masa inicial  $m$ , en un intervalo entre  $m_{inf}$  y  $m_{sup}$ .

Los cambios que sufre con respecto al tiempo la  $M_*$  se encuentran definidos por:

$$\dot{M}_*(t) = \Psi(t) - E(t) \quad (5)$$

Donde  $E(t)$  es la tasa a la cual las estrellas que mueren regresan su material al MIE y se encuentra representada por:

$$E(t) = \int_{m_{\tau_0}(t)}^{m_{sup}} (m - m_{rem}) \Psi(t - \tau_m) \phi(m) dm \quad (6)$$

El término  $(m - m_{rem})$  es la masa total eyectada al medio por una estrella de masa inicial  $m$  que al morir deja un cadáver estelar de masa  $m_{rem}$ . El término  $\tau_m$  es el tiempo de vida de la estrella de masa  $m$ .  $m_{\tau_0}(t)$  es la estrella de menor masa muriendo al tiempo  $t$ .

De las ecuaciones 2, 3 y 5, se deducen los cambios que sufre la  $M_{gas}$  con respecto al tiempo:

$$\dot{M}_{\text{gas}}(t) = -\Psi(t) + E(t) + A(t) - W(t) \quad (7)$$

Sabiendo que las abundancias químicas representan la fracción de los elementos químicos, a partir de la ecuación anterior, se expresa la cantidad de gas en forma del elemento  $i$ , como:

$$\left( X_i(t) M_{\text{gas}}(t) \right)' = -X_i(t) \Psi(t) + E_i(t) + X_i^A(t) A(t) + X_i^W(t) W(t) \quad (8)$$

Donde  $X_i$  es la abundancia por masa de la especie  $i$  en el gas interestelar,  $X_i^A$  es la abundancia del elemento  $i$  en el gas acretado y  $X_i^W$  es la abundancia por masa del elemento  $i$  eyectado al medio intergaláctico.

El término  $E_i(t)$  es la tasa de material estelar eyectado al MIE por las estrellas que mueren y está expresado por:

$$E_i(t) = E_{i_{\text{np}}}(t) + E_{i_{\text{p}}}(t) \quad (9)$$

Donde  $E_{i_{\text{np}}}$  representa el material que no fue procesado por las estrellas y por ende, tiene abundancias químicas del medio donde la estrella se formó a tiempos  $(t - \tau_m)$ :

$$E_{i_{\text{np}}}(t) = \int_{m_{T_0(t)\text{inf}}}^{m_{\text{sup}}} (m - m_{\text{rem}}) X_i(t - \tau_m) \Psi(t - \tau_m) \phi(m) dm \quad (10)$$

Y  $E_{i_{\text{p}}}$  es un término equivalente a  $E_{i_{\text{np}}}$ , representando los elementos que sí fueron sintetizados por los procesos de nucleosíntesis estelar:

$$E_{i_{\text{p}}}(t) = \int_{m_{T_0}(t)}^{m_{\text{sup}}} m p_{im}(m) \Psi(t - \tau_m) \phi(m) dm \quad (11)$$

El término  $p_{im}$  es el rendimiento químico estelar de la especie  $i$ , la cual a su vez está definido como:

$$p_{im}(m) = \left( \frac{m_{ej}}{m} \right)_i \quad (12)$$

Donde  $m_{ej}$  es la masa de la estrella convertida en el elemento  $i$  y eyectada.

Las ecuaciones presentadas anteriormente son integro-diferenciales y son resueltas sólo numéricamente. Sin embargo, pueden ser simplificadas bajo cierta aproximación que se presenta a continuación.

### 1.3.2.2 APROXIMACIÓN DE RECICLAJE INSTANTÁNEO

---

La Aproximación de Reciclaje Instantáneo (ARI) supone que todas las estrellas con masa inicial mayor que  $1 M_{\odot}$  mueren instantáneamente ( $M_{T_0}(1) = 1 M_{\odot}$ ) después de haber sido creadas ( $\tau_m = 0$ ) eyectando sus elementos químicos sintetizados al MIE.

En primera instancia, la ecuación de la tasa con la que las estrellas muertas retornan su material al MIE se simplifica como:

$$E(t) = \Psi(t)R \quad (13)$$

Donde R corresponde al material estelar eyectado por todas estrellas mayores de  $1 M_{\odot}$  al MIE, el cual es calculado por:

$$R = \int_{1M_{\odot}}^{m_{\text{sup}}} (m - m_{\text{rem}}) \rho(m) dm \quad (14)$$

Al tomar en cuenta esta simplificación, el cambio con respecto al tiempo de  $M_*$  y  $M_{\text{gas}}$  se ven modificados:

$$\dot{M}_*(t) = (1-R)\Psi(t) \quad (15)$$

$$\dot{M}_{\text{gas}}(t) = -(1-R)\Psi(t) + A(t) - W(t) \quad (16)$$

La aproximación también modifica la ecuación del material estelar eyectado que contiene elementos químicos procesados y no procesados:

$$E_{i_{\text{np}}}(t) = RX_i\Psi(t) \quad (17)$$

$$E_{i_{\text{p}}}(t) = Y_i\Psi(t) \quad (18)$$

Donde  $Y_i$  es el rendimiento del elemento  $i$ , por generación estelar con estrellas mayores de  $1 M_{\odot}$ , el cual está dado por:

$$Y_i = \int_{1M_{\odot}}^{m_{\text{sup}}} m p_{im}(m) \rho(m) dm \quad (19)$$

Por lo tanto, la *ecuación 8* se ve modificada de tal forma que:

$$\left( X_i(t) M_{\text{gas}}(t) \right)' = -(1-R)X_i(t)\Psi(t) + Y_i\Psi(t) + X_i^A(t)A(t) - X_i^W(t)W(t) \quad (20)$$

En consecuencia, debido a que se desea conocer la evolución de la abundancias químicas con respecto al tiempo, se extrae la derivada interna de  $(X_i(t)M_{\text{gas}}(t))'$  y sustituyendo la derivada temporal de  $M_{\text{gas}}$  en la *ecuación 20*, se obtiene:

$$X_i(t) \dot{M}_{\text{gas}}(t) = Y_i\Psi(t) + A(t)(X_i^A(t) - X_i(t)) + W(t)(X_i(t) - X_i^W(t)) \quad (21)$$

Cabe mencionar que esta aproximación es adecuada para elementos producidos por EM (e.g. oxígeno que fue requerido como restricción observacional en el modelo presentado en el *capítulo 3*) dado que los tiempos de vida de estas estrellas son breves ( $10^{-3}$  a  $10^2$  Ga).

## 1.4 ZONA DE HABITABILIDAD GALÁCTICA

La Zona de Habitabilidad Galáctica (ZHG) está definida como la región con suficiente abundancia de elementos químicos para formar sistemas planetarios donde planetas tipo Tierra puedan ser creados y sean capaces de sostener vida (González, Brownlee, & Ward, 2001; Lineweaver, 2001; Lineweaver, Fenner, & Gibson, 2004).

La ZHG hace uso de varias definiciones y suposiciones tanto astrofísicas como geofísicas/biogénicas que deben de plantearse para así encontrar dicha región en la galaxia. La

abundancia de elementos químicos más pesados que el hidrógeno y helio (metalicidad,  $Z$ ) es necesaria para la formación planetaria que incluye planetas tipo Tierra y una ocurrencia de SN bajas para que la vida sobre esos planetas se desarrolle. Los modelos de Evolución Química (EQ), proveen la información, en el espacio y tiempo, de la distribución de  $Z$  y de  $S$ .

### 1.4.1 CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES PARA LA ZONA DE HABITABILIDAD GALÁCTICA

En este contexto, es importante tener en mente aquellas propiedades y características que un planeta tipo Tierra y su vecindad requieren para ser considerados habitables o que conlleven a la habitabilidad. En Astrobiología, los elementos químicos se encuentran clasificados por los papeles que juegan en la formación de planetas tipo Tierra y en el origen + evolución de la vida. Los elementos biogénicos son aquellos que forman la atmósfera, agua, aminoácidos y proteínas; los elementos geofísicos son los que conforman a las placas tectónicas y el núcleo fundido y en movimiento (Hazen, et al., 2002).

#### 1.4.1.1 CONDICIONES ASTROFÍSICAS

---

Las condiciones para que se forme un planeta estable donde no se extermine la vida, son las siguientes:

##### 1.4.1.1.1 FORMACIÓN PLANETARIA

---

En la actualidad, los mecanismos que conllevan a la formación planetaria no son conocidos pero se han propuesto diversos modelos para explicar los posibles fenómenos físicos (Hillenbrand, 2008; Rhee, Song, & Zuckerman, 2008; Shankland, Blank, & Boboltz, 2008; Youdin, 2008). Sin embargo, los procesos químicos de la formación planetaria son, prácticamente desconocidos, ya que el indicio que se tiene es la abundancia química de las estrellas que albergan planetas y, como se ha planteado anteriormente, esto es importante porque representa la abundancia química que tuvo el disco proto-planetario del cual se formaron los planetas (van der Tak, 2008). Pese a que la abundancia química estelar es un parámetro bastante general<sup>14</sup>, esta permite plantear ciertos límites sobre las necesidades químicas mínimas requeridas para formar planetas. En otras palabras,  $\log Z/Z_{\odot}$ , debe encontrarse en un intervalo tal que la densidad sea la suficiente para dar paso a las atracciones gravitacionales que condensan la materia y formen planetésimos<sup>15</sup> (Lineweaver, 2001).

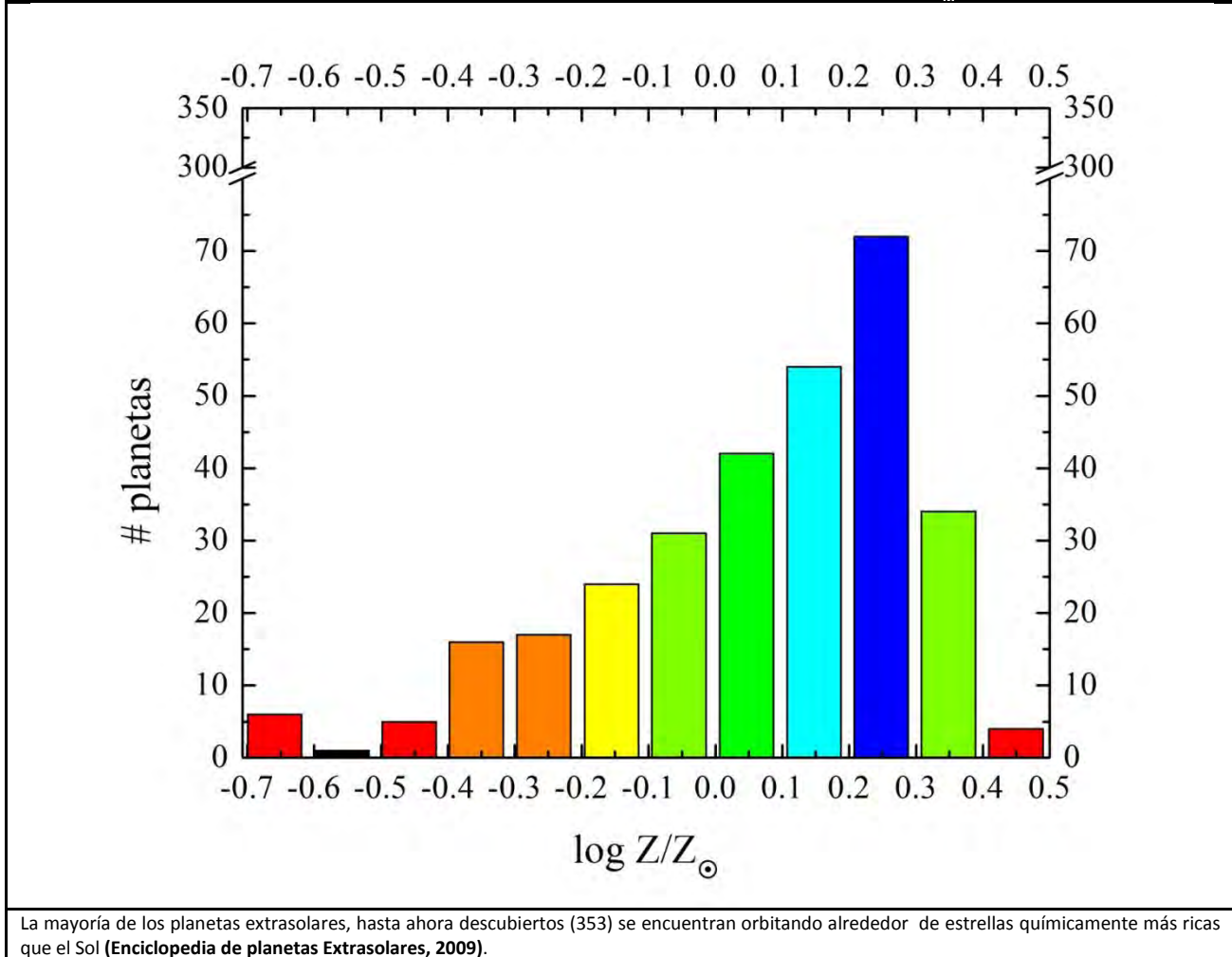
---

<sup>14</sup> La abundancia química incluye a de todos los elementos químicos más pesados que el He pero no proporciona información sobre las cantidades específicas de algún elemento o molécula en particular.

<sup>15</sup> Los planetésimos son objetos sólidos que se encuentran en discos proto-planetarios que darán origen a planetas (Karttunen, 2003).

Utilizando la información presentada en la *Figura 5* (Enciclopedia de planetas Extrasolares, 2009), un intervalo de  $\log Z/Z_{\odot}$  fue encontrado:  $-0.35 \leq \log Z/Z_{\odot} \leq +0.35$ . En los estudios previos de ZHG, enfocados en VL, otro intervalo fue propuesto basado en las abundancias químicas de las estrellas que albergaban planetas descubiertas hasta 2004; dicho intervalo es  $-0.10 \leq \log Z/Z_{\odot} \leq +0.25$  (Lineweaver, Fenner, & Gibson, 2004).

**FIGURA 5. DISTRIBUCIÓN DEL NÚMERO DE PLANETAS EXTRASOLARES DESCUBIERTOS RESPECTO AL  $\log Z/Z_{\odot}$  DE SU ESTRELLA**



En la formación planetaria, se originan planetas tipo Tierra a la vez que se forman planetas tipo Júpiter o Jovianos. Si la formación planetas Jovianos es benéfico<sup>16</sup> o no<sup>17</sup> para el planeta tipo Tierra, es un tema debatible (Horner, 2008). Pese a ello, dentro de los intervalos anteriormente explicados, se considera la formación de todo tipo de planetas.

<sup>16</sup> Este tipo de planetas pueden actuar como escudos de los planetas tipo Tierra, como en el caso de la Tierra y Júpiter, contra impactos meteoríticos (Fogg & Nelson, 2007; Ward & Brownlee, 2000).

<sup>17</sup> Los planetas Jovianos pueden migrar hacia regiones centrales o cercanas a la estrella del sistema planetario, provocando colisiones con planetas internos que los destruiría (Lineweaver, 2001; Lineweaver, Fenner, & Gibson, 2004)

#### 1.4.1.1.2 ÓRBITA CIRCULAR ESTABLE

---

La fuerza de marea es un efecto secundario de la fuerza de gravedad entre los cuerpos, en este caso planetas, y es responsable de la existencia de las mareas. Dicho fenómeno interviene en las órbitas de los planetas lo que tiene como consecuencia la existencia de un término llamado órbita circular estable, la cual es aquella órbita que tiene un planeta posterior a su migración debido a la marea, desde su órbita original excéntrica, y es quasi-circular.

Una órbita de este tipo es importante ya que al adquirir una órbita de esta clase, permite que el planeta tipo Tierra no tenga cambios extremos de temperatura debido a que al orbitar alrededor de la estrella del sistema planetario, no tendría periodos largos de alejamiento a la estrella (bajas temperaturas) ni de acercamiento a la estrella (altas temperaturas). Lo anterior las condiciones físicas en la superficie del planeta.

El tiempo que le toma al planeta a adquirir una órbita circular estable, posteriormente a su formación, es función no sólo de la órbita inicial del planeta sino también de la masa del mismo y este tiempo varía entre 1 y 10 Ga (Barnes, Raymond, Jackson, & Greenber, 2008).

#### 1.4.1.1.3 SOBREVIVENCIA A LA OCURRENCIA DE SN

---

El factor de las SN es crucial ya que cuando explotan, estas emiten radiación de altas energías que pueden volatilizar la atmósfera del planeta así como también esterilizar su superficie, eliminando tanto las posibilidades de presencia como la vida misma (Lineweaver, 2001; Lineweaver, Fenner, & Gibson, 2004).

Es importante que el número de SN,  $\xi(t)$ , cercanas a un planeta, sea menor o igual que el de la Tierra, durante toda su existencia. Sin embargo, Lineweaver, Fenner, & Gibson (2004) consideran que  $\xi(t)$  debe ser hasta dos veces la ocurrencia de SN que ha sufrido la Tierra en la VL durante 4.5 Ga, i. e. desde que se formó hasta la actualidad.

La Tierra representa el patrón de sobrevivencia a la ocurrencia de SN dado que es el único planeta conocido con presencia de vida. La ocurrencia de SN que la Tierra ha sufrido durante su existencia ( $\xi_{\oplus} = 0.20 \text{ Ga}^{-1} \text{ pc}^{-2}$ , ver *sección 4.1.1.2*) se ha basado en la formación de la VL (Carigi, Peimbert, Esteban, & García-Rojas, 2005).

#### 1.4.1.2 CONDICIONES GEOFÍSICAS

---

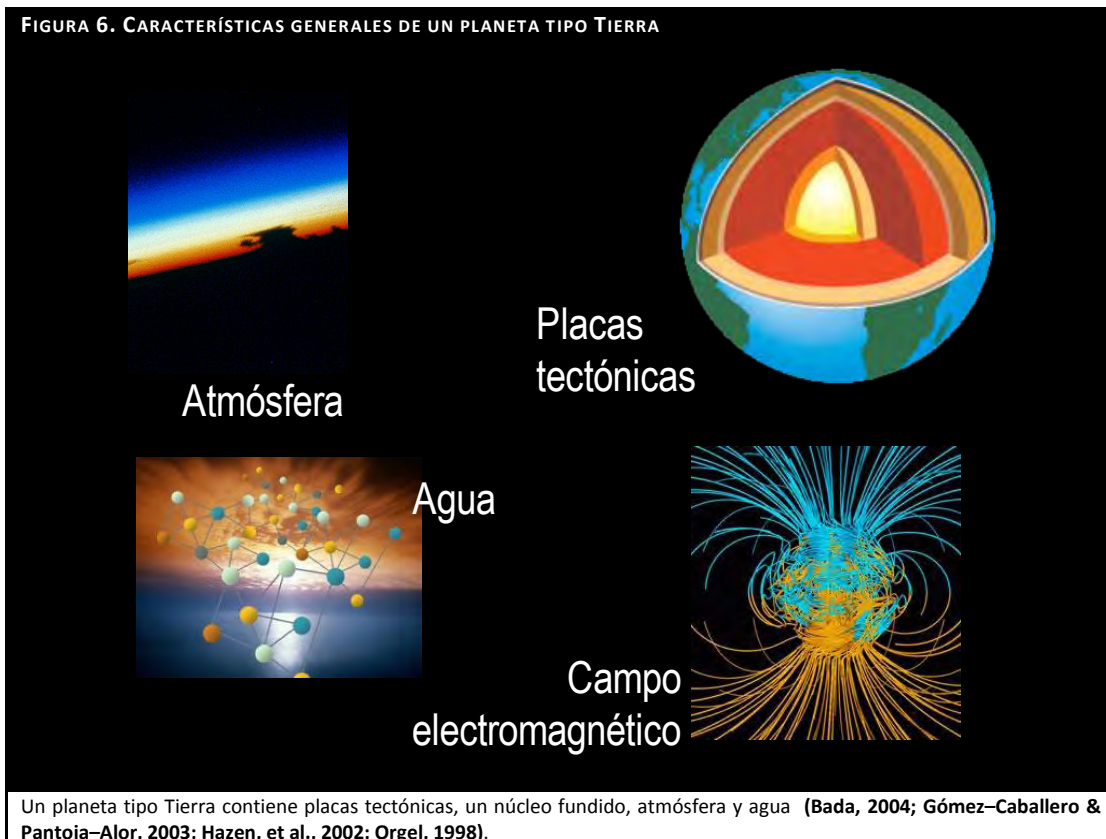
Un planeta tipo Tierra es un planeta que cuenta con suficiente abundancia de elementos biogénicos y geofísicos para dar lugar al origen + evolución de vida como es conocida en la Tierra (Bada, 2004; Gómez-Caballero & Pantoja-Alor, 2003; Hazen, et al., 2002; Orgel, 1998). Adicionalmente, la Tierra es usada como referencia dado a que es el único patrón



conocido para determinar la existencia de vida, desde arqueobacterias hasta especies evolucionadas como los humanos (Bada, 2004; Orgel, 1998).

Para que un planeta pueda ser identificado como tipo Tierra, este debe contener y desarrollar:

- Placas tectónicas: la presencia de una corteza formada principalmente por Si, que constituye las placas tectónicas. Éstas son necesarias dado a que la vida debe tener un sitio donde vivir con suficientes recursos para su sobrevivencia (Hazen, et al., 2002; Lineweaver, 2001).
- Campo magnético: un núcleo fundido a altas temperaturas y que a su vez se encuentre en movimiento y en consecuencia pueda generar un campo electromagnético que proteja al planeta de las radiaciones, tanto de la estrella central del sistema planetario como de posibles SN vecinas. Los elementos químicos que proveen el núcleo y el manto son metales tales como Fe, Mg, Mn y Ni. Aquellos que permiten el movimiento debido a fisiones nucleares son los radioisótopos Eu, P, Th y U (Bada, 2004; Gómez-Caballero & Pantoja-Alor, 2003).
- Agua: en la superficie de las placas tectónicas se encuentran los océanos formados por H<sub>2</sub>O. Dado a que el único patrón de vida conocido es el de la Tierra, el agua es un recurso crucial para el origen y evolución de la vida en la Tierra misma (McClendon, 1999).



- **Atmósfera:** una atmósfera que sea lo suficientemente densa para proteger al planeta de la radiación UV e impactos de meteoritos y lo suficientemente liviana para permitir el desarrollo de vida en la superficie del planeta. La composición de la atmósfera que permitió el origen de la vida en la Tierra, se encuentra descrita por la abundancia de CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>O y NO<sub>2</sub> que sirvieron de base a la atmósfera actual (Bada, 2004; Chyba & Sagan, 1991; Lovering, Parry, & Jaeger, 1960; Maurette, Brackb, Kuratc, Perreaud, & Engrand, 1995; Navarro–González, McKay, & Nna–Mvondo, 2001; Sekine, Sugita, Kadono, & Matsui, 2003).

Es importante destacar que la abundancia de los elementos químicos necesarios para crear planetas tipo Tierra, está contenida y bien representada por la distribución de Z obtenida del modelo de EQ.

### 1.4.1.3 CONDICIONES BIOGÉNICAS

---

Como fue mencionado previamente, la ZHG se basa en el patrón de vida de la Tierra por lo tanto, para poder determinar tanto las necesidades como el tiempo de evolución de vida, los estudios sobre el origen y evolución de la vida deben ser tomados en cuenta.

Existen diversas teorías sobre el origen de la vida: las posibles formas como se llevó a cabo y los posibles lugares en donde pudo haberse originado la vida en la Tierra. Algunas de estas teorías suponen que el origen fue en las chimeneas hidrotermales del fondo marino, en donde existe una interacción entre el manto terrestre y el océano (Bada, 2004; Chang, 1982; Gómez–Caballero & Pantoja–Alor, 2003; Hazen, et al., 2002; McClendon, 1999; Orgel, 1998).

Otras teorías proponen la migración de la vida desde otras regiones del espacio hacia la Tierra (Maurette, Brackb, Kuratc, Perreaud, & Engrand, 1995; Orgel, 1998). Existen otras que hablan de un efecto catalizador de relámpagos o meteoritos metálicos (Chyba & Sagan, 1991; Lovering, Parry, & Jaeger, 1960; Navarro–González, McKay, & Nna–Mvondo, 2001; Orgel, 1998; Sekine, Sugita, Kadono, & Matsui, 2003) sobre la atmósfera primitiva y/o los mares.

En este trabajo, se consideró que la vida en la Tierra comenzó a existir hace  $3.47 \pm 0.5$  Ga, debido a que los fósiles más antiguos tienen esta edad y le pertenecen a unos microorganismos llamados cianobacterias (McClendon, 1999). Tomando en cuenta que la edad de la Tierra es de  $4.57 \pm 0.11$  Ga (Bonanno, Schlattl, & Paternò, 2002), se consideró que le tomó a la vida casi 1.0 Ga en aparecer. De lo anterior, se estableció que el tiempo para que la vida exista en un planeta, es de 1.0 Ga después de la formación del mismo.

Por otro lado, al considerarse vida desarrollada y asociarla con la vida humana, se consideró otro parámetro de tiempo el cual es la aparición de seres humanos, lo que fue hace aproximadamente dos millones de años (Bada, 2004).

Sin embargo, dado que los tiempos usados en el modelo de EQ son del orden de giga-años,  $2 \times 10^{-3}$  es una cantidad no significativa. Por lo tanto, se estableció que el tiempo para que exista vida desarrollada en el planeta, es de 4.6 Ga después de la formación de éste.

## 1.5 MIGRACIÓN RADIAL ESTELAR

En este trabajo, se consideró la migración radial como el movimiento de las partículas estelares en el disco galáctico como consecuencia de la presencia de una *barra* en M31. Al tomar en cuenta los movimientos que ocurren en la galaxia debido a la presencia de una *barra*, en la presente investigación, se propuso que dicho fenómeno pudo afectar a los gradientes de abundancias químicas de M31 y a su vez, a la Zona de Habitabilidad Galáctica.

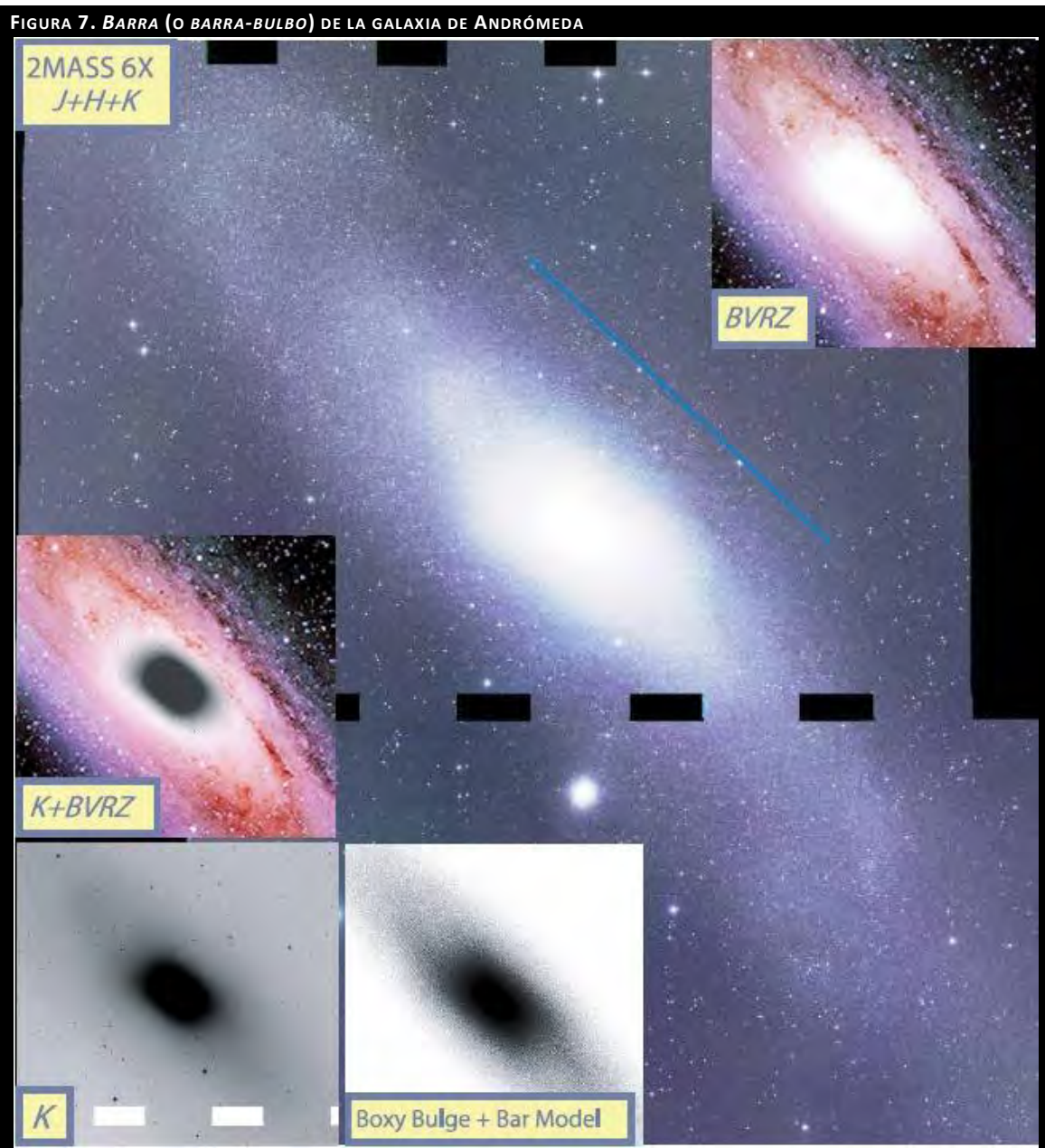
### 1.5.1 GALAXIAS ESPIRALES Y BARRAS GALÁCTICAS

Las galaxias son sistemas constituidos por grandes cantidades de gas y estrellas, del orden de  $10^8$  hasta  $10^{12} M_{\odot}$ , que se extienden a lo largo de varios cientos de kilo-pársecs. Existen distintos tipos de galaxias de acuerdo a su morfología visual: galaxias enanas, elípticas y espirales, a este último grupo pertenecen la VL y nuestro objeto de estudio, M31 (Karttunen, 2003). Cuando una galaxia espiral presenta desde una perturbación no-axisimétrica menor hasta una distribución de luz muy pronunciada, se dice que dicha galaxia contiene una *barra* galáctica. Lo anterior se observa debido a que el porcentaje de estrellas de la galaxia (medida por medio de la luminosidad estelar) que se puede encontrar en la *barra* oscila entre el 10 y el 50% (Sellwood & Wilkinson, 1993).

Una de las teorías que explican el origen de las *barras* galácticas propone que la interacción gravitacional de materia oscura de una galaxia vecina con la de la galaxia espiral en formación, ocasiona un efecto marea que modificó las órbitas de las estrellas centrales reuniéndolas en una familia de órbitas elongadas (Friedli & Benz, 1993). Otra de las teorías postula que la creación de la *barra* es resultado de una onda de densidad que radia y crece con el tiempo, desde el centro de la galaxia espiral cuyos efectos re-acomodan las órbitas de las estrellas internas (Bournaud & Combes, 2002). Así mismo otro mecanismo de origen plantea que las *barras* pueden formarse a través de una inestabilidad dinámica global del *disco* galáctico también, sobre las órbitas estelares (Sellwood & Wilkinson, 1993). Las teorías anteriores, se enfocan principalmente en el efecto de los distintos factores que pueden originar las *barras*, sobre las estrellas debido a que estas partículas son lo suficientemente masivas como para recibir algún efecto gravitacional evidente sobre ellas, lo que no sucede de una manera notoria sobre el gas.

Las *barras* son un fenómeno común en las galaxias ya que se presentan en más de dos tercios de la población galáctica y se encuentran en todos los tipos de galaxias (espirales) de *disco* (Eskridge & Frogel, 1999), como es el caso de M31 (Beaton R. L., et al., 2007) y VL (Gerhard, Binney, & Zhao, 1998). Las *barras* galácticas son estructuras formadas por estrellas que siguen un patrón de órbitas elongadas u ovaladas (Mihalas & McRae, 1968) cuyo tamaño, localización y simetría dependen de la galaxia a la que pertenezcan. Sin embargo, la longitud de las *barras* siempre es menor que el diámetro de la galaxia que la contiene (Sellwood & Wilkinson, 1993).

En alrededor del 30% de la población de galaxias que contienen una *barra*, ésta se concentra en las regiones centrales, pudiendo contener así un *bulbo* esferoidal en el centro. En general, el tamaño de la *barra* puede oscilar entre 1.6 hasta 3.3 veces el tamaño del *bulbo* (Sellwood & Wilkinson, 1993). Como consecuencia de la localización de la barra en zonas internas de la galaxia, no es claro aún, si el *bulbo* y la *barra* son componentes distintas, conjuntas o una sola. Aparentemente, éste es el caso de M31, ya que en las imágenes obtenidas enfocando su región central (ver *Figura 7*), no se observa una diferencia entre el *bulbo* y la *barra* ya que el radio promedio en el que se localiza el primero es alrededor de 3 kpc y para la segunda es de hasta 5 kpc (Beaton R. L., et al., 2007).



Observaciones de la barra o barra-bulbo de la galaxia de Andrómeda a partir de distintas líneas del infrarrojo cercano (i. e. J, 1.24  $\mu\text{m}$ ; H, 1.66  $\mu\text{m}$ ; K, 2.16  $\mu\text{m}$ ; Z, 181 nm) y filtros en el óptico (i. e. B, 94 nm; V, 88 nm; R, 138 nm) (Beaton R. L., et al., 2007).

## 1.5.2 LA BARRA GALÁCTICA Y SUS CONSECUENCIAS

El material en galaxias que no contienen una *barra*, parece seguir órbitas casi circulares; por otro lado, las galaxias que sí la contienen, como las galaxias espirales, son más complicadas porque el material presenta movimientos no-circulares y no se observa una simetría. Datos cinéticos y el hecho de que, las *barras* se localizan tanto en regiones del *bulbo* como del *disco*, indican que las *barras* constituyen un componente importante en la distribución de masa en una galaxia (Sellwood & Wilkinson, 1993). Los movimientos galácticos internos que las *barras* pueden ocasionar principalmente sobre el material estelar<sup>18</sup> de la galaxia, debido a interacciones gravitacionales son:

- Formación de *brazos espirales* (Sellwood & Wilkinson, 1993).
- Distribución de las estrellas del *disco* hacia regiones del *bulbo*, lo que provee un mecanismo de retroalimentación a la *barra* atribuido a un incremento del patrón de velocidad de las órbitas estelares (Friedli & Benz, 1993).
- Distribución de las estrellas del *bulbo* y del *disco* hacia regiones externas de la galaxia, lo que ocasiona la disolución de la *barra* atribuida a una disminución del patrón de velocidad de las órbitas estelares (Friedli & Benz, 1995).
- Formación de una *barra* secundaria dentro de la principal (Friedli, Benz, & Kennicutt, 1994).

Cabe destacar que el hecho de que exista una distribución tanto interna como externa del material estelar, provoca que la *barra* no sea una componente perenne en la galaxia, es decir puede formarse, destruirse y nuevamente formarse (Friedli, Benz, & Kennicutt, 1994).

Las consecuencias que pueden tener los movimientos galácticos internos sobre la galaxia, debido a la existencia de una *barra* son, a su vez:

- Intercambio de calor, momento angular y abundancia química debido al mezclado de partículas (Athanasoula & Beaton, 2006; Beaton R. , et al., 2007; Martin & Roy, 1994).
- Redistribución de los elementos químicos y modificación de sus gradientes debidos a la formación estelar en regiones centrales (Friedli, Benz, & Kennicutt, 1994; Friedli & Benz, 1993; Friedli & Benz, 1995).

Por lo tanto, si las *barras* influyen a la evolución, la dinámica y a las abundancias químicas de una galaxia en efecto, éstas afectan a su vez, a la Zona de Habitabilidad Galáctica.

La redistribución de los elementos químicos y la modificación de sus gradientes debido a la formación de una *barra* galáctica y sus respectivas consecuencias, pueden llegar a ser significativas (Friedli, Benz, & Kennicutt, 1994; Knapen, Pérez-Ramírez, & Laine, 2002; Martin & Roy, 1994; Pérez-Ramírez, Knapen, Peletier, Laine, Doyon, & Nadeau, 2000; Roškar, Debattista, Quinn, Stinson, & Wadsley, 2008), o sutiles presentando ligeras fluctuaciones (Allen, Carigi, & Peimbert, 1998; Schönrich & Binney, 2009).

---

<sup>18</sup> Como se explicó anteriormente, las *barras* se conforman, en su mayoría, de estrellas.

## 2. EVOLUCIÓN QUÍMICA DE LA GALAXIA DE ANDRÓMEDA

En el presente trabajo, se realizó el modelo de EQ a partir de las ecuaciones mostradas en la sección 1.3.2 para las tres componentes galácticas de M31: *halo*, *disco* y *bulbo*. Lo anterior se realizó por medio de la construcción de un código de programación llamado KERO.

### 2.1 SUPOSICIONES DEL MODELO DE EVOLUCIÓN QUÍMICA Y SU RESOLUCIÓN

El modelo de EQ de M31, se construyó bajo las siguientes suposiciones generales:

- I. La galaxia se formó únicamente de material primigenio por lo que las abundancias primigenias por masa  $[X^A(t)]$ , para H, He y  $Z^{19}$  son  $H^A(t) = 0.75$ ,  $He^A(t) = 0.25$ , y  $Z^A(t) = 0.00$  (implicando  $O^A(t) = 0.00$ ).
- II. La TFE, pese a ser un fenómeno complejo, se parametrizó sencillamente usando la ley Kennicutt-Schmidt (Kennicutt, 1998):

$$\Psi(t) = vM_{\text{gas}}^n(t) \quad (22)$$

De la cual  $v$  es una constante y representa la eficiencia de la formación estelar y  $n$  es un número entre 1 y 2, el cual tiene valores distintos para cada una de las componentes galácticas (ver secciones 3.2.2 y 3.2.3).

- III. La FMI fue representada por la función

$$\varphi(m) = \varphi_0 m^{-(1+\chi)} \quad (23)$$

El parámetro  $\chi$  tiene distintos valores de acuerdo a los intervalos de la masa de las estrellas según Kroupa *et al.* (1993):

$$\chi = \begin{cases} 0.3 & \text{en } m \leq 0.5M_{\odot} \\ 1.2 & \text{en } 0.5M_{\odot} \leq m \leq 1.0M_{\odot} \\ 1.7 & \text{en } 1.0M_{\odot} \leq m \end{cases} \quad (24)$$

Dicha función se hizo continua, siendo  $\varphi_0$  su parámetro de normalización:

$$\varphi_0 = \left[ \int_{0.1M_{\odot}}^{80M_{\odot}} m\varphi(m) dm \right]^{-1} = 3.22M_{\odot} \quad (25)$$

Los límites de integración son de 0.1 a 80  $M_{\odot}$  porque son las masas, inferior y superior, de las estrellas que se consideraron forman a la población estelar que se tomó en cuenta.

- IV. Se desprecian las pérdidas de gas y estrellas al medio intergaláctico, lo que implica que  $W(t) = 0$ .

<sup>19</sup> Por razones de practicidad, la abundancia de los elementos químicos más pesados que el hidrógeno y helio, i.e. metalicidad, es tomada como si fuera un elemento químico per se.

V. El tiempo máximo de evolución, es decir la edad de la galaxia en el modelo, es de 13 Ga.

Utilizando como base las consideraciones anteriores y las ecuaciones de la sección 2.3.2.2, las expresiones que se resolvieron son:

$$\dot{M}_T(t) = A(t) \quad (26)$$

$$\dot{M}_{\text{gas}}(t) = -(1-R)vM_{\text{gas}}^n(t) + A(t) \quad (27)$$

$$\dot{M}_*(t) = (1-R)vM_{\text{gas}}^n(t) \quad (28)$$

$$\dot{X}_i(t)M_{\text{gas}}(t) = vM_{\text{gas}}^n(t)Y_i + vM_{\text{gas}}^n(t)(X_i^A(t) - X_i(t)) \quad (29)$$

Por otro lado, al aplicar la primer consideración general así como la *ecuación 29* a cada uno de los elementos químicos que se utilizaron en la presente investigación (i.e. H, O y Z) se obtuvieron las *ecuaciones 30, 31 y 32*.

$$\dot{H}M_{\text{gas}} = vM_{\text{gas}}^n Y_H + A(t)(0.75 - H(t)) \quad (30)$$

$$\dot{O}M_{\text{gas}} = vM_{\text{gas}}^n Y_O - A(t)O(t) \quad (31)$$

$$\dot{Z}M_{\text{gas}} = vM_{\text{gas}}^n Y_Z - A(t)Z(t) \quad (32)$$

Los rendimientos estelares, i.e.  $Y_H$ ,  $Y_O$  y  $Y_Z$ , fueron tomados de Franco & Carigi (2008). Debido a que los rendimientos dependen de la metalicidad estelar, se consideró un promedio de los rendimientos estelares (Franco & Carigi, 2008), los cuales tienen un valor de  $-0.0294$ ,  $0.0045$  y  $0.0104$ , respectivamente. No obstante que las *ecuaciones 26, 27, 28, 30, 31 y 32* fueron simplificadas considerablemente, estas diferenciales se debieron de resolver numéricamente para así, conocer las propiedades de M31 en cada punto y momento de su evolución, manteniendo la proporcionalidad de la TFE con respecto a  $\Sigma_{\text{gas}}$ , elevada a la enésima potencia. El resultado de dicha resolución numérica (método Runge-Kutta) de las seis diferenciales, para el tiempo de estudio  $t_i$ , fue el siguiente:

$$M_T(t_i) = M_T(t_{i-1}) + \Delta t \left( \frac{A(t_i) + A(t_{i-1})}{2} \right) \quad (33)$$

$$M_{\text{gas}}(t_i) = M_{\text{gas}}(t_{i-1}) + \Delta t \left\{ \frac{A(t_i) + A(t_{i-1})}{2} - vR \left[ \frac{\Delta t (A(t_{i-1}) - vR M_{\text{gas}}^n(t_{i-1}))}{2} + M_{\text{gas}}(t_{i-1}) \right]^n \right\} \quad (34)$$

$$M_*(t_i) = M_*(t_{i-1}) + vR \left( \frac{M_{\text{gas}}^n(t_i) + M_{\text{gas}}^n(t_{i-1})}{2} \right) \quad (35)$$

$$H(t_i) = \frac{H(t_{i-1}) \left[ 1 - \frac{\Delta t}{4} \left( \frac{A(t_i)}{M_{\text{gas}}(t_i)} + \frac{A(t_{i-1})}{M_{\text{gas}}(t_{i-1})} \right) \right] + vY_H \Delta t \left[ \frac{M_{\text{gas}}^n(t_i) + M_{\text{gas}}^n(t_{i-1})}{2} \right] + \frac{\Delta t H^A}{2} \left( \frac{A(t_i)}{M_{\text{gas}}(t_i)} + \frac{A(t_{i-1})}{M_{\text{gas}}(t_{i-1})} \right)}{1 + \frac{\Delta t}{4} \left( \frac{A(t_i)}{M_{\text{gas}}(t_i)} + \frac{A(t_{i-1})}{M_{\text{gas}}(t_{i-1})} \right)} \quad (36)$$

$$O(t_i) = \frac{O(t_{i-1}) \left[ 1 - \frac{\Delta t}{4} \left( \frac{A(t_i)}{M_{\text{gas}}(t_i)} + \frac{A(t_{i-1})}{M_{\text{gas}}(t_{i-1})} \right) \right] + vY_O \Delta t \left[ \frac{M_{\text{gas}}^n(t_i) + M_{\text{gas}}^n(t_{i-1})}{2} \right]}{1 + \frac{\Delta t}{4} \left( \frac{A(t_i)}{M_{\text{gas}}(t_i)} + \frac{A(t_{i-1})}{M_{\text{gas}}(t_{i-1})} \right)} \quad (37)$$

$$Z(t_i) = \frac{Z(t_{i-1}) \left[ 1 - \frac{\Delta t}{4} \left( \frac{A(t_i)}{M_{\text{gas}}(t_i)} + \frac{A(t_{i-1})}{M_{\text{gas}}(t_{i-1})} \right) \right] + v Y_Z \Delta t \left[ \frac{M_{\text{gas}}^n(t_i) + M_{\text{gas}}^n(t_{i-1})}{2} \right]}{1 + \frac{\Delta t}{4} \left( \frac{A(t_i)}{M_{\text{gas}}(t_i)} + \frac{A(t_{i-1})}{M_{\text{gas}}(t_{i-1})} \right)} \quad (38)$$

Para comparar las abundancias químicas teóricas de [O/H], las cuales son por masa, con las abundancias observadas, las cuales son por número, se utiliza la siguiente relación:

$$\left[ \frac{\text{O}}{\text{H}} \right] = \log \left( \frac{\text{O}(t_i)}{\text{H}(t_i)} \times \frac{1}{16} \right) - \log \left( \frac{\text{O}}{\text{H}} \right)_{\odot} \quad (39)$$

Recordando, el  $\log(\text{O}/\text{H})_{\odot}$  tiene un valor de  $-3.34$  dex (Grevesse, Asplund, & Sauval, 2007). La relación de (O/H) fue dividida entre la masa atómica del oxígeno para tener la abundancia química por masa. Para comparar las abundancias químicas teóricas de  $\log Z/Z_{\odot}$  con las abundancias observadas, se utiliza la siguiente relación:

$$\log \left( \frac{Z}{Z_{\odot}} \right) = \log \left( \frac{Z(t_i)}{Z_{\odot}} \right) \quad (40)$$

Con los planteamientos de esta sección, se dio paso a los cálculos específicos para cada componente de M31 y calcular así, su EQ tomando como restricción, los observables correspondientes.

## 2.2 BULBO Y SU EVOLUCIÓN QUÍMICA

En la siguiente sección, se muestran los datos observacionales que se utilizaron para restringir el modelo de EQ del *bulbo*, el modelo mismo y los resultados del modelo.

### 2.2.1 RESTRICCIONES OBSERVACIONALES

Como se ha explicado previamente (ver *sección 1.2.1.3*), el *bulbo* es una componente galáctica sin gas y en consecuencia, las únicas restricciones observacionales que se tienen del mismo, son la masa y las abundancias químicas de las estrellas que conforman al *bulbo*.

#### 2.2.1.1 MASA TOTAL DEL BULBO

---

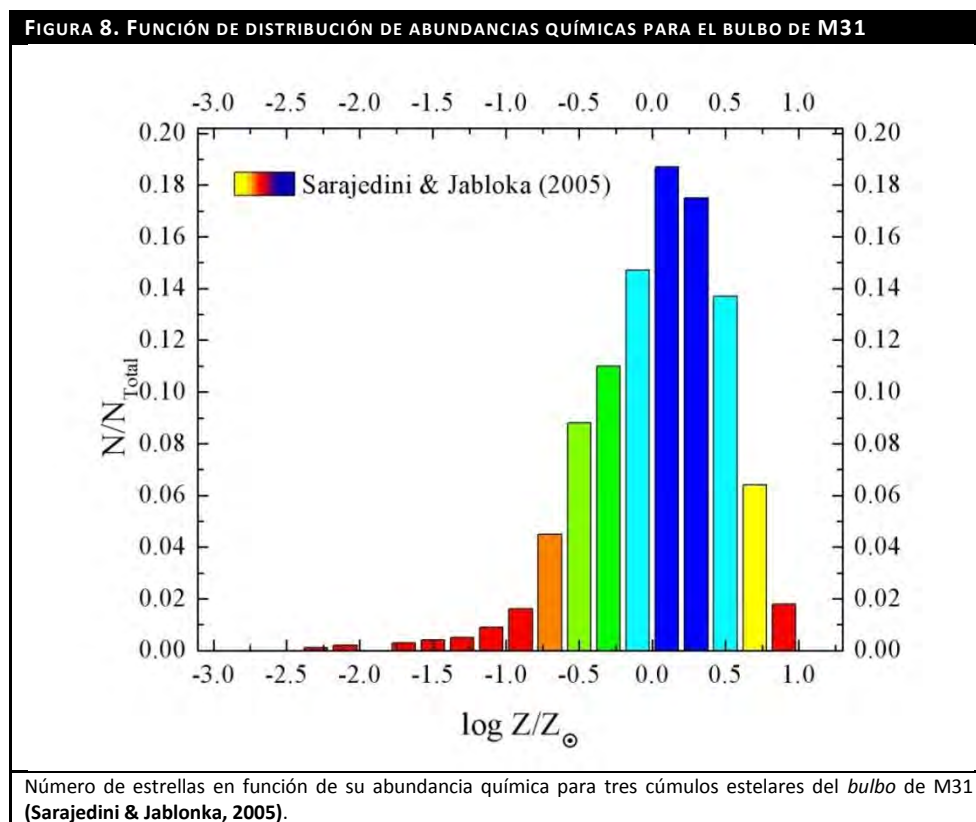
La masa total bariónica que conforma al *bulbo* es de  $2.5 \times 10^{10} M_{\odot}$  (Widrow, Perrett, & Suandu, 2003) la cual se determinó por medio del brillo que tiene dicha componente. El brillo fue medido a través de la luminosidad de las estrellas y debido a que el *bulbo* es una componente sin gas, se infiere que la cantidad total de estrellas representa a la masa total bariónica del *bulbo*.



### 2.2.1.2 ABUNDANCIAS QUÍMICAS DEL BULBO

Se han determinado las abundancias de los metales<sup>20</sup> en estrellas del *bulbo*, específicamente de tres cúmulos estelares que se encuentran entre 0.80 y 1.6 kpc del centro galáctico de M31. Las estrellas de estos cúmulos fueron incluidas en un estudio teórico de tal forma que se les asignó un lugar dentro un conjunto de estrellas a las que les corresponde determinado intervalo de abundancia química o mejor dicho,  $\log Z/Z_{\odot}$  (Sarajedini & Jablonka, 2005), como se muestra en la *Figura 8*.

La restricción observacional que se empleó es llamada Función de Distribución de Masa (FDM) la cual da el número de estrellas con respecto a su abundancia química, entre dos valores consecutivos de metalicidad.



### 2.2.2 MODELO DE EVOLUCIÓN QUÍMICA DEL BULBO

El modelo de EQ del *bulbo* de M31, se construyó bajo las siguientes suposiciones específicas:

<sup>20</sup> Recordando, astronómicamente se denomina metales a los elementos químicos más pesados que el He y a la abundancia de estos elementos, metalicidad o Z.

- I. El *bulbo* tiene el mismo comportamiento y propiedades a radios menores a 3.0 kpc, debido a que en esta componente no se han encontrado aún diferencias químicas en función del radio.
- II. La eficiencia en su formación estelar fue muy alta y consumió prácticamente todo su gas.
- III. La expresión para la TFE fue:

$$\Psi_b(t) = v_b M_{\text{gas}}(t) \quad (41)$$

El índice  $n$  fue 1 y el valor para  $v_b$  resultó ser de  $0.7 \text{ Ga}^{-1}$  el cual se obtuvo al ajustar la masa total y las abundancias químicas teóricas y observacionales.

- IV. La acreción se consideró como una exponencial en función del tiempo:

$$\dot{M}_{T,b} = A_b(t) = a_b e^{-t/\tau_b} \quad (42)$$

El término  $\tau_b$  representa el tiempo de escala para el *bulbo* que determina qué tan rápidamente la masa va cayendo a esta componente, cuyo valor de 0.1 Ga fue tomado de Ballero, Kroupa, & Matteucci (2007).

La constante  $a_b$  fue encontrada cuando se integró la ecuación 42 desde  $t = 0$  hasta  $t = 13 \text{ Ga}$  (tiempo actual) y se igualó a la masa total actual del *bulbo* de M31, y dicha constante es:

$$a_b = \frac{2.5 \times 10^{10} M_{\odot}}{\tau_b \left(1 - e^{-13 \text{ Gy} / \tau_b}\right)} \quad (43)$$

- V. Las pérdidas de material fueron despreciables (Ballero, Matteucci, Origlia, & Rich, 2007).

A partir de las ecuaciones y suposiciones anteriores así como las planteadas en las secciones 1.3.2 y 2.1, se desarrolló el modelo de EQ del *bulbo*.

En la Figura 9, se muestra la evolución de la masa total del *bulbo* en función del tiempo en donde se corrobora que el modelo propuesto reprodujo la masa total observada de  $2.5 \times 10^{10} M_{\odot}$  (Widrow, Perrett, & Suandu, 2003).

Las abundancias químicas se ajustaron por medio del cálculo de la FDM la cual, permite conocer el número de estrellas ( $N_i$ ) con respecto a la población total ( $N_{\text{Total}}$ ) a la que le corresponde cierto valor de  $\log Z/Z_{\odot}$ .

Para lo anterior, se tomó el intervalo de  $\log Z/Z_{\odot}$  conocido de las observaciones (ver Figura 8) y se analizó si el modelo de EQ arrojaba esos valores.

Al ser así, se calculó el número de estrellas con esa abundancia química. El número de estrellas  $N_i$ , se calculó por medio de la integral de la TFE desde el tiempo  $t_{i-1}$  a  $t_i$  (tiempos en

donde coincidió el valor de  $\log Z/Z_{\odot}$  teórico y observacional) y la integral de la FMI para estrellas viejas<sup>21</sup>, es decir:

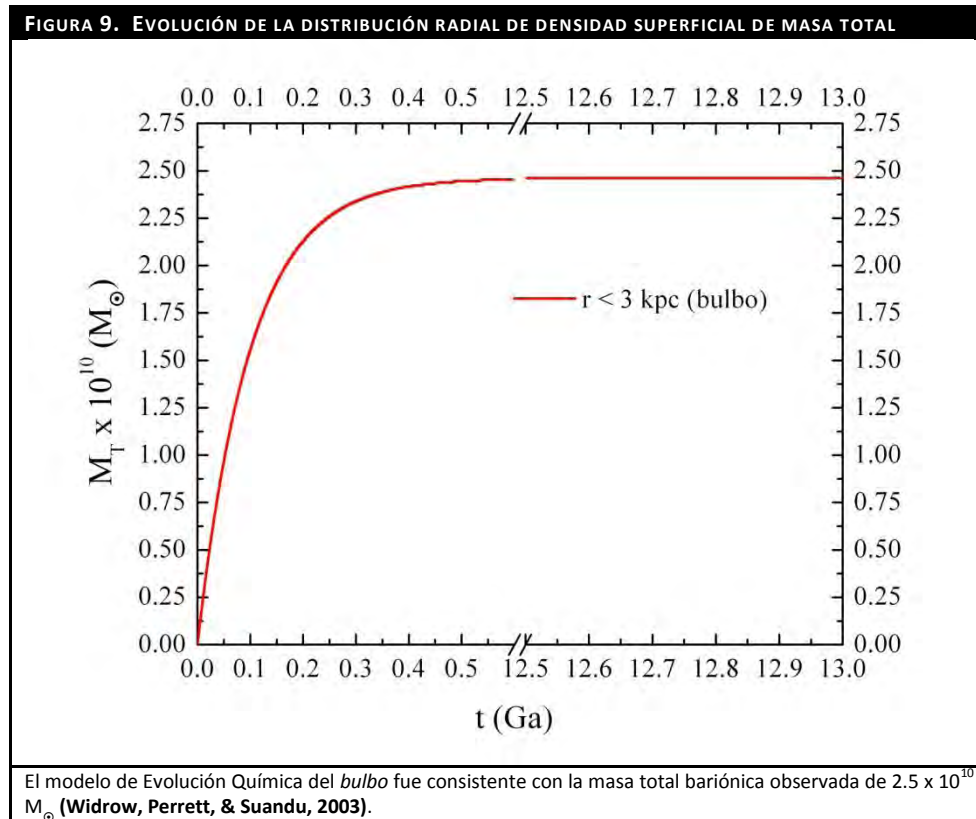
$$N_i = \int \varphi(M) dM \times \int_{t_{i-1}}^{t_i} \Psi(t) dt \quad (44)$$

$N_T$  se estimó con la integral total de la TFE en todos los tiempos de la formación galáctica y con la integral de la FMI también para estrellas viejas:

$$N_T = \int \varphi(M) dM \times \int_{t_0}^{t_f} \Psi(t) dt \quad (45)$$

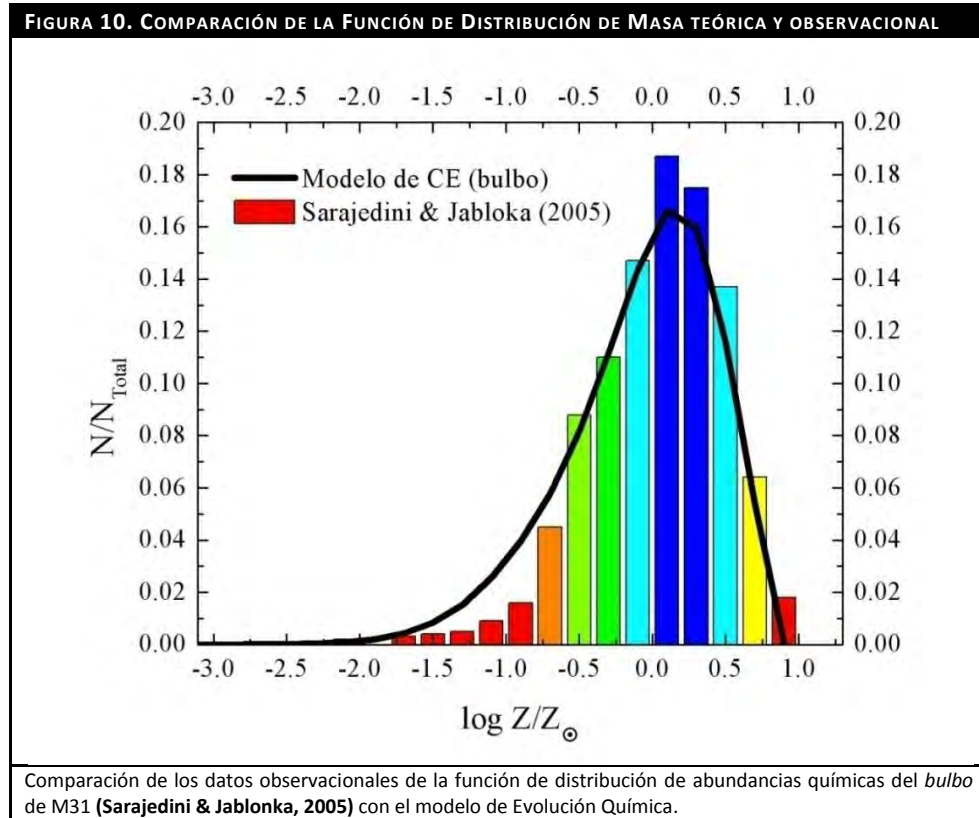
El siguiente paso fue simplemente el cociente de las ecuaciones anteriores:

$$\frac{N_i}{N_T} = \frac{\int_{t_{i-1}}^{t_i} \Psi(t) dt}{\int_{t_0}^{t_f} \Psi(t) dt} \quad (46)$$



Con lo anterior, se graficó (ver *Figura 10*) la FDM teórica contrastando con la observacional y así, verificar que el modelo de EQ para el *bulbo*, con las consideraciones tomadas, era ad hoc con la realidad de esta componente galáctica de M31.

<sup>21</sup> Las estrellas viejas según ARI, son aquellas estrellas cuyas masas son menores a  $1 M_{\odot}$  y, como se ha mencionado previamente, la edad de las estrellas se encuentra en función de su masa, por lo tanto, estas estrellas no han muerto en la actualidad.



## 2.3 HALO-DISCO Y SU EVOLUCIÓN QUÍMICA

En la siguiente sección, se muestran los datos observacionales que se utilizaron para restringir el modelo de EQ del *halo-disco*, el modelo mismo y los resultados.

### 2.3.1 RESTRICCIONES OBSERVACIONALES

Las restricciones observacionales que se tienen para el *halo* y el *disco*, son las abundancias químicas de ambos y la distribución radial de densidad superficial de la masa de gas del *disco*.

#### 2.3.1.1 ABUNDANCIAS QUÍMICAS DEL HALO

El *halo* no contiene gas y el número de estrellas que se hallan en él es menor que en el *disco*, sin embargo se han logrado determinar las abundancias químicas de algunas estrellas que se encuentran fuera del plano del *disco* y en regiones externas del mismo. El intervalo encontrado es de  $-2.6 \text{ dex} \leq \log Z/Z_{\odot} \leq -0.5 \text{ dex}$  (Chapman, et al., 2006; Koch, et al., 2008).

### 2.3.1.2 ABUNDANCIAS QUÍMICAS DEL DISCO

---

Las abundancias químicas del *disco* están dadas por la distribución radial de la abundancia de oxígeno,  $[O/H](r)$ . Los datos de esta distribución fueron tomados de las compilaciones para M31 de espectros en regiones HII de Blair et al. (1982) y Galarza et al. (1999). De esta última referencia, se seleccionaron solamente las regiones HII etiquetadas como “centro-brillante” ya que son objetos más compactos y la mayor parte de su emisión es recibida por el espectrómetro. De la muestra total de las regiones, se rechazaron aquellas con medidas de emisión colisional con alta incertidumbre en las líneas de  $[OII]\lambda 3727$ ,  $[OIII]\lambda 4659$ ,  $[OIII]\lambda 5007$  y  $[NII]\lambda 6584$ . Tomando en cuenta lo anterior, la muestra se redujo a 87 objetos.

Determinaciones precisas en regiones HII pueden ser derivadas de medidas de cocientes de líneas sensibles a la temperatura, tales como  $[OIII]\lambda 5007/[OIII]\lambda 4363$  o  $[NII]\lambda 6583/[NII]\lambda 5754$ . Desafortunadamente, en objetos de bajo brillo superficial, como es el caso de las regiones HII de M31, la línea sensible a la temperatura  $[OIII]\lambda 4363$  es muy débil para ser medida. Sin embargo, usando el método bi-evaluado de Pagel et al. (1979),  $R_{23}$ , la abundancia de oxígeno puede ser calculada usando sólo líneas fuertes, en donde la abundancia de oxígeno es una función uni-dimensional del parámetro  $R_{23}$  definido como:

$$R_{23} = \frac{[OII]\lambda 3727 + [OIII]\lambda 4959 + 5007}{H\beta} \quad (47)$$

El problema de utilizar el método  $R_{23}$  es que está doblemente evaluado con respecto a  $[O/H]$ , i.e. para valores bajos, el parámetro aumenta con la abundancia mientras que para valores altos, el parámetro disminuye. Para romper la degeneración del método, se calculó el  $\log([NII]\lambda 6584/[OII]\lambda 3727)$  el cual no es sensible a parámetros de ionización y es una función fuerte de  $[O/H]$  (Kewley & Dopita, 2002; Kewley & Ellison, 2008). Para obtener una estimación de las incertidumbres en las abundancias, se propagó el error en la línea de los flujos y se añadió cuadráticamente la precisión de cada método el cual se encuentra entre  $\pm 0.1 - 0.2$  dex.

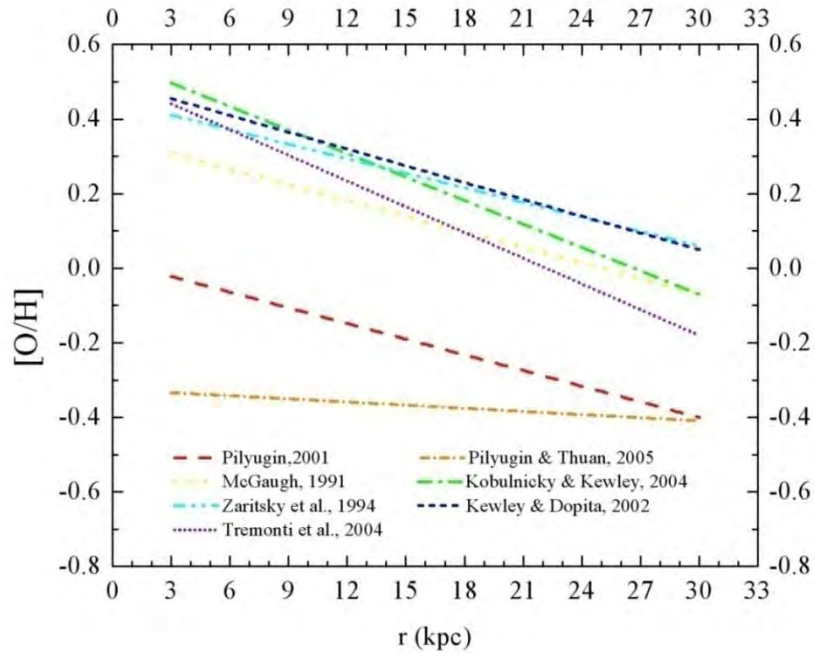
En la *Figura 11*, se muestran las distribuciones radiales de abundancia de oxígeno,  $[O/H]$ , que se obtienen de métodos empíricos (Pilyugin, 2001; Pilyugin & Thuan, 2005) y teóricos (Kewley & Dopita, 2002; Kobulnicky & Kewley, 2004; McGaugh, 1991; Tremonti, et al., 2004; Zaritsky, Kennicutt, & Huchra, 1994) que se basan en el método  $R_{23}$ . Como se puede observar, los métodos teóricos proporcionan gradientes que se encuentran en una región estrecha del diagrama  $[O/H](r)$ , sin embargo los métodos teóricos tienen una pendiente similar y las ordenadas al origen varían en 0.2 dex, aproximadamente.

Adicionalmente, se probó el efecto de la presencia de una dispersión intrínseca en los datos. De una forma similar, a la que se llevó a cabo por Rosolowsky & Simon (2008) para el gradiente de M33<sup>22</sup>, se aplicó el método de Akritas & Bershady (1996) para calcular los gradientes en presencia de dispersión intrínseca para M31.

---

<sup>22</sup> M33 es la tercera y última galaxia espiral del Grupo Local, al que pertenecen VL y M31.

FIGURA 11. GRADIENTES DE [O/H] DETERMINADOS POR MÉTODOS EMPÍRICOS Y TEÓRICOS



Distribuciones radiales de [O/H], que se obtienen de métodos empíricos (Pilyugin, 2001; Pilyugin & Thuan, 2005) y teóricos (Kewley & Dopita, 2002; Kobulnicky & Kewley, 2004; McGaugh, 1991; Tremonti, et al., 2004; Zaritsky, Kennicutt, & Huchra, 1994).

En el caso de M31, la dispersión intrínseca de [O/H] a un radio dado (0.15 dex) fue del orden de las incertidumbres típicas de los datos, así los resultados fueron idénticos a aquellos calculados por un simple ajuste lineal sin embargo, se obtuvieron incertidumbres ligeramente más grandes en los parámetros de ajuste.

Así mismo, se exploró el comportamiento de los gradientes obtenidos con diferentes calibraciones teóricas de [O/H] de una muestra de 10 regiones HII, escogidas aleatoriamente.

Los gradientes, como toda línea recta, se expresan en función de una pendiente y una ordenada al origen y por lo tanto, se construyeron dos histogramas tomando en cuenta las calibraciones teóricas, obteniéndose así las distribuciones que se encuentran en la Figura 12 para las pendientes y las ordenadas al origen, [O/H]<sub>0</sub> de los gradientes de [O/H].

Finalmente, se adoptaron dos funciones de [O/H] para trabajar sobre ellas: la primera obtenida de los resultados de los histogramas presentados (Figura 12), es:

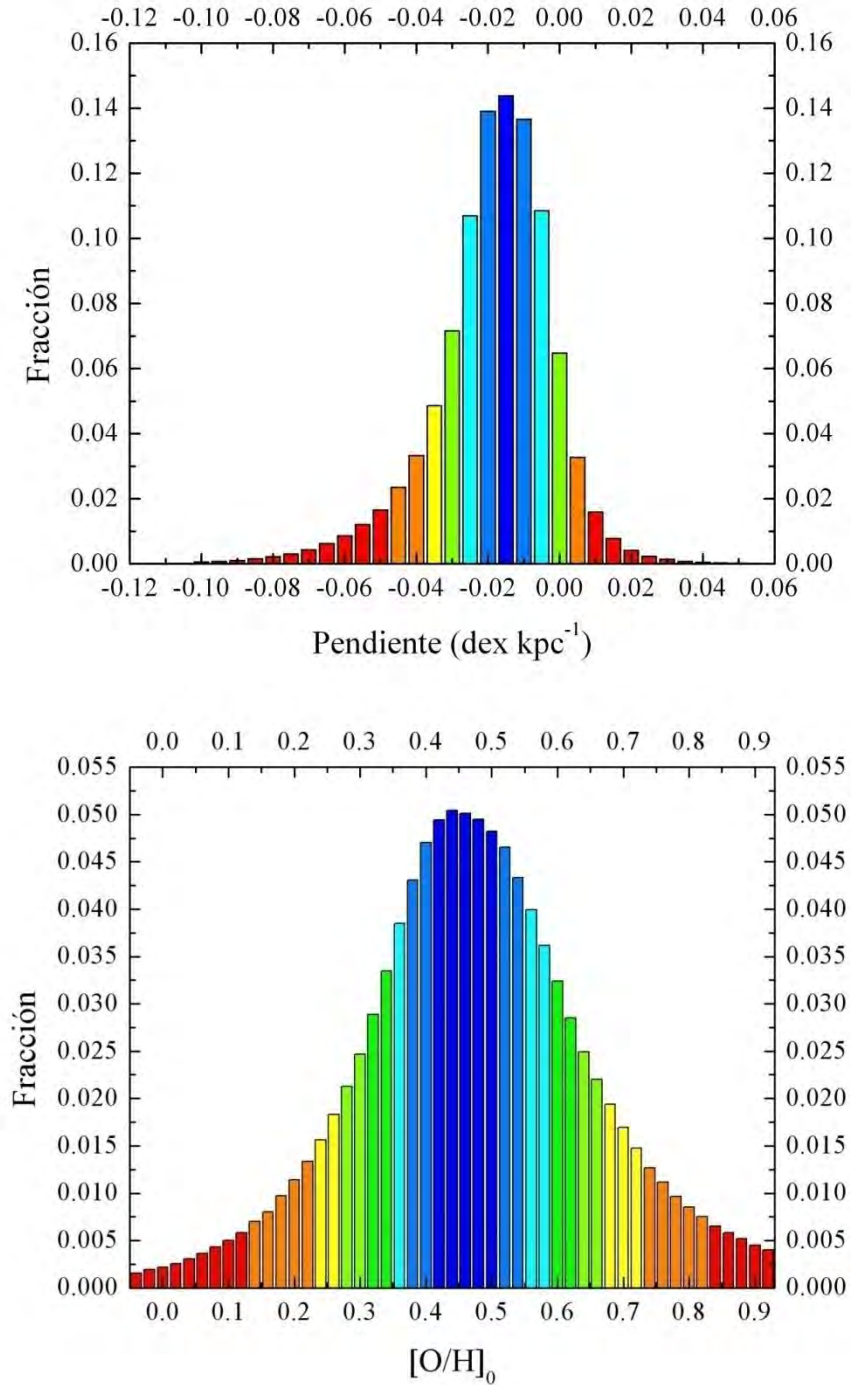
$$\left[ \frac{\text{O}}{\text{H}} \right] (r) = (-0.015 \pm 0.012) \frac{\text{dex}}{\text{kpc}} r (\text{kpc}) + (0.44 \pm 0.20) \text{dex} \quad (48)$$

En la Figura 13, se muestra el gradiente de la ecuación 48 que se empleó como restricción observacional principal (línea gruesa). La región sombreada, alrededor de dicha línea, reúne todos los gradientes teóricos y representa la incertidumbre.

La segunda es la función dada por la calibración empírica de Pilyugin (2001), la cual es representada por:

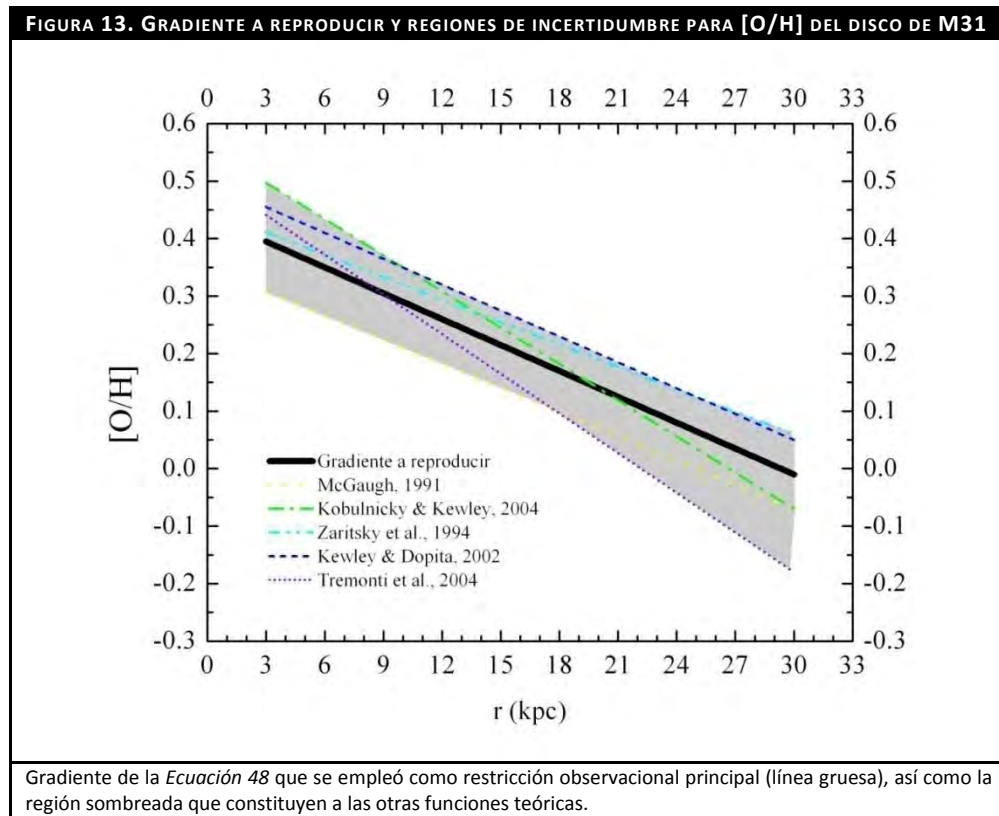
$$\left[\frac{\text{O}}{\text{H}}\right](r) = (-0.014 \pm 0.004) \frac{\text{dex}}{\text{kpc}} r (\text{kpc}) + (0.02 \pm 0.05) \text{ dex} \quad (49)$$

FIGURA 12. DISTRIBUCIONES DE LAS PENDIENTES Y LAS ORDENADAS AL ORIGEN DE LOS GRADIENTES DE [O/H]



Distribuciones de las pendientes y las ordenadas al origen de los gradientes de [O/H] medidos de una muestra de 10 regiones HII escogidas aleatoriamente de la muestra total de 87 objetos a partir de métodos teóricos.

Es importante señalar que el gradiente de la *ecuación 49*, también se consideró restricción observacional. Sin embargo, para poder obtener del modelo esos valores bajos de  $[O/H]$  (líneas inferiores de la *Figura 10*), las otras restricciones observacionales deberían ser considerablemente diferentes y/o ser modificadas. El valor de la pendiente de los gradientes de  $[O/H]$  que fue calculada ( $-0.015 \pm 0.012 \text{ dex kpc}^{-1}$ ), fue un poco empinada pero es consistente dentro de los errores ( $-0.006 \pm 0.20 \text{ dex kpc}^{-1}$ ) obtenidos por Trundle et al. (2002) para las estrellas de M31. Venn et al. (2000) encontraron que no existe un gradiente para  $[O/H]$  entre 10 y 20 kpc sin embargo, su estudio estuvo basado en la determinación de abundancias químicas para sólo tres estrellas supergigantes del tipo A-F y por lo tanto, sus resultados no son concluyentes.



### 2.3.1.3 DISTRIBUCIÓN RADIAL DE LA DENSIDAD SUPERFICIAL DE LA MASA DE GAS DEL DISCO

La distribución radial de la densidad superficial<sup>23</sup> de la masa de gas en el *disco*,  $\Sigma_{\text{gas}}(r)$ , representa las formas gaseosas (atómicas y moleculares) en que se encuentran todos los elementos químicos en el *disco* galáctico por lo tanto se puede expresar como  $\Sigma_{\text{gas}}(r) = \Sigma_{\text{H}}(r) + \Sigma_{\text{He}}(r) + \Sigma_{\text{Z}}(r)$ . A continuación, se muestran la forma en que se calculó la densidad superficial de gas en forma de los distintos elementos químicos.

<sup>23</sup> La densidad radial de la densidad superficial,  $\Sigma(r)$ , está dada, como cualquier otra medida de densidad, en masa por unidad de área,  $M_{\odot} \text{ pc}^{-2}$ .



### 2.3.1.3.1 DENSIDAD SUPERFICIAL DE GAS EN FORMA DE HIDRÓGENO

---

E. M. Berkhuijsen (comunicación privada, 2008) basándose en Nieten *et al.* (2006), amablemente proporcionó las densidades superficiales actualizadas de hidrógeno atómico (HI) y molecular (H<sub>2</sub>) de las mitades norte y sur de M31 en unidades de partícula por centímetro cuadrado.

Para obtener  $\Sigma_H(r)$ , para cada especie del hidrógeno que se encuentra en el gas, se procedió con lo siguiente:

- I. Promediar los datos de ambas mitades.
- II. Convertir los datos de  $1/\text{cm}^2$  en  $M_\odot \text{ pc}^{-2}$ , utilizando la masa de un átomo de hidrógeno<sup>24</sup> y convirtiendo a las unidades adecuadas<sup>25</sup>, es decir kg a  $M_\odot$  y  $\text{cm}^2$  a  $\text{pc}^2$ .
- III. Corregir por inclinación ya que el *disco* de M31 está inclinado con respecto al plano del cielo por un ángulo  $\theta = 77.5^\circ$ . Por lo tanto, los datos se multiplicaron por  $\cos \theta$  para obtener la proyección apropiada.
- IV. Corregir la distancia de 690 kpc que utilizó E. M. Berkhuijsen, al adoptar 780 kpc (Holland, 1998) como la distancia entre M31 y la Tierra.
- V. Sumar ambas especies, ya que  $\Sigma_H(r) = \Sigma_{\text{HI}}(r) + 2\Sigma_{\text{H}_2}(r)$

Otros datos empleados en este trabajo, fueron aquellos compilados por Renda *et al.* (2005) sin embargo la información ya se encontraba como  $\Sigma_H(r)$  por lo que sólo se corrigió por distancia.

### 2.3.1.3.2 ABUNDANCIA POR MASA DE METALES

---

Debido a que sólo se contaba con los datos de densidad de masa en forma de H, se calculó Z. Para obtener Z(t), se procedió con los siguientes pasos:

- I. Suponer que las abundancias de metales en el gas ionizado son las mismas que en el gas atómico, de tal manera que:

$$\frac{\Sigma_Z(r)}{\Sigma_{\text{HI}}(r)} = \frac{Z(r)}{H(r)} \quad (50)$$

- II. Obtener el cociente de O/H necesario para satisfacer la siguiente relación obtenida a partir del gradiente observado<sup>26</sup>.

$$\left(\frac{\text{O}}{\text{H}}\right)^\# = 10^{-0.015r-2.9} \quad (51)$$

<sup>24</sup> La masa de un átomo de H se tomó como la masa de un protón,  $1.7 \times 10^{-27}$  kg.

<sup>25</sup> Recordando,  $1 M_\odot = 1.99 \times 10^{30}$  kg.  $1 \text{ pc} = 2.09 \times 10^{18}$  cm.

<sup>26</sup>  $[\text{O}/\text{H}] = -0.015 \text{ dex kpc}^{-1} r (\text{kpc}) + 0.44 \text{ dex}$ .

- III. Suponer que los metales en el *disco* galáctico de M31 escalan a  $[O/H](r)$  como en el Sol, es decir:

$$\frac{Z(r)}{Z_{\odot}} = \frac{(O/H)(r)}{(O/H)_{\odot}} \quad (52)$$

- IV. Adoptar las abundancia solares por número de Z y (O/H) basadas en Grevesse *et al.* (2007) siendo 0.012 dex y  $-3.34$  dex, respectivamente y calcular  $Z(r)$  con la siguiente expresión:

$$Z(r) = Z_{\odot} 10^{\left[\frac{O}{H}\right]} = 0.012 \times 10^{(-0.015r+0.44)} \quad (53)$$

#### 2.3.1.3.3 ABUNDANCIA POR MASA DE HELIO

---

Debido a que sólo se contaba con los datos de densidad de masa en forma de H, se calculó He. Para obtener He(t), se prosiguió con lo siguiente:

- I. Suponer que las abundancias del helio en el gas ionizado son las mismas que en el gas atómico, de tal manera que:

$$\frac{\Sigma_{\text{He}}(r)}{\Sigma_{\text{HI}}(r)} = \frac{\text{He}(r)}{\text{H}(r)} \quad (54)$$

- II. Utilizar el enriquecimiento por masa de He respecto a O ( $\text{He} = 0.25 + 3.30$ ) determinado a partir de modelos de EQ del *disco* de VL y de las observaciones en regiones HII de galaxias enanas irregulares, del *disco* de VL y de estrellas en la vecindad solar (Carigi & Peimbert, 2008).
- III. Calcular He(t) a partir de la relación, convirtiendo la abundancia de oxígeno por número ( $O_{\#}$ ) a por masa, normalizando las abundancias químicas (i. e.  $H = 1 - \text{He} - Z$ ) y utilizar la expresión de Z obtenida con los cálculos de la *sección 3.3.1.3.2*:

$$\text{He}(r) = \frac{0.25 + 3.3 \left(\frac{O}{H}\right)^{\#} \times 16 (1 - Z(r))}{1 + 3.3 \left(\frac{O}{H}\right)^{\#} \times 16} \quad (55)$$

#### 2.3.1.3.4 DENSIDAD SUPERFICIAL DE LA MASA DE GAS TOTAL

---

Utilizando los cálculos y suposiciones presentados en las secciones anteriores así como los resultados obtenidos de ellos, se prosiguió con lo siguiente para hallar  $H(r)$ ,  $\Sigma_Z(r)$ ,  $\Sigma_{\text{He}}(r)$ , y así, obtener  $\Sigma_{\text{gas}}(r)$ .

- I. Calcular  $H(r)$  con la normalización  $H(r) = 1 - Z(r) - \text{He}(r)$ .
- II. Calcular a partir de la *ecuación 51*,  $\Sigma_Z(r)$  con la expresión:

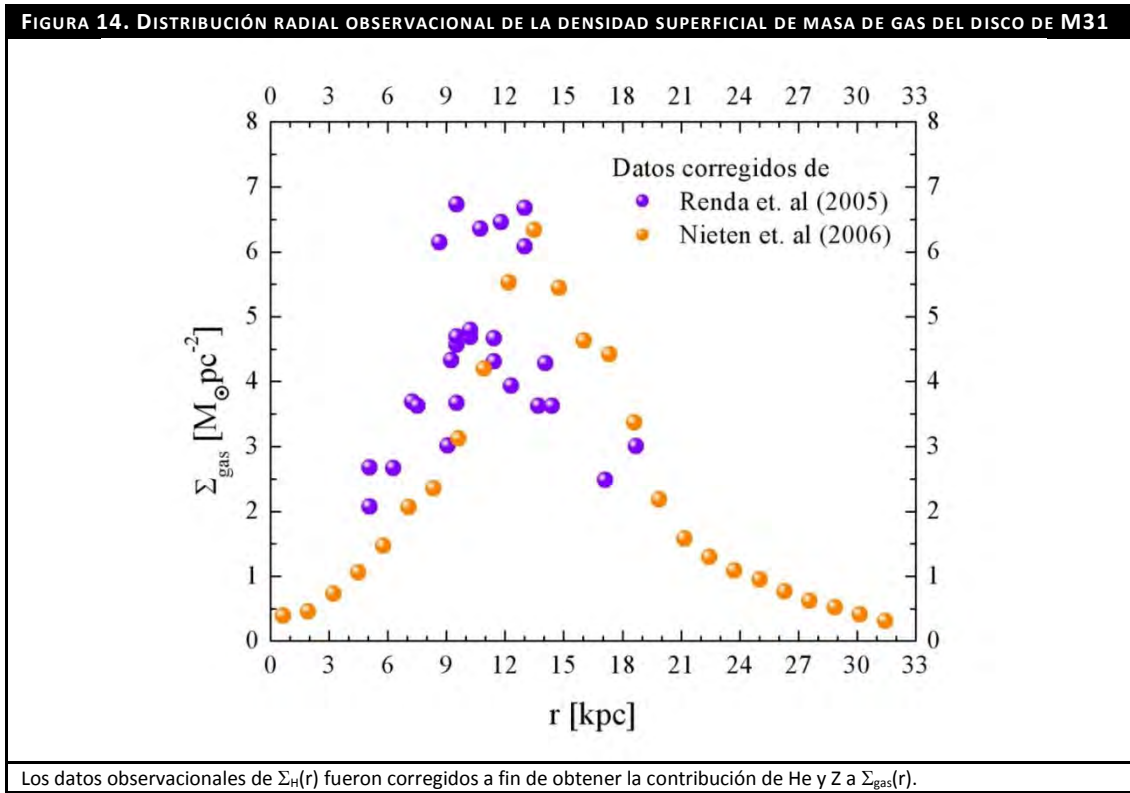
$$\Sigma_Z(r) = \frac{\Sigma_{\text{HI}}(r)Z(r)}{H(r)} \quad (56)$$

III. Calcular a partir de la ecuación 54,  $\Sigma_{\text{He}}(r)$  con la expresión:

$$\Sigma_{\text{He}}(r) = \frac{\Sigma_{\text{HI}}(r)\text{He}(r)}{H(r)} \quad (57)$$

La distribución radial de la densidad superficial de masa de gas del disco de M31 se calcula con la expresión  $\Sigma_{\text{gas}}(r) = \Sigma_{\text{H}}(r) + \Sigma_{\text{He}}(r) + \Sigma_Z(r)$ .

En la Figura 14, se presentan los datos ya corregidos.



#### 2.3.1.4 PERFILES DE BRILLO DEL HALO Y EL DISCO

El perfil de brillo utilizado para el *halo* de M31 fue tomado de Renda *et al.* (2005) y representa la distribución radial de la masa total, tal que:

$$\Sigma_{\text{T,h}} = \frac{6M_{\odot}\text{pc}^{-2}}{1 + \left(\frac{r}{8\text{kpc}}\right)^2} \quad (58)$$

Así mismo, el perfil de luminosidad del *disco* está dado por:

$$\Sigma_{\text{T,d}}(r) = \Sigma_{0,d} e^{-\frac{r}{r_d}} \quad (59)$$

Donde  $\Sigma_{0,d}$  es el valor a  $r = 0$  kpc, el cual se infiere integrando en el radio y suponiendo simetría azimutal sobre toda la superficie luminosa de M31 para reproducir su masa total de  $9.7 \times 10^{10} M_{\odot}$  (Widrow, Perrett, & Suandu, 2003).  $\Sigma_{0,d}$  se obtuvo de la siguiente manera:

$$\int_{0 \text{ kpc}}^{40 \text{ kpc}} \Sigma_{0,d} e^{-\frac{r}{r_d}} 2\pi r dr = 9.7 \times 10^{10} M_{\odot}$$

$$\Sigma_{0,d} = \frac{9.7 \times 10^{10} M_{\odot}}{2\pi \int_{0 \text{ kpc}}^{40 \text{ kpc}} e^{-\frac{r}{r_d}} r dr} = \frac{9.7 \times 10^{10} M_{\odot}}{2\pi \times 30 \text{ kpc}^2} = 5.14 \times 10^8 \frac{M_{\odot}}{\text{kpc}^2} \quad (60)$$

$$\Sigma_{0,d} = 514.60 \frac{M_{\odot}}{\text{pc}^2}$$

El parámetro  $r_d$  es el radio de escala y es una constante que se requiere para ajustar la curva exponencial de luminosidad a la distribución de luminosidad observada. El valor de esta constante se ha tomado como 5.5 kpc de acuerdo a Renda *et al.* (2005).

### 2.3.2 MODELO DE EVOLUCIÓN QUÍMICA DEL HALO-DISCO

En el presente trabajo, se consideró la formación (en función del radio) y evolución del *disco* y *halo* según un modelo de acreción dual con material primigenio bajo el contexto de formación *dentro-fuera* (i.e. la galaxia se formó más eficientemente en regiones centrales que en la periferia) entre radios de 3 kpc y 30 kpc. Para cada radio se supuso simetría azimutal (i.e. todas las regiones a un mismo radio tienen las mismas propiedades químicas y físicas).

La acreción-dual está dada por:

$$\dot{\Sigma}_{T,h-d}(r, t) = A_h(r, t) + A_d(r, t) = a_h(r) e^{-t/\tau_h} + a_d(r) e^{-\frac{(t-t_{\text{delay}})}{\tau_d(r)}} \quad (61)$$

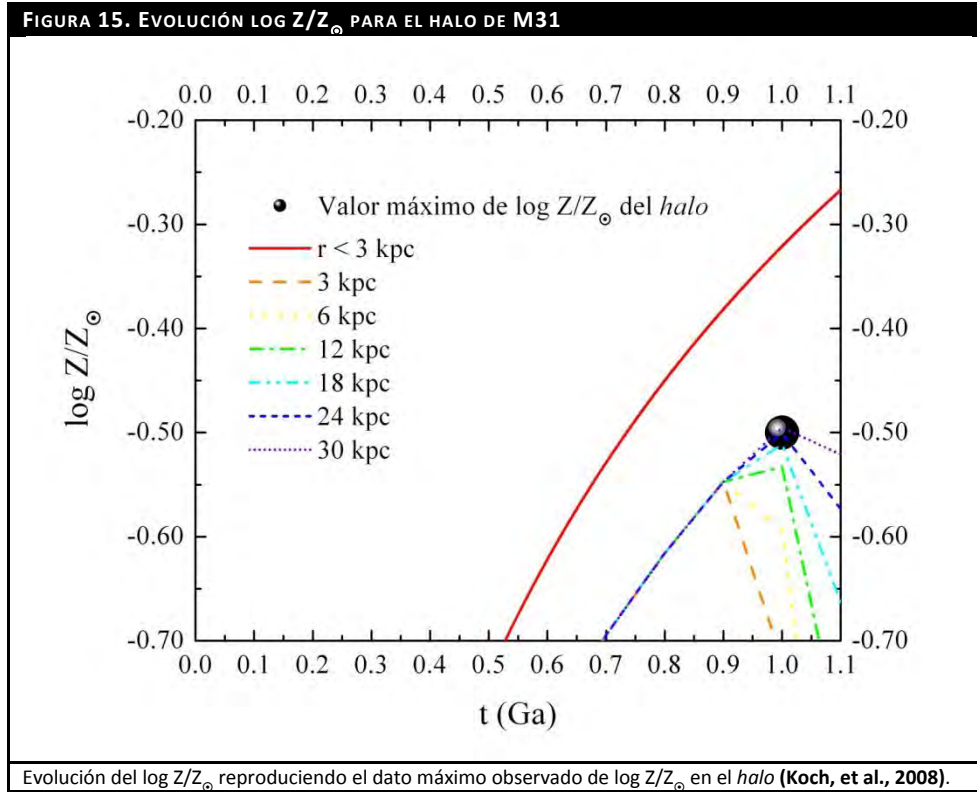
El primer término representa la formación del *halo* durante el primer giga-año de formación,  $\tau_h$  se tomó como 0.1 Ga de acuerdo a Renda *et al.* (2005) para alcanzar los valores de  $Z$  de las estrellas del *halo* (ver *Figura 15*), la variable  $a_h(r)$  se encontró cuando se integró el primer término de la ecuación anterior desde  $t = 0$  hasta  $t = 1$  Ga y se igualó al perfil de brillo actual del *halo* de M31 (*ecuación 58*). Dicha variable es:

$$a_h(r) = \frac{384}{\tau_h (1+r^2)} \quad (62)$$

El segundo término representa la formación del *disco*, desde  $t_{\text{delay}}$  (1Ga) hasta el tiempo actual (13 Ga) donde;  $\tau_d(r, t) = 0.45r(\text{kpc}^{-1})$  se obtuvo del modelo de EQ al reproducir los datos observacionales de  $\Sigma_{\text{gas}}(r)$  y  $[O/H]$  (como se analiza en párrafos siguientes); la variable  $a_d(r)$  se encontró cuando se integró el segundo término de la *ecuación 61* desde  $t = 0$  hasta  $t = 13$  Ga y se igualó al perfil de brillo actual del *disco* de M31 (*ecuación 59*).

Dicha variable es:

$$a_d(r) = \frac{514.60 M_\odot \text{pc}^{-2} e^{-r/5.5 \text{kpc}}}{\tau_d \left(1 - e^{-13 \text{Gy} \cdot \text{delay} / \tau_d(r)}\right)} \quad (63)$$



La TFE propuesta para los tiempos en donde se formó el *halo* ( $t < 1.0$  Ga) es directamente proporcional a la densidad superficial de gas (ver ecuación 64).

$$\Psi_h(t) = v_h \Sigma_{\text{gas}}(t) \quad (64)$$

El valor para  $v_h$  resultó ser de  $0.5 \text{ Ga}^{-1}$  y se obtuvo al reproducir (en los tiempos de formación del *halo*), valores menores o iguales al valor máximo de la metalicidad de la población estelar del halo ( $\log Z/Z_\odot \leq -0.5$  dex tomado de Koch et al., 2008) como se puede observar en la Figura 15.

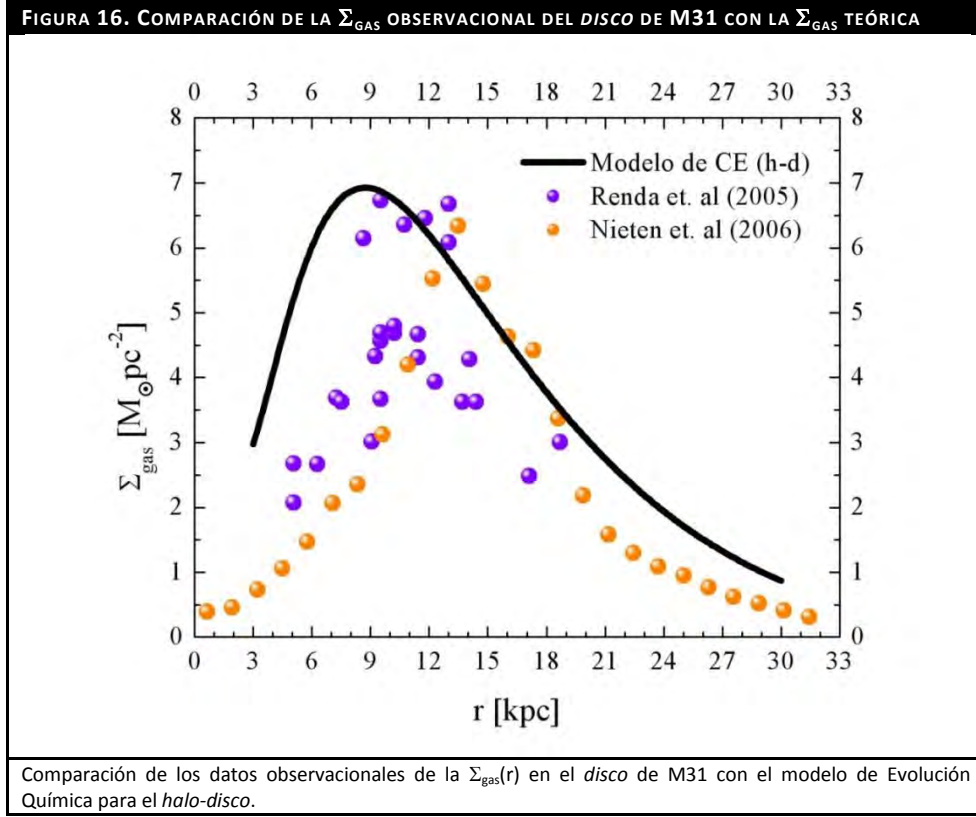
La caída que se observa a tiempos mayores a 1 Ga, i.e. en los momentos donde inició la formación del *disco*, es debida a la cantidad de material fresco (o primigenio) que M31 recibió, diluyendo los elementos químicos (distintos al hidrógeno y helio) que se encontraban.

La TFE propuesta para los tiempos en donde se formó el *disco* ( $t \geq 1$  Ga) es directamente proporcional a la densidad superficial de gas elevada a la 1.45 (Fuchs, Jahreiß, & Flynn, 2009) (ver ecuación 65).

El valor obtenido para  $v_d$  fue de  $0.23 \text{ Ga}^{-1} (M_\odot/\text{pc}^2)^{-0.45}$ , para reproducir los datos observacionales de  $\Sigma_{\text{gas}}(r)$  y  $[\text{O}/\text{H}]$  (como se detalla a continuación y se ilustra en las Figuras 16 y 17).

$$\Psi_d(t) = v_d \Sigma_{\text{gas}}^{1.45}(t)$$

(65)



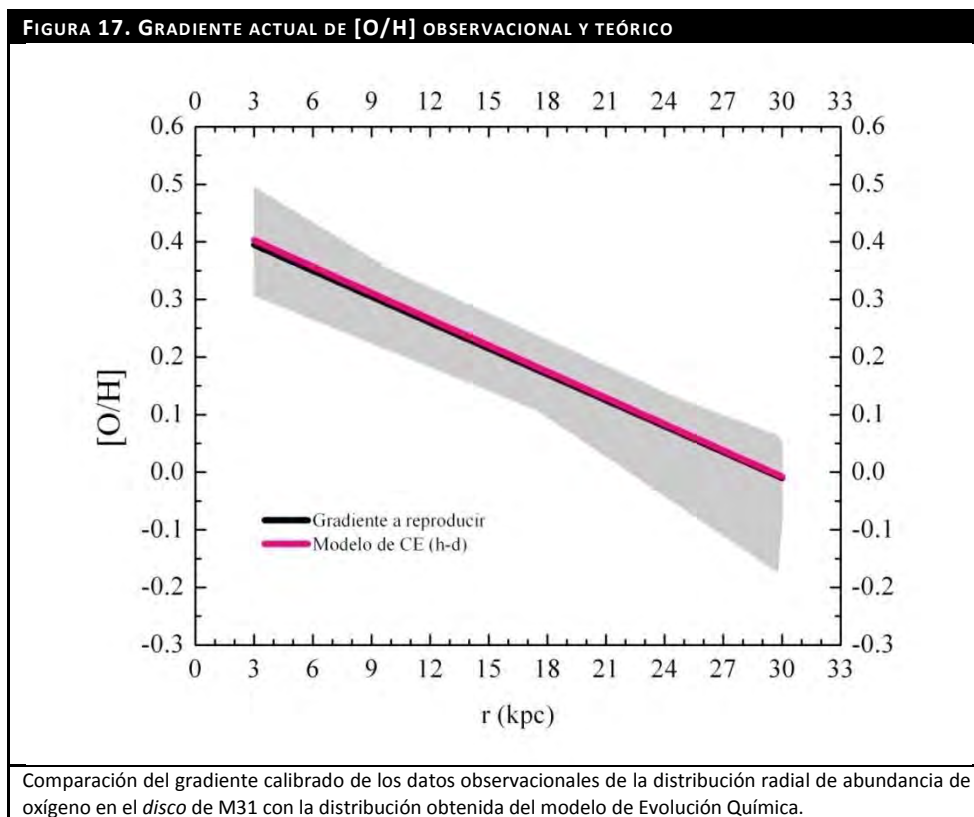
En la *Figura 16*, se graficó  $\Sigma_{\text{gas}}(t)$  del modelo de EQ junto con las restricciones observacionales correspondientes (ver *Figura 14*). El intervalo de valores máximos observacionales fueron reproducidos así como también el comportamiento general que tienen los datos en la periferia del *disco* de M31 pero no para  $r < 9$  kpc.

Se intentó mejorar el ajuste aumentando la eficiencia de la TFE pero el gradiente de  $[O/H]$  se empinó hasta un valor de  $-0.2 \text{ dex kpc}^{-1}$ , en desacuerdo a las observaciones ( $-0.015 \text{ dex kpc}^{-1}$ ).

Se construyó la gráfica de  $[O/H]$  (ver *Figura 17*) tratando de reproducir el gradiente actual de M31,  $[O/H] = -0.015 \text{ dex kpc}^{-1} r (\text{kpc}) + 0.44 \text{ dex}$ . El ajuste que se dio entre el gradiente calibrado y el obtenido por el modelo, fue muy preciso ya que el obtenido fue  $[O/H] = -0.015 \text{ dex kpc}^{-1} r (\text{kpc}) + 0.45 \text{ dex}$ .

El tener un ajuste a los datos observacionales, permitió conocer la evolución del oxígeno.

Debido a que el oxígeno es la especie química más abundante contenida en Z, la aproximación es apropiada para la evolución del resto de los elementos químicos distintos al hidrógeno y helio, la cual es requerida para determinar la primer condición de la Zona de Habitabilidad Galáctica, i. e. formación planetaria.



## 2.4 MODELO DE EVOLUCIÓN QUÍMICA DE M31

A continuación se muestran la evolución de las diferentes funciones obtenidas del modelo de EQ a partir de las ecuaciones y suposiciones mostradas en secciones anteriores.

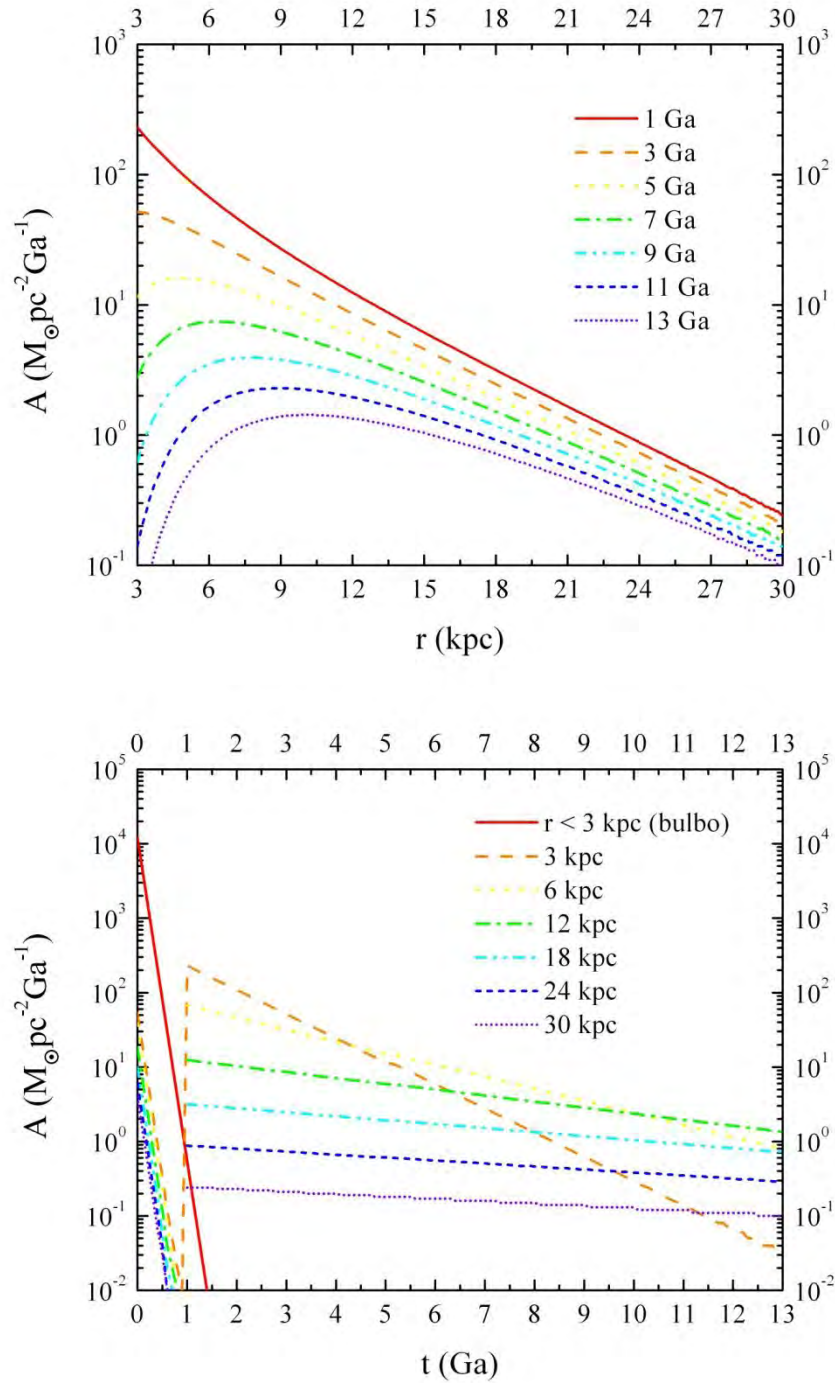
Debido a que se deseó comparar los resultados de las componentes de M31, *bulbo* y *halo-disco*, así como estudiar la continuidad entre ambas componentes a  $r = 3$  kpc, se ha proyectado el *bulbo* sobre el *disco*, dividiendo todos los valores entre el área del *bulbo* que, corresponde al *disco* galáctico. Simplemente, se calculó el área de la siguiente forma  $\pi r^2 = \pi (3 \times 10^3 \text{ pc})^2 = 2.83 \times 10^7 \text{ pc}^2$ .

Para la zona del *bulbo*, se procuró incorporar las tres componentes galácticas en las gráficas cuyas dimensiones y visualización lo permitieran.

En el primer par de gráficas de la *Figura 18*, se muestra el comportamiento de la acreción,  $A(t)$ , en función del radio y el tiempo, respectivamente. Como se observa de estas gráficas, la acreción siguió el escenario *dentro-fuera* con el que se planteó el modelo para el *disco* de M31. La acreción es más eficiente en regiones centrales y también lo fue en el pasado.

En la gráfica inferior de la *Figura 18*, se observa que al *bulbo* fue formado por una gran cantidad de material en los primeros 0.4 Ga así mismo, en la gráfica inferior de la misma figura ( $t \leq 1$  Ga), se observa que el *halo* que tuvo una acreción menor con respecto a la del *disco*.

FIGURA 18. EVOLUCIÓN DE LA ACRECIÓN DEL HALO-DISCO EN FUNCIÓN DEL RADIO Y EL TIEMPO

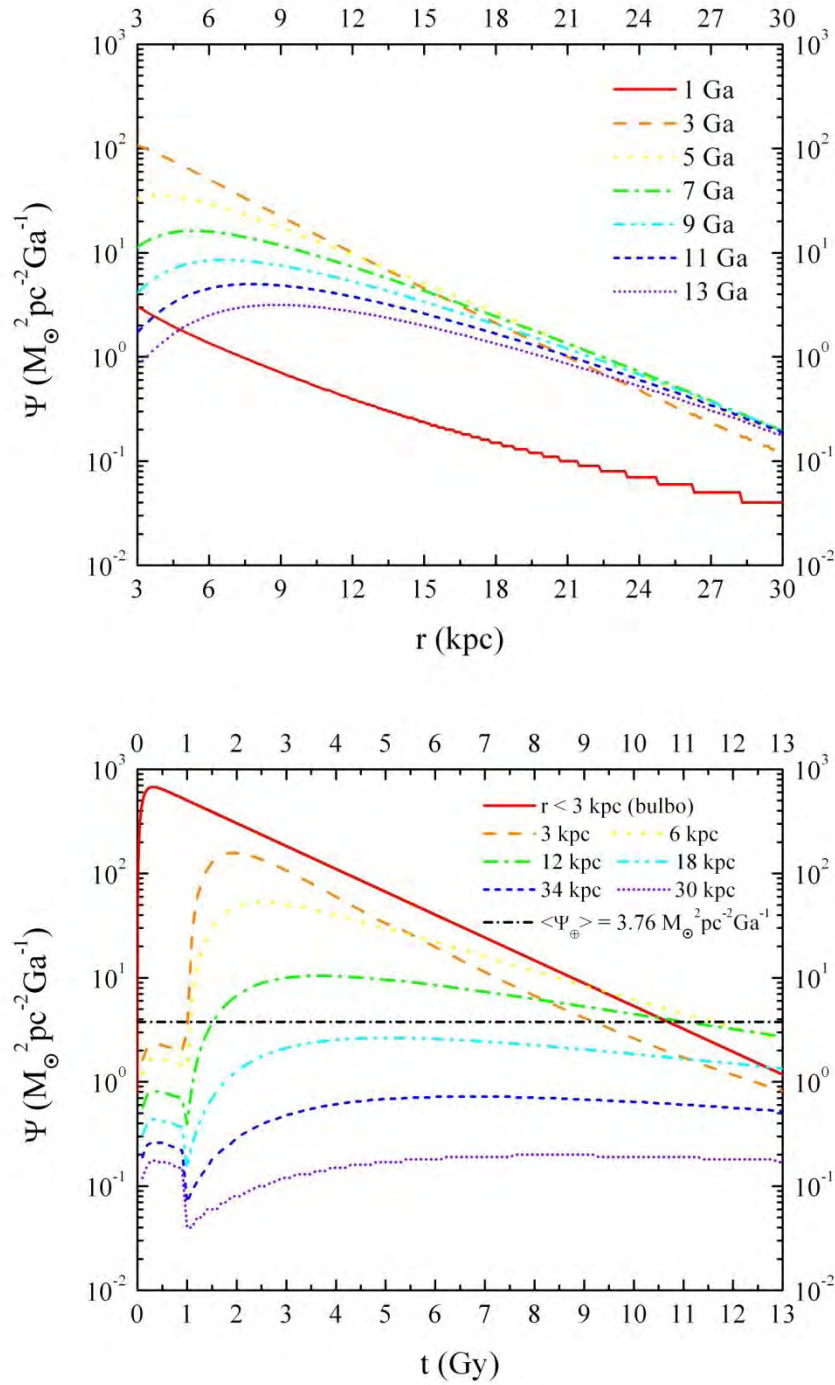


La acreción muestra un decaimiento con el radio y el tiempo, originando una formación del *halo-disco dentro-fuera*. La formación de M31 fue más eficiente, principalmente en regiones centrales que en la periferia.

A continuación, se analiza la evolución de la tasa de formación estelar, TFE, a partir de la *Figura 19* que lo ilustra en función del radio y el tiempo.



FIGURA 19. EVOLUCIÓN DE LA TASA DE FORMACIÓN ESTELAR DE EN FUNCIÓN DEL RADIO Y EL TIEMPO



M31 formó estrellas de una manera más eficiente en sus regiones internas que en las externas. La formación estelar disminuyó al paso del tiempo en zonas centrales, debido al decremento de la acreción en esas zonas.

Como se observa, en el primer giga-año de formación, el *halo* fue menos eficiente que el *disco* y este último también siguió el escenario *dentro-fuera* con el que se planteó el modelo (ver gráfica superior de la *Figura 19*).

Por otro lado, en la gráfica inferior de la *Figura 19*, se observa que al *bulbo* fue altamente eficiente para formar estrellas en los primeros 0.4 Ga. A tiempos menores a un giga-año, se observa la presencia del *halo* que tuvo una eficiencia menor con respecto a la del *disco*. Así mismo, la formación estelar fue disminuyendo conforme fue ocurriendo la evolución. Como dato adicional de la gráfica inferior de la *Figura 19*, se muestra la línea horizontal negra que representa al promedio de la integral de 8.5 a 16 Ga de la TFE de la VL, valor que se detalla en la *sección 3.1.1.2*.

A continuación, se analiza la distribución radial de densidad superficial de la masa total,  $\Sigma_T$ , apoyándose de la *Figura 20*. Como se observa, la materia fue acumulándose con el paso del tiempo y existe mayor cantidad en regiones centrales que en la periferia, lo cual fue consistente con el escenario *dentro-fuera*. En la gráfica inferior de la misma *Figura 20*, se muestra que la acumulación de materia es mayor en regiones internas que en externas. Así mismo, la materia se ha mantenido más o menos constante en los últimos 7 Ga para las regiones centrales. Las regiones externas no han sufrido cambios drásticos en ningún momento de la evolución. Como se nota en la figura, en el primer giga-año de la evolución, el *halo* no contribuyó con una cantidad significativa de materia.

La distribución radial de la densidad superficial de la masa de gas,  $\Sigma_{gas}$ , es mostrada a continuación utilizando las gráficas de la *Figura 21*, en función del radio. El escenario de formación *dentro-fuera* refleja la diferencia entre regiones centrales y regiones periféricas. Al tiempo actual, 13 Ga, se reproducen los valores observados principalmente a  $r < 9$  kpc (ver *Figura 14*). El gran aumento en  $\Sigma_{gas}$  entre 1 y 3 Ga se debe a la cantidad de material acretado al comenzar la formación del *disco* (ver *Figura 18*). El gas no fue acumulándose con el paso del tiempo ya que este fue consumiéndose para formar estrellas (ver *Figura 22*) según la TFE estudiada en la *Figura 20*.

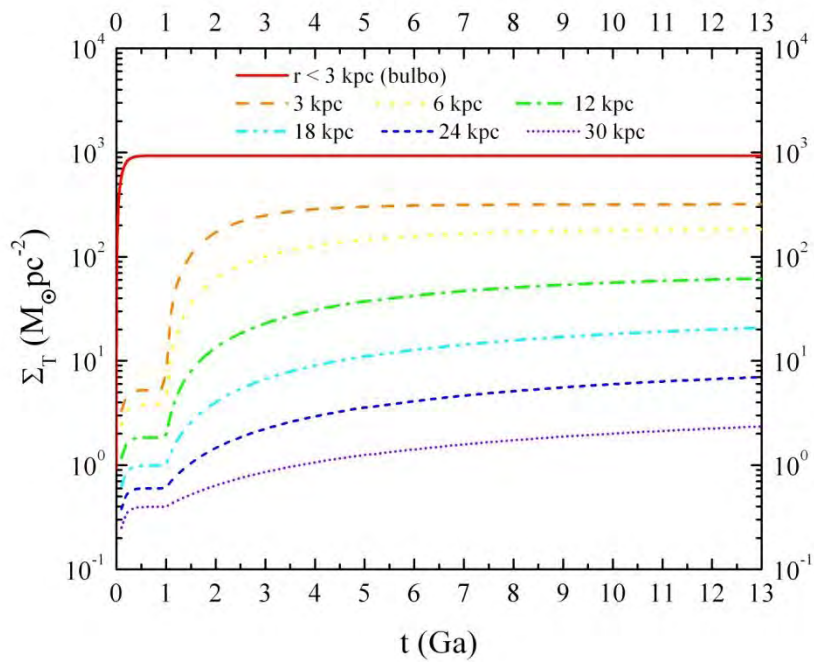
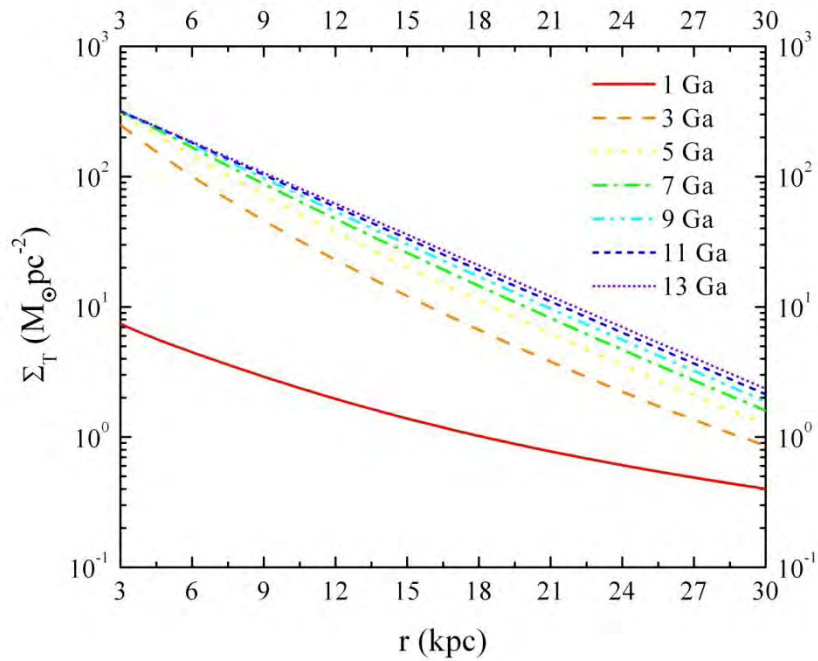
En la gráfica inferior de la *Figura 21*, se observa que la cantidad de gas que el *bulbo* recibió en los primeros 0.5 Ga, fue consumido de tal forma que desde los últimos 5 Ga, esta componente galáctica carece de gas ya que fue altamente eficiente al producir estrellas del material que tuvo debido a la rápida acreción de material. También, se muestra de mejor forma que la acumulación de gas fue mayor en regiones internas que en externas del *disco* debido al escenario *dentro-fuera* y luego, se fue consumiendo por la formación estelar y la falta de acreción (ver *Figuras 14 y 18*). En el primer giga-año de la evolución, el *halo* no contribuyó con una cantidad significativa de gas.

La distribución radial de la densidad superficial de la masa de estrellas,  $\Sigma_*$ , es examinada apoyándose de las gráficas de la *Figura 22*, donde se muestra en función del tiempo. El escenario de formación *dentro-fuera* y la TFE determinaron la cantidad de estrellas formadas en el *disco* en función del radio. En el primer giga-año, la cantidad de estrellas que se formaron en el *halo*, no fue relevante a comparación de giga-años posteriores, así mismo, desde alrededor de los 8 Ga, el monto de estrellas formadas se ha mantenido relativamente constante debido a la falta de acreción, es decir ya no recibe material y por lo tanto, no tiene más material de donde formar estrellas (ver *Figura 21*).

En la gráfica inferior de la *Figura 22*, se observa que la cantidad de estrellas que el *bulbo* formó se ha mantenido relativamente inmutable desde los primeros 0.5 Ga, llegando a una cantidad similar a lo que se observa actualmente,  $883 M_{\odot} \text{pc}^{-2}$  (i.e.  $2.5 \times 10^{10} M_{\odot} / 2.83 \times 10^7$

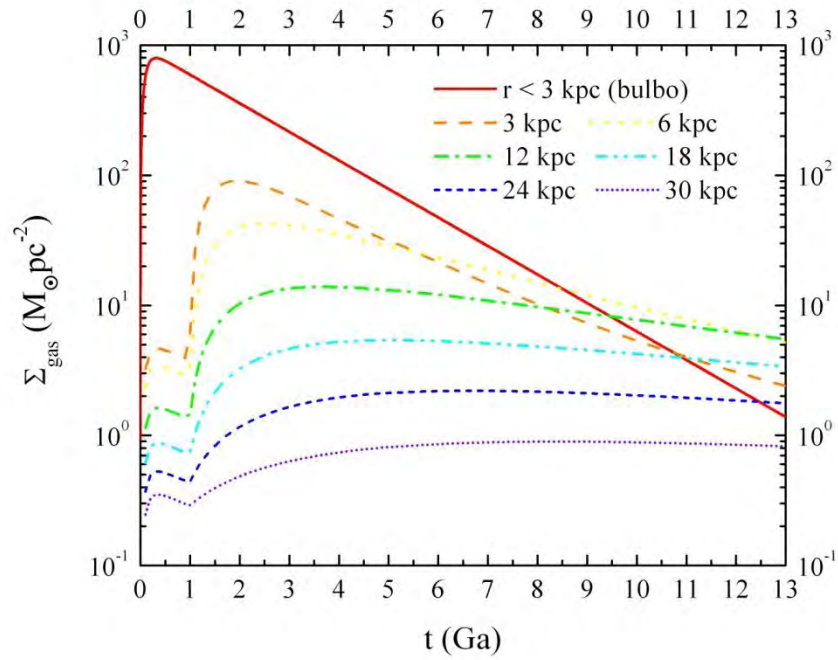
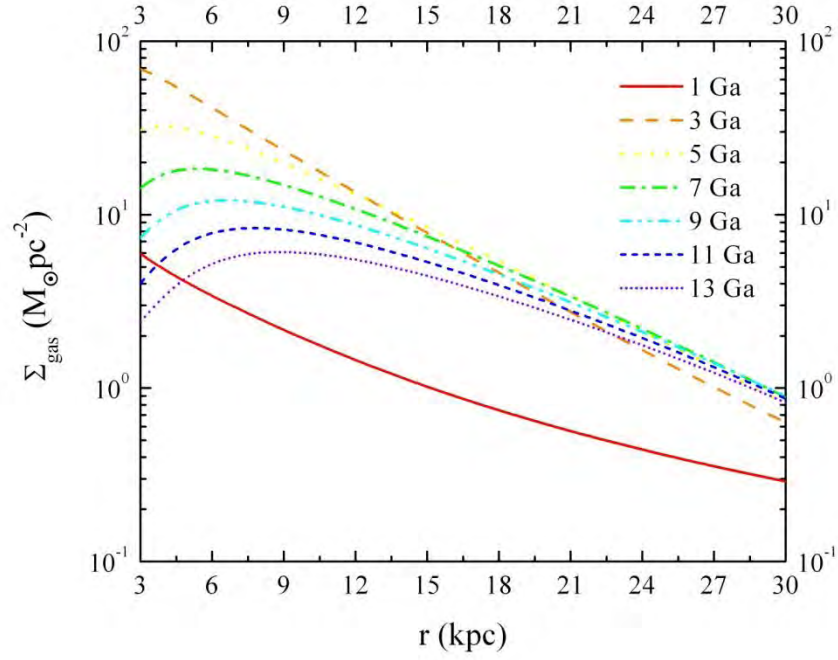
$\text{pc}^2$ ) (Widrow, Perrett, & Suandu, 2003). También se muestra de mejor forma que la acumulación de estrellas fue mayor en regiones internas que en externas del *disco*. El *halo* no contribuyó con una cantidad significativa de estrellas durante el primer giga-año de formación galáctica.

FIGURA 20. EVOLUCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN RADIAL DE DENSIDAD SUPERFICIAL DE MASA TOTAL



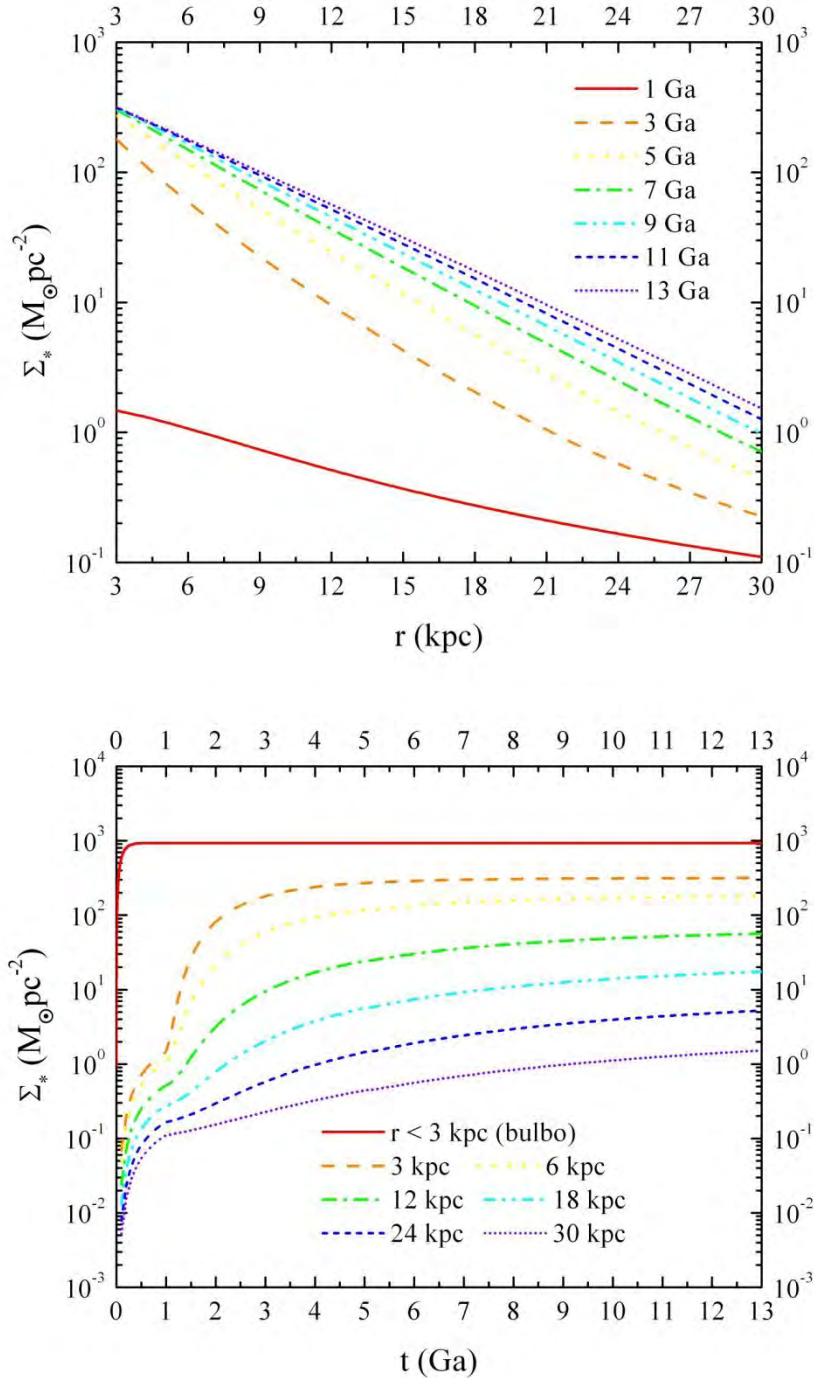
La cantidad de material de M31 fue aumentando con el tiempo, según la forma de la acreción y fue más eficiente en regiones centrales.

FIGURA 21. EVOLUCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN RADIAL DE LA DENSIDAD SUPERFICIAL DE MASA DE GAS



La cantidad de gas de M31 fue disminuyendo con el tiempo, conforme se fueron formando las estrellas. La contribución del *halo*, en el primer giga-año no fue significativa.

FIGURA 22. EVOLUCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN RADIAL DE DENSIDAD SUPERFICIAL DE MASA DE ESTRELLAS

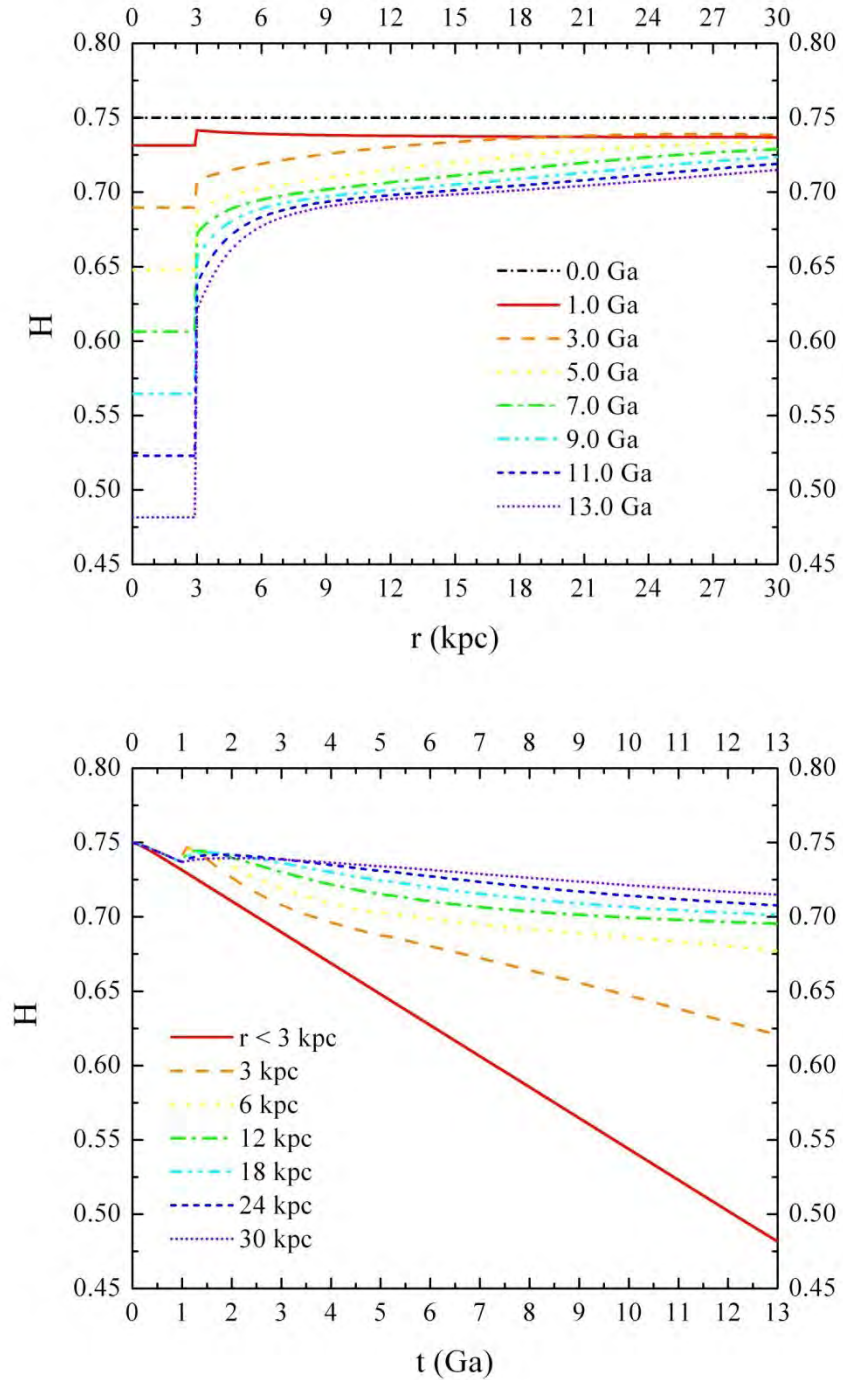


La cantidad de estrellas del *disco* de M31 aumentó con el tiempo, según la tasa de formación estelar que fue más eficiente en regiones centrales.

A continuación, se presentan las distribuciones radiales de las abundancias de hidrógeno (Figura 23), de oxígeno (Figura 24), de metales (Figura 25), de [O/H] (Figura 26) y  $\log Z/Z_\odot$  (Figura 27). En las gráficas en función del radio, se presenta la evolución del *bulbo* ( $r < 3$

kpc) y con ello se muestra la diferencia de comportamiento entre el *bulbo* y el *halo-disco*, que sigue el escenario de formación *dentro-fuera*.

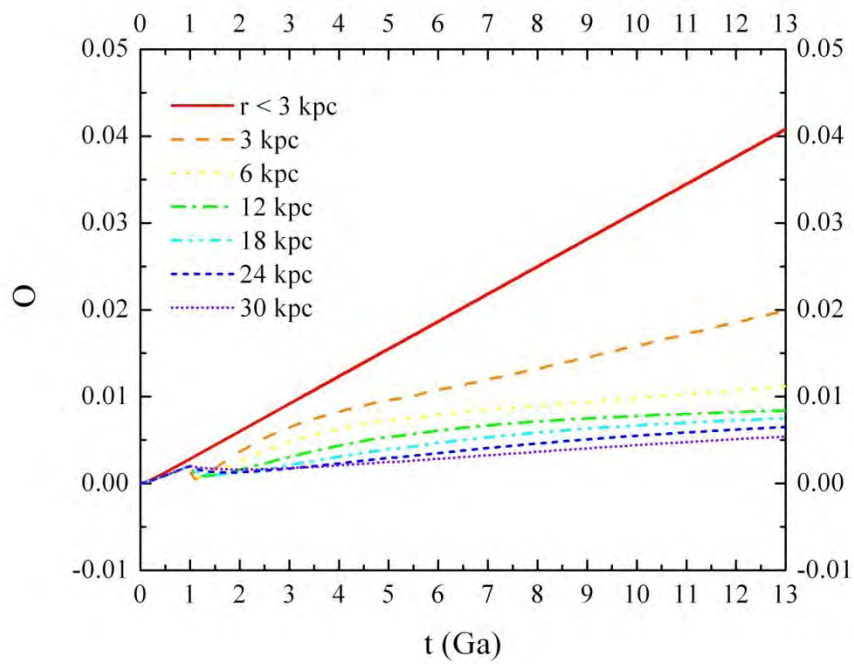
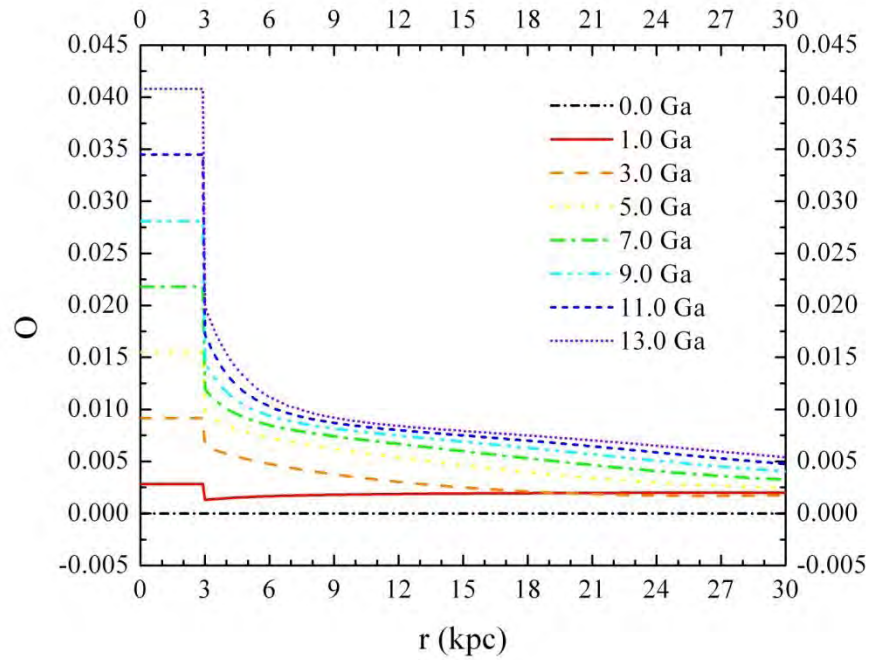
**FIGURA 23. EVOLUCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN RADIAL DE ABUNDANCIA DE HIDRÓGENO**



El consumo del hidrógeno para formar elementos químicos más pesados es mayor en regiones internas que en externas y la cantidad del mismo fue disminuyendo con el tiempo.

El hidrógeno sigue un comportamiento similar a aquél que presenta la  $\Sigma_{gas}$ , i.e. el consumo de hidrógeno fue mayor en partes internas que en externas y la cantidad del mismo ha disminuido (inicialmente 0.75 hasta  $\sim 0.48$  en el *bulbo* y  $\sim 0.63$  en regiones internas del *disco*) con el paso del tiempo.

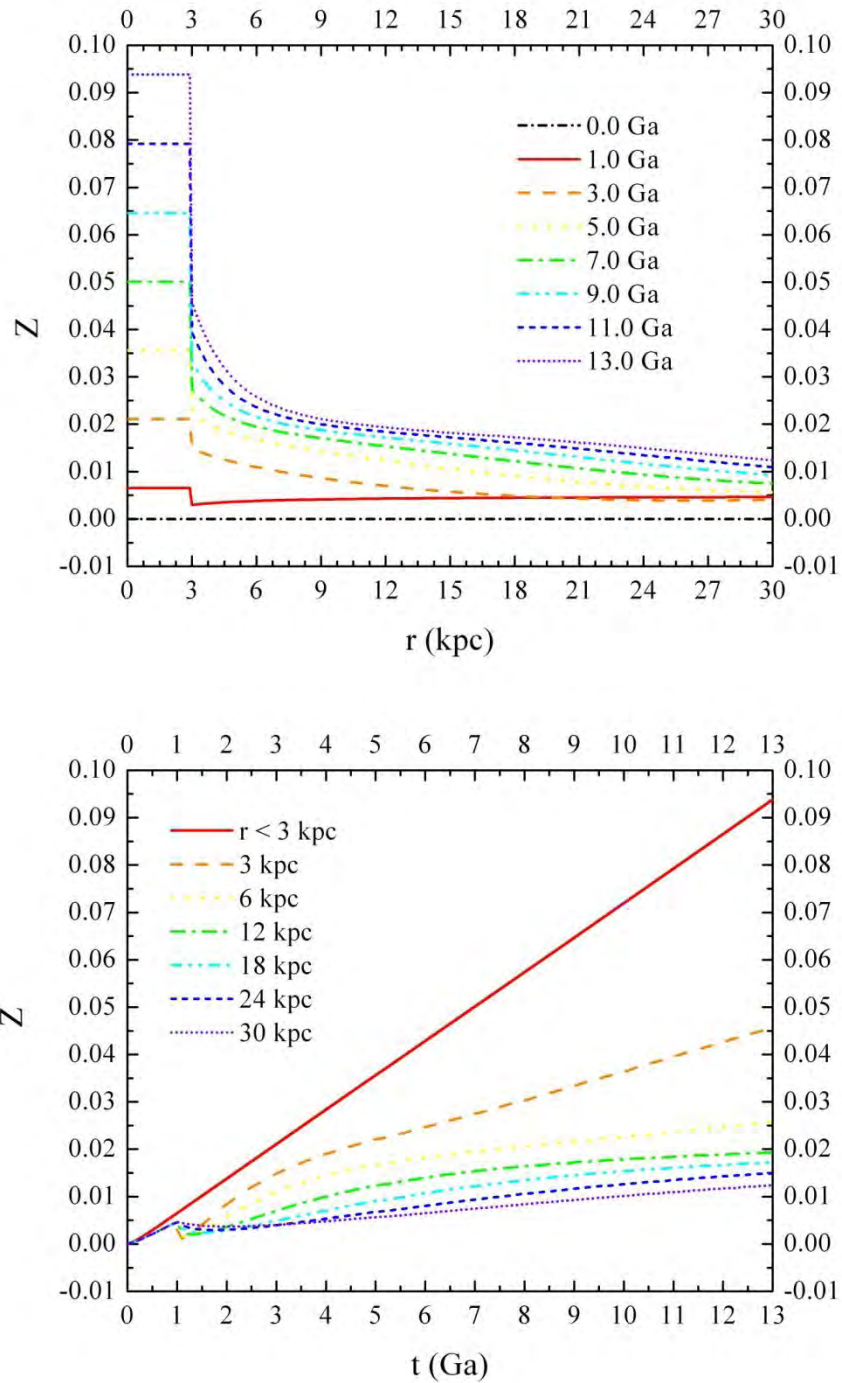
FIGURA 24. EVOLUCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN RADIAL DE OXÍGENO



La producción de oxígeno, es mayor en regiones internas que en externas y fue acumulándose con el tiempo.

Los otros elementos químicos (ver Figuras 27 y 28) se han producido más eficientemente en regiones centrales que en la periferia y su abundancia se ha incrementado (inicialmente 0.00 tanto para el oxígeno como para los metales, hasta  $\sim 0.04$  en el *bulbo* y  $\sim 0.02$  en regiones internas del *disco* para el oxígeno y hasta  $\sim 0.95$  en el *bulbo* y  $\sim 0.45$  en regiones internas del *disco* para los metales) en función del tiempo.

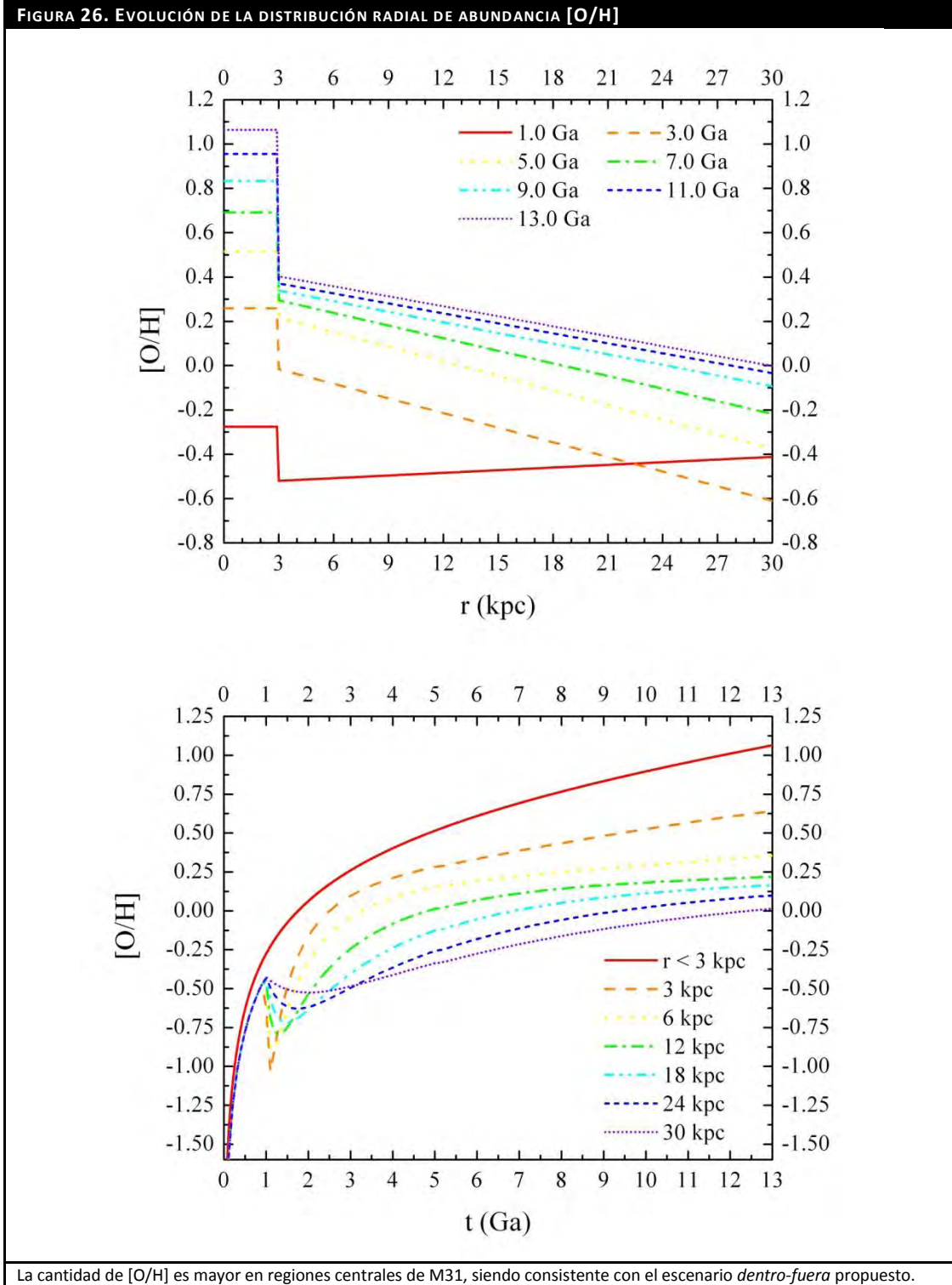
FIGURA 25. EVOLUCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN RADIAL DE ABUNDANCIA DE Z



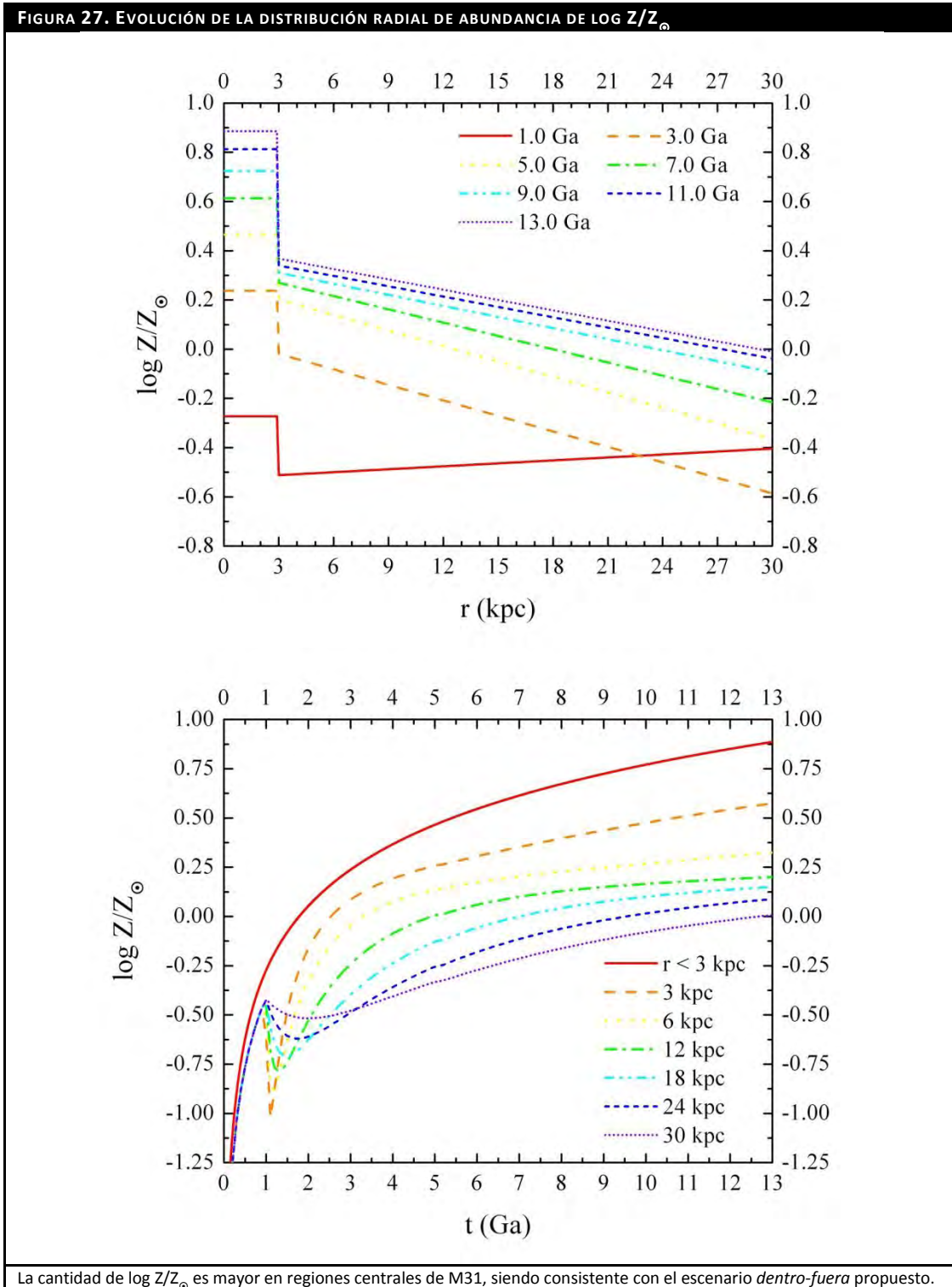
La cantidad de elementos químicos, distintos al H y He, fue aumentando con el tiempo.



Como se ha planteado previamente, el oxígeno es el elemento químico más abundante que se encuentra representado por Z y debido a que una de las restricciones observacionales más importante es la abundancia de este mismo elemento, fue necesario extraer del modelo de EQ su comportamiento en función del radio y el tiempo.



Los datos del  $\log Z/Z_{\odot}$  son importantes para el estudio de Zona de Habitabilidad Galáctica ya que los únicos parámetros químicos que existen de formación planetaria están en función de  $\log Z/Z_{\odot}$ .



### 3. ZONA DE HABITABILIDAD GALÁCTICA DE LA GALAXIA DE ANDRÓMEDA

Como se ha mencionado, la Zona de Habitabilidad Galáctica (ZHG) está definida como la región con suficiente abundancia de elementos químicos para formar sistemas planetarios donde planetas tipo Tierra pueden ser encontrados y pueden ser capaces de sostener vida (González, Brownlee, & Ward, 2001; Lineweaver, 2001; Lineweaver, Fenner, & Gibson, 2004).

Un planeta tipo Tierra está caracterizado por la presencia de un campo electromagnético, placas tectónicas, agua, atmósfera y compuestos que den paso a la creación y evolución de vida (Bada, 2004; Hazen, et al., 2002; Orgel, 1998).

#### 3.1 RESTRICCIONES PARA LA ZONA DE HABITABILIDAD GALÁCTICA

Como se describió en la *sección 1.4*, la ZHG hace uso de varias definiciones y suposiciones tanto astrofísicas como geofísicas/biogénicas como la abundancia de metales ya que es necesaria para la formación planetaria, incluyendo planetas tipo Tierra y una ocurrencia de SN bajas para que la vida pueda desarrollarse sobre los planetas.

Utilizando la información provista por el modelo de EQ de este trabajo, sobre la distribución de Z y SN en el espacio y el tiempo, se pudo determinar que regiones en M31 cumplen con las restricciones químico-físicas y temporales condiciones para ser consideradas dentro de la ZHG. A continuación se describen dichas restricciones.

##### 3.1.1 RESTRICCIONES QUÍMICO-FÍSICAS

Las restricciones químico-físicas describen los requerimientos químicos para la formación planetaria (condiciones químicas generales, ya que como se planteó anteriormente, los procesos químicos son desconocidos) y la sobrevivencia del planeta con respecto a la ocurrencia de SN.

###### 3.1.1.1 FORMACIÓN PLANETARIA

---

Con los requisitos químicos para la formación planetaria detallados en la *sección 1.4.1.1*, se plantean dos posibles perspectivas usando los intervalos de abundancias químicas dadas por  $\log Z/Z_{\odot}$ , los cuales son:

- $-0.10 \leq \log Z/Z_{\odot} \leq +0.35$  (Lineweaver, Fenner, & Gibson, 2004)
- $-0.35 \leq \log Z/Z_{\odot} \leq +0.35$  (presente trabajo)

En ambos escenarios de formación planetaria, planetas tipo Tierra son formados así como planetas Jovianos. La diferencia entre ambos escenarios sobre la formación planetaria,

radica en la actualización de los datos de las abundancias químicas de las estrellas a las que en la actualidad se les han detectado planetas orbitando.

En la *Figura 28*, se muestran los radios galactocéntricos y tiempos (región verde) a los cuales es posible la formación planetaria que depende de la condición de metalicidad impuesta a la evolución de las abundancias químicas dadas por el modelo de EQ de M31 (ver *sección 2.4* y *Figura 27*).

La región azul representa la zona y los tiempos en los que no se puede formar un planeta debido a la baja cantidad de elementos químicos que se encuentran. La región amarilla representa la zona y los tiempos en los que tampoco se puede dar formación planetaria por poseer una alta metalicidad. En la actualidad no se han detectado estrellas que albergan planetas a esos valores altos.

Los ejes de las ordenadas en las gráficas de la *Figura 28*, representan los tiempos de la EQ que son a su vez, las edades de M31. Si se analizan hacia atrás los tiempos de estudio, se deducen las edades que tendrían los planetas formados en la actualidad. Los ejes de las abscisas representan a la distancia galactocéntrica, es decir el radio al cual se localizaría el planeta formado.

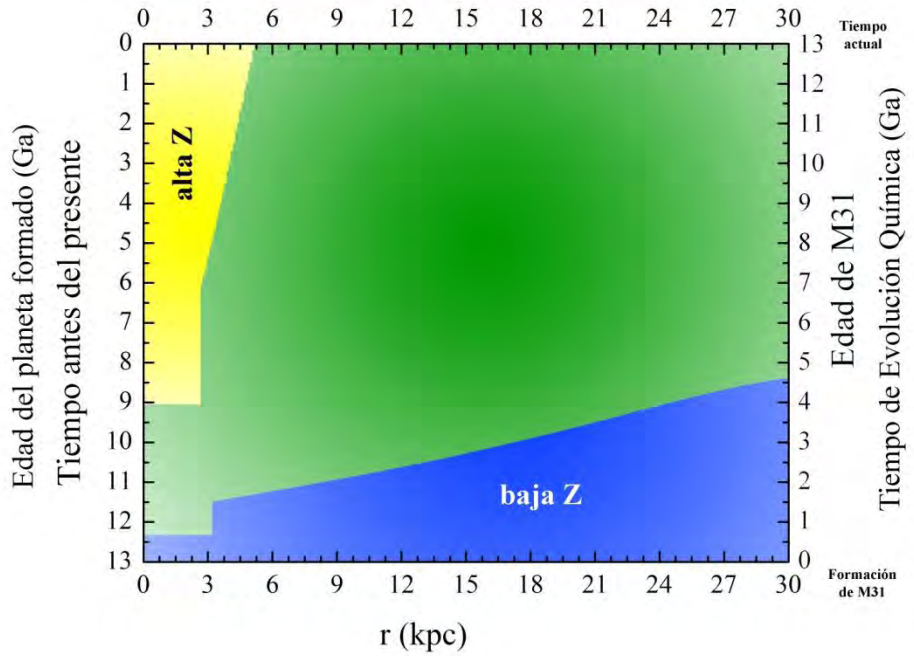
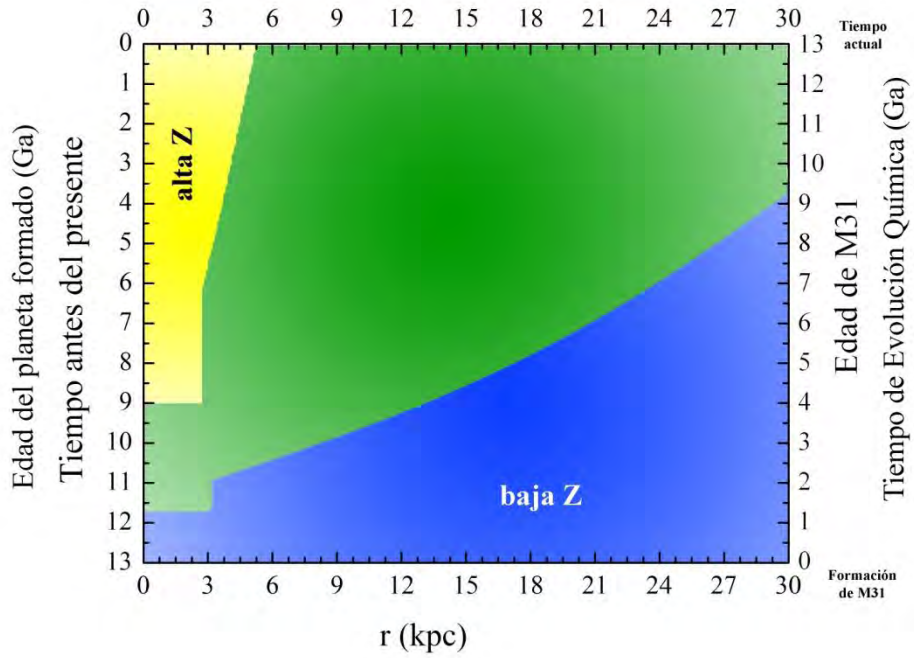
Recordando, a radios menores a 3 kpc se localiza el *bulbo*; a radios mayores a 3 kpc y tiempos menores o iguales a 1 Ga, se encuentra el *halo* y a la misma distancia pero a tiempos mayores a 1 Ga está el *disco*.

En la gráfica superior de la *Figura 28*, se muestran los radios galactocéntricos y tiempos (región verde) a los cuales es posible la formación planetaria, imponiendo la condición de metalicidad de Lineweaver *et al.* (2004) a la evolución de las abundancias químicas,  $Z(r,t)$ , dadas por el modelo de EQ de M31. En las regiones del *bulbo*, se pueden encontrar planetas después de un poco más de 1 Ga hasta 4 Ga, a tiempos posteriores la metalicidad es muy alta.

En el *disco* de la misma gráfica superior de la *Figura 31*, sólo hasta después de los 2 Ga del inicio de la formación de M31, pueden encontrarse planetas sin embargo, a partir de los 7 Ga, en regiones centrales del *disco* mismo, la metalicidad es muy alta por lo que el número de planetas que se encontraría, se reduciría. En las regiones externas del *disco*, es decir de 20 kpc en adelante, se encontrarán planetas después de los 3 Ga de EQ. En la actualidad, la formación planetaria se da desde alrededor de los 5 hasta los 30 kpc.

En la gráfica inferior de la *Figura 28*, se muestran los radios galactocéntricos y tiempos (región verde) a los cuales es posible la formación planetaria, imponiendo la condición de metalicidad propuesto en la presente investigación a la evolución de las abundancias químicas,  $Z(r,t)$ , dadas por el modelo de EQ de M31. En las regiones del *bulbo*, se pueden encontrar planetas después de un poco más de 0.5 Ga hasta 4 Ga, a tiempos posteriores la metalicidad es muy alta. En el *disco*, sólo hasta después de los 1.5 Ga del inicio de la formación de M31, pueden encontrarse planetas sin embargo, a partir de los 7 Ga, en regiones centrales del *disco* mismo, la metalicidad es muy alta por lo que el número de planetas que se encontraría, se reduciría. En las regiones externas del *disco*, es decir de 20 kpc en adelante, se encontrarán planetas después de los 6 Ga de EQ. En la actualidad, la formación planetaria se da desde alrededor de los 5 kpc hasta los 30 kpc.

FIGURA 28. REGIONES DE M31 CON FORMACIÓN PLANETARIA



Regiones y tiempos de la posible formación planetaria tomando como base las abundancias químicas dadas por el modelo de Evolución Química y los intervalos de metalicidad propuestos, es decir:  $-0.10 \leq \log Z/Z_{\odot} \leq +0.35$  de Lineweaver *et al.* (2004) en la gráfica superior y,  $-0.35 \leq \log Z/Z_{\odot} \leq +0.35$  del presente trabajo en la gráfica inferior. La región verde representa los radios y los tiempos donde y cuando se puede dar la formación planetaria. Las regiones azul y amarilla representan los radios y tiempos donde y cuando no habrá formación planetaria debido a los extremos (bajos y altos, respectivamente) en la cantidad de elementos químicos.

### 3.1.1.2 SOBREVIVENCIA DE UN PLANETA TIPO TIERRA A LA OCURRENCIA DE SUPERNOVAS

La Tierra representa el patrón de sobrevivencia a la ocurrencia de SN dado a que es el único planeta conocido con vida.

El factor de las SN es relevante debido a que en su estallido, emiten radiación de altas energías que pueden volatilizar la atmósfera y esterilizar la superficie del planeta (Lineweaver, 2001; Lineweaver, Fenner, & Gibson, 2004).

La sobrevivencia a SN está dada por el promedio temporal del número de SN por unidad de tiempo,  $\langle \xi(r,t) \rangle$ , vecinas a un sistema planetario con respecto a un múltiplo de la  $\langle \xi \rangle$  de la Tierra,  $\langle \xi_{\oplus} \rangle$ .

Las condiciones de sobrevivencia se diferencian por:

- El lapso considerado en el promedio temporal y el límite superior de la  $\langle \xi(r,t) \rangle$  que la vida resiste en unidades de  $\langle \xi_{\oplus} \rangle$  (múltiplo).
- El número de SN por unidad de tiempo,  $\xi(r,t)$ , está dada por (ver ecuación 6):

$$\xi(r,t) = \int \Psi(t - t_m) \varphi(m) dm \quad (62)$$

Usando ARI

$$\xi(r,t) = \Psi(t) \int \varphi(m) dm \quad (63)$$

Los progenitores de una SN son las estrellas de masas mayores a  $8 M_{\odot}$  por lo tanto:

$$\xi(r,t) = \Psi(t) \int_{8M_{\odot}}^{80M_{\odot}} \varphi(m) dm \quad (64)$$

Suponiendo la FMI del modelo de EQ (ver sección 2.1), de manera que:

$$\xi(r,t) = \Psi(t) (0.05 M_{\odot}^{-1}) \quad (65)$$

Y el promedio temporal de  $R_{SN}$  fue igual a:

$$\langle \xi(r,t) \rangle = \frac{(0.05 M_{\odot}^{-1}) \left( \int_t^{t_{\max}} \Psi(r,t) dt \right)}{(t_{\max} - t)} \quad (66)$$

La  $\langle \xi_{\oplus} \rangle$  es el promedio temporal del número de SN que han estallado en la vecindad solar durante la vida de la Tierra (4.5 Ga). Debido a que la vecindad solar es un círculo concéntrico al Sol (el cual está ubicado a 8 kpc del centro galáctico de la VL),  $\xi_{\oplus}$  fue calculada a partir de la TFE inferida por un modelo de EQ de la VL (Carigi, Peimbert, Esteban, & García-Rojas, 2005).

$$\langle \xi_{\oplus} \rangle = \frac{(0.05 M_{\odot}^{-1}) \left( \int_{8.5\text{Ga}}^{13.0\text{Ga}} \Psi(8\text{kpc}, t) dt \right)}{4.5\text{Ga}} = 0.20 \text{Ga}^{-1} \text{pc}^{-2} \quad (67)$$

La sobrevivencia de un planeta con respecto a la ocurrencia de SN fue calculada de tres formas distintas que son explicadas a continuación.

### 3.1.1.2.1 SOBREVIVENCIA DE ACUERDO A LINEWEAVER ET AL. (2004)

---

La primera fue tomada en base al cálculo de Lineweaver *et al.* (2004), la cual supone que el planeta sobrevive si  $\langle \xi(r,t) \rangle$  durante los primeros 4.5 Ga de la vida del planeta, es menor o igual que el doble de la  $\langle \xi_{\oplus} \rangle$ , por lo tanto:

$$\langle \xi(r,t) \rangle = \frac{(0.05M_{\odot}^{-1}) \left( \int_t^{t+4.5\text{Ga}} \Psi(t) dt \right)}{4.5\text{Ga}} \quad (68)$$

$$\frac{(0.05M_{\odot}^{-1}) \int_t^{t+4.5\text{Ga}} \Psi(t) dt}{4.5\text{Ga} \langle \xi_{\oplus} \rangle} \leq 2.0 \quad (69)$$

En la *Figura 29*, se muestra la evolución, en función del radio y el tiempo, del riesgo a SN que ha tenido M31 durante su EQ de acuerdo a lo propuesto por Lineweaver *et al.* (2004). De la gráfica superior de la *Figura 29*, se observa que conforme transcurre el tiempo. El riesgo va disminuyendo y es mayor en regiones centrales que en la periferia, tal y como ocurre con la TFE ya que el riesgo es proporcional a esta tasa.

Como se observa de la gráfica inferior de la misma *Figura 29*, se confirma que en las regiones centrales el riesgo es mayor y éste va disminuyendo en regiones externas. Sin embargo, sólo en el *bulbo* existe un riesgo 2 veces mayor que el que ha tenido la Tierra en el *disco* de la VL<sup>27</sup> utilizando la consideración de Lineweaver *et al.* (2004).

La limitante de esta condición es que si hay una densidad de SN importante, i.e. considerablemente mayor que la  $\langle \xi_{\oplus} \rangle$ , después de los primeros 4.5 Ga del planeta, ésta pasa desapercibida y por lo tanto se observan más planetas sobrevivientes de los que realmente hay.

### 3.1.1.2.2 SOBREVIVENCIA DURANTE TODA LA VIDA DEL PLANETA

---

La segunda forma de cálculo de la sobrevivencia a la ocurrencia de SN fue tomada en base a la suposición de que el planeta sobrevive si  $\langle \xi(r,t) \rangle$  durante toda la vida del planeta (13 Ga es la edad de la galaxia), es menor o igual que la  $\langle \xi_{\oplus} \rangle$ , por lo tanto:

$$\langle \xi(r,t) \rangle = \frac{(0.05M_{\odot}^{-1}) \left( \int_t^{13\text{Ga}} \Psi(t) dt \right)}{(13\text{Ga} - t)} \quad (70)$$

---

<sup>27</sup> El estudio de Lineweaver *et al.* (2004) sólo se enfocó en el *disco* de la VL.

$$\frac{(0.05M_{\odot}^{-1})\left(\int_t^{13\text{Ga}} \Psi(t)dt\right)}{(13\text{Ga} - t)\langle\xi_{\oplus}\rangle} \leq 1.0 \quad (71)$$

En la *Figura 30*, se muestra la evolución, en función del radio y el tiempo, del riesgo a SN que ha tenido M31 durante su EQ de acuerdo a lo propuesto en este trabajo por la *ecuación 71*. De la gráfica superior de la *Figura 30*, se observa que conforme transcurre el tiempo, el riesgo va disminuyendo y es mayor en regiones centrales que en la periferia, tal y como ocurre con la TFE ya que el riesgo es proporcional a esta tasa debido a que de la formación estelar se sabe el número de estrellas creadas y que son progenitoras de SN.

Como se observa en la gráfica inferior de la misma *Figura 30*, se confirma que en las regiones centrales el riesgo es mayor y éste va disminuyendo en regiones externas debido al escenario *dentro-fuera*. En el *bulbo*, en sus primeros 5 Ga de formación, sí existe un riesgo mayor que el que ya ha tenido la Tierra en el *disco* de la VL. El factor de sobrevivencia a SN sigue siendo un promedio temporal de la ocurrencia de estos estallidos y la comparación sigue siendo la misma, la cual es lo que ha pasado la Tierra en su existencia, es decir los últimos ~4.5 Ga de la historia de la vecindad solar.

La limitante de esta condición es que al promediar los eventos de SN durante toda la vida del planeta, se plantea la suposición de que la vida puede recuperarse y/o resurgir en el planeta que haya tenido un estallido cercano.

### 3.1.1.2.3 SOBREVIVENCIA INSTANTÁNEA

---

La tercera forma de cálculo de la sobrevivencia a la ocurrencia de SN fue tomada en base a la suposición de que el planeta sobrevive si  $\langle\xi(r,t)\rangle$  es menor o igual que la  $\langle\xi_{\oplus}\rangle$  en todos los instantes de la existencia del planeta, por lo tanto:

$$\langle\xi(r,t)\rangle = \frac{(0.05M_{\odot}^{-1})\left(\int_t^{t_{\max}=t+\Delta t} \Psi(t)dt\right)}{(t_{\max} - t)} \quad (72)$$

$$\frac{(0.05M_{\odot}^{-1})(\Psi(r,t))}{\langle\xi_{\oplus}\rangle} \leq 1.0 \quad (73)$$

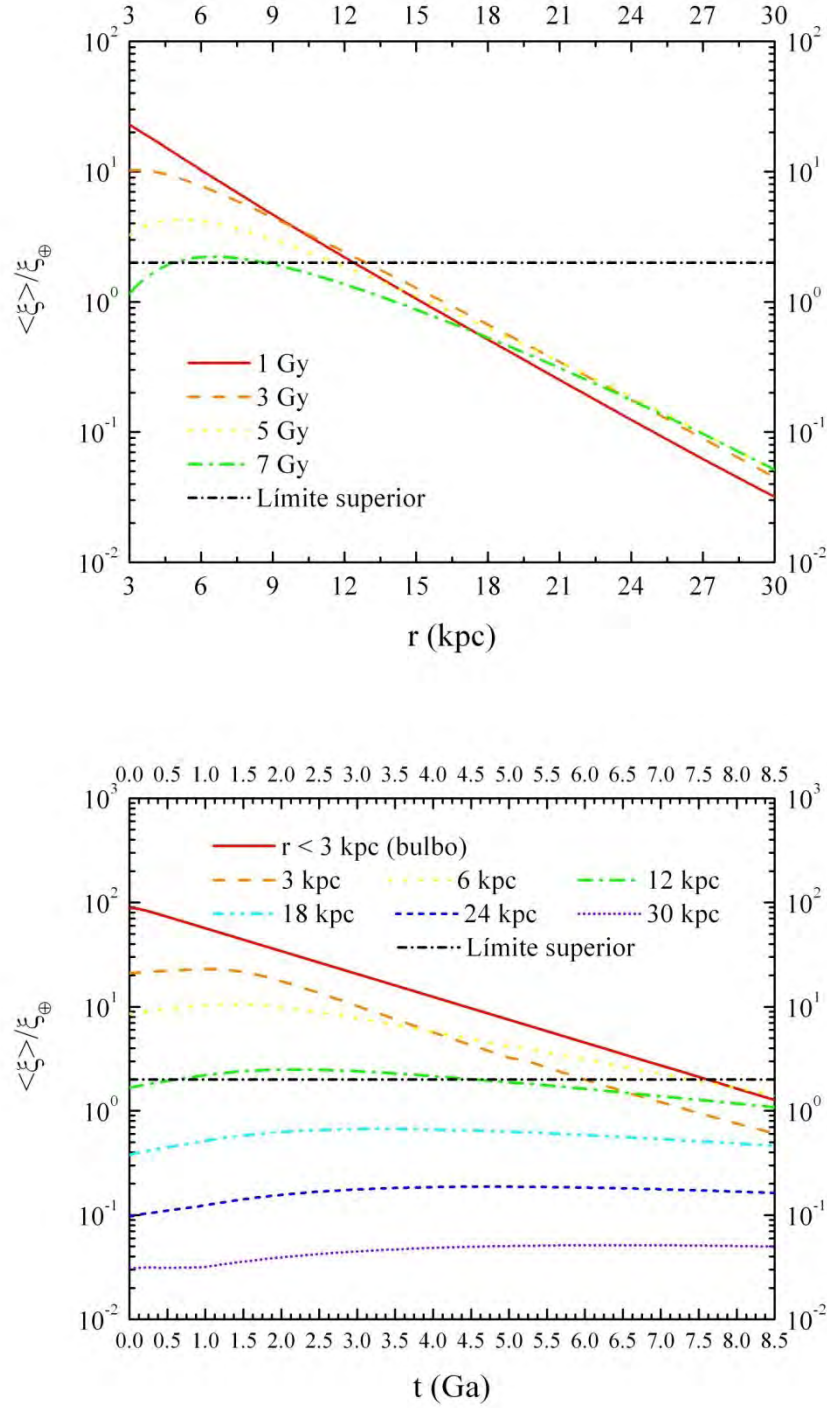
En la *Figura 31*, se muestra la evolución, en función del radio y el tiempo, del riesgo a SN que ha tenido M31 durante su EQ de acuerdo a lo propuesto en este trabajo por la *ecuación 73*. De la gráfica superior de la *Figura 31*, se observa que conforme transcurre el tiempo, el riesgo va disminuyendo y es mayor en regiones centrales que en la periferia, tal y como ocurre con la TFE ya que el riesgo es proporcional a esta tasa debido a que de la formación estelar se sabe el número de estrellas creadas y que son progenitoras de SN.

Como se observa de la gráfica inferior de la misma *Figura 31*, se confirma que en las regiones centrales el riesgo es mayor y éste va disminuyendo en regiones externas debido al escenario *dentro-fuera*. En el *bulbo* en sus primeros 8 Ga de formación, sí existe un riesgo mayor que el que ya tenido la Tierra en el *disco* de la VL utilizando la *ecuación 73*.



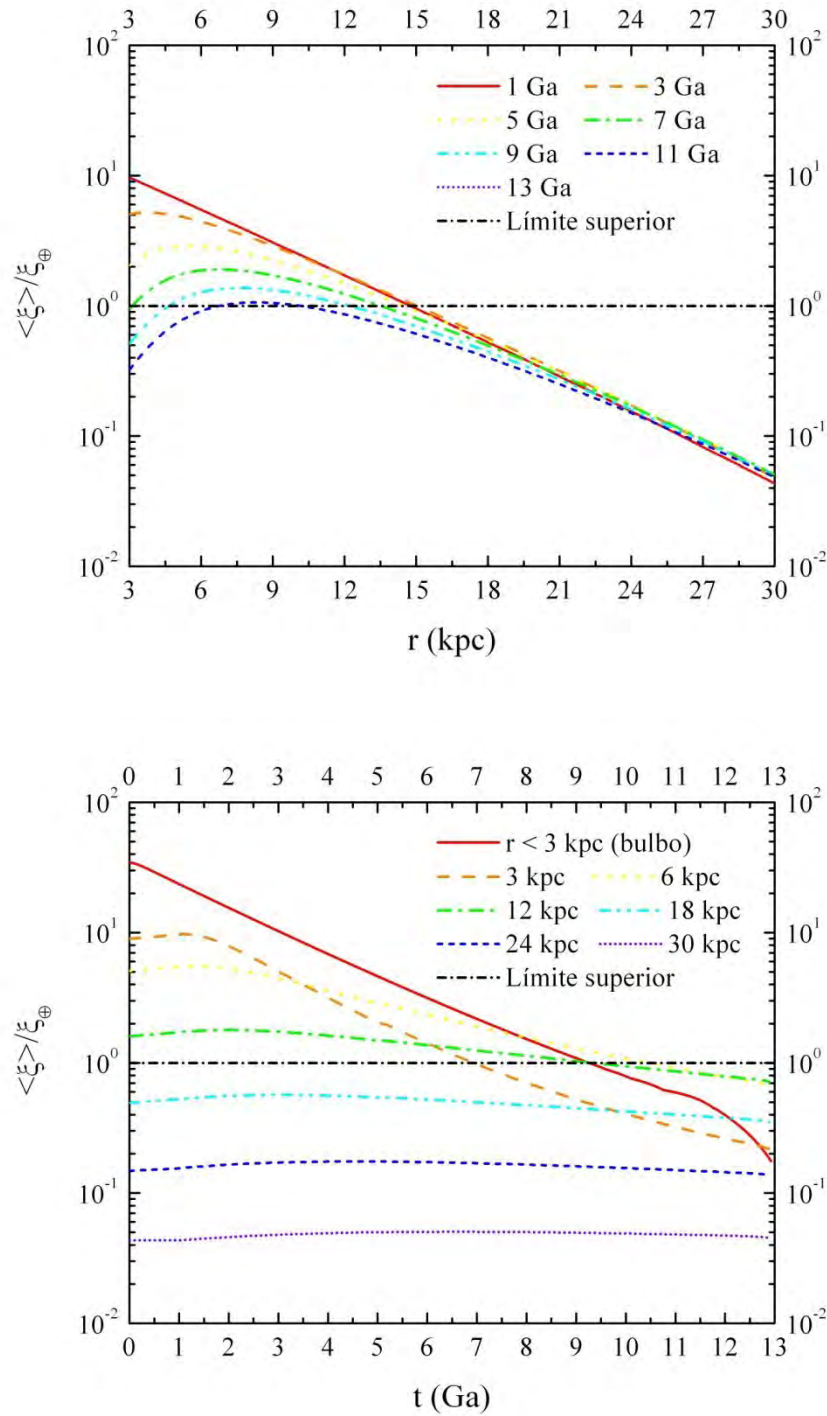
La limitante de esta condición es que se plantea la suposición de que la vida es frágil y no puede recuperarse y/o resurgir en el planeta que haya tenido un estallido cercano.

**FIGURA 29. EVOLUCIÓN DEL RIESGO A SN DE M31 DE ACUERDO A LA CONDICIÓN DE LINEWEAVER ET AL. (2004)**



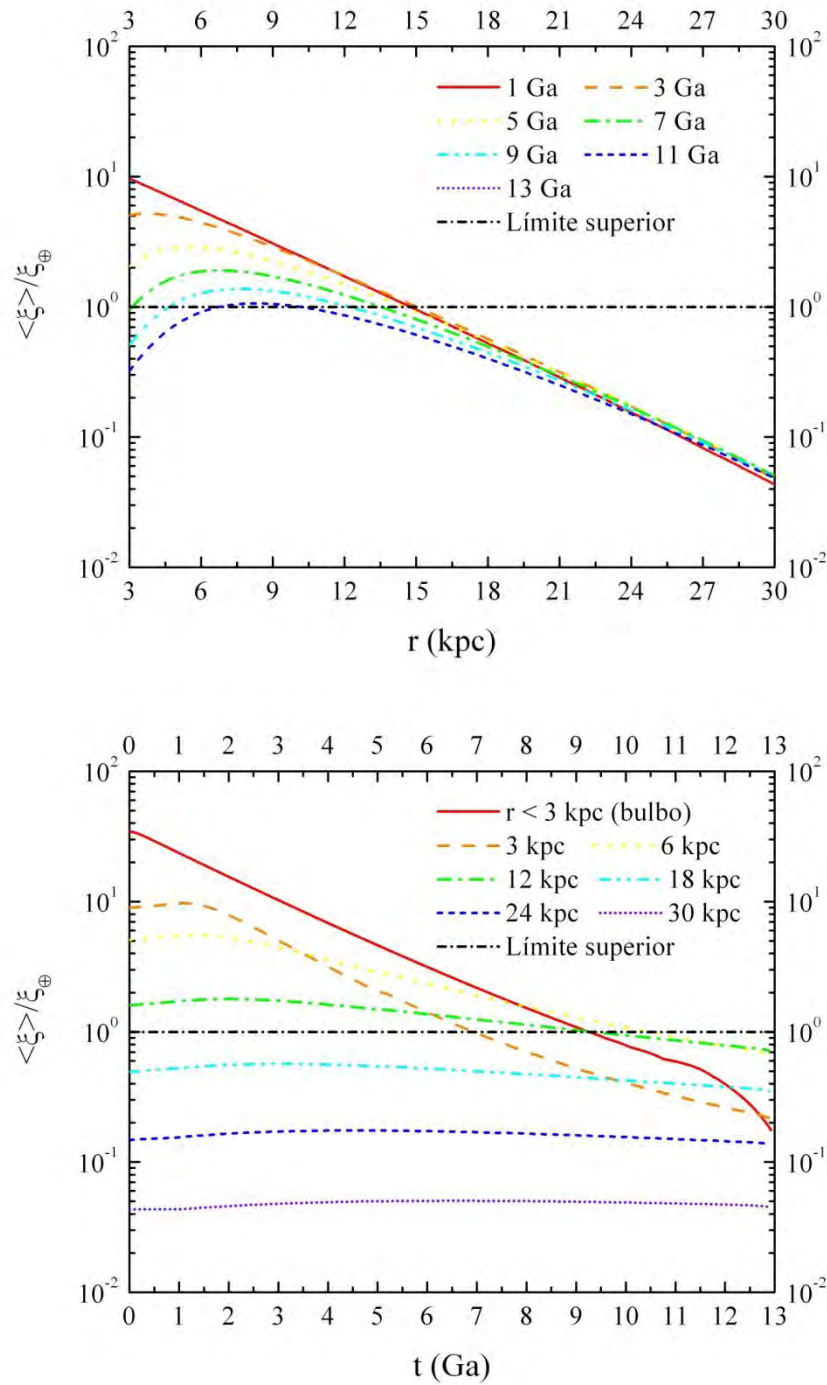
Conforme transcurre el tiempo, el riesgo va disminuyendo y es mayor en regiones centrales que en la periferia. La línea horizontal representa el límite donde  $\langle \xi(r,t) \rangle = 2 \langle \xi_{\oplus} \rangle$ .

FIGURA 30. EVOLUCIÓN DEL RIESGO A SN DE M31 DE ACUERDO A CONDICIONES DE SOBREVIVENCIA EN LA VIDA DEL PLANETA



Conforme transcurre el tiempo, el riesgo va disminuyendo y es mayor en regiones centrales que en la periferia. La línea horizontal representa el límite donde  $\langle \xi(r,t) \rangle = \langle \xi_{\oplus} \rangle$ .

**FIGURA 31. EVOLUCIÓN DEL RIESGO A SN DE M31 DE ACUERDO A CONDICIONES DE SOBREVIVENCIA INSTANTÁNEA**



Conforme transcurre el tiempo, el riesgo va disminuyendo y es mayor en regiones centrales que en la periferia. La línea horizontal representa el límite donde  $\langle \xi(r,t) \rangle = \xi_{\oplus}$ .

### 3.1.1.3 REGIONES Y TIEMPOS DE FORMACIÓN PLANETARIA + SOBREVIVENCIA A LA OCURRENCIA DE SN

Utilizando los resultados del modelo de EQ de M31, para la formación planetaria detallados en la *sección 3.1.1.1*, y cada uno de los tres escenarios de supervivencia a SN de la

sección 3.1.1.2, se muestran a continuación las regiones obtenidas en las Figuras 32 y 33 en donde se muestran los radios galactocéntricos y tiempos (región verde) a los cuales es posible la formación planetaria que dependen de la condición de metalicidad impuesta. También se muestran los radios galactocéntricos y tiempos (región roja) a los cuales los planetas formados sobrevivieron a la ocurrencia de SN dependiendo del escenario impuesto al modelo de EQ de M31. Recordando, la región azul representa la zona y los tiempos en los que no se puede formar un planeta debido a la baja cantidad de elementos químicos que se encuentran. La región amarilla representa la zona y los tiempos en los que tampoco se puede dar formación planetaria por poseer una alta metalicidad. En la actualidad no se han detectado estrellas que albergan planetas a esos valores altos.

Los ejes de las ordenadas en las gráficas de las Figura 32 y 33, representan los tiempos de la EQ que son a su vez, las edades de M31. Si se analizan hacia atrás los tiempos de estudio, se deducen las edades que tendrían los planetas formados en la actualidad. Los ejes de las abscisas representan a la distancia galactocéntrica, es decir el radio al cual se localizaría el planeta formado. Así mismo, a radios menores a 3 kpc se localiza el *bulbo*; a radios mayores a 3 kpc y tiempos menores o iguales a 1 Ga, se encuentra el *halo* y a la misma distancia pero a tiempos mayores a 1 Ga está el *disco*.

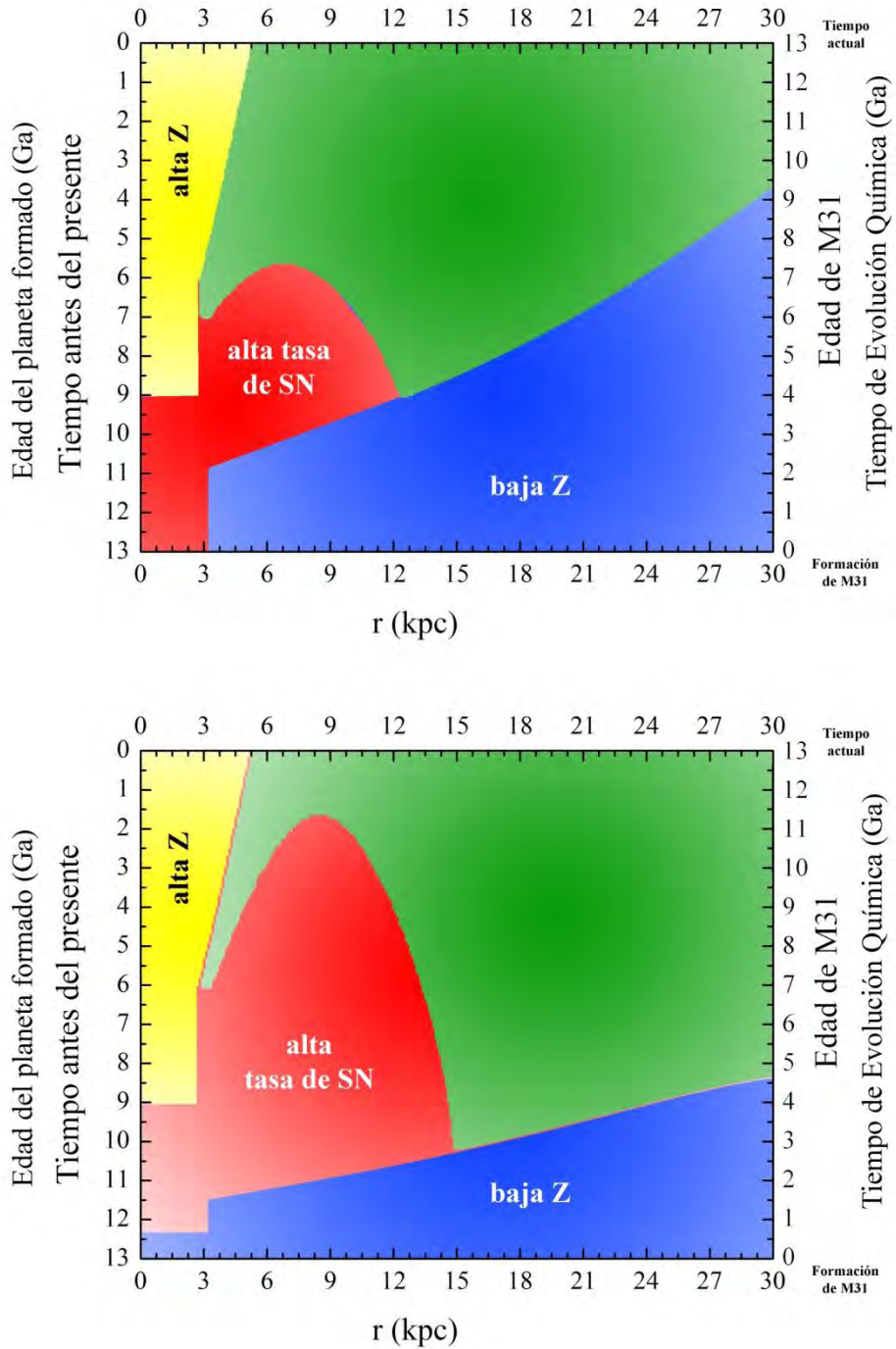
En la gráfica superior de la Figura 32, se muestran las regiones en donde los planetas formados tuvieron una  $\langle \xi(r,t) \rangle$  mayor que dos veces  $\langle \xi_{\oplus} \rangle$  en los primeros 4.5 Ga de vida del planeta en base a lo propuesto por Lineweaver *et al.* (2004). Como se puede observar, el factor de sobrevivencia propuesto por los autores es un factor relevante solamente en la zona del *bulbo* de M31. En toda la región del *disco* de la misma gráfica, después de los 2 Ga del inicio de la formación de M31, pueden encontrarse planetas que sobreviven a esta condición de SN.

En la gráfica inferior de la Figura 32, se muestran las regiones en donde los planetas formados tuvieron una  $\langle \xi(r,t) \rangle$  mayor que  $\langle \xi_{\oplus} \rangle$  en toda la vida del planeta en base a lo propuesto en este trabajo por la ecuación 71. Como se puede observar el factor de sobrevivencia propuesto, es un factor relevante sólo en los primeros giga-años de la EQ de la M31 y en la región del *bulbo*, así como también en zonas centrales del *disco* y solamente, después de 11 Ga de formación, el factor de sobrevivencia a SN propuesto deja de ser relevante en el *disco*.

En ambas gráficas de la Figura 32, la región con una alta ocurrencia de SN que no permitiría la sobrevivencia de vida en ningún momento de la existencia del planeta es el *bulbo*. Este resultado es importante ya que por vez primera, se analiza y descarta cuantitativamente esta componente galáctica para la construcción de la ZHG.

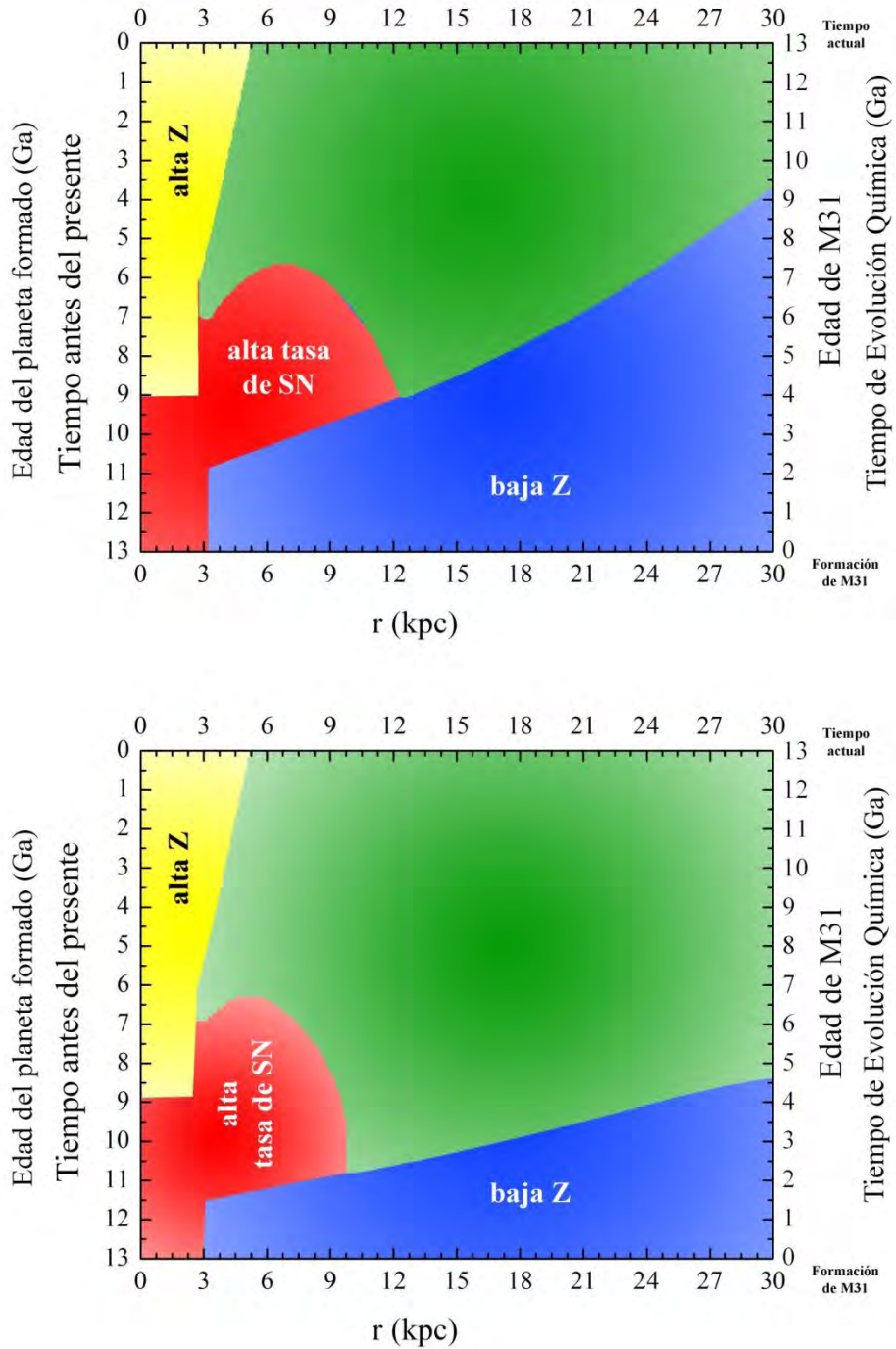
En la gráfica superior de la Figura 33, se vuelven a mostrar, para poder comparar los diferentes escenarios, las regiones obtenidas de lo supuesto en base a Lineweaver *et al.* (2004). En la gráfica inferior de la Figura 33, se muestran las regiones en donde los planetas formados tuvieron una  $\langle \xi(r,t) \rangle$  mayor que  $\langle \xi_{\oplus} \rangle$  en el preciso instante en que fueron formados en base a lo propuesto en este trabajo por la ecuación 73. Como se puede observar, el factor de sobrevivencia propuesto es un factor relevante en los primeros giga-años de la EQ de la M31 y en la región del *bulbo*, así como también en zonas centrales del *disco* y solamente, después de 7 Ga de formación, el factor de sobrevivencia a SN propuesto deja de ser relevante en el *disco*.

FIGURA 32. REGIONES Y TIEMPOS DE FORMACIÓN PLANETARIA Y SOBREVIVENCIA A LA OCURRENCIA DE SUPERNOVAS



La región verde representa los radios y los tiempos donde y cuando se puede dar la formación planetaria tomando como base las abundancias químicas dadas por el modelo de Evolución Química y los intervalos propuestos de metalicidad, es decir:  $-0.10 \leq \log Z/Z_{\odot} \leq +0.35$  de Lineweaver *et al.* (2004) en la gráfica superior y,  $-0.35 \leq \log Z/Z_{\odot} \leq +0.35$  del presente trabajo en la gráfica inferior. Las regiones azul y amarilla representan los radios y tiempos donde y cuando no habrá formación planetaria debido a los extremos (bajos y altos, respectivamente) en la cantidad de elementos químicos. La región roja representa los radios y los tiempos donde y cuando los planetas formados tuvieron:  $\langle \xi(r,t) \rangle \geq 2 \langle \xi_{\oplus} \rangle$  en sus primeros 4.5 Ga de existencia de acuerdo con Lineweaver *et al.* (2004) en la gráfica superior y,  $\langle \xi(r,t) \rangle \geq \langle \xi_{\oplus} \rangle$  durante toda la vida del planeta de acuerdo a lo propuesto en el presente el trabajo y mostrado en la gráfica inferior. En ambas gráficas, la región con una alta ocurrencia de SN que no permitiría la sobrevivencia la vida en ningún momento de la existencia del planeta es el *bulbo*. Este resultado es importante ya que por vez primera, se analiza y descarta cuantitativamente esta componente galáctica para la construcción de la ZHG.

FIGURA 33. REGIONES Y TIEMPOS DE FORMACIÓN PLANETARIA Y SOBREVIVENCIA A LA OCURRENCIA DE SUPERNOVAS



La región verde representa los radios y los tiempos donde y cuando se puede dar la formación planetaria tomando como base las abundancias químicas dadas por el modelo de Evolución Química y los intervalos propuestos de metalicidad, es decir:  $-0.10 \leq \log Z/Z_{\odot} \leq +0.35$  de Lineweaver *et al.* (2004) en la gráfica superior y,  $-0.35 \leq \log Z/Z_{\odot} \leq +0.35$  del presente trabajo en la gráfica inferior. Las regiones azul y amarilla representan los radios y tiempos donde y cuando no habrá formación planetaria debido a los extremos (bajos y altos, respectivamente) en la cantidad de elementos químicos. La región roja representa los radios y los tiempos donde y cuando los planetas formados tuvieron:  $\langle \xi(r,t) \rangle \geq 2 \langle \xi_{\oplus} \rangle$  en sus primeros 4.5 Ga de existencia de acuerdo con Lineweaver *et al.* (2004) en la gráfica superior y,  $\langle \xi(r,t) \rangle \geq \langle \xi_{\oplus} \rangle$  en cada uno de los instantes de la vida del planeta de acuerdo a lo propuesto en el presente trabajo y mostrado en la gráfica inferior. En ambas gráficas, la región con una alta ocurrencia de SN que no permitirá la sobrevivencia de vida en ningún momento de la existencia del planeta es el *bulbo*. En la gráfica inferior, también es relevante la sobrevivencia en zonas centrales del *disco* hasta los 7 Ga.

### 3.1.2 RESTRICCIONES BIOGÉNICAS

Los elementos biogénicos son aquellos que forman la atmósfera, el agua, los aminoácidos y las proteínas (Hazen, et al., 2002), es decir los que proporcionan las condiciones propicias para la vida y como la ZHG se basa en el patrón de vida en la Tierra por lo tanto, las restricciones biogénicas se refieren a las edades mínimas que un planeta formado debe tener para cumplir las condiciones de órbita circular estable y origen + evolución de vida.

#### 3.1.2.1 PLANETA QUE CUENTA CON UNA ÓRBITA CIRCULAR ESTABLE Y TIENE VIDA SIMPLE

---

El que un planeta adquiera una órbita circular estable es importante ya que permite que este no tenga cambios extremos de temperatura manteniendo cierta estabilidad (Shaw, 2006). En este trabajo, se consideró que la edad mínima del planeta formado debe ser 1.0 Ga para que pueda adquirir dicha órbita debido a que este es el valor mínimo requerido propuesto por Barnes *et al.* (2008).

Así mismo, se sabe que la vida en la Tierra comenzó a existir hace  $3.47 \pm 0.5$  Ga y la edad de la Tierra es de 4.5 Ga, por lo tanto se consideró que la vida apareció 1.0 Ga después de la formación de un planeta.

Como la edad de un planeta para adquirir una órbita circular estable es la misma para permitir el origen de vida simple (1.0 Ga), por lo tanto estas condiciones pueden ocurrir al mismo tiempo.

Utilizando los resultados del modelo de EQ de M31, para la formación planetaria detallados en la *sección 3.1.1.1*, cada uno de los tres escenarios de sobrevivencia a SN de la *sección 3.1.1.2*, y la condición de 1 Ga como edad del planeta, se muestran a continuación, las regiones obtenidas en las *Figuras 37 y 38* en donde se presentan los radios galactocéntricos y tiempos a los cuales se encuentran planetas que cuentan ya con una órbita circular estable y contienen vida simple (región texturizada blanca).

Recordando, la región verde representa los radios galactocéntricos y tiempos a los cuales es posible la formación planetaria y que dependen de la condición de metalicidad impuesta. La región roja muestra los radios galactocéntricos y tiempos a los cuales los planetas formados sobrevivieron a la ocurrencia de SN dependiendo del escenario impuesto al modelo de EQ de M31.

Así mismo, la región azul representa la zona y los tiempos en los que no se puede formar un planeta debido a la baja cantidad de elementos químicos que se encuentran. La región amarilla representa la zona y los tiempos en los que tampoco se puede dar formación planetaria por poseer una alta metalicidad.

Los ejes de las ordenadas en las gráficas de las *Figura 34 y 35*, representan los tiempos de la EQ que son a su vez, las edades de M31. Si se analizan hacia atrás los tiempos de estudio, se deducen las edades que tendrían los planetas formados en la actualidad. Los ejes de las

abscisas representan a la distancia galactocéntrica, es decir el radio al cual se localizaría el planeta formado. Así mismo, a radios menores a 3 kpc se localiza el *bulbo*; a radios mayores a 3 kpc y tiempos menores o iguales a 1 Ga, se encuentra el *halo* y a la misma distancia pero a tiempos mayores a 1 Ga está el *disco*.

En la gráfica superior de la *Figura 34*, se muestra la ZHG bajo las condiciones de metalicidad y sobrevivencia a SN propuestas por Lineweaver *et al.* (2004) junto con la restricción de edad mínima de 1 Ga. Como se puede observar, en la zona del *bulbo* de M31, los planetas podrían haber adquirido la órbita circular estable pero la vida no hubiera sobrevivido a la ocurrencia de SN. En toda la región del *disco* de la misma gráfica, después de los 2 Ga del inicio de la formación de M31 hasta los 12 Ga, pueden encontrarse planetas que ya han adquirido la órbita circular estable y pueden contener vida simple.

En la gráfica inferior de la *Figura 34*, se muestra la ZHG bajo las condiciones de metalicidad ( $-0.35 \leq \log Z/Z_{\odot} \leq +0.35$ ) y la sobrevivencia a la ocurrencia de SN en toda la vida del planeta (ver *ecuación 71*) en base a lo propuesto en este trabajo. Como ocurre con la gráfica superior, se puede observar que en la zona del *bulbo* de M31, los planetas podrían haber adquirido la órbita circular estable pero la vida no hubiera sobrevivido a la ocurrencia de SN. En toda la región del *disco* de la misma gráfica inferior, después de los 1.5 Ga del inicio de la formación de M31, pueden encontrarse planetas que ya han adquirido la órbita circular estable y pueden contener vida simple.

En la gráfica superior de la *Figura 35*, se vuelven a mostrar, para poder comparar los diferentes escenarios, las regiones obtenidas de lo supuesto en base a Lineweaver *et al.* (2004). En la gráfica inferior de la *Figura 35*, se muestra la ZHG bajo las condiciones de metalicidad ( $-0.35 \leq \log Z/Z_{\odot} \leq +0.35$ ) y la sobrevivencia a la ocurrencia de SN en el preciso instante de la formación del planeta (ver *ecuación 73*) en base a lo propuesto en este trabajo.

Como ocurre con la gráfica superior de la misma *Figura 38*, se puede observar que en la zona del *bulbo* de M31, los planetas podrían haber adquirido la órbita circular estable pero la vida no hubiera sobrevivido a la ocurrencia de SN. Lo mismo ocurre en los primeros 7 Ga en zonas centrales del *disco* y solamente, posterior a esta edad, pueden encontrarse planetas que ya han adquirido la órbita circular estable y pueden contener vida simple.

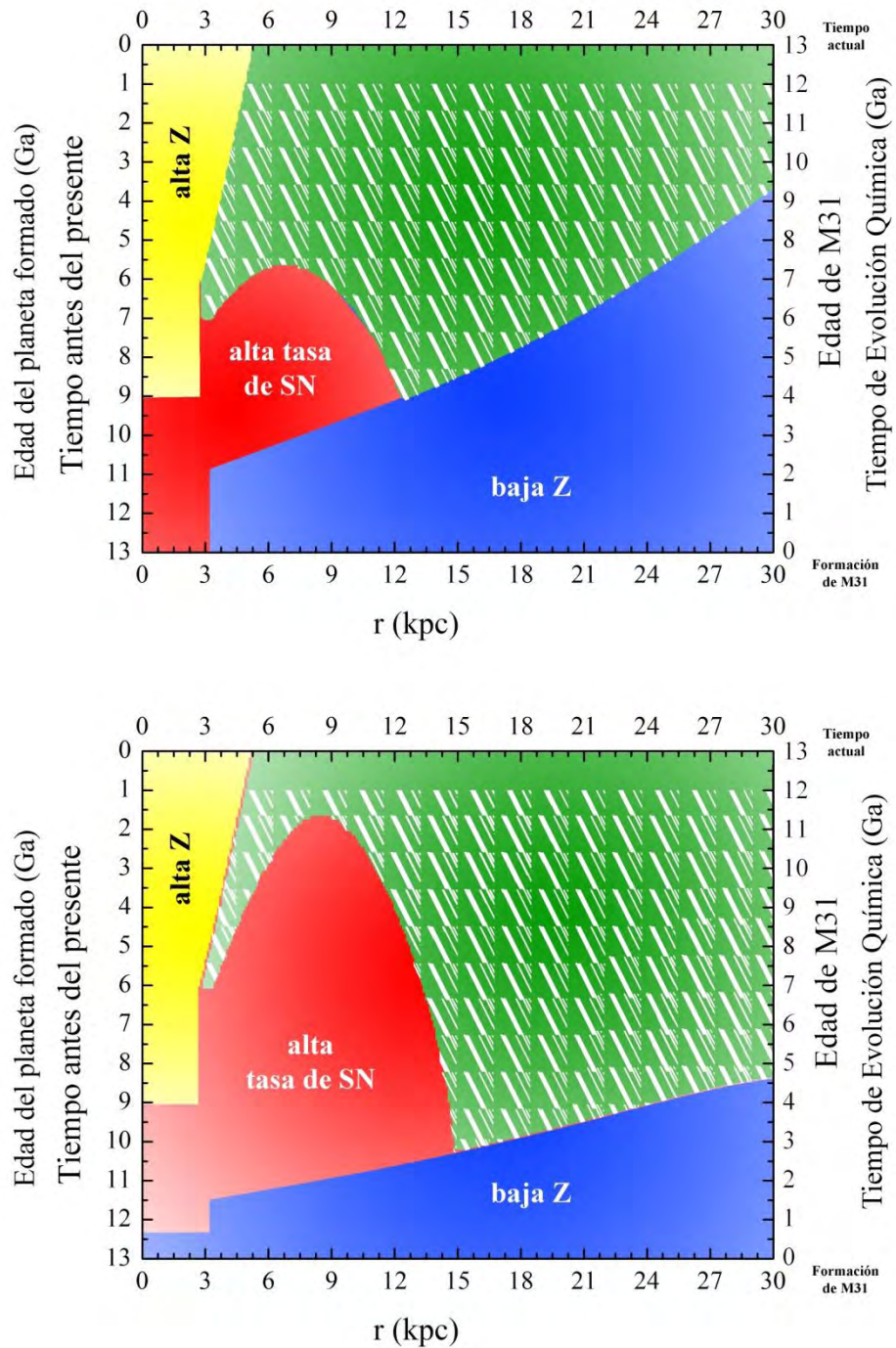
En las gráficas de las *Figuras 34* y *35*, la región con una alta ocurrencia de SN que no permitiría la sobrevivencia la vida en ningún momento de la existencia del planeta es el *bulbo*, pese a que sí podrán encontrarse tanto planetas formados como planetas que ya han adquirido la órbita circular estable.

Este resultado es importante ya que se analiza y descarta cuantitativamente esta componente galáctica para la construcción de la ZHG con respecto a la viabilidad de la vida en esos planetas.

En la actualidad, es decir a 13 Ga de la EQ de M31, tomando en cuenta cualquier escenario de metalicidad y sobrevivencia a la ocurrencia de SN, se encontrarían planetas que ya han adquirido la órbita circular estable y pueden contener vida simple por el hecho de tener la edad mínima para esta condición, ya que las edades van desde 1 Ga hasta 11 Ga.

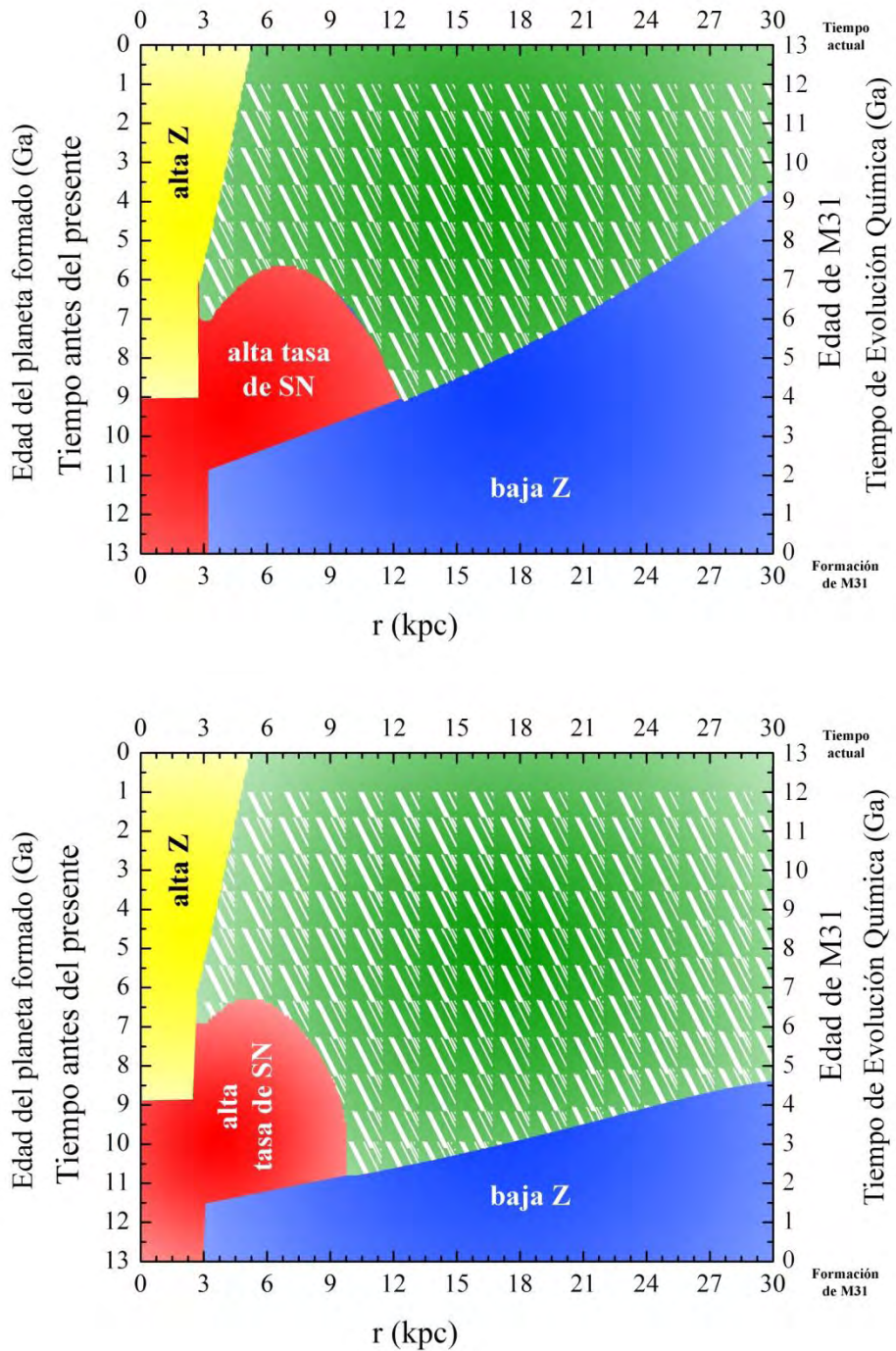


FIGURA 34. ZONA DE HABITABILIDAD GALÁCTICA: PLANETAS SOBREVIVIENTES A SUPERNOVAS QUE PODRÍAN CONTENER VIDA SIMPLE



La región verde representa los radios y los tiempos donde y cuando se puede dar la formación planetaria tomando como base las abundancias químicas dadas por el modelo de Evolución Química y los intervalos propuestos de metalicidad, es decir:  $-0.10 \leq \log Z/Z_{\odot} \leq +0.35$  de Lineweaver *et al.* (2004) en la gráfica superior y,  $-0.35 \leq \log Z/Z_{\odot} \leq +0.35$  del presente trabajo en la gráfica inferior. Las regiones azul y amarilla representan los radios y tiempos donde y cuando no habrá formación planetaria debido a los extremos (bajos y altos, respectivamente) en la cantidad de elementos químicos. La región roja representa los radios y los tiempos donde y cuando los planetas formados tuvieron:  $\langle \xi(r,t) \rangle \geq 2 \langle \xi_{\oplus} \rangle$  en sus primeros 4.5 Ga de existencia de acuerdo con Lineweaver *et al.* (2004) en la gráfica superior y,  $\langle \xi(r,t) \rangle \geq \langle \xi_{\oplus} \rangle$  durante toda la vida del planeta de acuerdo a lo propuesto en presente el trabajo y mostrado en la gráfica inferior. La región texturizada blanca representa a las zonas en donde se encuentran planetas que cuentan ya con una órbita circular estable y podrían contener vida simple en ellos.

FIGURA 35. ZONA DE HABITABILIDAD GALÁCTICA: PLANETAS SOBREVIVIENTES A SUPERNOVAS QUE PODRÍAN CONTENER VIDA SIMPLE



La región verde representa los radios y los tiempos donde y cuando se puede dar la formación planetaria tomando como base las abundancias químicas dadas por el modelo de Evolución Química y los intervalos propuestos de metalicidad, es decir:  $-0.10 \leq \log Z/Z_{\odot} \leq +0.35$  de Lineweaver *et al.* (2004) en la gráfica superior y,  $-0.35 \leq \log Z/Z_{\odot} \leq +0.35$  del presente trabajo en la gráfica inferior. Las regiones azul y amarilla representan los radios y tiempos donde y cuando no habrá formación planetaria debido a los extremos (bajos y altos, respectivamente) en la cantidad de elementos químicos. La región roja representa los radios y los tiempos donde y cuando los planetas formados tuvieron:  $\langle \xi(r,t) \rangle \geq 2 \langle \xi_{\oplus} \rangle$  en sus primeros 4.5 Ga de existencia de acuerdo con Lineweaver *et al.* (2004) en la gráfica superior y,  $\langle \xi(r,t) \rangle \geq \langle \xi_{\oplus} \rangle$  en cada uno de los instantes de la vida del planeta de acuerdo a lo propuesto en el presente trabajo y mostrado en la gráfica inferior. La región texturizada blanca representa a las zonas en donde se encuentran planetas que cuentan ya con una órbita circular estable y podrían contener vida simple en ellos.

### 3.1.2.2 PLANETA CON UNA ÓRBITA CIRCULAR ESTABLE Y CONTENDRÍA VIDA SIMPLE + COMPLEJA

---

Debido a que la ZHG se basa en el patrón de vida en la Tierra y al considerarse vida desarrollada como la vida humana, se propuso otro parámetro de edad mínima de los planetas para permitir la aparición no sólo vida simple sino también vida desarrollada, la cual es de 4.5 Ga después de la formación de la formación del planeta.

Utilizando los resultados del modelo de EQ de M31, para la formación planetaria detallados en la *sección 3.1.1.1*, cada uno de los tres escenarios de sobrevivencia a SN de la *sección 3.1.1.2*, la condición de 1 Ga como edad del planeta descrita en la *sección 3.1.2.1*, se muestran a continuación, las regiones obtenidas en las *Figuras 36 y 37* en donde se presentan los radios galactocéntricos y tiempos a los cuales se encuentran planetas que contendría vida desarrollada en ellos (región texturizada negra).

Recordando, la región verde representa los radios galactocéntricos y tiempos a los cuales es posible la formación planetaria y que dependen de la condición de metalicidad impuesta. La región roja muestra los radios galactocéntricos y tiempos a los cuales los planetas formados sobrevivieron a la ocurrencia de SN dependiendo del escenario impuesto al modelo de EQ de M31. La región texturizada blanca indica los radios galactocéntricos y tiempos a los cuales se encuentran planetas que cuentan ya con una órbita circular estable y contendría vida simple en ellos. Así mismo, la región azul representa la zona y los tiempos en los que no se puede formar un planeta debido a la baja cantidad de elementos químicos que se encuentran. La región amarilla representa la zona y los tiempos en los que tampoco se puede dar formación planetaria por poseer una alta metalicidad.

Los ejes de las ordenadas en las gráficas de las *Figura 36 y 37*, representan los tiempos de la EQ que son a su vez, las edades de M31. Si se analizan hacia atrás los tiempos de estudio, se deducen las edades que tendrían los planetas formados en la actualidad. Los ejes de las abscisas representan a la distancia galactocéntrica, es decir el radio al cual se localizaría el planeta formado. Adicionalmente, a radios menores a 3 kpc se localiza el *bulbo*; a radios mayores a 3 kpc y tiempos menores o iguales a 1 Ga, se encuentra el *halo* y a la misma distancia pero a tiempos mayores a 1 Ga está el *disco*.

En la gráfica superior de la *Figura 36*, se muestra la ZHG bajo las condiciones de metalicidad y sobrevivencia a SN propuestas por Lineweaver *et al.* (2004), la restricción de edad mínima para la vida simple y la edad mínima de 4.5 Ga para permitir la existencia de vida desarrollada. Como se puede observar, en la zona del *bulbo* de M31, la vida desarrollada no hubiera sobrevivido a la ocurrencia de SN. En toda la región del *disco* de la misma gráfica, después de los 2 Ga del inicio de la formación de M31 hasta los 8.5 Ga, pueden encontrarse planetas que cuentan con las condiciones adecuadas para la vida desarrollada. En la gráfica inferior de la *Figura 36*, se muestra la ZHG bajo las condiciones de metalicidad ( $-0.35 \leq \log Z/Z_{\odot} \leq +0.35$ ) y la sobrevivencia a la ocurrencia de SN en toda la vida del planeta (ver *ecuación 71*) en base a lo propuesto en este trabajo junto con la restricción de edad mínima para la vida simple y la edad mínima de 4.5 Ga para permitir la existencia de vida desarrollada. Como ocurre con la gráfica superior, se puede observar que en la zona del *bulbo* de M31, la vida desarrollada tampoco hubiera sobrevivido a la ocurrencia de SN. En toda la región del *disco* de la misma

gráfica inferior, después de los 3 Ga del inicio de la formación de M31, pueden encontrarse planetas que cuentan con las condiciones adecuadas para la vida desarrollada.

En la gráfica superior de la *Figura 37*, se vuelven a mostrar, para poder comparar los diferentes escenarios, las regiones obtenidas de lo supuesto en base a Lineweaver *et al.* (2004) y la restricción de edad mínima para la vida simple y la edad mínima de 4.5 Ga para permitir la existencia de vida desarrollada. En la gráfica inferior de la *Figura 40*, se muestra la ZHG bajo las condiciones de metalicidad ( $-0.35 \leq \log Z/Z_{\odot} \leq +0.35$ ) y la sobrevivencia a la ocurrencia de SN en el preciso instante de la formación del planeta (ver *ecuación 73*) en base a lo propuesto en este trabajo junto con la restricción de edad mínima para la vida simple y la edad mínima de 4.5 Ga para permitir la existencia de vida desarrollada. Como ocurre con la gráfica superior de la misma *Figura 36*, se puede observar que en la zona del *bulbo* de M31, la vida desarrollada tampoco hubiera sobrevivido a la ocurrencia de SN. Lo mismo ocurre en los primeros 7 Ga en zonas centrales del *disco* y solamente, posterior a esta edad, pueden encontrarse planetas que cuentan con las condiciones adecuadas para la vida desarrollada.

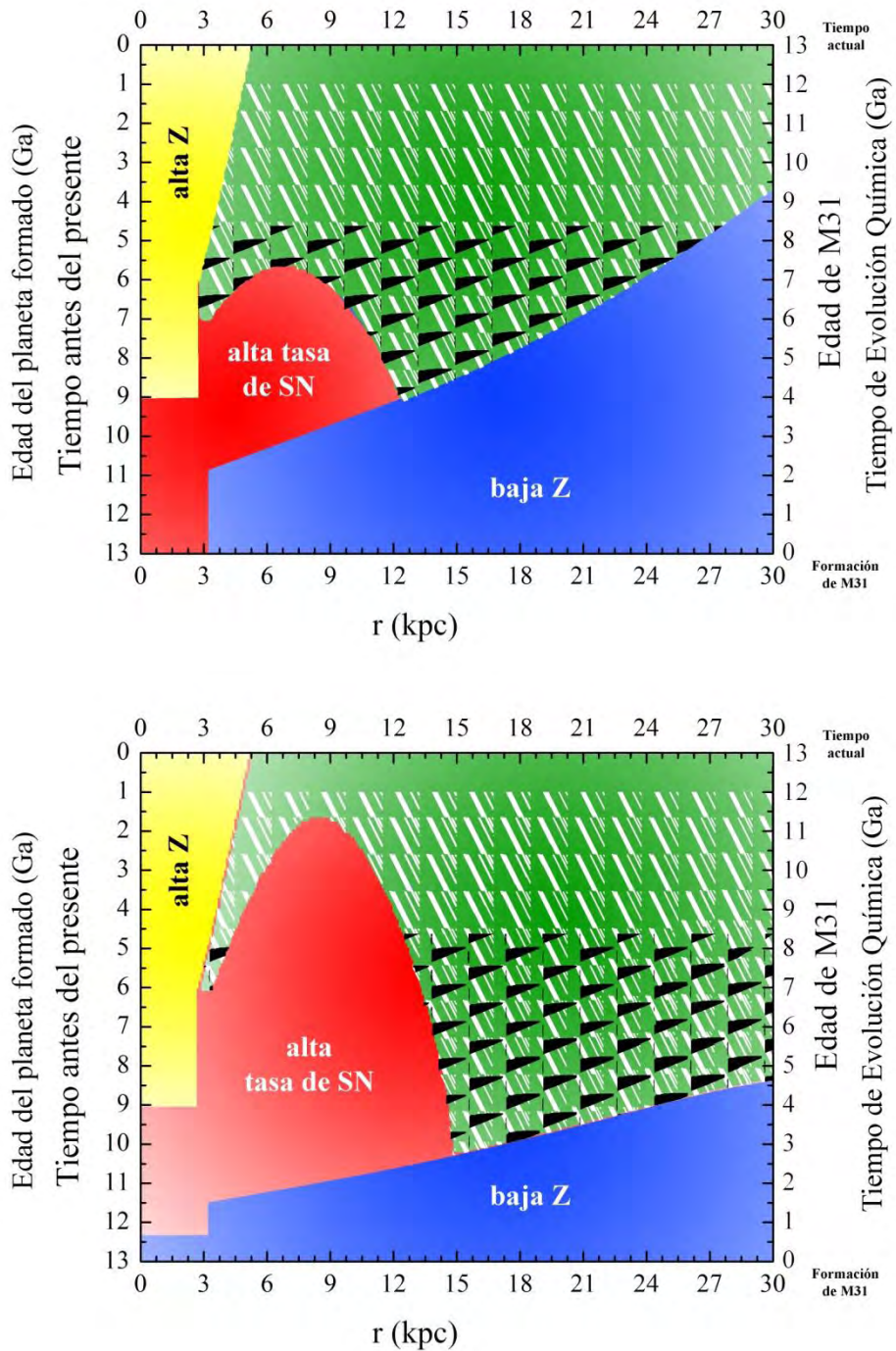
En las gráficas de las *Figuras 36* y *37*, la región con una alta ocurrencia de SN que no permitiría la sobrevivencia la vida desarrollada en ningún momento de la existencia del planeta es el *bulbo*. En la actualidad, es decir a los 13 Ga de la EQ de M31, tomando en cuenta cualquier escenario de metalicidad y sobrevivencia a la ocurrencia de SN, se encontrarían planetas que pueden contener vida desarrollada por el hecho de tener la edad mínima para esta condición, ya que las edades van desde 4.5 Ga hasta 11 Ga.

## 3.2 COMPARACIÓN LAS DIFERENTES ZONAS DE HABITABILIDAD GALÁCTICA

La ZHG hace uso de varias definiciones y suposiciones que han ido modificándose con el paso del tiempo. En el caso de las condiciones de metalicidad planteadas por el único trabajo de ZHG (Lineweaver, Fenner, & Gibson, 2004) y el presente, radica en la actualización de los datos de las abundancias químicas de las estrellas a las que se les han detectado planetas orbitando. Al haber disminuido la metalicidad mínima para la formación planetaria, se da un aumento en las regiones externas del *disco* de M31 (ver *Figura 28*).

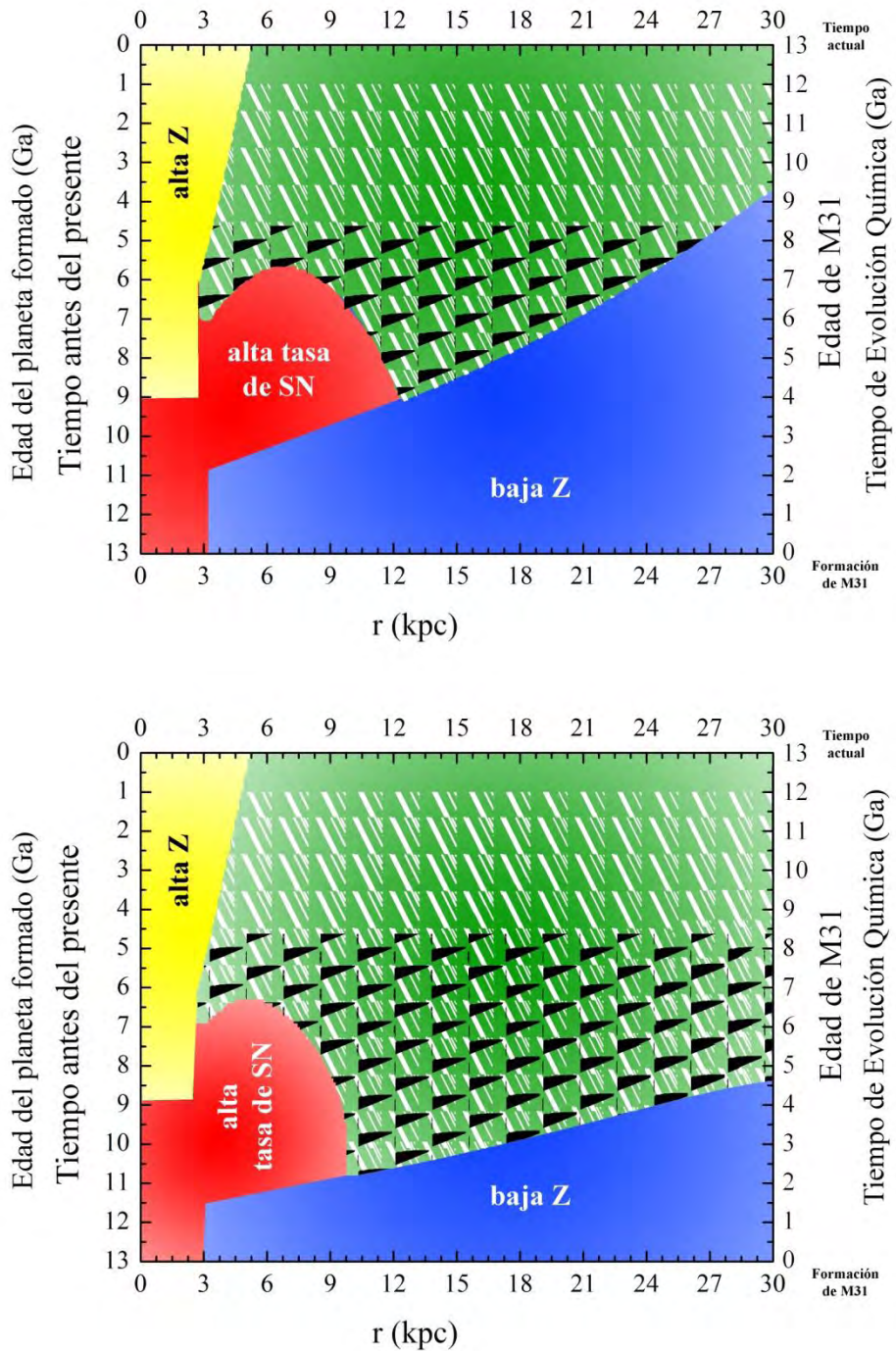
Para todas las condiciones de sobrevivencia a la ocurrencia de SN, existen limitantes ya que este aspecto en la vecindad solar, tienen demasiados parámetros libres. Sin embargo, la limitante de la condición de Lineweaver *et al.* (2004) es que si hay una densidad de SN considerablemente mayor que la  $\langle \xi_{\oplus} \rangle$ , después de los primeros 4.5 Ga del planeta, ésta pasa desapercibida y por lo tanto se observan más planetas sobrevivientes de los que realmente hay. Las limitantes para las condiciones propuestas en este trabajo, se basan en el hecho de que no se conoce el efecto de una SN sobre la vida y por lo tanto, la limitante de la primera condición propuesta es que al promediar los eventos de SN durante toda la vida del planeta, se plantea que la vida puede recuperarse y/o resurgir en el planeta que haya tenido un estallido cercano. La limitante de la segunda condición propuesta es que se plantea que la vida es frágil y no puede recuperarse y/o resurgir en el planeta que haya tenido un estallido cercano.

FIGURA 36. ZONA DE HABITABILIDAD GALÁCTICA: PLANETAS SOBREVIVIENTES A SN QUE PODRÍAN CONTENER VIDA SIMPLE + COMPLEJA



La región verde representa los radios y los tiempos donde y cuando se puede dar la formación planetaria tomando como base las abundancias químicas dadas por el modelo de Evolución Química y los intervalos propuestos de metalicidad, es decir:  $-0.10 \leq \log Z/Z_{\odot} \leq +0.35$  de Lineweaver *et al.* (2004) en la gráfica superior y,  $-0.35 \leq \log Z/Z_{\odot} \leq +0.35$  del presente trabajo en la gráfica inferior. Las regiones azul y amarilla representan los radios y tiempos donde y cuando no habrá formación planetaria debido a los extremos (bajos y altos, respectivamente) en la cantidad de elementos químicos. La región roja representa los radios y los tiempos donde y cuando los planetas formados tuvieron:  $\langle \xi(r,t) \rangle \geq 2 \langle \xi_{\oplus} \rangle$  en sus primeros 4.5 Ga de existencia de acuerdo con Lineweaver *et al.* (2004) en la gráfica superior y,  $\langle \xi(r,t) \rangle \geq \langle \xi_{\oplus} \rangle$  en toda la vida del planeta de acuerdo a lo propuesto en el presente trabajo y mostrado en la gráfica inferior. La región texturizada blanca representa a las zonas en donde se encuentran planetas que cuentan ya con una órbita circular estable y pueden contener vida simple en ellos. La región texturizada negra representa a las zonas en donde se encuentran planetas que pueden contener vida desarrollada en ellos.

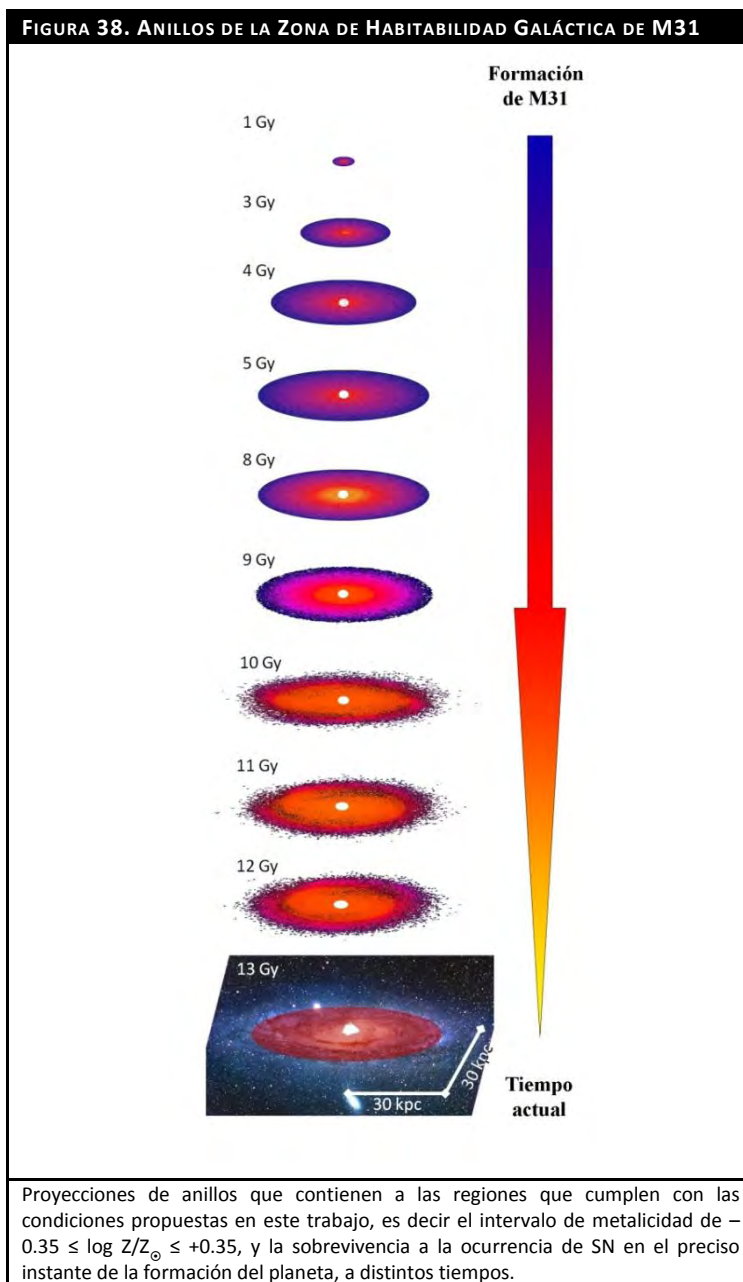
**FIGURA 37. ZONA DE HABITABILIDAD GALÁCTICA: PLANETAS SOBREVIVIENTES A SN QUE PODRÍAN CONTENER VIDA SIMPLE + COMPLEJA**



La región verde representa los radios y los tiempos donde y cuando se puede dar la formación planetaria tomando como base las abundancias químicas dadas por el modelo de Evolución Química y los intervalos propuestos de metalicidad, es decir:  $-0.10 \leq \log Z/Z_{\odot} \leq +0.35$  de Lineweaver *et al.* (2004) en la gráfica superior y,  $-0.35 \leq \log Z/Z_{\odot} \leq +0.35$  del presente trabajo en la gráfica inferior. Las regiones azul y amarilla representan los radios y tiempos donde y cuando no habrá formación planetaria debido a los extremos (bajos y altos, respectivamente) en la cantidad de elementos químicos. La región roja representa los radios y los tiempos donde y cuando los planetas formados tuvieron:  $\langle \xi(r,t) \rangle \geq 2 \langle \xi_{\oplus} \rangle$  en sus primeros 4.5 Ga de existencia de acuerdo con Lineweaver *et al.* (2004) en la gráfica superior y,  $\langle \xi(r,t) \rangle \geq \langle \xi_{\oplus} \rangle$  en cada uno de los instantes de la vida del planeta de acuerdo a lo propuesto en el presente trabajo y mostrado en la gráfica inferior. La región texturizada blanca representa a las zonas en donde se encuentran planetas que cuentan ya con una órbita circular estable y pueden contener vida simple en ellos. La región texturizada negra representa a las zonas en donde se encuentran planetas que pueden contener vida desarrollada en ellos.

### 3.3 ANILLOS DE LA ZONA DE HABITABILIDAD GALÁCTICA A DISTINTOS TIEMPOS

Para poder ejemplificar de mejor manera cómo cambian las regiones donde puede darse formación planetaria y la sobrevivencia de planetas formados a la ocurrencia de SN con respecto a la EQ en M31, se proyectaron anillos<sup>28</sup> que contienen a las regiones sobre el plano de la galaxia, a distintos tiempos, que cumplen con condiciones para la ZHG. En la *Figura 41*, se muestran los anillos proyectados a distintos tiempos de la EQ de M31 que cumplieron con las condiciones propuestas en este trabajo



<sup>28</sup> Debido a la suposición del modelo de EQ de simetría azimutal/axial.

Las condiciones tomadas fueron el intervalo de metalicidad de  $-0.35 \leq \log Z/Z_{\odot} \leq +0.35$ , y la sobrevivencia a la ocurrencia de SN en el preciso instante de la formación del planeta (ver *ecuación 73*). Como se puede observar, conforme transcurrió la EQ, el ancho del anillo fue aumentando debido al incremento de las abundancias químicas.

La última imagen de la figura, muestra una imagen, en el óptico, de M31 a la que se le superpuso el anillo de la ZHG que tiene en la actualidad, i.e. a los 13 Ga de su formación. Actualmente, la ZHG de M31 es un anillo el cual inicia a 5 kpc desde el centro de la galaxia y termina, aproximadamente, a los 30 kpc lo que implica que tiene un grosor de  $\sim 25$  kpc. La ZHG actual contendría planetas con edades de hasta 11 Ga los cuales ya cuentan con una órbita circular estable y podrían contener vida tanto simple como compleja.



## 4. MIGRACIÓN RADIAL ESTELAR

Como se ha planteado a lo largo de este trabajo, los objetivos fueron determinar la evolución de los elementos químicos y la predicción de regiones químicamente aptas para la formación de planetas que alberguen vida en la galaxia de Andrómeda. Lo anterior es lo que se considera la ZHG. Además, otro fenómeno que se consideró en la actual investigación, fue la Migración Radial Estelar (MRE) que es el movimiento de las estrellas en la galaxia debido a una *barra galáctica*. Recordando de la *sección 1.5*, las *barras* son un fenómeno común y se encuentran en todos los tipos de galaxias espirales como M31 (Beaton R. L., et al., 2007) y VL (Gerhard, Binney, & Zhao, 1998).

Las *barras* galácticas son estructuras formadas por estrellas que siguen un patrón de órbitas elongadas u ovaladas (Mihalas & McRae, 1968) que se concentra en regiones centrales, pudiendo contener así un *bulbo* esferoidal en el centro. No es claro aún, si el *bulbo* y la *barra* son componentes distintas, conjuntas o una sola. En el caso de M31, no se observa una diferencia entre el *bulbo* y la *barra* ya que el radio promedio en el que se localiza el primero es alrededor de 3 kpc y para la segunda es de hasta 5 kpc (Beaton R. L., et al., 2007). Debido a que las *barras* se localizan tanto en regiones del *bulbo* como del *disco*, estas constituyen un componente importante en la distribución de masa en una galaxia (Sellwood & Wilkinson, 1993), principalmente sobre el material estelar.

Para poder desarrollar este objetivo del trabajo, se utilizaron resultados de modelos que predicen el comportamiento de las partículas que conforman a una galaxia espiral con barra similar a M31. A continuación se describen las características y procedimientos que se siguieron.

### 4.1 SIMULACIONES Y MIGRACIÓN

Los resultados de los códigos de programación que predicen el comportamiento dinámico de las partículas que constituyen a una galaxia se le denominan simulaciones cosmológicas de n-cuerpos. En estos códigos se analizan las interacciones gravitacionales, hidrodinámicas y termodinámicas entre las partículas, o mejor dicho cúmulos de partículas, ya sean gas, estrellas o de materia oscura. El número de cúmulos que conforman a estas simulaciones puede ir desde unos cientos hasta millones (Sellwood & Wilkinson, 1993).

En este trabajo, se utilizaron las simulaciones hechas por Klypin *et al.* (2008), las cuales reproducen el comportamiento de una galaxia espiral barrada en un periodo de 5 Ga, es decir a partir de los 8 Ga de su formación hasta la actualidad, i. e. 13 Ga. La galaxia ya formada, se construyó al inicio por la acreción de flujos externos de material que se detuvo para mantener a la galaxia como un sistema cerrado. Por lo tanto, desde los 5 Ga hasta el presente, no recibió material externo y tampoco formó más estrellas manteniendo así, las que había formado desde el inicio.

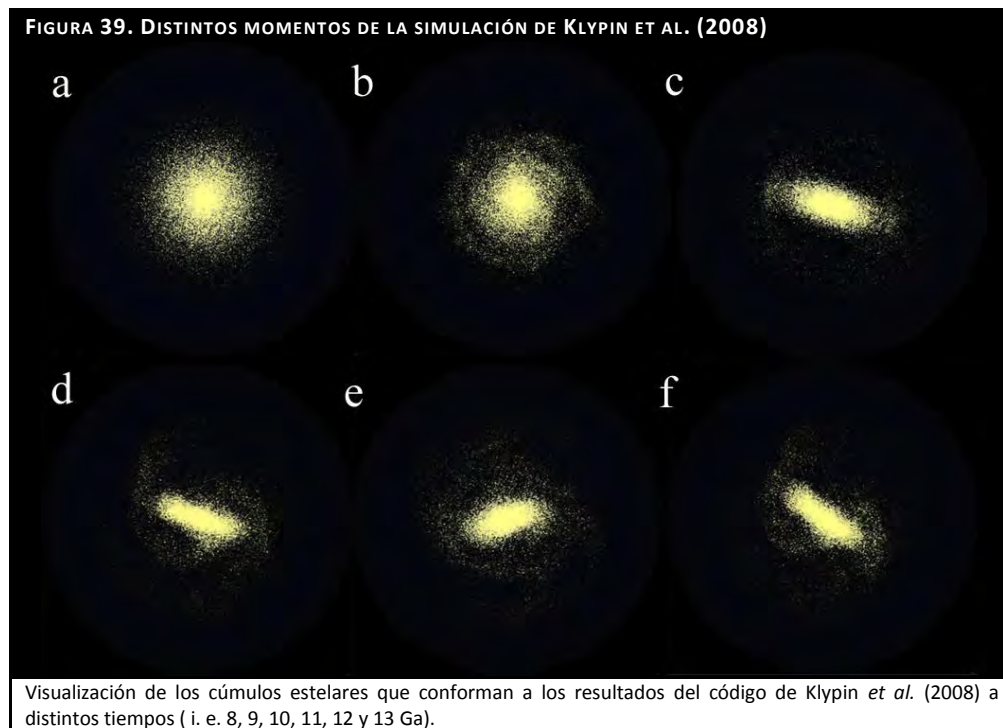
Las partículas que conforman a las simulaciones son poco más de  $10^6$  cúmulos, de los cuales  $10^3$  son cúmulos de estrellas de  $10^5 M_{\odot}$  cada uno. Las estrellas que forman parte de esos

cúmulos, tiene  $1 M_{\odot}$ . Esto es consistente con el escenario de ARI propuesto por el modelo de EQ ya que dentro de esta aproximación, las estrellas que tienen una masa menor a  $1 M_{\odot}$  viven por siempre, mientras las que tienen masa mayor a  $1 M_{\odot}$  mueren instantáneamente.

Las componentes galácticas en esta simulación, fueron creadas por los mismos flujos iniciales de material en contraste a lo propuesto en el modelo de EQ que las forma de manera independiente por medio de un colapso monolítico bajo el escenario *dentro-fuera*. Al inicio de la simulación, es decir a los 5 Ga de la formación de la galaxia, se tienen solamente las componentes galácticas constituidas de materia bariónica<sup>29</sup>. Mientras el *bulbo* y el *disco* acretan estrellas provenientes del *halo*, se van tornando más masivos, llegando al punto en donde se vuelven inestables gravitacionalmente afectando las órbitas estelares y dando paso a la formación de la *barra*.

Desde el momento en que la *barra* se forma, esta permanece en toda la simulación. Cabe destacar que la *barra* no es una condición que se imponga en la simulación, sino que se va dando como un fenómeno gravitacional natural debido a la inestabilidad de las regiones centrales de la galaxia.

En la *Figura 39*, se muestra la visualización de los cúmulos estelares que conforman a los resultados del código de Klypin, Valenzuela, Colín, & Quinn (2008) a distintos tiempos ( i. e. 8, 9, 10, 11, 12 y 13 Ga). Como se puede apreciar en el primer tiempo de la simulación, es decir a 8 Ga (*Figura 42a*), el *disco* tiene simetría azimutal tal como se planteó en el modelo de EQ; sin embargo, conforme pasa el tiempo, la simetría desaparece.



<sup>29</sup> En las simulaciones también se toma en cuenta un *halo* de materia oscura, sin embargo esta no interviene directamente en la química de la galaxia.

## 4.2 MIGRACIÓN RADIAL ESTELAR Y EVOLUCIÓN QUÍMICA

Del modelo de EQ realizado en este trabajo, se escogieron los datos de abundancia química de  $Z/Z_{\odot}$  al tiempo de 8 Ga debido a que a partir de ese momento, la historia química de M31 no cambia demasiado y se encuentra en el intervalo de los gradientes que se utilizaron como restricciones observacionales (ver *Figuras 17 y 27*).

Para unir el modelo de EQ con la simulación cosmológica, se procedió con lo siguiente:

- I. Asignar a las cúmulos de estrellas del primer momento de la simulación ( $t = 8$  Ga), una metalicidad ( $Z/Z_{\odot}$ ) de acuerdo a su radio, ya que a cada radio del modelo de EQ tiene una abundancia química del gas del MIE.
- II. Dividir a la galaxia a ese tiempo (8 Ga) en anillos de 0.1 kpc de grosor.
- III. Calcular la metalicidad promedio de cada anillo con la expresión

$$\left\langle \frac{Z}{Z_{\odot}} \right\rangle = \frac{\sum_{i=1}^n Z/Z_{\odot}}{n} \quad (74)$$

Donde  $n$  es el número total de cúmulos que se encuentran en el anillo  $i$ .

- IV. Obtener el comportamiento radial del  $\log Z/Z_{\odot}$  para ese radio y graficar (ver línea a 8 Ga de la gráfica superior *Figura 40 y Figura 41a*).
- V. Observar hacia donde se movieron las estrellas con abundancias químicas ya asignadas a distintos tiempos, tomando en cuenta que cada cúmulo estelar mantiene la misma abundancia química durante toda la simulación cosmológica (ver *Figura 41*).
- VI. Obtener el comportamiento radial del  $\log (Z/Z_{\odot})$  para cada tiempo y graficar (ver gráfica superior de la *Figura 40*).
- VII. Ajustar rectas en tres regiones: *bulbo*, *disco* y periferia, para observar el cambio del gradiente en cada momento de la evolución cosmológica y graficar (ver gráfica inferior de la *Figura 40*).

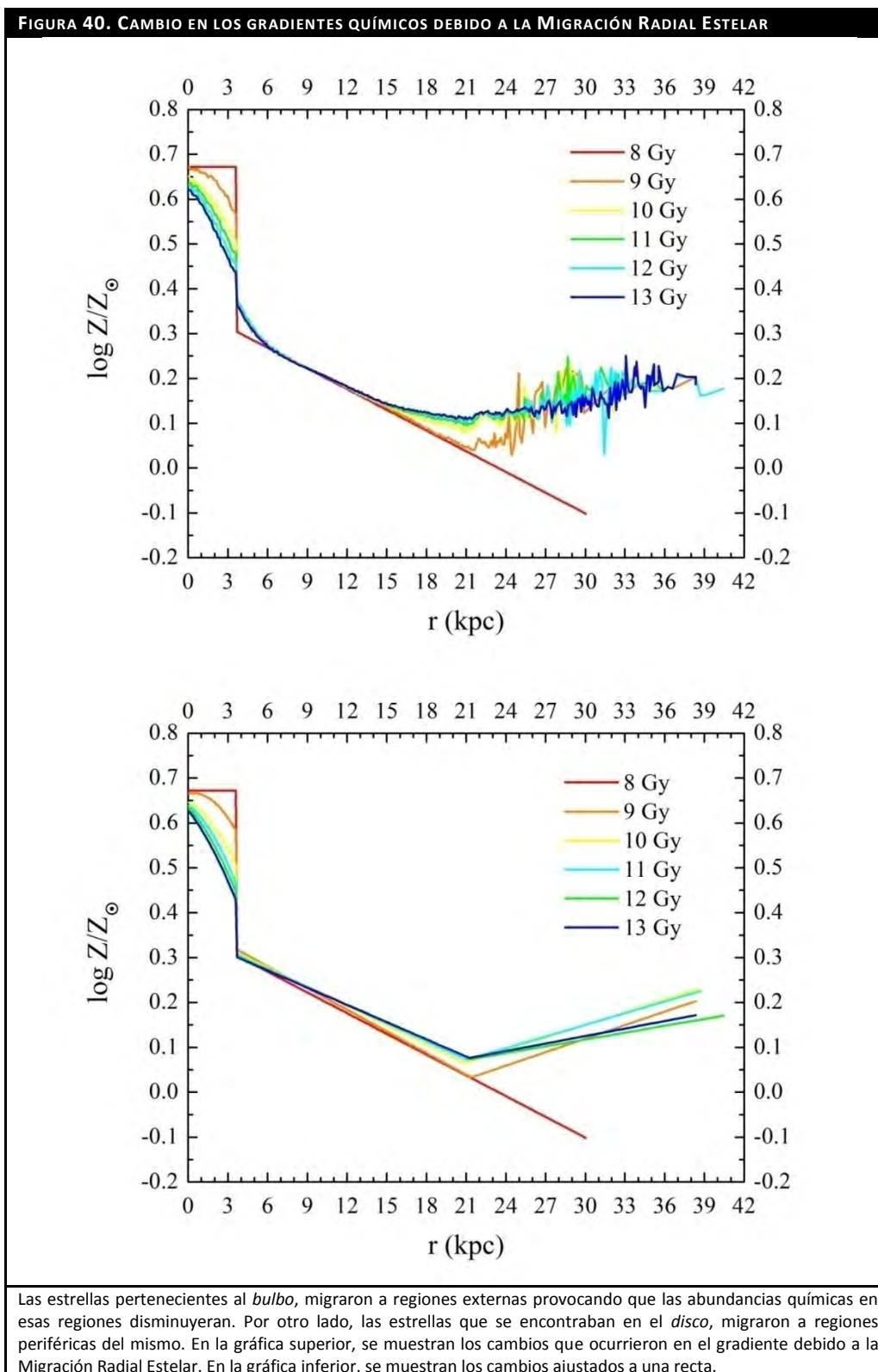
En las gráficas de la *Figura 40*, se muestran los cambios que se observaron en el gradiente.

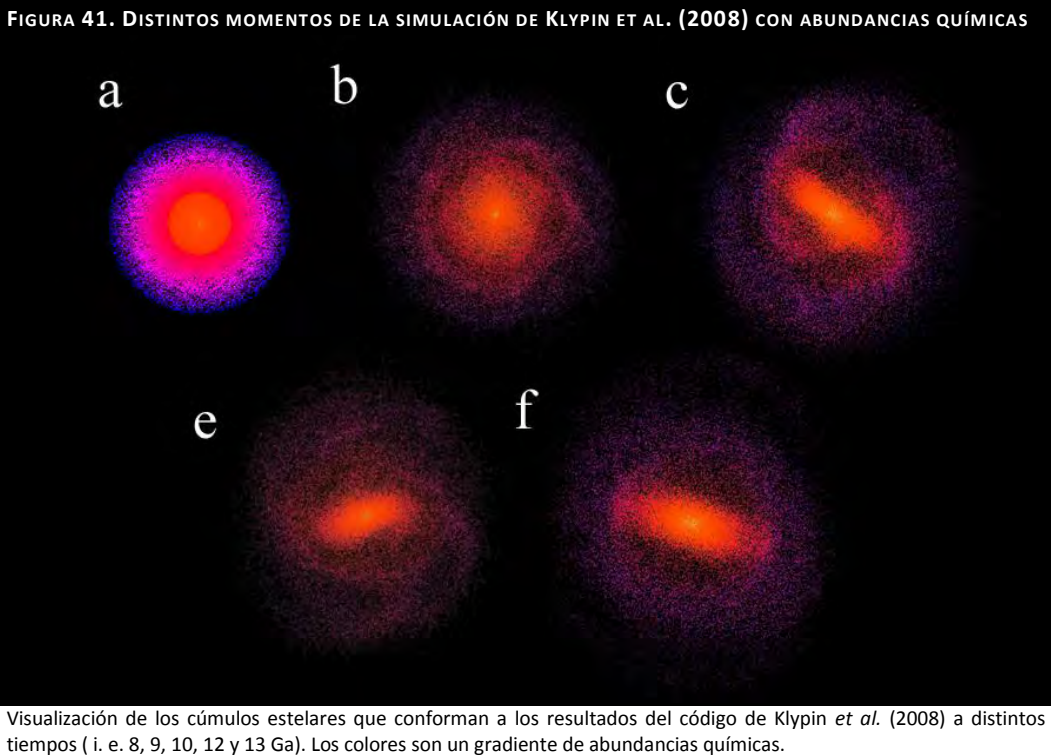
Lo que ocurrió debido a la MRE, fue que las estrellas pertenecientes al *bulbo*, migraron a regiones externas provocando que las abundancias químicas en esas regiones disminuyeran. Por otra parte, las estrellas que se encontraban en el *disco*, migraron a regiones periféricas del mismo.

En las imágenes de la *Figura 41*, se puede observar, por medio de la combinación de los colores, que cúmulos de estrellas pertenecientes al *bulbo*, migraron hacia regiones externas provocando que las abundancias químicas en esas regiones disminuyeran.

Por otro lado, los cúmulos de estrellas que se encontraban en el *disco*, migraron a regiones periféricas del mismo. A su vez, también se puede observar, por el mezclado de colores, que adicionalmente hubo movimiento de estrellas de las partes externas a las internas.

Al haber asignado abundancias químicas a la simulación cosmológica y al determinar cómo se modificó el gradiente, se procedió a aplicar las condiciones de la metalicidad de la ZHG a la galaxia que ha tenido MRE.





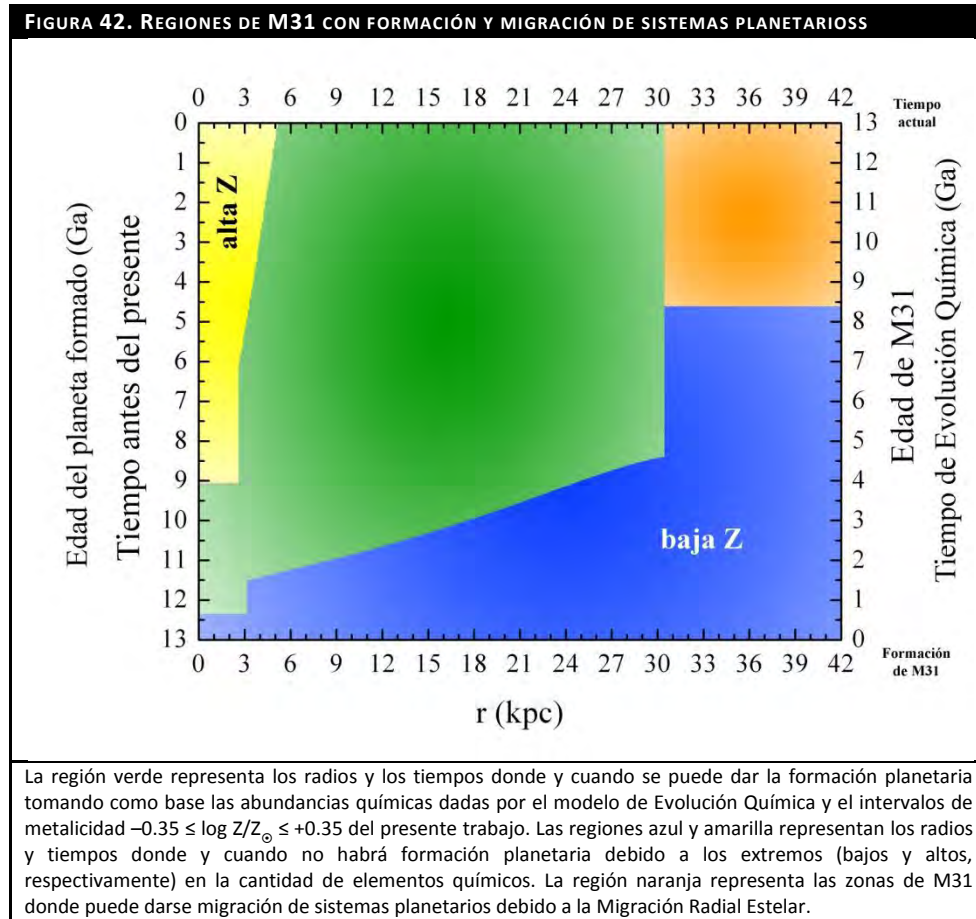
### 4.3 MIGRACIÓN RADIAL ESTELAR Y MIGRACIÓN DE SISTEMAS PLANETARIOS

Al obtener el cambio en el gradiente en cada momento de la simulación, se aplicaron las condiciones de metalicidad propuestas en este trabajo ( $-0.35 \leq \log Z/Z_{\odot} \leq 0.35$ , ver *sección 3.1.1.1*) para obtener las regiones en las que se puede dar la migración de sistemas planetarios, debido a que anteriormente ya se han obtenido las regiones donde se puede dar la formación planetaria. Además, en la simulación sólo se tienen cúmulos de estrellas con abundancias químicas y no gas del cual se podrían formar sistemas planetarios. Por lo tanto, debido a la MRE, las estrellas que migraron pudieron haber llevado consigo el sistema planetario que ya se hubiese formado alrededor de ellas.

Recordando, la región verde representa los radios galactocéntricos y tiempos a los cuales es posible la formación planetaria y que dependen de la condición de metalicidad impuesta. La región azul representa la zona y los tiempos en los que no se puede formar un planeta debido a la baja cantidad de elementos químicos que se encuentran. La región amarilla representa la zona y los tiempos en los que tampoco se puede dar formación planetaria por poseer una alta metalicidad. Los ejes de las ordenadas en la gráfica de la *Figura 42* (así como también de las gráficas de la *Figura 43*), representan los tiempos de la EQ que son a su vez, las edades de M31. Si se analizan hacia atrás los tiempos de estudio, se deducen las edades que tendrían los planetas formados en la actualidad. Los ejes de las abscisas representan a la distancia galactocéntrica, es decir el radio al cual se localizaría el planeta formado. Adicionalmente, a radios menores a 3 kpc se localiza el *bulbo*; a radios mayores a 3 kpc y

tiempos menores o iguales a 1 Ga, se encuentra el *halo* y a la misma distancia pero a tiempos mayores a 1 Ga está el *disco*.

En la *Figura 42*, se muestra la región naranja que representa las regiones externas del *disco* de M31 en donde puede darse la migración de sistemas planetarios por la MRE. Como se observa, la metalicidad del *bulbo* no se vio afectada por la MRE. En la actualidad, es decir a los 13 Ga de la EQ de M31, se encontrarían planetas con edades de hasta 12.5 Ga que migraron de regiones internas.



#### 4.4 MIGRACIÓN RADIAL ESTELAR Y ZONA DE HABITABILIDAD GALÁCTICA

Para poder involucrar a la MRE en la ZHG, el concepto de esta última debe ser ampliado ya que actualmente sólo se considera las regiones donde pueden formarse los sistemas planetarios (González, Brownlee, & Ward, 2001; Lineweaver, 2001; Lineweaver, Fenner, & Gibson, 2004). Por lo tanto, en este trabajo se plantea que la ZHG es cualquier región que cumpla con cualquiera de las siguientes dos condiciones:

- Suficiente abundancia de elementos químicos para formar sistemas planetarios donde planetas tipo Tierra son encontrados y son capaces de sostener vida.

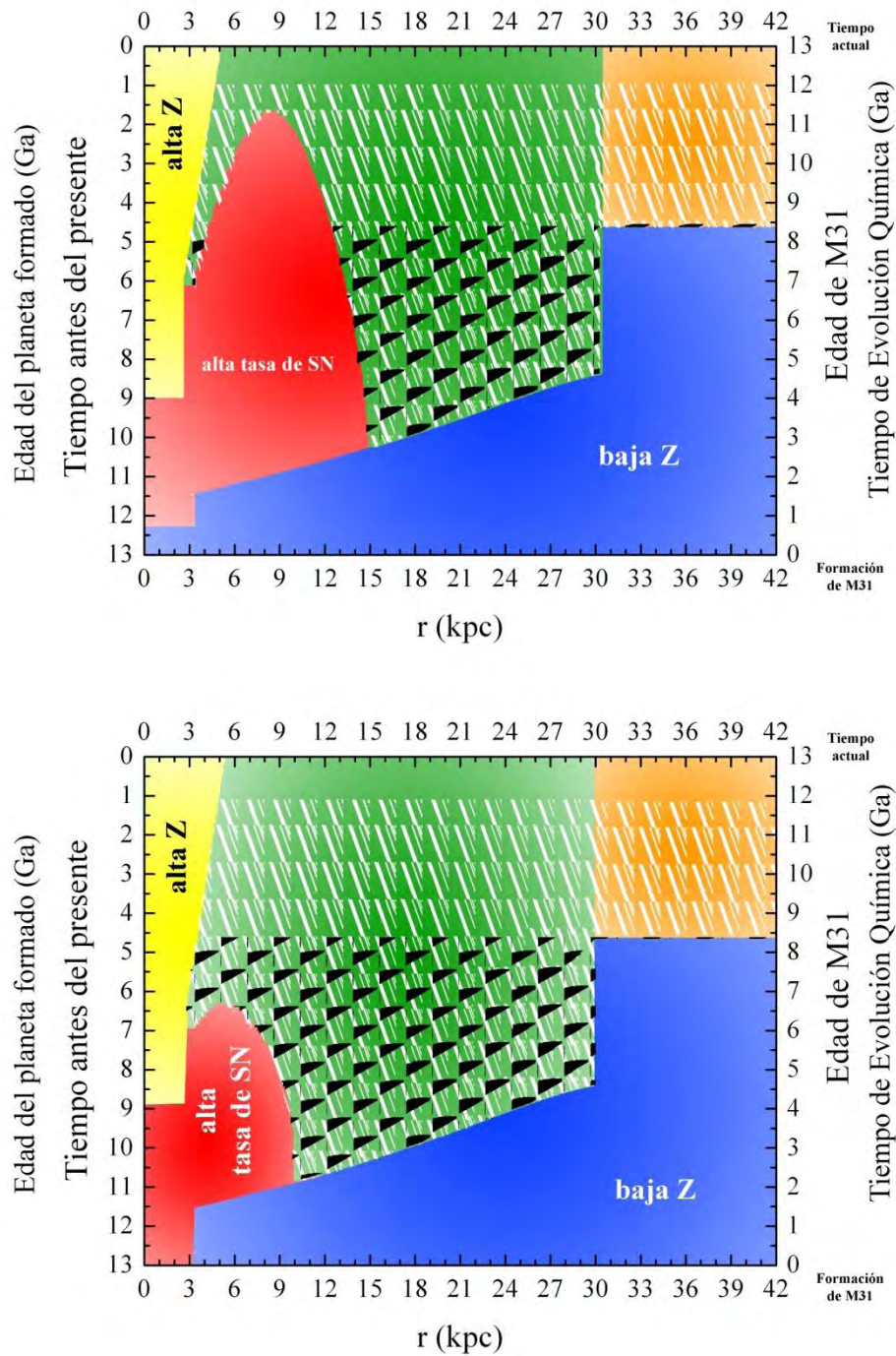
- Sistemas planetarios donde planetas tipo Tierra son encontrados y son capaces de sostener vida.

Con lo anterior y el haber encontrado las regiones donde puede haber migración de sistemas planetarios, se aplicaron las condiciones de sobrevivencia a SN propuestas en este trabajo para así encontrar ZHG que se muestran en la *Figura 43*.

Recordando, la región verde representa los radios galactocéntricos y tiempos a los cuales es posible la formación planetaria y que dependen de la condición de metalicidad impuesta. La región roja muestra los radios galactocéntricos y tiempos a los cuales los planetas formados sobrevivieron a la ocurrencia de SN dependiendo del escenario impuesto al modelo de EQ de M31. La región texturizada blanca indica los radios galactocéntricos y tiempos a los cuales se encuentran planetas que cuentan ya con una órbita circular estable y podrían contener vida simple en ellos. La región texturizada negra indica los radios galactocéntricos y tiempos a los cuales se encuentran planetas que podrían contener vida desarrollada en ellos. Así mismo, la región azul representa la zona y los tiempos en los que no se puede formar un planeta debido a la baja cantidad de elementos químicos que se encuentran. La región amarilla representa la zona y los tiempos en los que tampoco se puede dar formación planetaria por poseer una alta metalicidad. Los ejes de las ordenadas en las gráficas de la *Figura 43*, representan los tiempos de la EQ que son a su vez, las edades de M31. Si se analizan hacia atrás los tiempos de estudio, se deducen las edades que tendrían los planetas formados en la actualidad. Los ejes de las abscisas representan a la distancia galactocéntrica, es decir el radio al cual se localizaría el planeta formado. Adicionalmente, a radios menores a 3 kpc se localiza el *bulbo*; a radios mayores a 3 kpc y tiempos menores o iguales a 1 Ga, se encuentra el *halo* y a la misma distancia pero a tiempos mayores a 1 Ga está el *disco*.

En la gráfica superior de la *Figura 43*, se muestra la ZHG considerando la primera condición propuesta de la sobrevivencia a la ocurrencia de SN en toda la vida del planeta (ver *ecuación 71*) y las edades mínimas que deben tener los planetas formados para haber adquirido ya una órbita circular estable y podrían contener en ellos vida simple y vida desarrollada. En toda la región del *disco* de la misma gráfica, incluyendo las regiones que se encuentran a radios mayores a 30 kpc en donde hubo MRE, después de los 2 Ga del inicio de la formación de M31, pueden encontrarse planetas que cuentan con las condiciones adecuadas para la vida, ya sea simple o desarrollada. Sin embargo, tal vez se encuentren planetas, en esa misma región, que migraron desde el *bulbo* y regiones centrales del *disco*, y en ellos la posibilidad de vida ha sido ya anulada debido a la ocurrencia de SN. En la gráfica inferior de la *Figura 43*, se muestra la ZHG considerando la segunda condición propuesta de la sobrevivencia a la ocurrencia de SN en cada uno de los instantes de la vida del planeta (ver *ecuación 73*) y las edades mínimas que deben tener los planetas formados para haber adquirido ya una órbita circular estable y contener en ellos vida simple y vida desarrollada. En la región del *disco* de la misma gráfica, incluyendo las regiones que se encuentran a radios mayores a 30 kpc en donde hubo MRE, después de los 3 Ga del inicio de la formación de M31, pueden encontrarse planetas que cuentan con las condiciones adecuadas para la vida, ya sea simple o desarrollada. Sin embargo, tal vez se encuentren planetas, en esa misma región, que migraron desde el *bulbo* y/o regiones centrales del *disco*, y en ellos la posibilidad de vida ha sido ya anulada debido a la ocurrencia de SN.

FIGURA 43 ZONA DE HABITABILIDAD GALÁCTICA: PLANETAS SOBREVIVIENTES A SN QUE PODRÍAN VIDA SIMPLE + COMPLEJA Y MRE



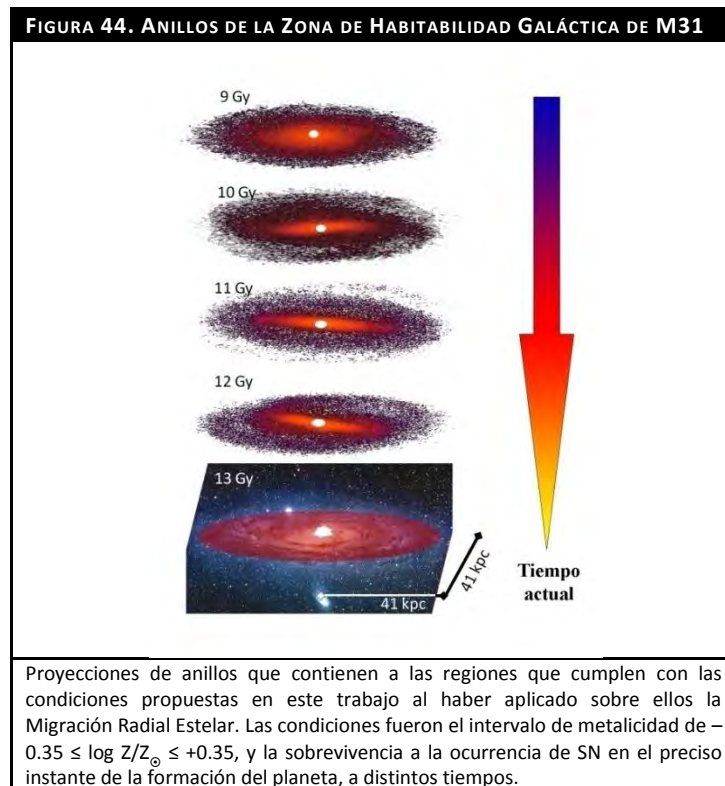
La región verde representa los radios y los tiempos donde y cuando se puede dar la formación planetaria tomando como base las abundancias químicas dadas por el modelo de Evolución Química y los intervalos propuestos de metalicidad, es decir:  $-0.10 \leq \log Z/Z_{\odot} \leq +0.35$  de Lineweaver *et al.* (2004) en la gráfica superior y,  $-0.35 \leq \log Z/Z_{\odot} \leq +0.35$  del presente trabajo en la gráfica inferior. Las regiones azul y amarilla representan los radios y tiempos donde y cuando no habrá formación planetaria debido a los extremos (bajos y altos, respectivamente) en la cantidad de elementos químicos. La región roja representa los radios y los tiempos donde y cuando los planetas formados tuvieron:  $\langle \xi(r,t) \rangle \geq 2 \langle \xi_{\oplus} \rangle$  en sus primeros 4.5 Ga de existencia de acuerdo con Lineweaver *et al.* (2004) en la gráfica superior y,  $\langle \xi(r,t) \rangle \geq \langle \xi_{\oplus} \rangle$  en cada uno de los instantes de la vida del planeta de acuerdo a lo propuesto en el presente trabajo y mostrado en la gráfica inferior. La región texturizada blanca representa a las zonas en donde se encuentran planetas que cuentan ya con una órbita circular estable y pueden contener vida simple en ellos. La región texturizada negra representa a las zonas en donde se encuentran planetas que pueden contener vida desarrollada en ellos. La región naranja representa las zonas de M31 donde puede darse migración de sistemas planetarios debido a la Migración Radial Estelar.



En la actualidad, es decir a los 13 Ga de la EQ de M31, tomando en cuenta cualquier escenario de metalicidad y sobrevivencia a la ocurrencia de SN, se encontrarían planetas que pueden contener tanto vida simple como desarrollada por el hecho de tener la edad mínima para esta condición, ya que las edades van desde 4.5 Ga hasta 11 Ga. Sin embargo, debido a que la región del *bulbo* y las regiones centrales del *disco*, tuvieron una alta ocurrencia de SN pudiendo no haber permitido la sobrevivencia la vida, representando así la razón por la cual en regiones externas de M31, no se encuentren planetas con vida, pese a que las condiciones podrían ser las adecuadas.

#### 4.5 ANILLOS DE LA ZONA DE HABITABILIDAD GALÁCTICA A DISTINTOS TIEMPOS

Para poder ejemplificar de mejor manera cómo cambian las regiones donde puede darse la ZHG junto con la MRE en M31, se proyectaron anillos<sup>30</sup> que contienen a las regiones sobre el plano de la galaxia, a distintos tiempos, que cumplen con condiciones para la ZHG. En la *Figura 44*, se muestran los anillos proyectados a distintos tiempos de la EQ de M31 que cumplieron con las condiciones propuestas en este trabajo y a las que se les aplicó la MRE.



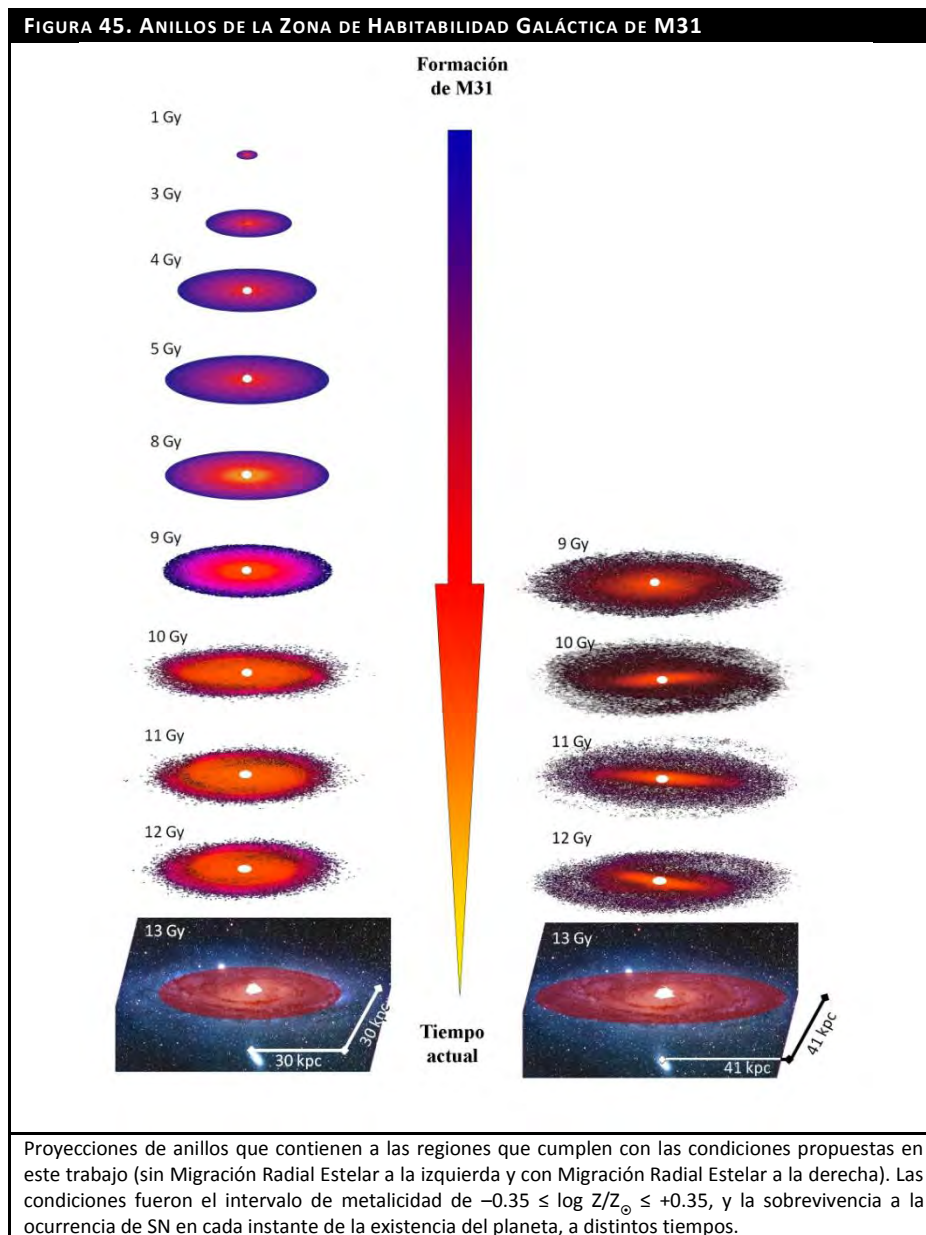
<sup>30</sup> Debido a la suposición del modelo de EQ de simetría azimutal/axial.

Las condiciones tomadas fueron el intervalo de metalicidad de  $-0.35 \leq \log Z/Z_{\odot} \leq +0.35$ , y la sobrevivencia a la ocurrencia de SN en el preciso instante de la formación del planeta (ver *ecuación 73*). Como se puede observar, conforme transcurrió la EQ, el ancho del anillo fue aumentando debido al incremento de las abundancias químicas.

La última imagen de la figura, muestra una imagen, en el óptico, de M31 a la que se le superpuso el anillo de la ZHG que tiene en la actualidad, i.e. a los 13 Ga de su formación. Actualmente, la ZHG de M31 es un anillo el cual inicia a 5 kpc desde el centro de la galaxia y termina, aproximadamente, a los 42 kpc lo que implica que tiene un grosor de  $\sim 25$  kpc. La ZHG actual contendría planetas con edades de hasta 11 Ga los cuales ya cuentan con una órbita circular estable y podrían contener vida tanto simple como compleja.

## 5. REGIONES QUÍMICAMENTE APTAS PARA LA FORMACIÓN DE PLANETAS QUE ALBERGUEN VIDA EN LA GALAXIA DE ANDRÓMEDA (CONCLUSIONES)

Utilizando el modelo de Evolución Química, se obtuvo por vez primera, la Zona de Habitabilidad Galáctica (ZHG) de M31 (ver *Figura 45*), considerando requerimientos en el espacio: las zonas con suficientes abundancias químicas para la formación planetaria y un número bajo de supernovas para evitar la extinción de vida; y requerimientos temporales: adquisición de una órbita circular estable, edad suficiente del planeta tanto para permitir el surgimiento de vida simple y la evolución hacia vida compleja.



La ZHG, sin considerar Migración Radial Estelar (MRE) de M31, consiste en un anillo que se va ensanchando desde regiones internas a externas, durante los primeros 4 Ga alcanzando, en la actualidad, a prácticamente todo el disco de la galaxia, entre 4 y 30 kpc. Este anillo contiene planetas de edades no mayores a 11 Ga, aquellos planetas de más de 1 giga-año de edad pueden albergar vida simple pero sólo en planetas de 4.6 giga-años puede encontrarse vida compleja. Si la vida es esterilizada por supernovas, los planetas entre 3 y 9 kpc y más viejos que 6.5 Ga fueron esterilizados (ver imagen izquierda de la *Figura 45*).

La ZHG, con MRE de M31, consiste en un anillo que se va ensanchando desde regiones internas a externas, durante los primeros 4 Ga alcanzando, en la actualidad, a prácticamente todo el disco de la galaxia, entre 4 y 42 kpc. Este anillo contiene planetas de edades no mayores a 11 Ga, aquellos planetas de más de 1 Ga de edad pueden albergar vida simple pero sólo en planetas de 4.6 giga-años puede encontrarse vida compleja. Si la vida es esterilizada por supernovas, los planetas entre 3 y 9 kpc y más viejos que 6.5 giga-años fueron esterilizados. Conforme transcurrió el tiempo, el grosor del anillo fue disminuyendo debido al incremento de las abundancias químicas. En la última imagen de la misma figura, se muestra una imagen actual, en el óptico, de M31 a la que se le superpuso el anillo de la ZHG con MRE que tiene en la actualidad, i.e. a los 13 Ga de su formación. Actualmente, la ZHG de M31 es un anillo el cual inicia a 5 kpc desde el centro de la galaxia y termina, aproximadamente, a los 42 kpc lo que implica que tiene un grosor de  $\sim 37$  kpc. La ZHG actual contendría planetas con edades de hasta 11 Ga los cuales ya cuentan con una órbita circular estable y podrían contener vida tanto simple como compleja (ver imagen derecha de la *Figura 45*).

# GLOSARIO DE ACRÓNIMOS Y TÉRMINOS

Abundancia de oxígeno sobre hidrógeno	[O/H]
Acreción	A(t)
Aproximación de Reciclaje Instantáneo	ARI
Código de programación utilizado para el modelaje de la Evolución Química	KERO
Distribución radial de densidad superficial de masa de estrellas	$\Sigma_*(r)$
Distribución radial de densidad superficial de masa de gas	$\Sigma_{\text{gas}}(r)$
Distribución radial de densidad superficial de masa de total bariónica	$\Sigma_T(r)$
Eficiencia de formación estelar	$\nu$
Estrella de baja masa	EBM
Estrella masiva	EM
Evolución Química	EQ
Función de Distribución de Masa	FDM
Función de Masa Inicia	FMI o $\varphi(m)$
Giga-año	Ga
Galaxia de Andrómeda	M31
Kilo-pársec	Kpc
Masa bariónica	M
Masa de gas	$M_{\text{gas}}$
Masa de Júpiter o Joviana	$M_J$
Masa de la estrella convertida en el elemento i	$M_{ej}$
Masa de una estrella	m
Masa del remanente estelar	$M_{\text{rem}}$
Masa estelar	$M_*$
Masa Solar	$M_{\odot}$
Masa Terrestre	$M_{\oplus}$
Medio Interestelar	MIE
Metalicidad o abundancia de elementos químicos más pesados que el helio	Z
Metalicidad Solar	$Z_{\odot}$
Migración Radial Estelar	MRE
Número de estrellas al tiempo i	$N_i$
Número de estrellas totales	$N_T$
Pársec	pc
Rendimiento químico estelar de la especie i	$p_i$
Rendimiento químico estelar de la especie i por generación estelar	$Y_i$
Supernova	SN
Sobrevivencia a la ocurrencia de Supernovas	$\xi(t)$
Sobrevivencia a la ocurrencia de Supernovas de la Tierra	$\xi_{\oplus}$
Tasa de Formación Estelar	TFE o $\Psi$
Tasa de muerte estelar	E(t)
Tasa de pérdidas de material	W(t)
Unidad Astronómica	UA
Vía Láctea o nuestra Galaxia	VL
Zona de Habitabilidad Galáctica	ZHG

# ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

TABLA 1. ELEMENTOS QUÍMICOS Y PROPIEDADES DE LAS ESTRELLAS QUE LOS SINTETIZAN	7
FIGURA 1. REACCIONES NUCLEARES QUE SE LLEVAN A CABO EN LA CADENA P-P	7
FIGURA 2. REACCIONES NUCLEARES QUE SE LLEVAN A CABO EN EL CICLO CNO	8
FIGURA 3. GALAXIA DE ANDRÓMEDA Y SUS DIMENSIONES	9
FIGURA 4. COMPONENTES DE LA GALAXIA DE ANDRÓMEDA	11
FIGURA 5. DISTRIBUCIÓN DEL NÚMERO DE PLANETAS EXTRASOLARES DESCUBIERTOS RESPECTO AL $\log Z/Z_{\odot}$ DE SU ESTRELLA	19
FIGURA 6. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE UN PLANETA TIPO TIERRA	21
FIGURA 7. <i>BARRA</i> (O <i>BARRA-BULBO</i> ) DE LA GALAXIA DE ANDRÓMEDA	24
FIGURA 8. FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE ABUNDANCIAS QUÍMICAS PARA EL BULBO DE M31	29
FIGURA 9. EVOLUCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN RADIAL DE DENSIDAD SUPERFICIAL DE MASA TOTAL	31
FIGURA 10. COMPARACIÓN DE LA FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE MASA TEÓRICA Y OBSERVACIONAL	32
FIGURA 11. GRADIENTES DE [O/H] DETERMINADOS POR MÉTODOS EMPÍRICOS Y TEÓRICOS	34
FIGURA 12. DISTRIBUCIONES DE LAS PENDIENTES Y LAS ORDENADAS AL ORIGEN DE LOS GRADIENTES DE [O/H]	35
FIGURA 13. GRADIENTE A REPRODUCIR Y REGIONES DE INCERTIDUMBRE PARA [O/H] DEL DISCO DE M31	36
FIGURA 14. DISTRIBUCIÓN RADIAL OBSERVACIONAL DE LA DENSIDAD SUPERFICIAL DE MASA DE GAS DEL DISCO DE M31	39
FIGURA 15. EVOLUCIÓN $\log Z/Z_{\odot}$ PARA EL HALO DE M31	41
FIGURA 16. COMPARACIÓN DE LA $\Sigma_{\text{GAS}}$ OBSERVACIONAL DEL <i>DISCO</i> DE M31 CON LA $\Sigma_{\text{GAS}}$ TEÓRICA	42
FIGURA 17. GRADIENTE ACTUAL DE [O/H] OBSERVACIONAL Y TEÓRICO	43
FIGURA 18. EVOLUCIÓN DE LA ACRECIÓN DEL <i>HALO-DISCO</i> EN FUNCIÓN DEL RADIO Y EL TIEMPO	44
FIGURA 19. EVOLUCIÓN DE LA TASA DE FORMACIÓN ESTELAR DE EN FUNCIÓN DEL RADIO Y EL TIEMPO	45
FIGURA 20. EVOLUCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN RADIAL DE DENSIDAD SUPERFICIAL DE MASA TOTAL	47
FIGURA 21. EVOLUCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN RADIAL DE LA DENSIDAD SUPERFICIAL DE MASA DE GAS	48
FIGURA 22. EVOLUCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN RADIAL DE DENSIDAD SUPERFICIAL DE MASA DE ESTRELLAS	49
FIGURA 23. EVOLUCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN RADIAL DE ABUNDANCIA DE HIDRÓGENO	50
FIGURA 24. EVOLUCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN RADIAL DE OXÍGENO	51
FIGURA 25. EVOLUCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN RADIAL DE ABUNDANCIA DE Z	52
FIGURA 26. EVOLUCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN RADIAL DE ABUNDANCIA [O/H]	53
FIGURA 27. EVOLUCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN RADIAL DE ABUNDANCIA DE $\log Z/Z_{\odot}$	54
FIGURA 28. REGIONES DE M31 CON FORMACIÓN PLANETARIA	57
FIGURA 29. EVOLUCIÓN DEL RIESGO A SN DE M31 DE ACUERDO A LA CONDICIÓN DE LINEWEAVER ET AL. (2004)	61
FIGURA 30. EVOLUCIÓN DEL RIESGO A SN DE M31 DE ACUERDO A CONDICIONES DE SOBREVIVENCIA EN LA VIDA DEL PLANETA	62
FIGURA 31. EVOLUCIÓN DEL RIESGO A SN DE M31 DE ACUERDO A CONDICIONES DE SOBREVIVENCIA INSTANTÁNEA	63
FIGURA 32. REGIONES Y TIEMPOS DE FORMACIÓN PLANETARIA Y SOBREVIVENCIA A LA OCURRENCIA DE SUPERNOVAS	65
FIGURA 33. REGIONES Y TIEMPOS DE FORMACIÓN PLANETARIA Y SOBREVIVENCIA A LA OCURRENCIA DE SUPERNOVAS	66
FIGURA 34. ZONA DE HABITABILIDAD GALÁCTICA: PLANETAS SOBREVIVIENTES A SUPERNOVAS QUE PODRÍAN CONTENER VIDA SIMPLE	69
FIGURA 35. ZONA DE HABITABILIDAD GALÁCTICA: PLANETAS SOBREVIVIENTES A SUPERNOVAS QUE PODRÍAN CONTENER VIDA SIMPLE	70
FIGURA 36. ZONA DE HABITABILIDAD GALÁCTICA: PLANETAS SOBREVIVIENTES A SN QUE PODRÍAN CONTENER VIDA SIMPLE + COMPLEJA	73
FIGURA 37. ZONA DE HABITABILIDAD GALÁCTICA: PLANETAS SOBREVIVIENTES A SN QUE PODRÍAN CONTENER VIDA SIMPLE + COMPLEJA	74
FIGURA 38. ANILLOS DE LA ZONA DE HABITABILIDAD GALÁCTICA DE M31	75
FIGURA 39. DISTINTOS MOMENTOS DE LA SIMULACIÓN DE KLYPIN ET AL. (2008)	78
FIGURA 40. CAMBIO EN LOS GRADIENTES QUÍMICOS DEBIDO A LA MIGRACIÓN RADIAL ESTELAR	80
	90

FIGURA 41. DISTINTOS MOMENTOS DE LA SIMULACIÓN DE KLYPIN ET AL. (2008) CON ABUNDANCIAS QUÍMICAS	81
FIGURA 42. REGIONES DE M31 CON FORMACIÓN Y MIGRACIÓN DE SISTEMAS PLANETARIOS	82
FIGURA 43 ZONA DE HABITABILIDAD GALÁCTICA: PLANETAS SOBREVIVIENTES A SN QUE PODRÍAN VIDA SIMPLE + COMPLEJA Y MRE	84
FIGURA 44. ANILLOS DE LA ZONA DE HABITABILIDAD GALÁCTICA DE M31	85
FIGURA 45. ANILLOS DE LA ZONA DE HABITABILIDAD GALÁCTICA DE M31	87

## REFERENCIAS

- Akritis, M. G., Bershadsky M. A. (1996) Linear Regression for Astronomical Data with Measurement Errors and Intrinsic Scatter. *The Astrophysical Journal*, 470, 706-714
- Allen, C., Carigi, L., & Peimbert, M. (1998). Chemodynamical model of the Galaxy: abundance gradients predicted for H II regions and planetary nebulae. *Astrophysical Journal*, 494, 247 - 255.
- Arnett, D. (1996). *Supernovae and nucleosynthesis*. UK: Princeton University Press.
- Athanassoula, E., & Beaton, R. L. (2006). Unravelling the mystery of the M31 bar. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 370, 1499 - 1512.
- Bada, J. L. (2004). How life began on Earth. *E&P Science Letter*, 226, 1 - 15.
- Ballero, S. K., Matteucci, F., Origlia, L., & Rich, R. M. (2007). Formation and evolution of the Galactic bulge: constraints. *Astronomy and Astrophysics*, 467, 123–136.
- Barnes, R., Raymond, S. N., Jackson, B., & Greenberg, R. (2008). Tides and the evolution of planetary habitability. *Astrobiology*, 8, 557-568.
- Beaton, R., Majewski, S., Guhathakurta, P., Skrutskie, M., Cutri, R., Good, J., et al. (2007). Unveiling the Boxy Bulge and Bar of the Andromeda Spiral Galaxy. *Astrophysical Journal*, 658, 91- 94.
- Bellazzini, M., Cacciari, C., Federici, L., Pecci, F., & Rich, M. (2003). The Andromeda project I. Deep HST-WFPC2 V, I photometry of 16 fields toward the disk and halo of the M31 galaxy. Probing stellar content and metallicity distribution. *Astronomy & Astrophysics*, 1 – 45.
- Blair, W. P., Kirshner, R. P., and Chevalier, R. A. (1982) Abundance gradients in M31 - Comparison of results from supernova remnants and H II regions. *The Astrophysical Journal*. 254: 50-69.
- Bonanno, A., Schlattl, H., & Paternò, L. (2002). The age of the Sun and the relativistic corrections in the EOS. *Astronomy & Astrophysics*, 390, 1115 – 1118.
- Bournaud, F., & Combes, F. (2002). Gas accretion on spiral galaxies: Bar formation and renewal. *Astronomy and Astrophysics*, 392, 83 – 102.
- Bradley, C. W., & Ostlie, D. A. (2007). *An introduction to modern astrophysics*. UK: Addison Wesley.
- Carigi, L., & Peimbert, M. (2008). The Helium and heavy elements enrichment of the Galactic Disk. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, 44, 341 - 354.
- Carigi, L., Peimbert, M., Esteban, C., & García-Rojas, J. (2005). Carbon, nitrogen and oxygen galactic gradients: a solution to the carbon enrichment problem. *The Astrophysical Journal*, 623, 213-224.



- Chang, S. (1982). Prebiotic organic matter: possible pathways for synthesis in a geological context. *PhEPI*, 29, 261 – 280.
- Chapman, S. C., Ibata, R., Lewis, G. F., Ferguson, A. M., Irwin, M., McConnachie, A., et al. (2006). A Kinematically Selected, Metal-poor Stellar Halo in the Outskirts of M31. *Astrophysical Journal*, 253, 255 - 266.
- Chyba, C., & Sagan, C. (1991). Electrical energy sources for organic synthesis on the early Earth. *Origins Life Evol. Biosph.*, 21, 3 – 17.
- Clayton, D. D. (1983). *Principles of stellar evolution and nucleosynthesis* (2a ed.). EUA: University of Chicago Press.
- Cowley, C. R. (1995). *An introduction to Cosmochemistry* (1a ed.). UK: Cambridge University Press.
- Enciclopedia de planetas Extrasolares. (2009). Desgargado en Junio 20, 2009, de <http://exoplanet.eu>
- Eskridge, P. B., & Frogel, J. A. (1999). What is the true fraction of barred spiral galaxies? *Astrophysics & Space Science*, 269/270, 427 – 430.
- Esteban, C. (2005). Cosmochemistry: from the Big Bang to the origin of life. In M. Vazquez, *Fundamental challenges in Astrobiology* (pp. 1-34). Research Signpost.
- Evans, N., & Wilkinson, M. (2000). The Mass of Andromeda galaxy. *Montly Notices of the Royal Astronomical Society*, 316, 929 - 942.
- Fogg, M. J., & Nelson, R. P. (2007). The effect of type I migration on the formation of terrestrial planets in hot Jupiter-systems. *Astronomy & Astrophysics*, 472, 1003 – 1015.
- Franco, I., & Carigi, L. (2008). The delayed contribution of low and intermediate mass stars to chemical galactic enrichment: An analytical approach. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, 44, 311 - 323.
- Friedli, D., & Benz, W. (1993). Secular evolution of isolated barred galaxies. I - Gravitational coupling between stellar bars and interstellar medium. *Astronomy & Astrophysics*, 268, 65-85.
- Friedli, D., & Benz, W. (1995). Secular evolution of isolated barred galaxies. II. Coupling between stars and interstellar medium via star formation. *Astronomy & Astrophysics*, 301, 649 - 665.
- Friedli, D., Benz, W., & Kennicutt, R. (1994). On the influence of bars and star formation on galactic abundance gradients. *The Astrophysical Journal*, 430, L105-L108.
- Fuchs, B., Jahreiß, H., & Flynn, C. (2009). A Schmidt-Kennicutt Law for Star Formation in the Milky Way Disk. *Astrophysical Journal*, 139, 266 - 271.
- Galarza, V. C., Walterbos, R. A. M., and Braun, R. (1999) Spectrophotometry of H II Regions, Diffuse Ionized Gas, and Supernova Remnants in M31: The Transition from Photoionization to Shock Ionization. *The Astronomical Journal*. 118: 2775-2796.
- Gerhard, O., Binney, J. J., & Zhao, H. (1998). The Galactic bar. *Highlights of Astronomy*, XI, 628.

- Gómez–Caballero, J. A., & Pantoja–Alor, J. (2003). El origen de la vida desde un punto de vista geológico. *Boletín Sociedad Geológica Mexicana*, LVI, 56 – 86.
- González, G., Brownlee, D., & Ward, P. (2001). The galactic habitable zone: galactic chemical evolution. *Icarus*, 152, 185 – 200.
- Grevesse, N., Asplund, M., & Sauval, A. J. (2007). The Solar Chemical Composition. *Space Science Reviews*, 130, 105 - 114.
- Hazen, B. N., Brandes, J., Cody, G., Hemley, R., Sharma, A., et al. (2002). High pressure and the origin of life. *J. Phys. Condensed Matter*, 14, 11489 – 11494.
- Hillenbrand, L. A. (2008). Disk dispersal and planet formation time scales. *Physics Scripta*, 130, 14024 – 14036.
- Hodge, P. (1992). *The Andromeda Galaxy*. Astrophysics Space Science Library, 176.
- Holland, S. (1998). *The Globular Clusters and Halo of M31*. University of British Columbia, Canada.
- Horner, J. J. (2008). Jupiter friend or foe? I: The asteroids. *International Journal of Astrobiology*, 7, 251 - 261.
- Ikoma, M., & Genda, H. (2006). Constrains on the mass of a habitable planet with water of nebular origin. *The Astrophysical Journal*, 648, 696 – 706.
- Karachentsev, I. D., & Kashibadze, O. G. (2006). Masses of the local group  $\gamma$  of the M81 group estimated from distortions in the local velocity field. *Astrophysics*, 49, 3 – 18.
- Karachentsev, I. D., Karachentseva, V. E., Hutchmeier, W. K., & Makarov, D. I. (2004). A Catalog of Neighboring Galaxies. *The Astronomical Journal*, 127, 2031 – 2068.
- Karttunen, H. (2003). *Fundamental Astronomy* (4a ed.). Alemania: ED. Springer-Verlag.
- Kewley, L. J., & Dopita, M. A. (2002). Using Strong Lines to Estimate Abundances in Extragalactic H II Regions and Starburst Galaxies. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 142, 35 - 52.
- Kewley, L. J., & Ellison, S. (2008). Metallicity Calibrations and the Mass-Metallicity Relation for Star-forming Galaxies. *The Astrophysical Journal*, 681, 1183 - 1204.
- Klypin, A., Valenzuela, O., Colín, P., & Quinn, T. (2008). Dynamics of barred galaxies: effects of disk height. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, arXiv:0808.3422.
- Knapen, J. H., Pérez-Ramírez, D., & Laine, S. (2002). Circumnuclear regions in barred spiral galaxies II. Relations to host galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 337, 808 – 828.
- Kobulnicky, H. A., & Kewley, L. J. (2004). Metallicities of  $0.3 < z < 1.0$  Galaxies in the GOODS-North Field. *The Astrophysical Journal*, 617, 240 - 261.
- Koch, A., Rich, R. M., Reitzel, D. B., Martin, N. F., Ibata, R. A., Chapman, S. C., et al. (2008). *Astrophysical Journal*. Kinematic and Chemical Constraints on the Formation of M31's Inner and Outer Halo, 689, 958 - 982.

- Lineweaver, C. H. (2001). An estimate of the age distributio of terrestrial planets in the Universe: quantifying metallicity as a selection effect. *Icarus* , 151, 307 – 313.
- Lineweaver, C. H., Fenner, Y., & Gibson, B. K. (2004). The galactic habitable zone and the age distribution of complex life in the milky way. *Science* , 303, 59 – 62.
- Lovering, J. F., Parry, L. G., & Jaeger, J. C. (1960). Temperatures and mass losses in iron meteorites during ablation in the Earth's atmosphere. *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 19, 156 – 167.
- Martin, P., & Roy, J. R. (1994). The influence of bars on the chemical composition of spiral galaxies. *Astrophysical Journal* , 424, 599 - 614.
- Mason, S. F. (1991). *Chemical Evolution: origin of elements, molecules and living systems* (1a ed.). UK: Clarendon Press.
- Mateucci, F. (2004). Chemical evolution of galaxies and intracluster medium. In C. Esteban (Ed.), *Cosmochemistry, The melting pot of the elements* (pp. 217 – 256). Reino Unido: Cambridge University Press.
- Matteucci, F. (2001). *The chemical evolution of the galaxy* (1a ed.). Países Bajos: Kluwer Academic Publishers.
- Maurette, M., Brackb, A., Kuratc, G., Perreaud, M., & Engrand, C. (1995). Were micrometeorites a source of prebiotic molecules on the early Earth? *Adv Space Res* , 15, 113 – 126.
- McClendon, J. H. (1999). The origin of life. *Earth-Science Revs* , 49, 71 – 93.
- McGaugh, S. S. (1991). H II region abundances - Model oxygen line ratios. *The Astrophysical Journal* , 380, 140 - 150.
- Mihalas, D., & McRae, R. P. (1968). *Galactic Astronomy*. US: W.H. Freeman and Company.
- Navarro–González, R., McKay, C. P., & Nna–Mvondo, D. (2001). A possible nitrogen crisis for archaean life due to reduce nitrogen fixation by lightning. *Nature* , 412, 61 – 64.
- Nieten, Ch., Neininger, N., Guélin, M., Ungerechts, H., Lucas, R., Berkhuijsen, E. M, Beck, R. and Wielebinski, R. (2006) Molecular gas in the Andromeda galaxy. *Astronomy and Astrophysics*. 453: 459-475.
- Orgel, L. E. (1998). ‘The origin of life – a review of facts y speculations. *TIBS* , 23, 491 – 495.
- Osterbrok, D. E.; Ferland, G. J.; “Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei”; ED. University Science books, EU; 1a edición, 1989.
- Pagel, B. E. J.; “Nucleosynthesis and chemical evolution of Galaxies”, ED. Cambridge University Press, UK; 1a edición, 1997.
- Peimbert, M. (1990). Total number of planetary nebulae in different galaxies and the PN distance scale. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica* , 20, 119 - 125.
- Peimbert, M., & Torres-Peimbert, S. (1977). Chemical composition of the Orion Nebula. *Monthly Notices of Royal Astronomical Society* , 179, 217 - 234.

- Pérez-Ramírez, D., Knapen, J. H., Peletier, R. F., Laine, S., Doyon, R., & Nadeau, D. (2000). Circumnuclear regions in barred spiral galaxies - I. Near-infrared imaging. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* , 317, 234 - 248.
- Pilyugin, L. S. (2001). The oxygen abundance distribution in M101. *Astronomy and Astrophysics* , 373, 56 - 62.
- Pilyugin, L. S., & Thuan, T. X. (2005). Oxygen Abundance Determination in H II Regions: The Strong Line Intensities-Abundance Calibration Revisited. *The Astrophysical Journal* , 631, 231 - 243.
- Renda, A., Kawata, D., Fenner, Y. and Gibson, B. K. (2005) Contrasting the chemical evolution of the Milky Way and the Andromeda galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 356: 1071-1078.
- Rhee, j. H., Song, I., & Zuckerman, B. (2008). Warm dust in the terrestrial planet zone of a Sun-like Pleiades star: collision between planetary embryos. *ApJ* , 675, 777 – 783.
- Rosolowsky, E., and Simon, J. D. (2008) The M33 Metallicity Project: Resolving the Abundance Gradient Discrepancies in M33. *The Astrophysical Journal* 675, 1213-1222
- Roškar, R., Debattista, V. P., Quinn, T. R., Stinson, G. S., & Wadsley, J. (2008). Riding the Spiral Waves: Implications of Stellar Migration for the Properties of Galactic Disks. *Astrophysical Journal* , 684, 79 - 82.
- Sarajedini, A., & Jablonka, P. (2005). The Metallicity Distribution Function of Field Stars in M31's Bulge. *The Astronomical Journal* , 130, 1627 – 1634.
- Schönrich, R., & Binney, J. (2009). Chemical evolution with radial mixing. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* , 396, 203 - 222.
- Sekine, Y., Sugita, S., Kadono, T., & Matsui, T. (2003). Methane production by large iron meteorites impacts on early Earth. *JGeophRes* , 108, 2 - 11.
- Sellwood, J. A., & Wilkinson, A. (1993). Dynamics of barred galaxies. *Rep. Prog. Phys.* , 56, 173 - 255.
- Shankland, P. D., Blank, D. L., & Boboltz, D. A. (2008). “Further constraints on the presence of a Debris disk in the multiplanetary system Gliese. *The Astronomical Journal* , 135, 2194 – 2198.
- Shaw, A. M. (2006). *Astrochemistry: from Astronomy to Astrobiology* (1a ed.). UK: John Wiley & Sons.
- Sparke, L. S., & Gallagher, J. S. (2000). *Galaxies in the Universe: an introduction* (1a ed.). UK: Cambridge University Press.
- Torres-Peimbert, S., & Peimbert, M. (1977). Photoelectric photometry and physical conditions of planetary nebulae. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica* , 2, 181 - 207.
- Tremonti, C. A., Heckman, T. M., Kauffmann, G., Brinchmann, J., Charlot, S., White, S. D., et al. (2004). The Origin of the Mass-Metallicity Relation: Insights from 53,000 Star-forming Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. *The Astrophysical Journal* , 613, 898 - 913.

van der Tak, F. (2008). Recent astrochemical results on star-formation regions. ASP Conference series , 387, 101 – 110.

Venn, K. A., McCarthy, J. K., Lennon, D. J., Przybilla, N., Kudritzki, R. P., and Lemke, M. (2000) Analysis of Four A-F Supergiants in M31 from Keck HIRES Spectroscopy. The Astrophysical Journal 541, 610-623

Ward, P. D., & Brownlee, D. (2000). Rare earth: why complex life is uncommon in the universe? Icarus , 147, 325-326.

Widrow, L. M., Perrett, K. M., & Suandu, S. H. (2003). Disk-bulge-halo models for the Andromeda galaxy. Astrophysical Journal , 588, 311 – 325.

Youdin, A. (2008). From Grains to Planetesimals. Les Houches Winter School, Physics and Astrophysics of Planetary Systems , arXiv:0807.1114v2 [astro-ph].

Zaritsky, D., Kennicutt, R. C., & Huchra, J. P. (1994). H II regions and the abundance properties of spiral galaxies. The Astrophysical Journal , 420, 87 - 109.