

Facultad de Matemática Astronomía y Física
Universidad Nacional de Córdoba

Trabajo Especial de la Licenciatura en Astronomía

Dinámica de cúmulos estelares en la Nube Menor de Magallanes

Alumna: Annabella E. Mondino Llermanos

Director: Dr. Andrés E. Piatti

Co-Director: Dr. Daniel Carpintero



Dinámica de Cúmulos Estelares en la Nube Menor de Magallanes
por Mondino Llermanos, Annabella Elizabeth se distribuye bajo una
Licencia Creative Commons Atribución 2.5 Argentina.

Marzo 2015

*“El cosmos es todo lo que es, todo lo que fue y todo lo que alguna vez será.
Nuestras más ligeras contemplaciones del cosmos nos hacen estremecer:
sentimos como una suerte de cosquilleo nos llena los nervios, una voz
muda, una ligera sensación... como si de un recuerdo lejano se tratase o
como si cayéramos desde una gran altura.
Sabemos que nos aproximamos al más grande de los misterios.”*

Carl Sagan (1934-1996)

Resumen

La evolución dinámica de los cúmulos de estrellas en la Nube Menor de Magallanes es actualmente un enigma que merece especial atención. En este trabajo, abordamos esta temática mediante la realización de simulaciones numéricas de sus movimientos orbitales. Con este fin, adoptamos un potencial gravitacional de la galaxia y la distribución de posición-edad-metalicidad actualmente conocida, y a partir de ellos buscamos conocer sus lugares de nacimiento mediante el cálculo de sus movimientos orbitales hacia el pasado para un intervalo igual a sus edades. Nuestro objetivo es investigar el impacto sobre la distribución espacial de metalicidad al considerar sus posiciones originales en lugar de las actuales.

Como se ha sugerido en varias ocasiones en los últimos años, nuestro conocimiento sobre la evolución química de la Nube Menor de Magallanes -después de un profundo estudio de las propiedades de su sistema de cúmulos estelares- ha encontrado una frontera infranqueable más allá de la cual sólo especulaciones teóricas se pueden realizar. En este contexto, es indiscutiblemente necesario el conocimiento de los lugares de nacimiento de sus cúmulos estelares para superar dicha frontera, particularmente en el caso de los cúmulos más viejos. La disponibilidad de recientes catálogos de cúmulos estelares, incluyendo nuevas determinaciones de los parámetros fundamentales, nos ayudan a mantener una perspectiva actual de lo que realmente está sucediendo en este campo de la astrofísica. En primera instancia, discutimos modelos teóricos propuestos recientemente en la literatura acerca de la estructura y evolución dinámica de la Nube Menor de Magallanes. Las simulaciones numéricas para describir la evolución dinámica de los cúmulos estelares se llevaron a cabo hacia atrás en el tiempo desde el presente hasta el momento de su formación, en diferentes escenarios. Consideramos un escenario simple que contempla solo la galaxia aislada en el Universo. A partir de este, propusimos escenarios más complejos que tienen en cuenta el gas y disco estelar de la galaxia, como así también la presencia de la Nube Mayor de Magallanes y de la Vía Láctea.

Los resultados muestran que en este último escenario simulado, los cúmulos experimentan en promedio un apartamiento de sus lugares de nacimiento, lo cual se traduce en una expansión del sistema en el plano del cielo. Esto nos permite concluir que la relación metalicidad-posición observada actualmente ha sido considerablemente modificada por la evolución dinámica de la galaxia.

Palabras claves: Nubes de Magallanes, Dinámica, Cúmulos Estelares, Metalicidad.

PACS:

1. 98.56.Si Magellanic Clouds and other irregular galaxies
2. 98.62.Bj Chemical composition and chemical evolution
3. 98.62.Dm Kinematics, dynamics, and rotation

Agradecimientos

*Un sueño que sueñas solo es sólo un sueño.
Un sueño que sueñas con alguien es una realidad.*

John Lennon (1940-1980)

A mi familia que siempre estuvo a mi lado brindándome
su apoyo incondicional y acompañándome en el camino
hacia la realización de mis metas,

a mis amigos, que aguantan mis locuras,

a mis directores Andrés E. Piatti y Daniel Carpintero,
por guiarme a lo largo de este camino y ayudarme tanto,

a Fa.M.A.F. que estimuló mi interés en la astronomía,

y al O.A.C. por ser no sólo un lugar de trabajo
sino además un segundo hogar.

Índice general

1. Introducción	8
2. El sistema de cúmulos estelares de la Nube Menor de Magallanes	27
2.1. Distribución espacial y cinemática	28
2.2. Distribución de edades	32
2.3. Metalicidades	34
2.4. Fundamentos de la elección de los objetos de estudio	38
3. Evolución dinámica	45
3.1. Modelos de potencial galáctico	45
3.2. Creación del sistema de cúmulos estelares	49
3.2.1. Designación de posiciones	49
3.2.2. Asignación de edades	57
3.2.3. Asignación de metalicidades	60
3.3. Dinámica de los cúmulos estelares	63
3.3.1. Velocidades de los cúmulos estelares inmersos en el disco estelar y de gas	63
3.3.2. Velocidades de los cúmulos estelares fuera del disco estelar y de gas	63
3.4. Método de resolución de las ecuaciones de movimiento	66
4. Simulaciones y resultados	72
4.1. Modelos empleados	72
4.2. Resultados	75
5. Paleogradientes de metalicidad en la Nube Menor de Magallanes	81
5.1. Análisis de los resultados	81
5.2. Robustez del programa	96

6. Conclusiones y perspectivas futuras	104
A. Relaciones resultantes en modelos simulados	106
A.1. Modelo 1	106
A.2. Modelo 2	106
A.3. Modelo 3	114
A.4. Modelo 4	114
B. Relaciones resultantes en modelos para estudio de robustez	122
B.1. Modelo 5	122
B.2. Modelo 6	122

Capítulo 1

Introducción

La Vía Láctea (en adelante VL), como todo objeto catalogado como una galaxia, es un sistema estelar dinámicamente ligado por atracción gravitatoria. Esta clase de objetos es muy diversa, por lo cual se requiere un gran número de parámetros para poder caracterizarlos. Uno de estos parámetros es su morfología. Es apreciable en este sentido, la existencia de dos tipos básicos de galaxias: Espirales y Elípticas. No obstante, la mayoría no son elipsoides o discos perfectos, sino una combinación entre ambos. Uno de los primeros esquemas clasificatorios, que aún se sigue empleando, es la *Secuencia de Hubble* (Figura 1.1) la cual clasifica a las galaxias en función del grado de combinación entre las componentes disco y elipsoide; y cuyo rango abarca desde aquellas puramente elipsoidales, también llamadas históricamente de tipo elípticas tempranas, hasta las puramente disco, también llamadas de tipo espirales tardías.

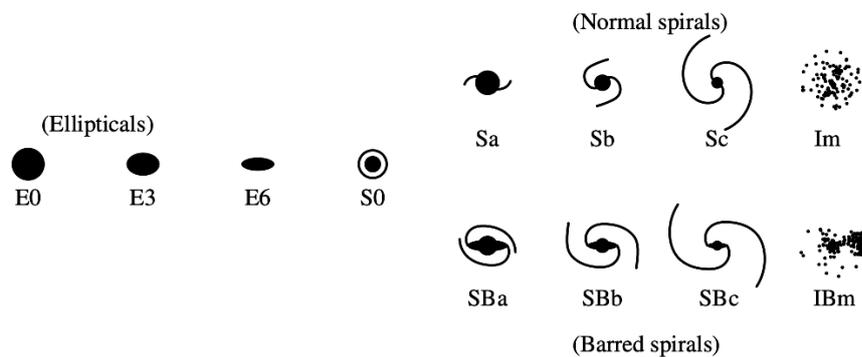


Figura 1.1: Representación esquemática de la secuencia de Hubble de morfologías galácticas (Abraham, 1998).

Es importante destacar que existen galaxias que no pueden catalogarse dentro de la secuencia original de Hubble. En este contexto podemos introducir lo que históricamente se ha referido como “galaxias enanas”, es decir, aquellas con $M_B \geq -18$ (Sandage y Binggeli, 1984), donde M_B se refiere a magnitud absoluta en el filtro B del sistema fotométrico de Johnson y Morgan. En particular, galaxias enanas con cantidades significativas de gas y con formación estelar, frecuentemente tienen una estructura muy irregular por lo cual suelen ser denominadas “irregulares”. A su vez, se han encontrado galaxias más brillantes cuyas morfologías no se asemejan ni a un disco ni a un esferoide; por lo cual se las denomina “galaxias peculiares”.

Con el fin de completar el esquema clasificatorio de morfologías galácticas, y luego de encontrar que muchas de las galaxias irregulares poseen débiles brazos espirales, de Vaucouleurs (1974) extendió la secuencia de galaxias espirales de Hubble hasta las irregulares en función del decrecimiento de la regularidad. A su vez, de Vaucouleurs subdividió las galaxias irregulares en dos grandes grupos, las denominadas de tipo magallánicas (tipo I), con incipiente estructura espiral y/o barrada, y las de tipo II, resultantes de una fusión de galaxias o deformadas por fuertes interacciones gravitacionales con una galaxia cercana.

De esta forma, a lo largo de la secuencia extendida de Hubble, las galaxias espirales se subdividen en S0a, Sa, Sab, Sb, Sbc (y sus correspondientes clases barradas). A estas se le empalma un conjunto de subtipos que van desde las Sc hasta las Sd, en los cuales las galaxias se vuelven progresivamente menos luminosas y sus estructuras espirales están menos definidas. Esto se extiende más allá de las Sd, a las irregulares denotadas como Sm o Im, donde encontramos galaxias disco con baja luminosidad, definidas como “enanas”, en las cuales las estrellas jóvenes no están distribuidas en brazos espirales. El prototipo de estas dos clases son la Nube Mayor de Magallanes (en adelante NMM) y la Nube Menor de Magallanes (en adelante NmM), y a esto corresponde la m en la denotación de las subclases.

Las galaxias irregulares han resultado ser más comunes de lo que se suponía. Más de un tercio de nuestras galaxias vecinas son de este tipo, aunque no ocupan un lugar predominante en la mayoría de los catálogos de galaxias, debido a que en general los catálogos se limitan a las galaxias más brillantes.

La mayor parte de la luminosidad de este tipo de galaxias es emitida por sus estrellas jóvenes masivas y sus extensas regiones de hidrógeno ionizado (HII). Estos sistemas son en general ricos en gas y su apariencia irregular se debe por un lado a que la emisión en el óptico está dominada por un grupo relativamente pequeño de estrellas jóvenes luminosas y regiones HII, y por otro lado, a que la velocidad circular en el disco no es tan grande como la velocidad de turbulencia del gas ($\sim 10 \text{ km s}^{-1}$). La velocidad circular de

las galaxias irregulares es una función lineal de la distancia al centro de la galaxia, lo cual se corresponde con una velocidad angular constante en la mayor parte de su disco estelar, y alcanza valores máximos de $\sim 50 - 70 \text{ km s}^{-1}$ cerca del borde del disco. Esta propiedad claramente las diferencia de las galaxias espirales luminosas, en las cuales la velocidad circular es mucho mayor y la curva de velocidades circulares es prácticamente plana más allá de un cierto valor de distancia.

Una minoría de galaxias han sido catalogadas como “irregulares” simplemente debido a que no se ajustan a ninguna otra clase. Este es el caso de galaxias tanto espirales como elípticas que han sido notablemente distorsionadas por recientes encuentros con galaxias vecinas, y galaxias que se encuentran transitando un proceso intenso de formación estelar que entorpece la determinación de la clase debido a que opaca la población estelar que usualmente la define.

La importancia de este esquema de clasificación es que muchas propiedades intrínsecas de las galaxias, como ser su luminosidad, color y contenido de gas, cambian sistemáticamente a lo largo de la secuencia, como puede verse en la Figura 1.2, lo cual indica que se trata también de una secuencia en las propiedades físicas básicas de las galaxias.

Dos de las galaxias más cercanas a la VL son las denominadas NMM y NmM, que se encuentran a una distancia de $\sim 50 \text{ kpc}$ y $\sim 60 \text{ kpc}$ respectivamente (Glatt et al., 2010) y ambas forman parte del Sistema Magallánico (en adelante SM). Las posiciones de sus centros ópticos en el plano del cielo son: $\alpha_{J2000}(\text{NMM}) = 05^{\text{h}}27^{\text{m}}36^{\text{s}}$, $\delta_{J2000}(\text{NMM}) = -69^{\circ}54'00''$ (van der Marel et al., 2002), $\alpha_{J2000}(\text{NmM}) = 00^{\text{h}}52^{\text{m}}45^{\text{s}}$, $\delta_{J2000}(\text{NmM}) = -72^{\circ}49'43''$ (Crowl et al., 2001). En la Figura 1.3 se muestra la distribución angular en el plano de 9035 objetos extensos en el SM extraído del trabajo de Bica et al. (2008).

Tanto la NMM como la NmM son galaxias enanas irregulares y suelen ser referidas como prototipo de su clase. Este tipo de galaxias se caracteriza por ser rica en gas, tener brazos espirales con una barra descentrada (de Vaucouleurs y Freeman, 1972) y muchas de ellas, como es el caso de la NMM, tienen una compañera (Odewahn, 1994) aunque la frecuencia de estas configuraciones es aún debatida (Wilcots, 2009).

El SM se conforma no sólo con las dos galaxias nombradas arriba, sino que incluye además otras estructuras, supuestamente producto de la interacción entre ambas, y/o con la VL. Una de estas estructuras es la corriente de hidrógeno neutro (HI) y polvo que parece conectar la NmM y la NMM, denominada Puente Magallánico. Otras componentes de este sistema son el Brazo Delantero y la Corriente Magallánica, estructuras de gas HI que preceden y siguen respectivamente a las Nubes en sus órbitas. La Corriente Magallánica

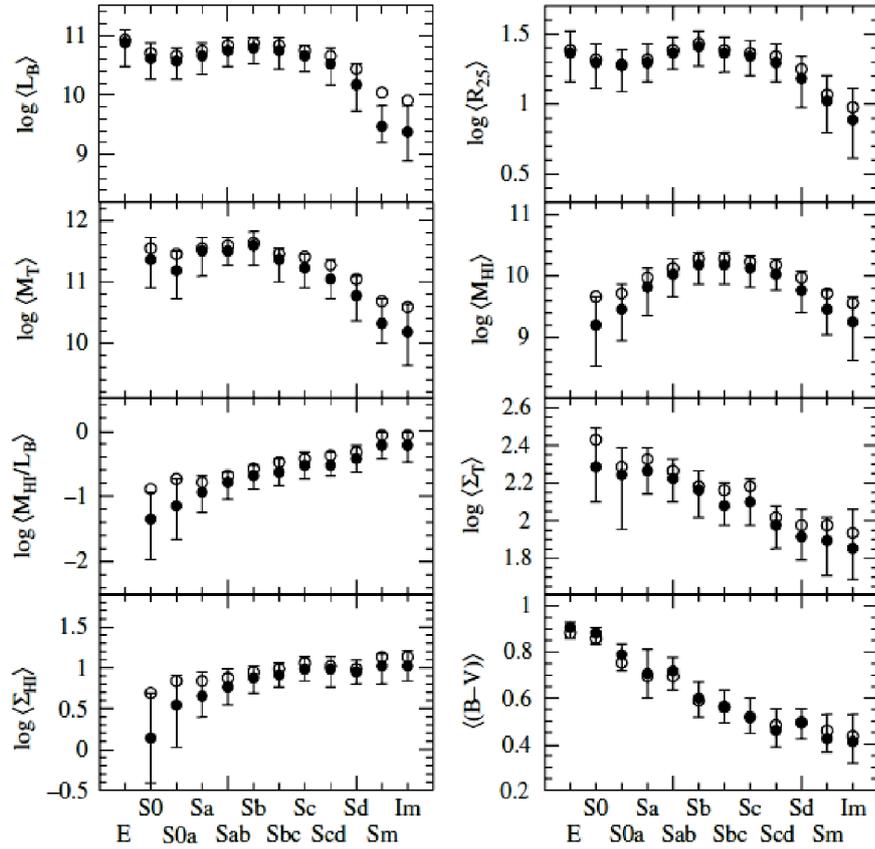


Figura 1.2: Propiedades galácticas a lo largo de la secuencia morfológica de Hubble, basado en la muestra RC3-UGC (Roberts y Haynes, 1994).

Los círculos rellenos representan las medianas mientras que los vacíos los valores medios. Las barras entre corchetes, los percentiles 25 y 75. Las propiedades graficadas son L_B (luminosidad en la banda B en L_\odot), R_{25} (radio en kpc de la isofota correspondiente a 25 mag arcseg $^{-2}$ en la banda B), M_T (masa total en unidades solares dentro del radio $R_\odot/2$, donde R_\odot se refiere al radio de la órbita solar en nuestra galaxia), M_{HI} (masa de HI en unidades solares), M_{HI}/L_B , Σ_T (densidad superficial de masa total), Σ_{HI} (densidad superficial de masa HI), y el color $B - V$ [Tomado de Roberts y Haynes (1994)].

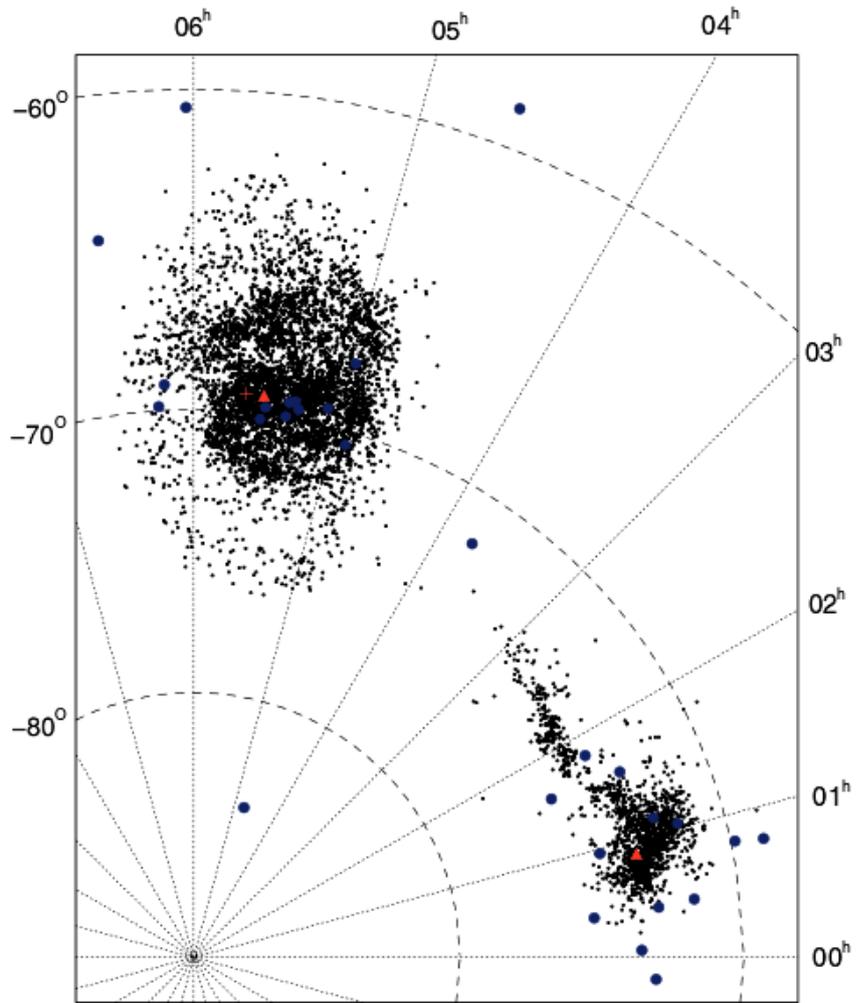


Figura 1.3: *Distribución angular en el plano del cielo de 9035 objetos extensos en el SM (Bica et al., 2008). En círculos azules se muestran los cúmulos con edades mayores a 4×10^9 años. Los centros de las NMM y NmM derivados por los autores, se indican con triángulos rojos.*

se extiende a lo largo de 150 grados en el cielo (Nidever et al., 2010, 2008) y fue tradicionalmente entendida como producto de las interacciones de marea de las dos Nubes de Magallanes con la VL (Murai y Fujimoto, 1980; Bekki y Chiba, 2005) y de los efectos por la presión de barrido (Mastropietro et al., 2005). A pesar de ello, si suponemos que el SM se encuentra en un primer acercamiento a nuestra galaxia, estas fuerzas han sido prácticamente despreciables hasta no hace mucho tiempo, por lo que es difícil conciliar los movimientos propios y órbitas actuales con la formación de la Corriente Magallánica, el Puente Magallánico y el Brazo Delantero (Besla et al., 2012).

Como alternativa para explicar la formación de estas estructuras previamente a la reciente aproximación del SM a la VL, Besla et al. (2010) elaboraron un modelo dinámico que permite obtener la morfología a gran escala del gas del SM como resultado de las interacciones de marea entre la NMM y la NmM. De esta manera, las interacciones entre ambas Nubes -que se suponen como sistemas ligados desde sus orígenes- darían lugar a la formación de la Corriente Magallánica, el Puente Magallánico y el Brazo Delantero tiempo antes de la primera aproximación del SM a la VL.

En un trabajo posterior y empleando el mismo escenario supuesto arriba, Besla et al. (2012) modelaron numéricamente la historia de interacción entre las Nubes de Magallanes y la VL. Los autores analizaron dos modelos que difieren en el número de vueltas completas que realiza la NmM alrededor de la NMM. En la Figura 1.4 se muestran las distribuciones resultantes del gas simulado de las Nubes para ambos modelos. Efectivamente pueden apreciarse todas las componentes del SM como producto de interacciones entre las galaxias.

Es importante destacar que un modelo realista de una de las componentes del SM debe tener en cuenta a las demás componentes, ya que su interacción no resulta despreciable y produce cambios evidentes en las características de la primera.

Como se ha mencionado, la NmM es una de las dos galaxias que conforman el SM, y es la que hemos elegido para el desarrollo de este trabajo. Es por esta razón, que describiremos a continuación las propiedades de algunas de sus componentes.

- **Regiones HI:** Stanimirović et al. (2004) emplean en su trabajo la muestra más actualizada hasta el momento de observaciones HI de la NmM para reexaminar su cinemática (ver Figura 1.5). Como resultado, ellos encontraron que el campo de velocidades de HI muestra un notable gradiente máximo en la dirección suroeste-noreste con una simetría

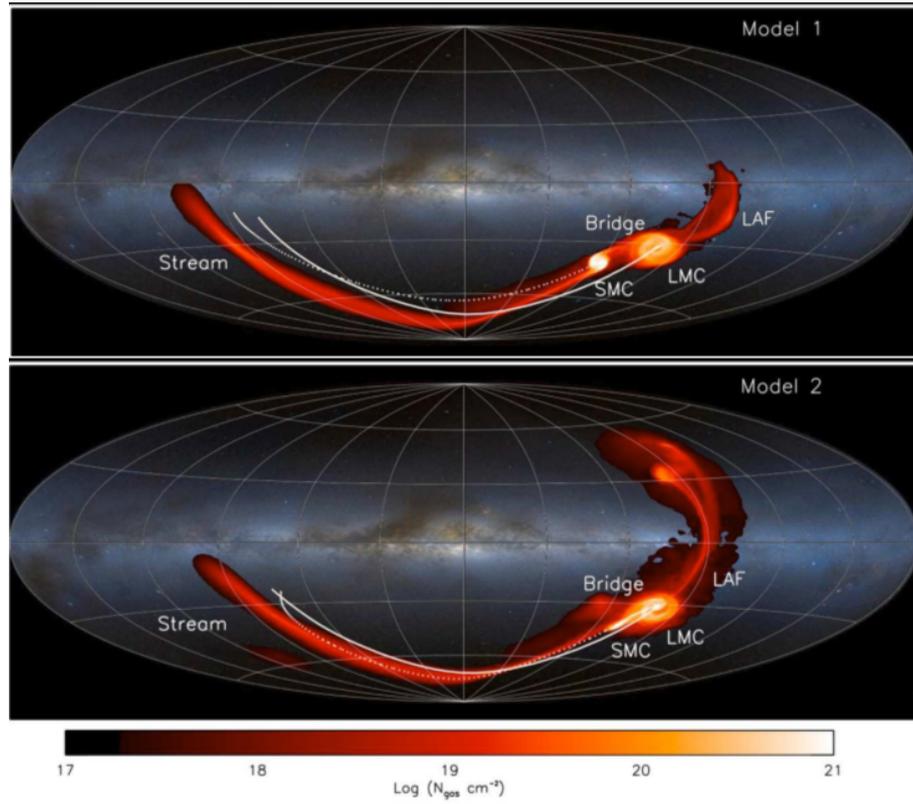


Figura 1.4: *Proyección Hammer-Aitoff de la distribución del total de gas simulado del SM (escala de rojos) para el Modelo 1 (arriba) y el Modelo 2 (abajo) del trabajo de Besla et al. (2012), superpuesto a una imagen de la VL (colores azul, blanco y marrón, Mellinger, 2009). La trayectoria orbital de la NMM (NmM) se indica con línea blanca sólida (punteada). Se etiquetan componentes del SM: NMM, NmM, Puente Magallánico (“Bridge”), Corriente Magallánica (“Stream”), Brazo Delantero (“LAF”).*

significativa en los contornos de isovelocidades, lo que sugiere una rotación diferencial alrededor de un valor medio para el principal cuerpo gaseoso de la galaxia (ver Figura 1.6). La intensidad media ponderada de velocidades a lo largo de cada línea de la visual (mapa de primer momento) se muestra en la Figura 1.7. Puede apreciarse el gradiente máximo que pasa de 91 km s^{-1} en el suroeste a 200 km s^{-1} en el noreste.

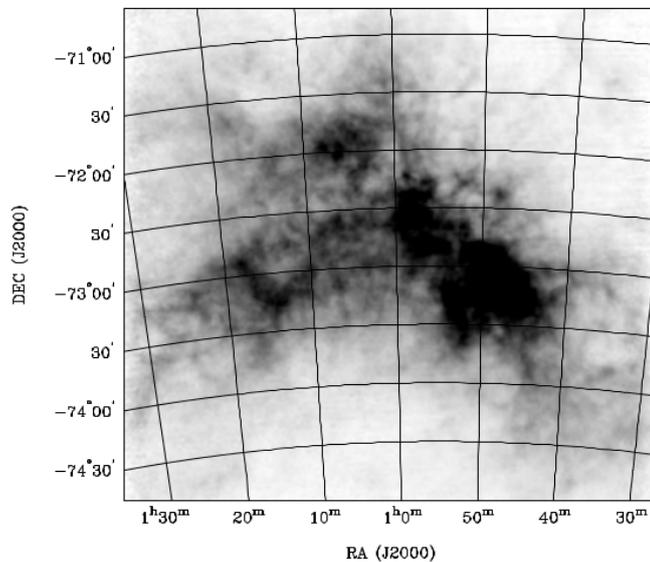


Figura 1.5: Imagen de la densidad de columna de HI en la NmM. La escala de grises tiene un rango de $0-7 \times 10^{21} \text{ átomos cm}^{-2}$ con una función de transferencia lineal.

Al comparar los datos obtenidos de las regiones HI con las predicciones de los modelos de evolución de la galaxia, los autores sugirieron que la región central de la NmM -que se corresponde con la componente con forma de disco o barra- habría sido el remanente de un disco primario soportado rotacionalmente, luego de los últimos dos encuentros de la NmM con la NMM. En este escenario se esperaría, como se ve a partir de las observaciones, un gradiente de velocidades como restos del original momento angular pre-encuentro. Finalmente ellos derivaron las curvas de velocidades y la masa dinámica, suponiendo que todo el gradiente era debido a la rotación. La curva de velocidades resultante aumenta rápida y linealmente hasta los 60 km s^{-1} hasta un radio de $\sim 3 \text{ kpc}$, mientras que la masa dinámica dentro de este radio resul-

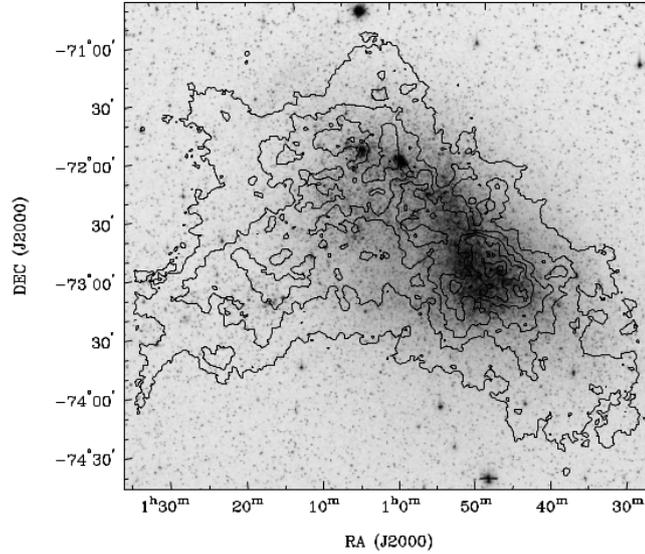


Figura 1.6: Imagen de la densidad de columna de HI superpuesta a una imagen en la banda V. Los niveles de contornos tienen un rango de $2,0 \times 10^{20}$ a $1,3 \times 10^{22}$ átomos cm^{-2} , con intervalo entre contornos de $3,8 \times 10^{20}$ átomos cm^{-2} .

ta de $2,4 \times 10^9 M_{\odot}$. Sin embargo la masa total estelar de la NmM es estimada en $\sim 3,1 \times 10^8 M_{\odot}$ y la masa de gas neutro en $5,6 \times 10^8 M_{\odot}$ (van der Marel y Guhathakurta, 2008). La masa total visible resultaría insuficiente para explicar la masa dinámicamente inferida, por lo cual la NmM podría suponerse que está embebida en un halo de materia oscura (van der Marel y Guhathakurta, 2008).

- **Estrellas jóvenes del campo:** Evans y Howarth (2008) estudiaron una muestra de 2045 estrellas jóvenes (O, A, B) del campo de la NmM (ver Figura 1.8). Como se observa, la muestra no cubre completamente la región estudiada para la componente de HI.

La distribución de la muestra de velocidades radiales se observa en la Figura 1.9. El primer panel muestra el conjunto completo de objetos, marcado en verde la dirección de máximo gradiente, prácticamente perpendicular a la encontrada para la componente gaseosa.

Siguiendo con su trabajo, Evans y Howarth dividieron la muestra en dos grupos a los que denominaron “barra” y “ala”, separados por la línea divisoria en el plano del cielo $\delta = -77^{\circ}50' + [4\alpha]'$ donde δ es la declinación y α la ascensión recta en minutos de tiempo (ver Figura 1.10). Encontraron que el gradiente de la barra es de $26,3 \pm 1,6$ km

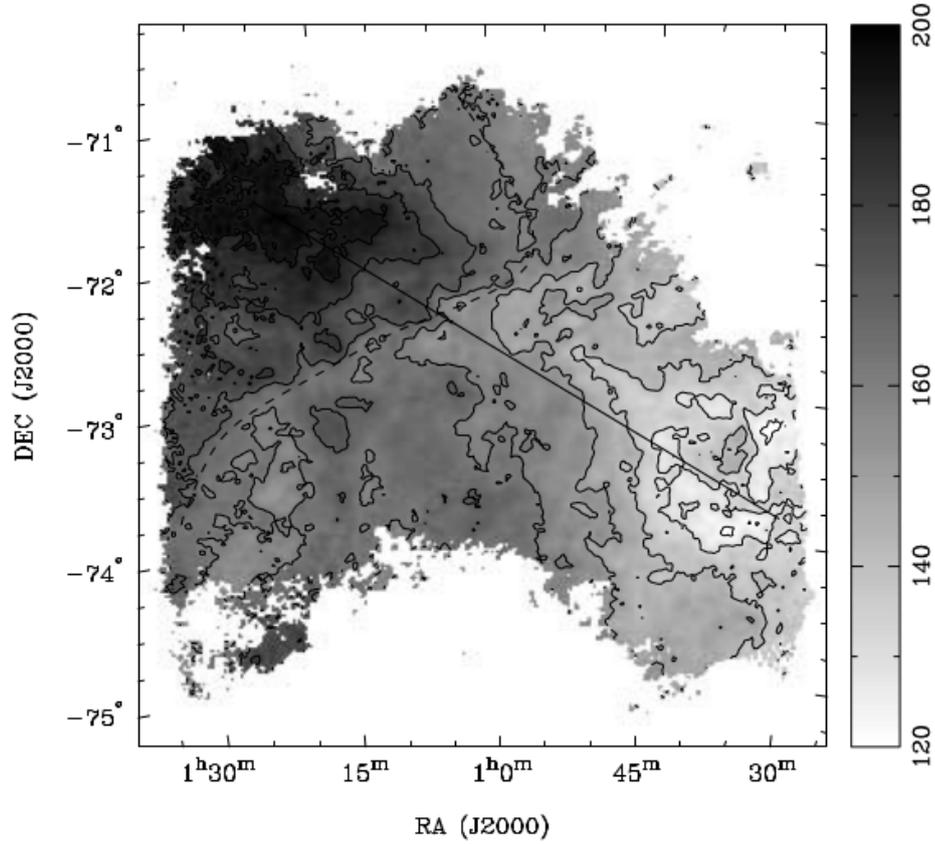


Figura 1.7: *Campo de velocidades heliocéntricas medias derivado por Stanimirović et al. (2004). El rango de la escala de grises es 120-200 km s⁻¹ con una función de transferencia lineal. Los niveles de contorno tienen un rango de 120 a 200 km s⁻¹ con intervalos entre contornos de 10 km s⁻¹. La línea sólida corresponde a la dirección de máximo gradiente, mientras que la línea punteada corresponde a la dirección de máxima distorsión de velocidades.*

s^{-1} grado $^{-1}$ en un ángulo de posición de $126^\circ \pm 4^\circ$. En el caso de la submuestra del ala, la distribución de velocidades parece ser distinta de la de la barra, probablemente como consecuencia de interacciones recientes entre ambas Nubes de Magallanes. La velocidad media de todas las estrellas de la muestra es de $+172,0 \pm 0,2 \text{ km s}^{-1}$ con una dispersión de velocidades de 30 km s^{-1} .

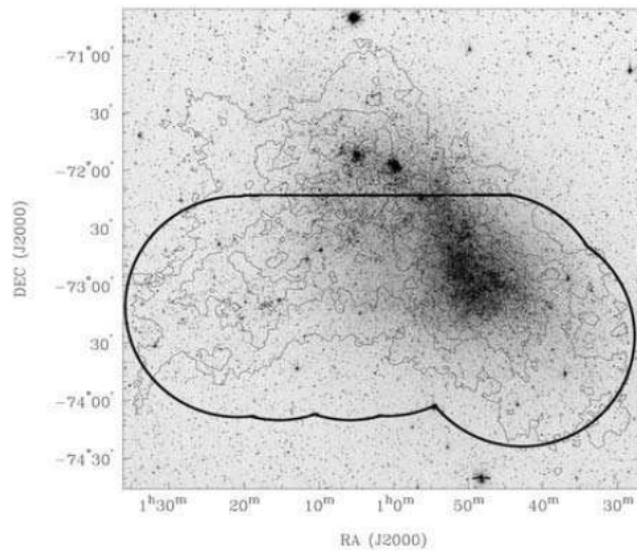


Figura 1.8: *El área aproximada de la muestra, superpuesto a una imagen en el filtro V de la NmM (Bessell, 2000) y los contornos de isodensidades de la columna de HI obtenidos por Stanimirović et al. (2004).*

- Estrellas gigantes rojas del campo:** Otro trazador de la estructura de la galaxia lo constituyen las estrellas gigantes rojas del campo que representan la mayor proporción de masa estelar. Estas se distribuyen de manera que la NmM tiene una apariencia morfológica esferoidal (Zaritsky et al., 2000, 2002). Harris y Zaritsky (2006) estudiaron un conjunto de 2046 estrellas de la rama de las gigantes rojas, distribuidas en una región central de la galaxia de $4 \text{ kpc} \times 2 \text{ kpc}$ e infirieron un valor medio de velocidad en la línea de la visual, como así también la dispersión de estos valores, a través de un ajuste gaussiano de los datos, obteniendo como resultado $\bar{v} = 145,6 \pm 0,6 \text{ km s}^{-1}$ y $\sigma = 27,5 \pm 0,5 \text{ km s}^{-1}$. Estos valores se encuentran en muy buen acuerdo con los obtenidos por los trazadores descriptos anteriormente. Sin embargo, el conjunto

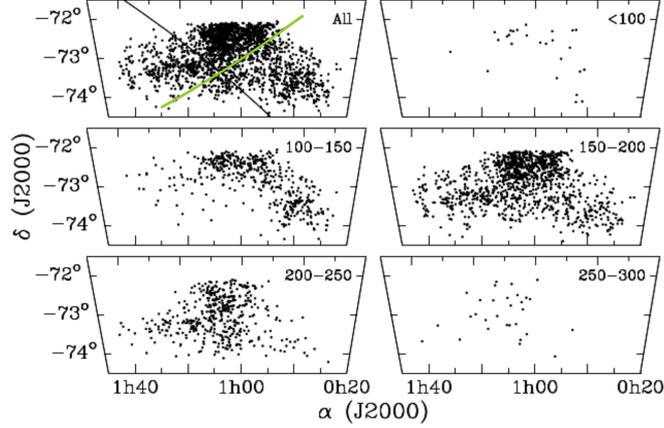


Figura 1.9: Distribución espacial de las 2045 estrellas del trabajo de Evans y Howarth (2008). En el panel superior izquierdo se observa la muestra completa con la línea negra dividiéndola en dos subconjuntos denominados “barra” y “ala”. Esta línea sigue la ecuación $\delta = -77^{\circ}50' + [4\alpha]'$ donde δ es la declinación y α la ascensión recta en minutos de tiempo. La dirección de máximo gradiente de velocidades de la barra se muestra en verde. Los otros paneles muestran las posiciones de las estrellas pertenecientes a intervalos de 50 km s^{-1} .

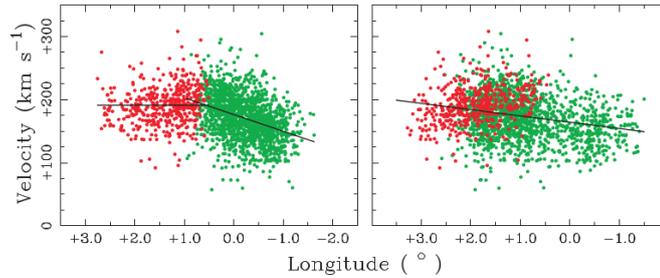


Figura 1.10: Panel izquierdo: Proyección de las velocidades radiales a lo largo del círculo máximo a $PA=60^{\circ}$, que pasa por $\alpha = 0^{\text{h}}45^{\text{m}}$, $\delta = -73^{\circ}$ de las estrellas asignadas a la barra de la NmM que se muestran en verde, junto a aquellas del ala mostradas en rojo. La línea sólida señala el gradiente de la barra ($26,5 \text{ km s}^{-1} \text{ grado}^{-1}$), y el gradiente relativamente plano del ala. Panel derecho: Proyección de las velocidades radiales a lo largo del $PA=60^{\circ}$, que pasa por $\alpha = 0^{\text{h}}45^{\text{m}}$, $\delta = -73^{\circ}$ que se corresponde con la dirección de máximo gradiente de velocidades de la componente HI; se tiene una pendiente de $10 \text{ km s}^{-1} \text{ grado}^{-1}$.

de estrellas gigantes rojas no muestra evidencia cinemática de rotación. Para dilucidar si las variaciones significativas de velocidad media en los distintos subcampos de la galaxia podrían deberse a una tendencia cinemática global, como podría ser una rotación sistémica o efectos dependientes de la perspectiva de la visual, los autores ajustaron un plano de distribución de velocidades en el cielo, el cual representa un cuerpo sólido en rotación. Así, los gradientes de velocidades observados se suponen originados por las proyecciones de velocidad tangencial galactocéntrica de la NmM en la línea de la visual hacia uno u otro lado de la galaxia. El ajuste resultó en una amplitud de rotación de $8,3 \text{ km s}^{-1} \text{ grado}^{-1}$ con una dispersión de $27,5 \pm 0,5 \text{ km s}^{-1}$. Estos valores sugieren que el gradiente total de velocidades observado puede representarse como efecto de las proyecciones tangenciales del movimiento con distinto signo a ambos lados de la región estudiada de la galaxia, lo cual genera una aparente rotación. De esta manera, el valor de la razón $V_{\text{rot}}/\sigma < 0,6$ les permitió concluir que la galaxia, al menos la componente de estrellas gigantes viejas del campo, está principalmente soportada por su dispersión de velocidades.

Teniendo en cuenta lo mencionado más arriba, las propiedades de la NmM son consistentes con un sistema esferoidal de baja luminosidad cuya apariencia irregular en el visual está dominada por la reciente formación estelar.

Las diferentes componentes de una galaxia pueden ser caracterizadas mediante distintos parámetros de éstas que somos capaces de estimar observacionalmente, como ser la abundancia metálica, la edad, la posición espacial o la velocidad radial. Muchos autores buscan encontrar relaciones entre estas características, ya que si efectivamente existe correlación entre las propiedades de las componentes de la galaxia tendríamos una idea más cabal de ésta y su historia evolutiva.

Piatti (2012) presentó un estudio de $3,3 \times 10^6$ de estrellas del campo distribuidas en regiones a lo largo de todo el cuerpo principal de la galaxia, a las que les estimó tanto la edad como la metalicidad estelar representativa para 160 subregiones relativamente pequeñas ($9 \times 9 \text{ arcmin}^2$) a partir de fotometría de Washington CT_1 , y derivó la relación edad-metalicidad (en adelante REM) desde el nacimiento de la galaxia hasta $\sim 1 \times 10^9$ años atrás. A partir de este estudio, encontró que el campo de estrellas no presenta gradiente de edad ni de metalicidad pero sí que la población más joven (edades menores a $\sim 2 \times 10^9$ años) es más rica en metales ($[\text{Fe}/\text{H}] \sim -0,8$) y está confinada a la región central de la NmM. En la Figura 1.11 se muestran la REM obtenida

en dicho trabajo, superpuesta a REMs derivadas por otros autores y a partir de modelos teóricos.

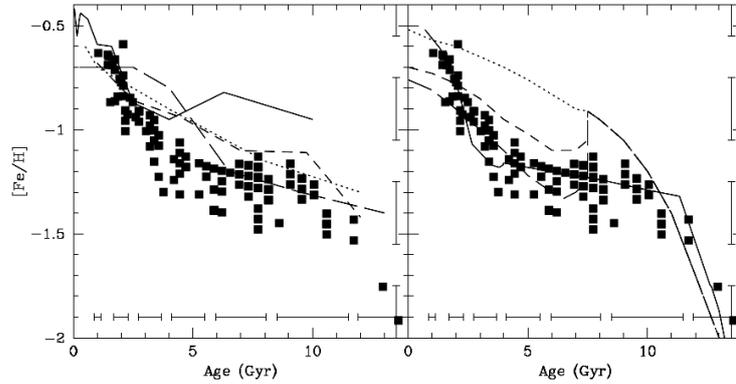


Figura 1.11: *REM* obtenida en el trabajo de Piatti (2012) de las estrellas de campo (cuadrados grises) con barras de error típico de edad y metalicidad en los márgenes. Panel izquierdo: Se superponen las *REMs* obtenidas por Harris y Zaritsky (2004) (línea sólida), Dolphin et al. (2001) (línea discontinua larga), Carrera et al. (2008) (línea discontinua corta) y Noël et al. (2009) (línea punteada). Panel derecho: Los modelos de *REMs* de Pagel y Tautvaisiene (1998) (línea sólida) y Tsujimoto y Bekki (2009) (líneas punteada, discontinua larga y discontinua corta, respectivamente). Las tres curvas corresponden a funciones con razones de masa 1: 4 (curva discontinua larga), igual masa (curva discontinua corta) y a eventos sin fusión (curva punteada), respectivamente.

Hasta aquí, hemos descripto brevemente las relaciones observadas entre las componentes del SM y cómo la hipótesis de la interacción entre ambas Nubes permite explicar varias de sus propiedades. Enfocándonos en la NmM, se procedió a enumerar y explicar lo que se conoce de distintos trazadores de su evolución. Cada una de estas componentes se caracterizan a partir de distintos parámetros que pueden o no estar correlacionados. Estas dependencias entre características como la distribución espacial de los distintos valores de las mismas pueden obtenerse mediante el ajuste de datos observacionales. En este punto, nos preguntamos si las disposiciones de estas propiedades pueden modificarse a lo largo de la evolución de la galaxia. Esto es algo importante a tener en cuenta al buscar inferir características de la NmM y su evolución. Si efectivamente se modifica la distribución espacial de las características a lo largo del tiempo, el primer interrogante que deberíamos responder es cuánto

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

se modifica la distribución presente respecto de la que tenía esta componente al momento del nacimiento de los objetos.

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar la evolución de las distribuciones espaciales de metalicidad de los cúmulos estelares de la NmM. Para ello se busca reconstruir las órbitas de estos objetos mediante simulaciones computacionales hacia atrás en el tiempo, hasta el momento de su formación; a fin de poder exponer la disposición de las características en distintas etapas de la evolución de la galaxia.

Debido al desconocimiento hasta la fecha de información relevante para el objetivo propuesto, como ser el movimiento propio de los cúmulos, en primera instancia se confeccionará un catálogo de cúmulos sintéticos que reflejen las propiedades observadas de éstos en la NmM. Buscando un conjunto lo más realista posible, los resultados se asemejarán a los que se obtendrían con una muestra real de datos observacionales.

Este trabajo se organiza de la siguiente manera. En primer lugar, en el Capítulo 2 se presentan las propiedades observadas del sistema de cúmulos de la NmM, que constituyen los datos a partir de los cuales se construirá la muestra artificial de objetos que se estudiarán. A su vez también se expondrán algunos argumentos de la elección de esta componente para este trabajo. En el Capítulo 3 se describe el método empleado para generar el sistema de cúmulos y simular su evolución dinámica. Las simulaciones realizadas y sus resultados se analizan en el Capítulo 4, y en el Capítulo 5, estos se analizan al igual que la robustez del programa. Finalmente, se exponen las conclusiones en el Capítulo 6.

Bibliografía

- Abraham, R. G.
1998. Perspectives in physical morphology. *ArXiv e-prints: astro-ph/9809131*.
- Bekki, K. y M. Chiba
2005. Formation and evolution of the Magellanic Clouds - I. Origin of structural, kinematic and chemical properties of the Large Magellanic Cloud. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 356:680–702.
- Besla, G., N. Kallivayalil, L. Hernquist, R. P. van der Marel, T. J. Cox, y D. Keres
2010. Simulations of the Magellanic Stream in a first infall scenario. *Astrophys. J. Let.*, 721:L97–L101.
- Besla, G., N. Kallivayalil, L. Hernquist, R. P. van der Marel, T. J. Cox, y D. Keres
2012. The role of dwarf galaxy interactions in shaping the Magellanic System and implications for Magellanic Irregulars. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 421:2109–2138.
- Bessell, M.
2000. *Magnitude scales and photometric systems*, P. 1939.
- Bica, E., C. Bonatto, C. M. Dutra, y J. F. C. Santos
2008. A general catalogue of extended objects in the Magellanic System. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 389:678–690.
- Carrera, R., C. Gallart, A. Aparicio, E. Costa, R. A. Méndez, y N. E. D. Noël
2008. The chemical enrichment history of the Small Magellanic Cloud and its gradients. *Astron. J.*, 136:1039–1048.

BIBLIOGRAFÍA

- Crowl, H. H., A. Sarajedini, A. E. Piatti, D. Geisler, E. Bica, J. J. Clariá, y J. F. C. Santos, Jr.
2001. The line-of-sight depth of populous clusters in the Small Magellanic Cloud. *Astron. J.*, 122:220–231.
- de Vaucouleurs, G.
1974. Structure, dynamics and statistical properties of galaxies. In *The Formation and Dynamics of Galaxies*, J. R. Shakeshaft, ed., volume 58 of *IAU Symposium*, Pp. 1–52.
- de Vaucouleurs, G. y K. C. Freeman
1972. Structure and dynamics of barred spiral galaxies, in particular of the Magellanic type. *Vistas in Astronomy*, 14:163–294.
- Dolphin, A. E., A. R. Walker, P. W. Hodge, M. Mateo, E. W. Olszewski, R. A. Schommer, y N. B. Suntzeff
2001. Old stellar populations of the Small Magellanic Cloud. *Astrophys. J.*, 562:303–313.
- Evans, C. J. y I. D. Howarth
2008. Kinematics of massive stars in the Small Magellanic Cloud. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 386:826–834.
- Glatt, K., E. K. Grebel, y A. Koch
2010. Ages and luminosities of young SMC/LMC star clusters and the recent star formation history of the Clouds. *Ast & Ast*, 517:A50.
- Harris, J. y D. Zaritsky
2004. The star formation history of the Small Magellanic Cloud. *Astron. J.*, 127:1531–1544.
- Harris, J. y D. Zaritsky
2006. Spectroscopic Survey of Red Giants in the Small Magellanic Cloud. I. Kinematics. *Astron. J.*, 131:2514–2524.
- Mastropietro, C., B. Moore, L. Mayer, J. Wadsley, y J. Stadel
2005. The gravitational and hydrodynamical interaction between the Large Magellanic Cloud and the Galaxy. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 363:509–520.
- Mellinger, A.
2009. A color all-sky panorama image of the Milky Way. *Pub. Astron. Soc. Pac.*, 121:1180–1187.

BIBLIOGRAFÍA

- Murai, T. y M. Fujimoto
1980. The Magellanic Stream and the Galaxy with a massive halo. *Pub. Astron. Soc. Jap.*, 32:581.
- Nidever, D. L., S. R. Majewski, y W. B. Burton
2008. The origin of the Magellanic Stream and its Leading Arm. *Astrophys. J.*, 679:432–459.
- Nidever, D. L., S. R. Majewski, W. Butler Burton, y L. Nigra
2010. The 200° Long Magellanic Stream System. *Astrophys. J.*, 723:1618–1631.
- Noël, N. E. D., A. Aparicio, C. Gallart, S. L. Hidalgo, E. Costa, y R. A. Méndez
2009. Old main-sequence turnoff photometry in the Small Magellanic Cloud. II. Star formation history and its spatial gradients. *Astrophys. J.*, 705:1260–1274.
- Odehahn, S. C.
1994. Properties of the Magellanic type spirals. 2: The frequency of companion galaxies. *Astron. J.*, 107:1320–1327.
- Pagel, B. E. J. y G. Tautvaisiene
1998. Chemical evolution of the Magellanic Clouds: analytical models. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 299:535–544.
- Piatti, A. E.
2012. The star field age-metallicity relationship of the Small Magellanic Cloud. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 422:1109–1121.
- Roberts, M. S. y M. P. Haynes
1994. Physical parameters along the Hubble Sequence. *Ann. Rev. Ast & Ast*, 32:115–152.
- Sandage, A. y B. Binggeli
1984. Studies of the Virgo cluster. III - A classification system and an illustrated atlas of Virgo cluster dwarf galaxies. *Astron. J.*, 89:919–931.
- Stanimirović, S., L. Staveley-Smith, y P. A. Jones
2004. A new look at the kinematics of neutral hydrogen in the Small Magellanic Cloud. *Astrophys. J.*, 604:176–186.
- Tsujimoto, T. y K. Bekki
2009. Chemical signature of a major merger in the early formation of the Small Magellanic Cloud. *Astrophys. J. Let.*, 700:L69–L72.

BIBLIOGRAFÍA

- van der Marel, R. P., D. R. Alves, E. Hardy, y N. B. Suntzeff
2002. New understanding of Large Magellanic Cloud structure, dynamics, and orbit from carbon star kinematics. *Astron. J.*, 124:2639–2663.
- van der Marel, R. P. y P. Guhathakurta
2008. M31 transverse velocity and Local Group mass from satellite kinematics. *Astrophys. J.*, 678:187–199.
- Wilcots, E. M.
2009. Magellanic type galaxies throughout the Universe. In *IAU Symposium*, J. T. Van Loon y J. M. Oliveira, eds., volume 256 of *IAU Symposium*, Pp. 461–472.
- Zaritsky, D., J. Harris, E. K. Grebel, y I. B. Thompson
2000. The morphologies of the Small Magellanic Cloud. *Astrophys. J. Let.*, 534:L53–L56.
- Zaritsky, D., J. Harris, I. B. Thompson, E. K. Grebel, y P. Massey
2002. The Magellanic Clouds Photometric Survey: The Small Magellanic Cloud stellar catalog and extinction map. *Astron. J.*, 123:855–872.

Capítulo 2

El sistema de cúmulos estelares de la Nube Menor de Magallanes

En este Capítulo se presenta un resumen breve de lo que hasta la fecha se conoce o ha sido inferido a partir de datos observacionales de la NmM, con el objetivo de emplearlos como marco que delimite las propiedades de la muestra sintética de cúmulos que procederemos a construir en el Capítulo 3 y que se empleará como objeto de prueba para las simulaciones realizadas en este trabajo.

Es de destacar que no se hace distinción entre cúmulos estelares “abiertos” y “globulares” debido a que esta clasificación no rige en la población de cúmulos de la NmM, a diferencia de lo que si sucede en la Vía Láctea.

La Sección §2.1 describe brevemente las propiedades de los cúmulos de esta galaxia en cuanto a su disposición espacial y de velocidades que poseen a tiempo presente, instante inicial a partir del cual se comienzan a integrar las trayectorias de estos objetos hacia atrás en el tiempo. En la Sección §2.2 se aborda el tema de la distribución en edades para esta componente, mientras que en §2.3 se presentan las metalicidades a partir de las REM. Finalmente en §2.4, luego de la descripción de las características intrínsecas de la galaxia, se exponen de manera concisa los fundamentos de la elección del sistema de cúmulos de la galaxia como objeto de prueba.

2.1. Distribución espacial y cinemática

La distribución espacial de 12 cúmulos de la NmM ha sido estudiada por Crowl et al. (2001). Este conjunto de cúmulos se limitó a aquellos con las más confiables estimaciones de edad y metalicidad disponibles. Ellos analizaron la variación de estos parámetros en función de la posición en el plano del cielo y con la profundidad en la línea de la visual.

Crowl et al. (2001) utilizaron mapas de enrojecimiento $E(B-V)$ en lugar de los valores individuales para cada cúmulo tomados de la literatura. Los mapas utilizados fueron los construidos por Burstein y Heiles (1982, en adelante BH82) y Schlegel, Finkbeiner y Davis (1998, en adelante SFD98). Además, se supuso que las magnitudes V de las estrellas del grupo rojo (*red clump*) de los cúmulos, a partir de las cuales calcularon las magnitudes absolutas $[M_V(RC)]$, depende de las edades y metalicidades de éstos (Sarajedini, 1999; Girardi et al., 2000). Para determinar la variación de $[M_V(RC)]$ con la edad y abundancia metálica, utilizaron las isócronas teóricas de la rama horizontal de Girardi et al. (2000). Basados en este análisis llegaron a las siguientes conclusiones:

1. Los datos observacionales indican que la región Este de la NmM (que se encuentra más próxima a la NMM) contiene cúmulos más jóvenes y ricos en metales comparados con los de la región Oeste. Esta correlación no es muy marcada debido al limitado tamaño de la muestra.
2. Dependiendo del mapa de enrojecimiento utilizado, el módulo de distancia medio se encuentra en el rango de $(m - M)_0 = 18,71 \pm 0,06$ a $(m - M)_0 = 18,82 \pm 0,05$.
3. La profundidad intrínseca de la población de cúmulos de la NmM en la línea de la visual a $\pm 1\sigma$ se encuentra entre ~ 6 y ~ 12 kpc, dependiendo principalmente del mapa de enrojecimiento empleado.
4. Observando la NmM como una galaxia triaxial con sus ejes de declinación, ascensión recta y profundidad en la línea de la visual, las razones aproximadas resultaron 1: 2: 4.

En la Figura 2.1 se muestran las distancias en la línea de la visual resultantes para el conjunto de objetos estudiados en función de los ejes en el

CAPÍTULO 2. EL SISTEMA DE CÚMULOS ESTELARES DE LA NUBE MENOR DE MAGALLANES

plano del cielo, mientras que la Figura 2.2 presenta los gráficos de la distribución tridimensional de los cúmulos en la galaxia.

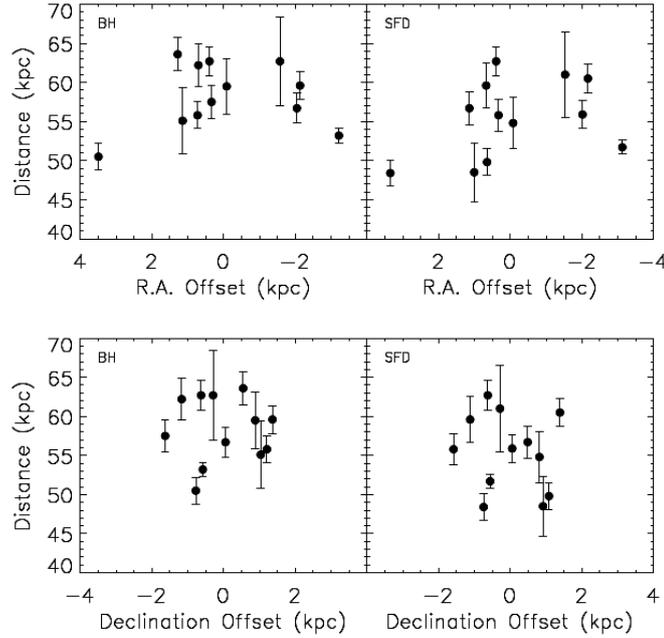


Figura 2.1: *Distancia de cada cúmulo (Crowl et al., 2001) como función de la ascensión recta (arriba) y la declinación (abajo), relativas al centro óptico de la NmM. Resultados adoptando enrojecimiento de BH82 (izquierda) y SFD98 (derecha).*

Teniendo en cuenta la distribución global de la población de cúmulos, se puede estudiar también la disposición de éstos en el plano del cielo, tal como realizaron Piatti y Bica en 2012. El estudio de estos autores se basó en los datos de ascensión recta y declinación de 564 candidatos a cúmulos del catálogo de Bica et al. (2008). A partir de un sistema de referencia elíptico, con el fin de reflejar más significativamente el achatamiento de la NmM y tomando como variable al semieje mayor a de una elipse centrada en el centro de la galaxia, paralelo al cuerpo principal de ésta y con razón de semiejes b/a igual a $1/2$, los autores supusieron que la distribución espacial de los cúmulos correlaciona mejor con a en lugar de la distancia radial o la distancia definida a lo largo de los ejes de ascensión recta o declinación.

Piatti y Bica realizaron un histograma de los valores de a resultantes, exento del sesgo que introduce la elección del tamaño del intervalo de muestreo de los datos y descontaminado estadísticamente de posibles objetos ca-

CAPÍTULO 2. EL SISTEMA DE CÚMULOS ESTELARES DE LA NUBE MENOR DE MAGALLANES

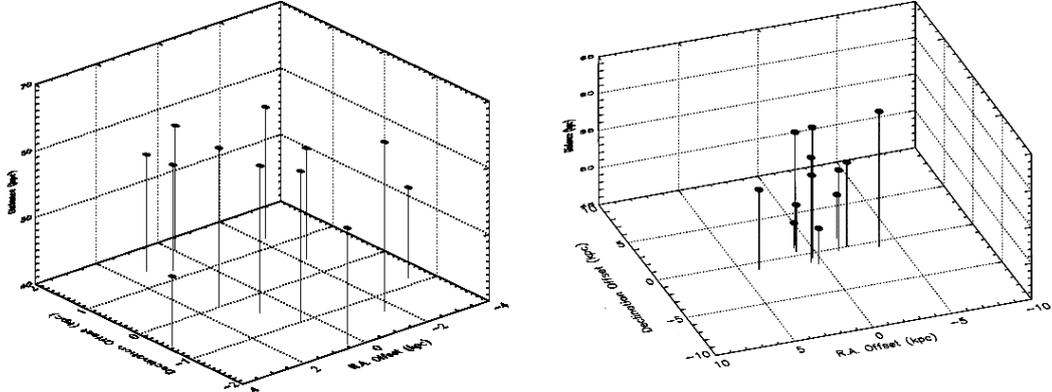


Figura 2.2: a) Gráfico tridimensional de la posición de los cúmulos en la NmM (Crowl et al., 2001), suponiendo que la magnitud del red clump es sensible a la edad y a la abundancia metálica, adoptando el modelo con mapa de enrojecimiento de SFD98. b) Igual que en a), excepto que adoptando el mapa de enrojecimiento de BH82.

talogados como cúmulos que no son genuinos sistemas físicos. Los resultados de este trabajo se muestran en la Figura 2.3.

Hasta aquí hemos presentado resultados acerca de la distribución espacial de los cúmulos de la NmM que nos serán de utilidad para nuestras simulaciones. Respecto de la estructura cinemática de la galaxia y en particular de la componente que nos interesa, podemos mencionar lo siguiente: La velocidad radial del centro de masa ha sido calculada a partir de datos observacionales de distintas componentes de la galaxia como se mencionó en el Capítulo 1. Algo más difícil de calcular es la velocidad en el plano del cielo, debido a la necesidad de datos observacionales separados por grandes intervalos de tiempo. Uno de los últimos trabajos observacionales en esta línea es el estudio de Kallivayalil et al. (2013) en el cual presentan los movimientos propios de la NMM y la NmM basados en tres épocas de datos del Telescopio Espacial Hubble, a lo largo de una línea de base de ~ 7 años y centrados en campos con objetos cuasi-estelares (en adelante QSOs) de fondo. Este trabajo fue una extensión del trabajo previo de los mismos autores en el cual emplearon sólo dos épocas de datos (Kallivayalil et al., 2006). El estudio consistió en medir las posiciones de QSOs que se encuentran por detrás de la NmM y de estrellas en la misma galaxia en los mismos campos de observación, en las tres épocas de tiempo separadas por ~ 2 y ~ 7 años. Como resultado de ello encontraron que el movimiento propio de las estrellas claramente se

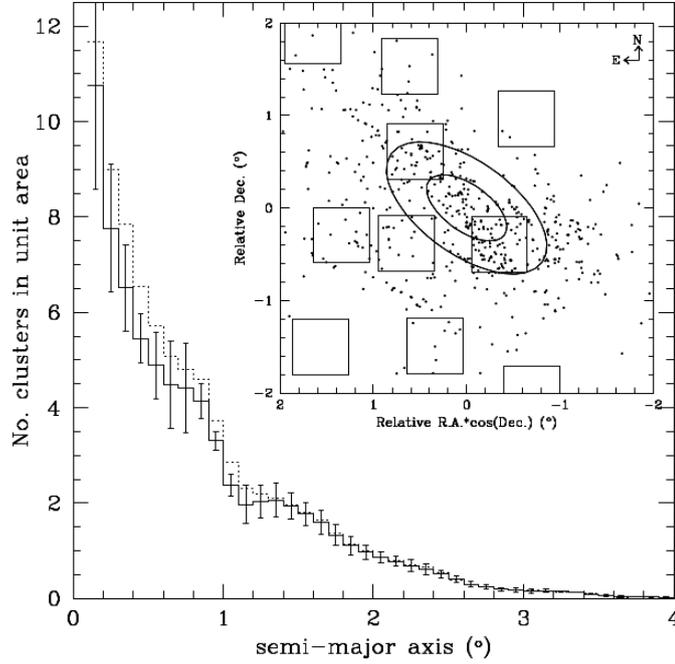


Figura 2.3: *Distribución espacial de cúmulos de la NmM (Piatti y Bica, 2012).*

distingue del de los QSOs, como puede verse en la Figura 2.4. Los símbolos de colores representan los valores obtenidos para los QSOs respecto de los de las estrellas.

Definiendo el movimiento propio por sus componentes en la dirección Oeste (μ_W) y Norte (μ_N) en función de la ascensión recta (α) y de declinación (δ), se sigue:

$$\mu_W \equiv -(d\alpha/dt) \cos(\delta), \quad \mu_N \equiv d\delta/dt. \quad (2.1)$$

Kallivayalil et al. (2013) encontraron que el movimiento propio del centro de masa de la NmM es:

$$\mu_W = -0,772 \pm 0,063 \text{ msa años}^{-1}, \quad \mu_N = -1,117 \pm 0,061 \text{ msa años}^{-1}, \quad (2.2)$$

donde msa son milisegundos de arco. Al combinar estos resultados con los obtenidos por otros autores sobre la velocidad del Sol respecto del *Sistema de Reposo Local*, Kallivayalil et al. (2013) derivaron la velocidad espacial galactocéntrica de la Nube:

$$v_{\text{tot}, \text{NmM}} = 217 \pm 26 \text{ km s}^{-1} \quad (2.3)$$

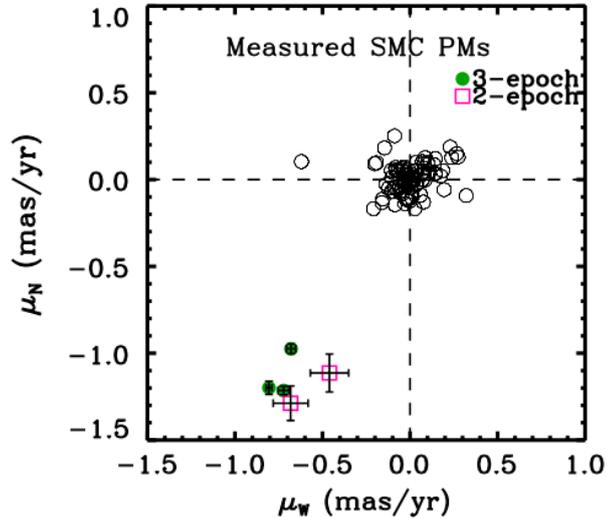


Figura 2.4: *Movimientos propios medidos para los QSOs (símbolos de colores) respecto a los movimientos propios estelares (círculos vacíos). Círculos rellenos verdes muestran los resultados derivados de las tres épocas de datos y en rosa, los obtenidos de sólo las dos primeras épocas.*

A partir de ello, reconstruyeron la órbita de la NmM -como así también la de la NMM utilizando las correspondiente velocidad espacial galactocéntrica-alrededor de la VL, para los últimos $\sim 3 \times 10^9$ años. Encontraron que la mayor fuente de incerteza en el trazado de las órbitas proviene de los errores en las masas de la VL y NMM; si bien algunos argumentos razonables les permitieron acotar el intervalo de valores posibles para ambas masas. Los resultados refuerzan la hipótesis, primeramente sugerida por Besla et al. (2007), que ambas Nubes estarían en su primer pasaje próximo a la VL.

2.2. Distribución de edades

Las edades de los cúmulos de la NmM han sido estudiadas por diferentes autores. Piatti et al. (2011a) combinaron resultados propios con otros disponibles en la literatura, compilando un conjunto de 43 cúmulos bien conocidos con edades mayores a 10^9 años. A partir de dicha muestra, los autores re-examinaron la distribución de edades. Como puede verse en la Figura 2.5(a), Piatti et al. (2011a) encontraron que la distribución actual de edades muestra dos excesos o picos primarios de cúmulos en $t = 2$ y 5×10^9 años, lo cual evidencia claros signos de episodios con una intensa formación de cúmulos.

Además, puede observarse que desde el nacimiento del sistema de cúmulos de la NmM hasta aproximadamente los primeros 4×10^9 años de vida, la formación de cúmulos se asemeja a un escenario con tasa de formación constante. Más adelante, alrededor de $\sim 7 - 8 \times 10^9$ años, la distribución de edades presenta un abrupto cambio en la pendiente como consecuencia del surgimiento de un relativo exceso de cúmulos. Este exceso puede deberse a una formación más intensa de cúmulos desencadenada por la interacción de marea entre ambas Nubes de Magallanes. En efecto, Tsujimoto y Bekki (2009) han sugerido desde la teoría que dicho evento tuvo lugar $\sim 7,5 \times 10^9$ años atrás, y que un fenómeno similar debió ocurrir en la NMM. Sin embargo, Piatti et al. (2011b) no encontraron ningún exceso de cúmulos en la NMM durante el intervalo de edades sugerido por Tsujimoto y Bekki, como puede verse en la Figura 2.5(b) la cual muestra la distribución intrínseca de cúmulos de esta galaxia obtenida por los autores.

Al comparar ambas distribuciones de la Figura 2.5, resulta evidente que la NMM posee una población de cúmulos en el intervalo $12 - 15 \times 10^9$ años, mientras que los cúmulos más viejos de la NmM coinciden aproximadamente en las edades de la conocida *brecha* de la NMM. Más aún, suponiendo que esta *brecha* es real, es decir que existe un período inactivo de formación de cúmulos en la NMM, y suponiendo también que el cúmulo más viejo de la NmM se formó $\sim 12 \times 10^9$ años atrás (NGC 121), se podría sugerir, como lo hicieron Piatti et al. (2002), el siguiente posible escenario: la NmM se formó a partir de la disgregación de una parte de la NMM que contenía gas y/o cúmulos estelares, posiblemente debido a la interacción entre la NMM y nuestra Galaxia. Este escenario propuesto no coincidiría con aquel descrito por Kallivayalil et al. (2013) y Besla et al. (2007), quienes encuentran evidencias que sugieren que el SM se encuentra en un primer acercamiento a la VL, por lo cual la NmM no podría ser el resultado de la interacción entre la NMM y la VL.

De la Figura 2.5(a) se desprende además que el primer máximo primario del proceso de formación hace 5×10^9 años, es seguido por un período de 2×10^9 años de una relativamente menor actividad de formación de cúmulos. Luego, hace 2×10^9 años, aparece un segundo máximo, el cual generalmente es atribuido a un abrupto episodio de formación de cúmulos generado por la interacción entre ambas Nubes. La existencia de este segundo máximo primario ha sido ampliamente documentada en la literatura (p. ej. Piatti et al., 2007; Bekki et al., 2004). En este sentido, la Figura 2.5(a) prueba la existencia de tal pico dentro de un nivel de confianza superior al 70 %.

Teniendo presentes los histogramas descritos anteriormente, y suponiendo que el SM se encuentra en su primer pasaje próximo a la VL, Carpintero et al. (2013) exploraron si la falta de cúmulos viejos ($\geq 7 \times 10^9$ años) en

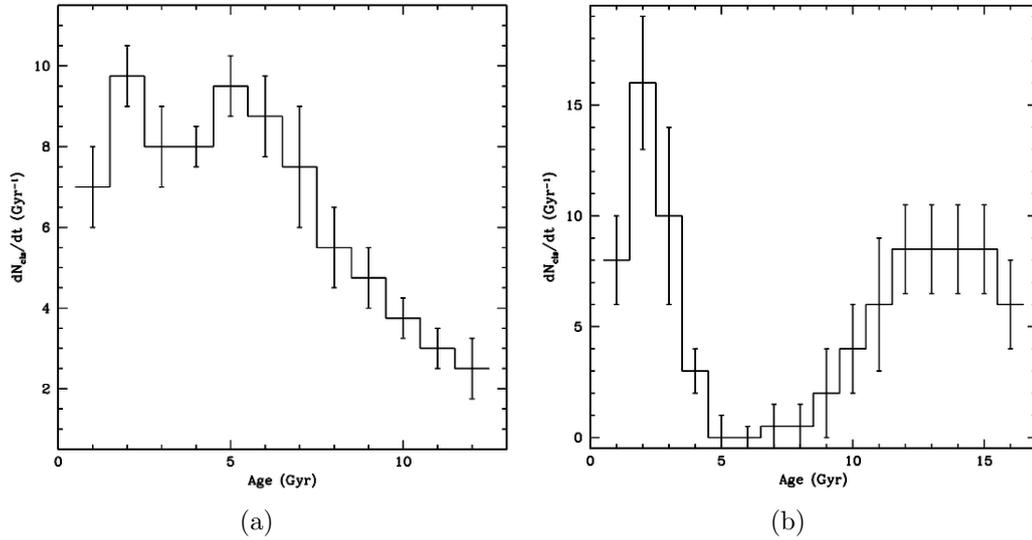


Figura 2.5: *Distribución intrínseca de edades de cúmulos de a) la NmM (Piatti et al., 2011a), b) la NMM (Piatti et al., 2011b).*

la NmM pudo ser el resultado de la captura de estos cúmulos por la NMM; como así también su eyección debido a interacciones de marea entre ambas galaxias. Con este fin, realizaron una serie de simulaciones numéricas empleando un amplio rango de parámetros para la órbita de la NmM alrededor de la NMM. Pudieron concluir que para excentricidades de la órbita $e \geq 0,4$, aproximadamente el 15% de los cúmulos de la NmM son capturados por la NMM; mientras que entre un 20% a 50% son eyectados al medio intergaláctico. Como es de esperar, los cúmulos desprendidos de la NmM fueron aquellos más débilmente ligados a ésta. Dentro de este escenario, sería posible interpretar entonces las diferencias observadas entre las distribución de cúmulos con edades $\geq 7 \times 10^9$ años en ambas Nubes.

El trabajo de Carpintero et al. (2013) es de gran interés para el presente estudio debido a que su código de simulaciones numéricas es el que emplearemos con las adaptaciones correspondientes en nuestro trabajo.

2.3. Metalicidades

Las metalicidades de varios cúmulos de la NmM han sido estimadas en los últimos años; como así también aquellas de estrellas de campo distribuidas en distintas regiones. Antes de describir la REM encontrada para diferentes

objetos de la NmM, quisiéramos hacer notar que en el caso de los cúmulos la misma no resulta afectada por efectos de incompletitud para edades grandes. Piatti (2011) encontró a través de un análisis estadístico, que un total de siete cúmulos relativamente viejos y/o viejos podrían no haber sido estudiados aún, e incluso obtuvo un número menor si se tiene en cuenta la distribución espacial de los mismos. Estos resultados son de gran importancia para nuestro trabajo, ya que utilizaremos la REM conocida hasta el presente, la cual suponemos desafectada de cualquier tipo de incertezas sistemáticas.

Piatti y Geisler (2013) presentaron una comparación homogénea entre la REM de estrellas del campo, obtenida a partir de las estimaciones de edad y metalicidad estelar representativa para distintas subregiones de la galaxia relativamente pequeñas, con la obtenida para 81 cúmulos de la NMM con edades $\geq 1 \times 10^9$ años y metalicidades derivadas en las mismas escalas. La REM resultante para los cúmulos es representada en la Figura 2.6 con cuadrados rellenos, superpuesta a la de estrellas del campo de la NMM (cuadrados abiertos con barras de error). Como puede verse, la REM de cúmulos se corresponde satisfactoriamente con la REM de estrellas del campo solamente en los últimos 3×10^9 años, mientras que la envolvente inferior de la REM de estrellas del campo es marcadamente más rica en metales que la de los cúmulos para las edades $t > 11 \times 10^9$ años. El origen de los 15 cúmulos más viejos de la NMM constituye un enigma en nuestro entendimiento de la formación y evolución de la galaxia, hasta la actualidad. Diferentes estudios muestran que tienen propiedades similares a los cúmulos globulares de la VL (Brocato et al., 1996; Mucciarelli et al., 2009) salvo por sus órbitas, que están en el disco de la NMM en lugar del halo isotérmico (Bekki, 2007). Por otro lado, la Figura 2.6 muestra que existe una población estelar de campo más vieja que 10×10^9 años y con ello, tan vieja como los cúmulos. Este resultado iría de la mano con el curioso enigma de la ausencia de cúmulos durante las edades pertenecientes al *brecha* (Bekki et al. 2004). Desde que Harris y Zaritsky (2009) encontraron que había una época relativamente inactiva en la formación de estrellas de campo aproximadamente 12 a 5×10^9 años atrás (similar a la observada para los cúmulos de estrellas), ellos también concluyeron que los modos de formación de estrellas del campo y de cúmulos estelares están estrechamente acoplados. Hay que tener en cuenta que las edades y metalicidades utilizados por Harris & Zaritsky para los 85 cúmulos no están en sí mismos en una escala homogénea ni en los mismos campos de escalas de edad/metalicidad.

Con el fin de encontrar pistas que permitan dar una explicación a la baja metalicidad de los cúmulos viejos de la NMM, Piatti & Geisler, reconstruyeron las REMs de cúmulos y subregiones de estrellas de campo de la NmM,

CAPÍTULO 2. EL SISTEMA DE CÚMULOS ESTELARES DE LA NUBE MENOR DE MAGALLANES

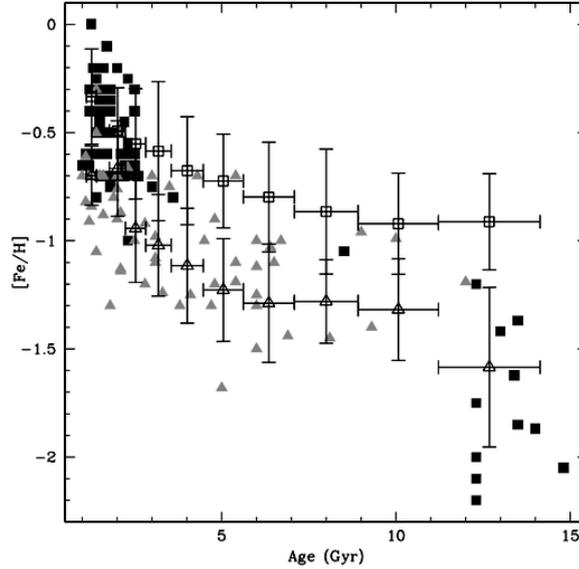


Figura 2.6: REMs del campo de la NMM (cuadrados abiertos) y NmM (triángulos abiertos). Se superponen las REMs de sus respectivos cúmulos en cuadrados rellenos (NMM) y triángulos rellenos (NmM) (Piatti y Geisler, 2013).

que obtuvieron también a partir de fotometría de Washington. Los resultados se muestran en la Figura 2.6 con triángulos abiertos para el valor medio de las subregiones de estrellas de campo (con sus barras de error) y triángulos rellenos para los cúmulos estelares. Como puede observarse, los cúmulos y las estrellas de campo aparentemente comparten historias de enriquecimiento químico similares en la NmM, a pesar de que la población de cúmulos viejos decrece drásticamente más allá de los $\sim 7 \times 10^9$ años y hay un cúmulo con edad de 10^{10} años.

Teniendo en cuenta esos resultados, Piatti (2011) concluyó que nuestro conocimiento acerca de la REM de los cúmulos de la NmM ha mejorado significativamente, particularmente en su régimen de edades grandes. Por lo tanto, no parece fácil conectar el origen de la población de mayor edad de cúmulos de la NMM a eventos de captura de antiguos cúmulos estelares de la NmM. Además, la REM de las estrellas del campo de la NmM resulta en promedio corrido en $\sim 0,4$ hacia metalicidades más pobre que la de la contraparte en la NMM para todas las edades y con poca dispersión. Esto indica que ambas galaxias han evolucionado químicamente de modo similar, a menos de una diferencia constante en el valor medio absoluto de sus metalicidades. Este resultado puede entenderse a la luz de la conocida relación masa-metalicidad promedio obtenida observacionalmente para galaxias. Esta

CAPÍTULO 2. EL SISTEMA DE CÚMULOS ESTELARES DE LA NUBE MENOR DE MAGALLANES

correlación queda en evidencia, a pesar de la gran dispersión, en la Figura 2.7. Dicha figura muestra la relación entre la abundancia de oxígeno en fase gaseosa y la masa estelar de 53.400 galaxias con estrellas en formación catalogadas en el *Sloan Digital Sky Survey* (Tremonti et al., 2004).

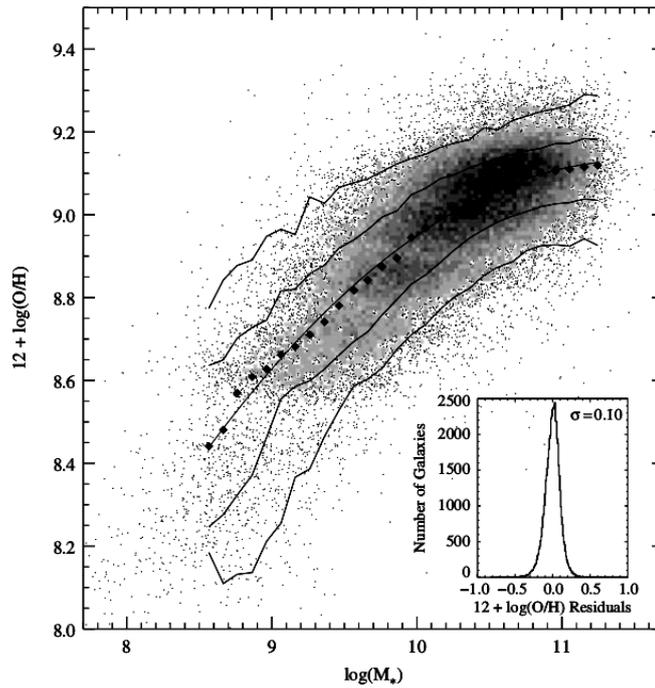


Figura 2.7: Relación entre masa estelar, en unidades de masas solares, y abundancia de oxígeno en fase gaseosa de ~ 53.400 galaxias con formación estelar activa en el catálogo SDSS. Para comparación, el Sol tiene $12 + \log[(O/H)] = 8,69$. Los puntos negros representan la media en intervalos de 0.1 en masas. Las curvas sólidas son los contornos que engloban el 68 % y 95 % de los datos. La curva gris muestra un ajuste polinomial de los datos. El recuadro muestra los restos del ajuste (Tremonti et al., 2004).

Finalmente, la Figura 2.6 muestra también que las REMs correspondientes a la población de estrellas del campo en ambas galaxias, experimentan un rápido enriquecimiento químico, seguido por un aparente período de quietud en formación estelar. Solo en la NmM se formaron cúmulos estelares durante este período (Piatti y Geisler, 2013). Un período reciente de enriquecimiento químico aparentemente tuvo comienzo hace 6×10^9 años atrás. La relativa deficiencia en elementos pesados de la NmM podría explicar la metalicidad de unos pocos cúmulos viejos observados en la NMM, si fueron capturados

de la NmM (Besla et al., 2012), pero este es un argumento poco probable para explicar la presencia de la mayoría de los cúmulos pobres en metales de la NMM ($t > 12 \times 10^9$ años). En efecto, es curioso en este contexto, que el cúmulo más viejo de la NmM conocido hasta la fecha, está en medio de la *brecha* de las distribuciones de cúmulos de la NMM.

2.4. Fundamentos de la elección de los objetos de estudio

El conocimiento de los parámetros fundamentales, tales como edad, metalicidad, distancia, velocidad espacial, etc., de los cúmulos estelares es de gran importancia astrofísica. En efecto, los estudios de dichos sistemas, tanto teóricos como observacionales, han permitido conocer cómo es la estructura de la galaxia anfitriona, cómo ella se formó y evolucionó (ver por ejemplo Magrini et al., 2009). De hecho, los cúmulos estelares han sido desde hace tiempo empleados como excelentes trazadores de los diferentes subsistemas que constituyen las galaxias (p. ej.: disco, halo) (Bonatto et al., 2006).

Las consideraciones expresadas precedentemente explican nuestro interés en determinar las posiciones iniciales o lugares de nacimiento de estos sistemas en la NmM. Si bien la sola determinación de las trayectorias o movimientos orbitales de cúmulos estelares es de por sí de gran valor, su potencial contribución alcanza una magnitud aún más relevante cuando una muestra estadísticamente significativa de ellos es analizada en un contexto cosmológico mayor, es decir, cuando sus propiedades globales son examinadas en diferentes escalas galácticas. En este sentido, la contribución a nuestro conocimiento de la formación y evolución de galaxias a partir de simulaciones numéricas, es de vital importancia. Concretamente, se procura interpretar desde un punto de vista teórico los resultados observacionales y, viceversa, distintas predicciones teóricas pueden ser confirmadas observacionalmente.

Estudios recientes llevados a cabo sin la ayuda de la información cinemática han intentado examinar la evolución química de la NmM. Así, Da Costa (1991) mostró que los cúmulos más pobres en metales tienen metalicidades similares y aparentemente diferentes edades, indicando que la galaxia ha experimentado una historia inusual de enriquecimiento químico. Un aspecto no examinado por el autor consiste en analizar la distribución espacial de los cúmulos estudiados, con el fin de poder confirmar si el enriquecimiento químico tuvo similar intensidad en toda la galaxia. Luego, Mighell et al. (1998) y Piatti et al. (2001, 2005) confirmaron a partir de resultados observacionales,

CAPÍTULO 2. EL SISTEMA DE CÚMULOS ESTELARES DE LA NUBE MENOR DE MAGALLANES

como así también Bekki et al. (2004) con resultados teóricos, que la galaxia experimentó una formación intensa de cúmulos hace $\sim 2 \times 10^9$ de años. Sin embargo, Rich et al. (2000) encontró que un proceso de formación intensa de cúmulos habría tenido lugar hace $\sim 8 \times 10^9$ de años, resultado predicho también teóricamente por Tsujimoto y Bekki (2009). Ninguno de estos trabajos examina si existe algún nexo entre estos procesos de formación intensa y la distribución espacial de los cúmulos. Es decir, la duda respecto de si los procesos de formación de cúmulos tienen algún vínculo con la existencia o no de gradientes de metalicidad y/o regiones de la galaxias preferidas para su formación aluden una vez más a la necesidad de conocer sus posiciones iniciales.

Una recomendación general implícita parece surgir de estudios acerca de la evolución química de la NmM, la cual señala la necesidad de considerar los lugares de nacimiento de los cúmulos para una más exhaustiva aproximación al estudio de su evolución química (Piatti 2011, Carpintero et al. 2013). Sin el conocimiento apropiado de las posiciones iniciales de los cúmulos en la galaxia, no puede esgrimirse en absoluto ninguna conclusión acerca de la evolución química de la misma, que resulta por sí misma necesariamente limitada al tiempo presente. Parece interesante y a la vez sugestivo poder explorar también, a partir de cálculos numéricos de las interacciones dinámicas entre las dos Nubes de Magallanes, la posibilidad de que la NMM haya podido capturar cúmulos viejos formados en la NmM, cuantificar el número de pasajes que han experimentado, las variaciones temporales de sus distancias relativas, y sus orientaciones respecto de la posición de la Vía Láctea (ver por ejemplo Bekki, 2012). El estado del debate acerca de la distribución de metalicidades de los cúmulos estelares resulta bien ilustrado cuando los resultados presentados en Kayser et al. (2006) son introducidos en el contexto general de la formación y evolución de la galaxia. Mientras durante las últimas décadas ha existido cierto consenso acerca de la existencia de un gradiente de abundancia lineal en la galaxia o, en el peor de los casos, con una pequeña tendencia menos marcada para distancias galactocéntricas menores a los 2 grados (Piatti et al., 2008); Kaiser et al. (2006) mostraron que existe una marcada dispersión que excede las incertezas en metalicidad por un factor 3. Sin embargo, como se puntualizó arriba, deberían usarse para un análisis más consistente las distancias galactocéntricas de los lugares de nacimiento de los cúmulos.

Esta reflexión es el móvil principal por el cual entendemos que el camino a seguir para el mejor entendimiento de lo que es la NmM: sus propiedades, formación y evolución, es el estudio dinámico de los diferentes trazadores de la galaxia. Esto seguramente proporcionará ideas o permitirá sugerir respuestas a varios de los interrogantes que hasta la fecha no han encontrado una

CAPÍTULO 2. EL SISTEMA DE CÚMULOS ESTELARES DE LA NUBE MENOR DE MAGALLANES

respuesta satisfactoria.

En este trabajo, se pretenden estudiar las propiedades de los cúmulos - importantes trazadores de la galaxia - a lo largo de la evolución temporal. Es por ello, que se necesitó de un amplio marco teórico previo, a fin de construir una imagen de la galaxia lo más realista posible. En los siguientes Capítulos, se describirá el trabajo que hemos realizado.

Bibliografía

Bekki, K.

2007. On the origin of the kinematical differences between the stellar halo and the old globular cluster system in the Large Magellanic Cloud. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 380:1669–1677.

Bekki, K.

2012. The influences of the Magellanic Clouds on the Galaxy: pole shift, warp and star formation history. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 422:1957–1974.

Bekki, K., W. J. Couch, M. A. Beasley, D. A. Forbes, M. Chiba, y G. S. Da Costa

2004. Explaining the mysterious age gap of globular clusters in the Large Magellanic Cloud. *Astrophys. J. Let.*, 610:L93–L96.

Besla, G., N. Kallivayalil, L. Hernquist, B. Robertson, T. J. Cox, R. P. van der Marel, y C. Alcock

2007. Are the Magellanic Clouds on their first passage about the Milky Way? *Astrophys. J.*, 668:949–967.

Besla, G., N. Kallivayalil, L. Hernquist, R. P. van der Marel, T. J. Cox, y D. Keres

2012. The role of dwarf galaxy interactions in shaping the Magellanic System and implications for Magellanic Irregulars. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 421:2109–2138.

Bica, E., C. Bonatto, C. M. Dutra, y J. F. C. Santos

2008. A general catalogue of extended objects in the Magellanic System. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 389:678–690.

Bonatto, C., L. O. Kerber, E. Bica, y B. X. Santiago

2006. Probing disk properties with open clusters. *Ast & Ast*, 446:121–135.

BIBLIOGRAFÍA

- Brocato, E., V. Castellani, F. R. Ferraro, A. M. Piersimoni, y V. Testa
1996. The age of the old Magellanic Cloud clusters - II. NGC 1786, 1841 and 2210 as evidence for an old coeval population of LMC and galactic globular clusters. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 282:614–622.
- Burstein, D. y C. Heiles
1982. Reddenings derived from H I and galaxy counts - Accuracy and maps. *Astron. J.*, 87:1165–1189 (BH82).
- Carpintero, D. D., F. A. Gómez, y A. E. Piatti
2013. On a possible origin for the lack of old star clusters in the Small Magellanic Cloud. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 435:L63–L67.
- Crowl, H. H., A. Sarajedini, A. E. Piatti, D. Geisler, E. Bica, J. J. Clariá, y J. F. C. Santos, Jr.
2001. The line-of-sight depth of populous clusters in the Small Magellanic Cloud. *Astron. J.*, 122:220–231.
- Da Costa, G. S.
1991. The age-abundance relations and age distributions for the star clusters of the Magellanic Clouds. In *The Magellanic Clouds*, R. Haynes y D. Milne, eds., volume 148 of *IAU Symposium*, P. 183.
- Girardi, L., A. Bressan, G. Bertelli, y C. Chiosi
2000. Evolutionary tracks and isochrones for low- and intermediate-mass stars: From 0.15 to 7 M_{sun} , and from $Z=0.0004$ to 0.03. *Ast & Ast Suppl.*, 141:371–383.
- Harris, J. y D. Zaritsky
2009. The star formation history of the Large Magellanic Cloud. *Astron. J.*, 138:1243–1260.
- Kallivayalil, N., R. P. van der Marel, y C. Alcock
2006. Is the SMC Bound to the LMC? The Hubble Space Telescope Proper Motion of the SMC. *Astrophys. J.*, 652:1213–1229.
- Kallivayalil, N., R. P. van der Marel, G. Besla, J. Anderson, y C. Alcock
2013. Third-epoch Magellanic Cloud proper motions. I. Hubble Space Telescope/WFC3 data and orbit implications. *Astrophys. J.*, 764:161.
- Kayser, A., E. K. Grebel, D. R. Harbeck, A. A. Cole, A. Koch, J. S. Gallagher, y G. S. Da Costa
2006. The age-metallicity relation of the SMC. *ArXiv e-prints: astro-ph/0607047*.

BIBLIOGRAFÍA

- Magrini, L., P. Sestito, S. Randich, y D. Galli
2009. The evolution of the Galactic metallicity gradient from high-resolution spectroscopy of open clusters. *Ast & Ast*, 494:95–108.
- Mighell, K. J., A. Sarajedini, y R. S. French
1998. WFPC2 observations of star clusters in the Magellanic Clouds. II. The oldest star clusters in the Small Magellanic Cloud. *Astron. J.*, 116:2395–2414.
- Mucciarelli, A., L. Origlia, F. R. Ferraro, y E. Pancino
2009. Looking outside the Galaxy: The discovery of chemical anomalies in three old Large Magellanic Cloud clusters. *Astrophys. J. Let.*, 695:L134–L139.
- Piatti, A. E.
2011. Towards a comprehensive picture of the star cluster age-metallicity relationship in the Small Magellanic Cloud. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 418:L69–L73.
- Piatti, A. E. y E. Bica
2012. Washington photometry of candidate star clusters in the Small Magellanic Cloud. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 425:3085–3093.
- Piatti, A. E., J. J. Clariá, E. Bica, D. Geisler, A. V. Ahumada, y L. Girardi
2011a. Washington photometry of 14 intermediate-age to old star clusters in the Small Magellanic Cloud. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 417:1559–1575.
- Piatti, A. E., J. J. Clariá, M. C. Parisi, y A. V. Ahumada
2011b. First estimates of the fundamental parameters of three Large Magellanic Cloud clusters. *Pub. Astron. Soc. Pac.*, 123:519–530.
- Piatti, A. E. y D. Geisler
2013. The age-metallicity relationship of the Large Magellanic Cloud field star population from Wide-field Washington Photometry. *Astron. J.*, 145:17.
- Piatti, A. E., D. Geisler, A. Sarajedini, C. Gallart, y M. Wischnjewsky
2008. Seven young star clusters in the inner region of the Small Magellanic Cloud. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 389:429–440.
- Piatti, A. E., J. F. C. Santos, J. J. Clariá, E. Bica, A. Sarajedini, y D. Geisler
2001. Ages and metallicities of five intermediate-age star clusters projected towards the Small Magellanic Cloud. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 325:792–802.

BIBLIOGRAFÍA

- Piatti, A. E., A. Sarajedini, D. Geisler, E. Bica, y J. J. Clariá
2002. Constraining the LMC cluster age gap: Washington photometry of NGC 2155 and SL 896 (LW 480). *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 329:556–566.
- Piatti, A. E., A. Sarajedini, D. Geisler, C. Gallart, y M. Wischnjewsky
2007. Two newly identified, relatively old star clusters in the Small Magellanic Cloud. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 381:L84–L88.
- Piatti, A. E., A. Sarajedini, D. Geisler, J. Seguel, y D. Clark
2005. Tracing the formation history of intermediate-age star clusters in the Small Magellanic Cloud. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 358:1215–1230.
- Rich, R. M., M. Shara, S. M. Fall, y D. Zurek
2000. Two groups of nearly coeval star clusters in the Small Magellanic Cloud. *Astron. J.*, 119:197–206.
- Sarajedini, A.
1999. WIYN open cluster study. III. The Observed variation of the red clump luminosity and color with metallicity and age. *Astron. J.*, 118:2321–2326.
- Schlegel, D. J., D. P. Finkbeiner, y M. Davis
1998. Maps of dust infrared emission for use in estimation of reddening and Cosmic Microwave Background radiation foregrounds. *Astrophys. J.*, 500:525–553 (SFD98).
- Tremonti, C. A., T. M. Heckman, G. Kauffmann, J. Brinchmann, S. Charlot, S. D. M. White, M. Seibert, E. W. Peng, D. J. Schlegel, A. Uomoto, M. Fukugita, y J. Brinkmann
2004. The origin of the mass-metallicity relation: Insights from 53,000 star-forming galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. *Astrophys. J.*, 613:898–913.
- Tsujimoto, T. y K. Bekki
2009. Chemical signature of a major merger in the early formation of the Small Magellanic Cloud. *Astrophys. J. Let.*, 700:L69–L72.

Capítulo 3

Evolución dinámica

En el presente trabajo se estudia la evolución en el tiempo de las distintas relaciones entre propiedades astrofísicas del sistema de cúmulos pertenecientes a la NmM mediante un catálogo sintético de cúmulos que reproduce las propiedades globales observadas. Un modelo numérico fue utilizado para trazar las trayectorias de estos cuerpos, desde el presente hacia atrás en el tiempo, hasta sus lugares de nacimiento. Para ello hemos desarrollado un conjunto de programas escritos en R y Fortran 90 que nos permiten: a) generar un conjunto de cúmulos cuyas posiciones, edades y metalicidades se corresponden con las distribuciones obtenidas observacionalmente; b) integrar las ecuaciones de movimiento hacia atrás en el tiempo, de los cúmulos en el potencial dado por la VL, la NMM y la NmM por un tiempo igual a sus respectivas edades; y c) extraer de los resultados de las simulaciones, distribuciones de edad-posición-metalicidad para distintos tiempos, a fin de comparar estas relaciones a lo largo de la evolución de la galaxia.

En este Capítulo presentamos el método propuesto. En primer lugar describimos el modelo utilizado para las tres galaxias (Sección §3.1). A continuación generamos el catálogo sintético de cúmulos, asignando a cada uno los valores de sus posiciones y velocidades, condiciones iniciales para nuestro integrador (Secciones §3.2 y §3.3). Por último presentamos el método utilizado para integrar las ecuaciones de movimiento (Sección §3.4).

3.1. Modelos de potencial galáctico

En principio, nos proponemos reproducir los movimientos orbitales de los cúmulos ligados a la NmM, teniendo en cuenta además los efectos dinámicos debido a la presencia de la NMM y la VL, entre otros. Para ello, debemos co-

nocer tanto las posiciones y velocidades actuales de los cúmulos y los centros de masas de las tres galaxias, como así también sus respectivos potenciales. En nuestro caso, las únicas fuerzas relevantes son la gravedad, entre las cuales incluimos la fricción dinámica debida al paso de los objetos por regiones embebidas de materia oscura.

Comenzamos por describir los potenciales gravitatorios involucrados. Para cada cúmulo, el potencial total al que se encuentra sometido es la suma de los potenciales de las tres galaxias y el potencial kepleriano con cada uno de los demás cúmulos de la muestra. El potencial de cada galaxia se obtiene sumando los potenciales producidos por cada una de sus estrellas, gas y materia oscura que la componen. Calcular la suma de todos estos potenciales individuales requiere una enorme capacidad de cálculo para lo cual es necesario conocer previamente las posiciones de todas las estrellas, como así también la distribución real de materia oscura. Esto representa un desafío fuera del alcance de este trabajo. En su lugar el campo gravitatorio de cada galaxia puede representarse a través de un potencial suavizado.

Tanto la componente bariónica de una galaxia como los halos de materia oscura pueden ser bien aproximados como sistemas dinámicos no colisionales en los cuales el potencial gravitacional en un punto \mathbf{x} , $\Phi(\mathbf{x})$, se relaciona con la densidad de masa, $\rho(\mathbf{x})$, a través de la ecuación de Poisson,

$$\nabla^2 \Phi(\mathbf{x}) = 4\pi G \rho(\mathbf{x}). \quad (3.1)$$

En particular, los halos de materia oscura como las componentes bariónicas de las galaxias elípticas suelen estar bien descriptas como esferas con una distribución de densidad dada por una doble ley de potencias,

$$\rho(r) = \rho_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-\gamma} \left[1 + \left(\frac{r}{r_0} \right)^\alpha \right]^{(\gamma-\beta)/\alpha}, \quad (3.2)$$

donde ρ_0 y r_0 son constantes distintas de cero con dimensiones de densidad y longitud, respectivamente.

A radios pequeños, cerca del centro definido para la galaxia, $\rho \propto r^{-\gamma}$ mientras que a grandes radios $\rho \propto r^{-\beta}$ y α determina la suavidad del quiebre entre las dos leyes de potencias. Uno de los casos especiales que a menudo se emplea en la literatura y que ha sido utilizado para modelar el halo de materia oscura de las tres galaxias que nos compete en este trabajo, es el perfil de Hernquist (1990) donde (α, β, γ) toman los valores $(1, 4, 1)$. La solución general para el correspondiente potencial gravitacional de este perfil esférico,

$$\Phi(r) = -4\pi G \left[\frac{1}{r} \int_0^r \rho(r') r'^2 dr' + \int_r^\infty \rho(r') r' dr' \right], \quad (3.3)$$

está dado por,

$$\Phi(r) = -\frac{GM}{r + r_0} \quad , \quad (3.4)$$

donde M es la masa total del sistema esférico.

En nuestro trabajo se tienen en cuenta a) el potencial de la VL dado por su halo de materia oscura (Φ_H), su bulbo (Φ_B) y su disco estelar y de gas (Φ_D); b) el potencial de la NMM dado por su halo de materia oscura (Φ_H); y c) el potencial de la NmM dado por su halo de materia oscura (Φ_H) y su disco estelar y de gas (Φ_D). Todos los halos de materia oscura en este trabajo son modelados por el perfil de Hernquist, al igual que el bulbo de la VL. Para describir los discos galácticos, se emplea el modelo de Miyamoto y Nagai (1975) cuya expresión general del potencial gravitacional es:

$$\Phi(R, z) = -\frac{GM}{\{R^2 + [r_d + (z^2 + z_d^2)^{1/2}]^2\}^{1/2}} \quad , \quad (3.5)$$

donde (R, z) denotan las dos coordenadas cilíndricas no angulares y tanto r_d como z_d , son constantes distintas de cero con dimensiones de longitud. La correspondiente distribución de densidad, derivada de la ecuación de Poisson (3.1) es:

$$\rho(R, z) = \frac{z_d^2 M r_d R^2 + [r_d + 3(z^2 + z_d^2)^{1/2}][r_d + (z^2 + z_d^2)^{1/2}]^2}{4\pi \{R^2 + [r_d + (z^2 + z_d^2)^{1/2}]^2\}^{5/2} (z^2 + z_d^2)^{3/2}} \quad . \quad (3.6)$$

Este perfil es una generalización del modelo para galaxias disco de Toomre (1963), para representar el potencial axialmente simétrico y la densidad en casos en que la masa no esté confinada a un único plano. De esta forma, esta solución constituye un par densidad-potencial que permite una transición continua del modelo para un disco fino de Kuzmin (1956) y el modelo esférico de Plummer (1911).

En la Tabla 3.1 se muestran los valores de los diferentes parámetros que hemos elegido para los potenciales externos al sistema de cúmulos.

Un aspecto importante a considerar es la disposición de los cúmulos en un sistema de referencia determinado. En particular, el disco de la NmM se encuentra posicionado de manera que en el plano del cielo se observa de canto, con su semieje en un ángulo de posición de 36° .

Como se mencionó al comienzo de la Sección, con el fin de obtener un modelo realista, hemos tenido en cuenta no solo las fuerzas gravitacionales suaves de los potenciales, sino también la fricción dinámica. Ésta es una fuerza de arrastre resultante del paso de un objeto de masa M_1 a través de un sistema no colisional cuyas partículas constituyentes (las partículas de

CAPÍTULO 3. EVOLUCIÓN DINÁMICA

Potencial	Parámetros	Vía Láctea	NMM	NmM
Φ_H	M [M_\odot]	10^{12}	$1,8 \times 10^{11}$	$2,1 \times 10^{10}$
	r_0 [kpc]	45,497	21,4	7,3
Φ_B	M [M_\odot]	10^{10}	-	-
	r_0 [kpc]	0,7	-	-
Φ_D	M [M_\odot]	$6,5 \times 10^{10}$	-	10^9
	z_d [kpc]	0,53	-	0,15
	r_d [kpc]	3,5	-	1,1

Tabla 3.1: *Parámetros empleados para los distintos potenciales externos al sistema de cúmulos, obtenidos de Besla et al. (2012).*

campo) tienen una masa $m_2 \ll M_1$. De esta forma, se transfiere energía y momento de la masa objeto a las partículas de campo.

En este trabajo se tienen en cuenta las aceleraciones de los halos de materia oscura de las galaxias en sus órbitas debidas a los halos de materia oscura de las demás galaxias. Estos encuentros entre los halos desaceleran la masa objeto con una tasa:

$$\frac{d\mathbf{v}_1}{dt} = -4\pi G^2 M_1 \rho_2 \ln \Lambda \int d^3\mathbf{v}_2 f(\mathbf{v}_2) \frac{\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2}{|\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2|^3} \quad , \quad (3.7)$$

donde el subíndice 1 se refiere a la galaxia que está siendo desacelerada y el subíndice 2 a la galaxia que está causando la fricción. $(\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2)$ es la velocidad relativa de la galaxia 1 con respecto a la galaxia 2 y Λ es el factor de Coulomb definido en nuestro caso como:

$$\Lambda = \frac{rv_1^2}{GM_1(r)} \quad , \quad (3.8)$$

donde r es la distancia relativa entre los centros de ambas galaxias y $M_1(r)$ es la masa del halo de la galaxia 1 dentro del radio r . La función distribución de velocidades de las partículas de campo del halo de la galaxia 2, $f_2(v)$, se obtiene integrando a todas las posiciones a la función distribución de Hernquist (1990) en el espacio de fase, con dispersión de velocidades isotrópica:

$$f(\mathbf{x}, \mathbf{v}) = \frac{M}{8\sqrt{2}\pi^3 r_0^3 \omega^3} \frac{1}{(1-s)^{5/2}} \times [3 \arcsen s + s(1-s^2)^{1/2}(1-2s^2)(8s^4 - 8s^2 - 3)] \quad , \quad (3.9)$$

donde (\mathbf{x}, \mathbf{v}) es un punto en el espacio de fase, $\omega = (GM/r_0)^{1/2}$ y $s = (-E)^{1/2}/\omega$ siendo $E = \frac{1}{2}v^2 + \Phi(r)$ la energía por unidad de masa de las partículas del campo.

Debido a la isotropía, la ecuación (3.7) puede reescribirse de manera más simple:

$$\frac{d\mathbf{v}_1}{dt} = -16\pi^2 G^2 M_1 \rho_2 \ln \Lambda \left[\int_0^{v_1} v^2 f(v) dv \right] \frac{\mathbf{v}_1}{v_1^3} . \quad (3.10)$$

A esta fórmula usualmente se la conoce como fricción dinámica de Chandrasekhar (1943). Desafortunadamente, no existe una fórmula cerrada para la primitiva, por lo que la integral de la ecuación (3.10) se puede aproximar de la siguiente manera:

$$4\pi \int_0^{v_1} dv_2 v_2^2 f(v_2) \simeq \frac{1}{6} \left(\operatorname{erf}(x) - \frac{2x}{\sqrt{\pi}} e^{-x^2} \right) , \quad (3.11)$$

con $x = 2v_1 \sqrt{Gr_0/M_2}$. Esta aproximación tiene un error de menos del 6% para cualquier valor de v_1 .

3.2. Creación del sistema de cúmulos estelares

El tamaño de los cúmulos es mucho menor al radio de la NmM, por lo que pueden considerarse objetos puntuales para los fines de este trabajo. El sistema de cúmulos simulados consiste por ende en un conjunto de partículas, cada una de las cuales está caracterizada por su edad, posición, velocidad y metalicidad. La masa para todos ellos, se considera en primer orden la misma y con un valor igual a $10^5 M_\odot$.

La muestra sintética de cúmulos construida contiene 619 objetos, lo cual se corresponde con el número de cúmulos actualmente conocidos (Piatti, 2011). Empleamos los datos observacionales descritos en el Capítulo 2 para asignar las propiedades astrofísicas a cada cúmulo.

3.2.1. Designación de posiciones

La NmM puede ser vista como una galaxia triaxial con sus tres ejes declinación (Dec.), ascensión recta (AR) y línea de la visual (LOS) siguiendo una proporción 1:2:4 (Crowl et al., 2001). Basándonos en esta proporción, generamos nuestra propia distribución espacial de cúmulos.

Asignación de posiciones en el plano del cielo

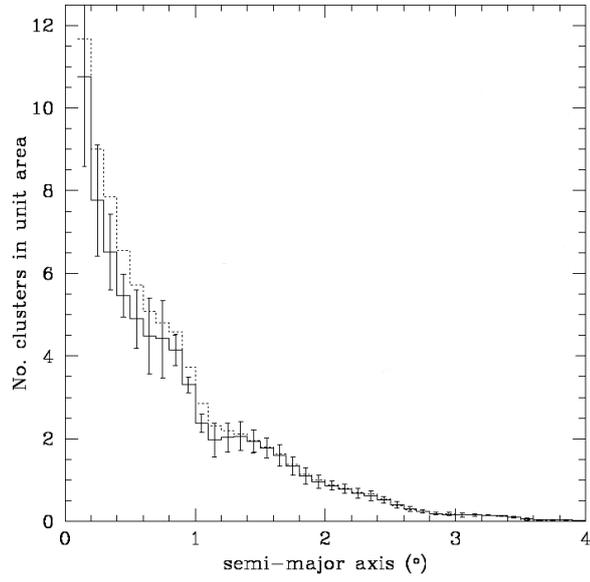
Para asignar las posiciones de los cúmulos en el plano del cielo, se contruyó una distribución de probabilidades de las posiciones de ellos del catálogo de Bica et al. (2008, en adelante B08). Decidimos utilizar un marco de referencia elíptico empleado en trabajos previos por distintos autores (ver por ejemplo Piatti, 2011) con el fin de reflejar más cabalmente el achataamiento de la galaxia. En este marco, a representa el semieje mayor de una elipse centrada en el centro de la NmM, que se encuentra alineado al cuerpo principal de la galaxia y cuya relación de semiejes b/a es $1/2$.

Se asigna como centro de la NmM al punto en el plano del cielo con coordenadas $AR= 00^h 52^m 45^s$, $Dec.= -72^\circ 49' 43''$ (J2000) (Crowl et al., 2001) y la dirección del semieje mayor tiene un ángulo de posición de 36° (Piatti y Bica, 2012, en adelante P12).

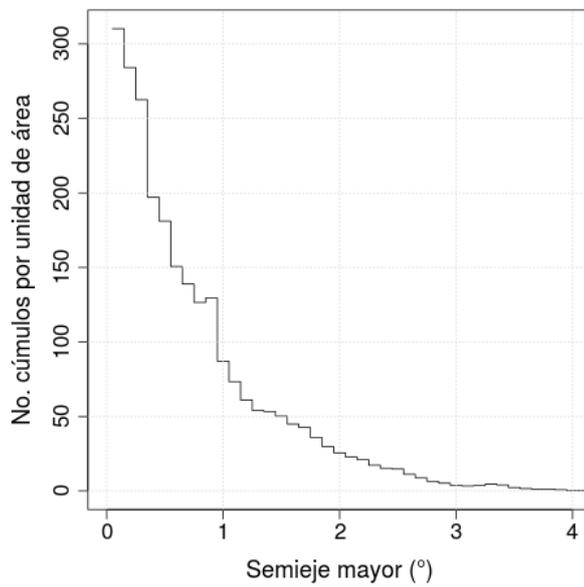
Se computó para cada cúmulo del catálogo B08, el valor de a que dicha elipse debería tener para que uno de los puntos de la trayectoria coincida con la posición del cúmulo. Se contó el número de cúmulos en anillos elípticos desde $a = 0^\circ$ hasta $a = 8^\circ$. El tamaño de cada anillo fue variado desde $0^\circ, 05$ hasta $0^\circ, 5$, de manera de construir diez histogramas de distribución espacial diferentes. Como es de esperar, ellos mostraron una dependencia con el tamaño del intervalo utilizado. Para superar esta dependencia promediamos los histogramas previamente normalizados. En la Figura 3.1 se muestran los resultados del trabajo de P12 (arriba) como así también nuestra distribución resultante (abajo), luego de aplicar el procedimiento descrito, y que emplearemos para asignar los valores de a a la muestra sintética de cúmulos. Como puede verse, existe buen acuerdo general entre ambos.

Previamente a asignar los valores de a a cada cúmulo de la muestra, empleamos un listado de 60 cúmulos reales de la NmM estudiados por distintos autores, cuyas posiciones en el plano del cielo y edades ya han sido catalogadas (Piatti 2011 y referencias allí, en adelante P11). Las edades de estos cúmulos son $\geq 10^9$ años. Este conjunto es prácticamente la muestra completa de cúmulos reales de esta galaxia pertenecientes a este rango de edades. Es por ello que suponemos que dentro del total de 564 cúmulos estudiados (B08), solo 60 pertenecen a este rango de edades infiriendo que en nuestra muestra sintética de 619 cúmulos debe haber 64 con edades $\geq 10^9$ años, subconjunto al cual denominaremos grupo A. Por su parte, los cúmulos con edades $< 10^9$ años pertenecerán al subconjunto B.

Con el fin de encontrar la distribución espacial en el plano del cielo del subconjunto de cúmulos A, se contruyó una distribución de probabilidades de valores de a a partir de los valores reales obtenidos para la lista de 60



(a) Piatti y Bica (2012).



(b) Este trabajo.

Figura 3.1: *Comparación de distribuciones espaciales en el plano del cielo.*

cúmulos. La distribución de probabilidades resultante se muestra en la Figura 3.2. De estos resultados se infieren que 25 de los cúmulos de nuestra muestra pertenecientes al conjunto A, deben encontrarse en el rango $a \in (4-8)^\circ$. Por otro lado, si empleamos la distribución de probabilidades obtenida a partir del catálogo de B08 para asignar los valores de a a todos los cúmulos de nuestra muestra, no encontramos esta cantidad mínima de cúmulos que predice la distribución obtenida empleando la muestra de P11, en el mismo rango de a .

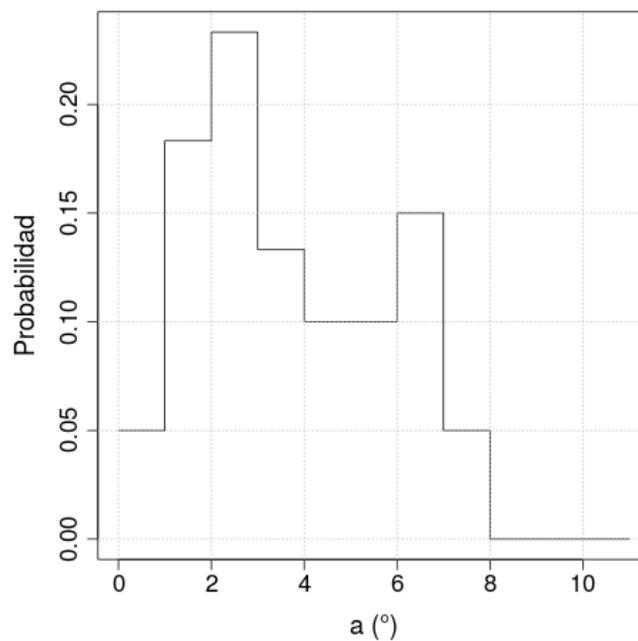


Figura 3.2: *Distribución de probabilidad de cúmulos con edades $\geq 10^9$ años, obtenida de la lista de 60 objetos reales (P11 y referencias allí).*

Para resolver este inconveniente, a partir de la distribución espacial resultante en la variable a del catálogo de B08 se procede a asignar mediante un programa generador de números que imite este histograma, los valores para 600 de nuestros cúmulos artificiales. A los 19 cúmulos restantes se les asignan los valores de $a > 4^\circ$ necesarios para que el subconjunto de cúmulos del grupo A, siga la distribución adecuada.

Para verificar que la distribución de valores de semieje mayor resultante para los 619 cúmulos artificiales mediante el método descrito no discrepe de la distribución obtenida por el catálogo B08, realizamos un test de Kolmogorov-Smirnov entre ambas funciones de distribución acumulada (ver Figura 3.3). De este test se concluye con un nivel de significación estadístico

igual a 0,8, que las distribuciones no difieren significativamente y por consiguiente, no hay evidencia estadística suficiente para rechazar la hipótesis de que ambas muestras provienen de la misma distribución.

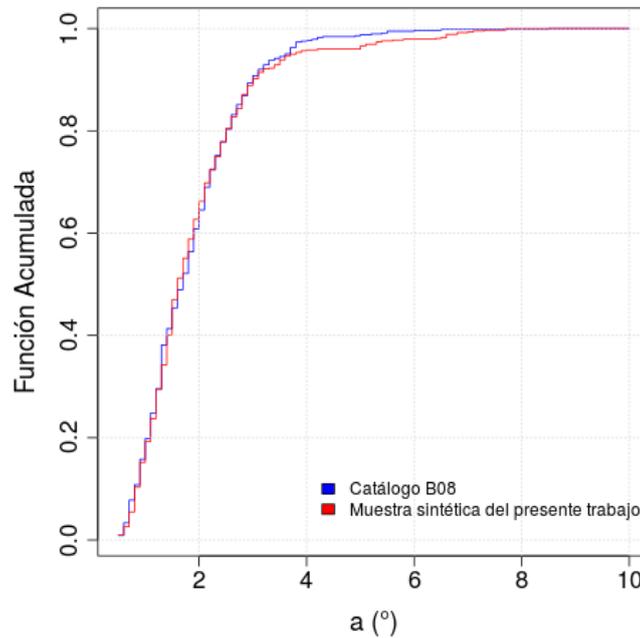


Figura 3.3: *Función distribución acumulada para valores de semieje mayor.*

Para asignar unívocamente una posición en el plano del cielo para cada cúmulo de nuestra muestra, a cada uno de ellos se le asigna un valor aleatorio uniforme entre 0 y 2π que será el valor del ángulo medido desde el centro de la elipse, que forma el radio vector del objeto, y el semieje mayor de la elipse. De esta forma, se encuentran los cúmulos unívocamente posicionados en el plano del cielo.

En la Figura 3.4 se muestran las posiciones resultantes para nuestra muestra de 619 cúmulos en el plano (Dec., AR) y en el plano (x, y) tangente al plano del cielo en la posición del centro de la galaxia. El punto rojo indica esta posición.

Asignación de posiciones en la línea de la visual

Basados en las razones axiales obtenidas por Crowl et al. (2001) y los valores de a obtenidos, asignamos la posición de los cúmulos en la línea de la

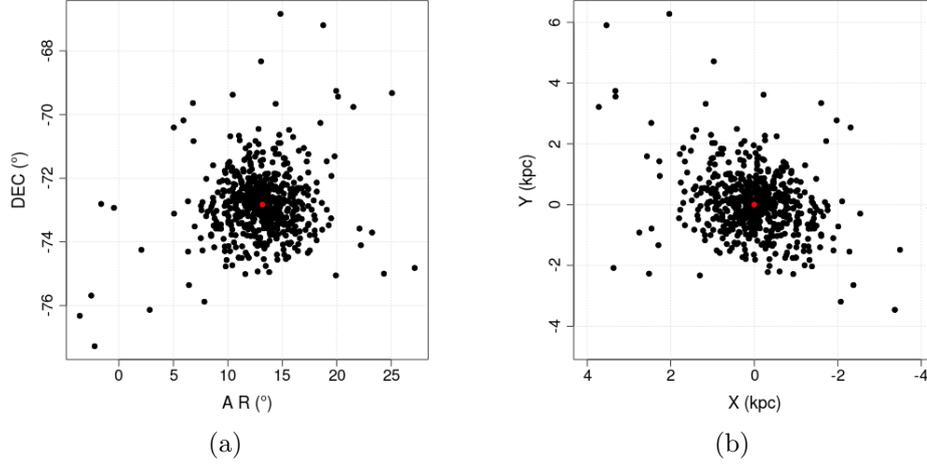


Figura 3.4: Posiciones en el plano del cielo de los objetos de nuestro catálogo sintético. El punto rojo indica la posición del centro de la NmM.

visual. Esta posición ubica al objeto en un espacio 3-D cuya proyección en el cielo reproduce la obtenida anteriormente. Para cada punto (x, y, z) con origen en el centro de la NmM, existe un conjunto de elipsoides con razones axiales 1:2:4 a los que se puede corresponder. Tomando $x =$ componente en la dirección del semieje mayor en el plano del cielo; $y =$ componente en la dirección del semieje menor en el plano del cielo; y $z =$ componente en la dirección en la línea de la visual, se tienen las siguientes relaciones:

$$a^2 = \left(x^2 + \frac{y^2}{(1/2)^2} \right) \quad , \quad (3.12)$$

$$m^2 = \left(x^2 + \frac{y^2}{(1/2)^2} + \frac{z^2}{2^2} \right) \quad , \quad (3.13)$$

por lo tanto,

$$m^2 = \left(a^2 + \frac{z^2}{2^2} \right) \quad , \quad (3.14)$$

donde m es un número perteneciente al intervalo $[a, 8]$ debido al límites de la muestra del catálogo B08, y

$$z = \pm 2|m^2 - a^2|^{1/2} \quad . \quad (3.15)$$

De esta manera $|z| \in [0, 2(8^2 - a^2)^{1/2}]$.

Los valores de z se generan en el rango predicho por las ecuaciones anteriores y siguiendo la distribución espacial obtenida en P12. Si bien esta

distribución tiene como variable el semieje mayor de la elipse que contiene al objeto en cuestión, suponemos que a lo largo de la línea de la visual, los objetos se distribuyen de igual manera y equitativamente por delante y por detrás de la posición del centro de la NmM.

En la Figura 3.5 se puede ver la distribución de la muestra de 600 cúmulos en función de $|z|$ (distancia al centro galáctico a lo largo de la línea de la visual).

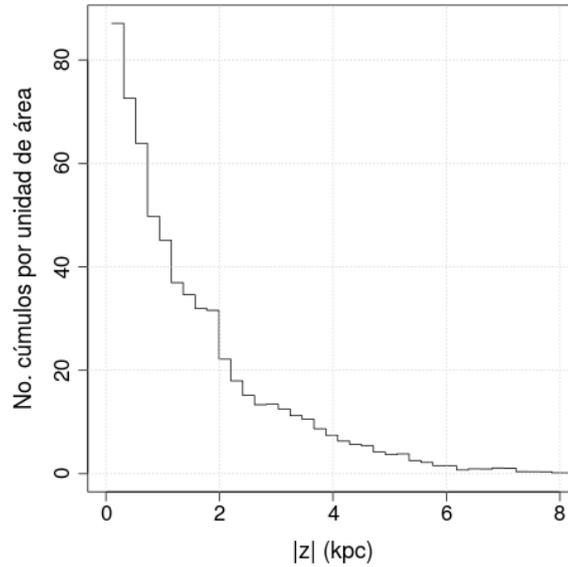


Figura 3.5: *Distribución de objetos en función de la distancia al centro de la NmM a lo largo de la línea de la visual.*

Para emplear las posiciones asignadas a los cúmulos de la muestra sintética como condiciones iniciales de nuestro programa de simulación necesitaremos que estas sean dadas en coordenadas galactocéntricas $J2000$ con origen en el centro de la VL. Es por ello que hicimos un cambio de coordenadas $(A R, DEC, z) \rightarrow (X_g, Y_g, Z_g)$ donde estas últimas son las componentes del vector posición de cada cúmulo centrado en el centro de la VL y donde el eje X_g coincide con el radio vector Sol-centro galáctico. La Figura 3.6 muestra la disposición del conjunto de cúmulos artificiales en coordenadas galactocéntricas con origen en el centro de la VL.

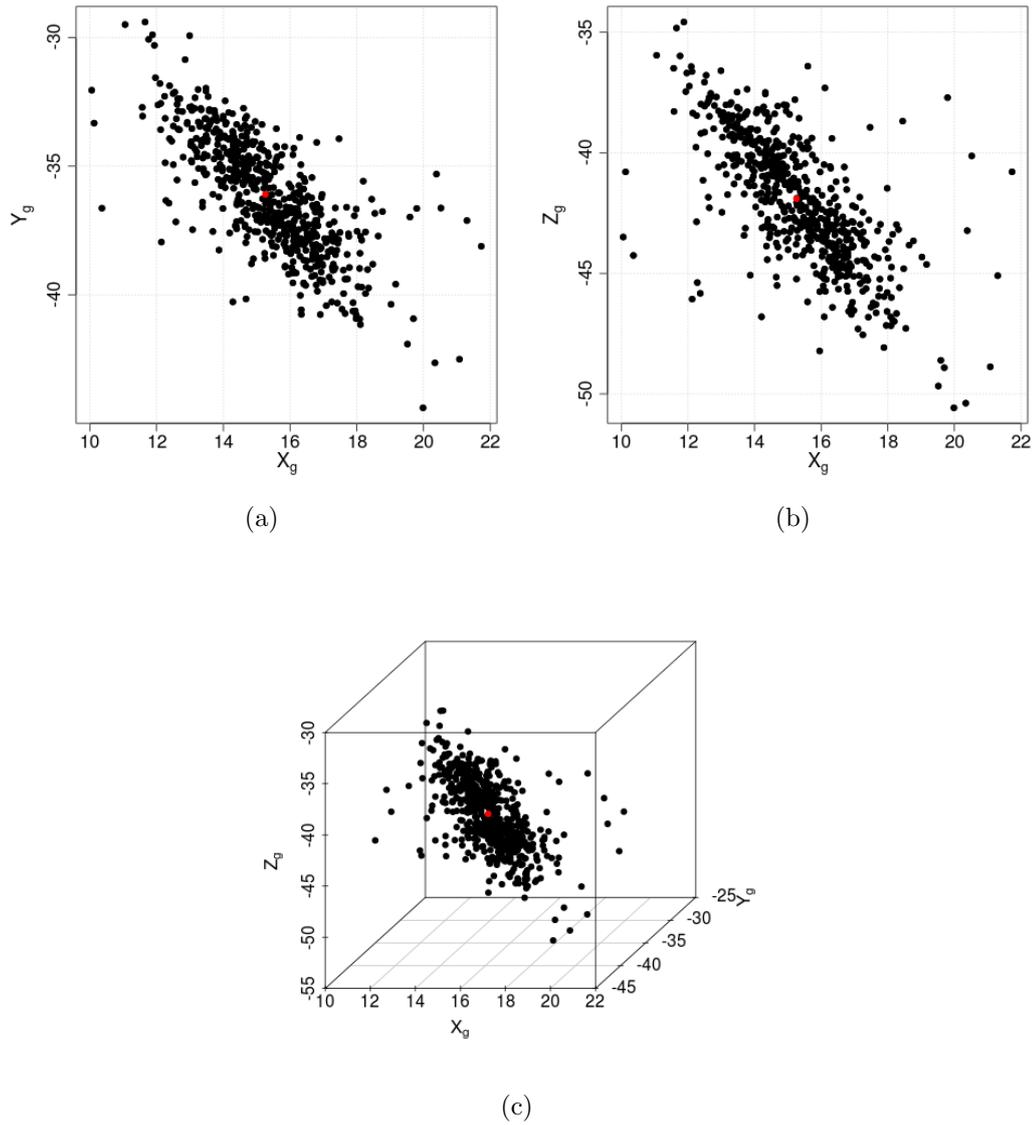


Figura 3.6: Posiciones cartesianas (x,y,z) de los objetos de nuestro catálogo sintético en el sistema de coordenadas galactocéntricas de la VL, en unidades de kpc. El punto rojo indica la posición del centro de la NmM.

3.2.2. Asignación de edades

Para asignar las edades a los 619 cúmulos de la muestra, subdividimos a ésta en dos grupos: el conjunto A de cúmulos con edades $\geq 10^9$ años y el conjunto B con edades $< 10^9$ años, como hicimos al momento de asignar posiciones en el plano del cielo (ver §3.2.1). Descripto de forma breve, esto se realizó suponiendo que la muestra debía contener 64 cúmulos del grupo A, los cuales siguen la distribución espacial obtenida a partir de un listado de 60 cúmulos reales con edades $\geq 1 \times 10^9$ años, estudiados por distintos autores. El 97 % de los cúmulos de la muestra, que incluye todos los cúmulos del grupo B y el 70 % del conjunto A, se distribuyeron espacialmente de acuerdo con la distribución espacial de probabilidades obtenida del catálogo de B08. A los cúmulos de A restantes se les asignaron posiciones con el fin de que el conjunto completo de cúmulos del grupo A siguiera su distribución espacial correspondiente. A fin de corroborar que este método de asignación de posiciones no hará diferenciar significativamente nuestra muestra del catálogo de B08, se realizó un test de Kolmogorov-Smirnov cuyo resultado no arroja evidencia con la cual rechazar la hipótesis de que ambas muestras siguen a la misma distribución.

A continuación describimos el método de asignación de edades para los distintos subconjuntos de nuestra muestra.

- **Cúmulos con edades $\geq 10^9$ años:** Se comienza por construir la función de distribución de probabilidades de las distintas edades para diferentes posiciones en la galaxia a partir de los valores de semieje mayor y edades del listado de 60 cúmulos reales. La Figura 3.7 muestra la relación edad-semieje mayor de esta muestra real.

Se subdividió la lista de 60 cúmulos en función del valor de a (ver §3.2.1) en intervalos de $\Delta a = 0, 1^\circ$, desde $a = 0^\circ$ hasta $a = 8^\circ$. Se confeccionaron histogramas de las edades con los objetos de cada subconjunto y, a partir de ellos la distribución de probabilidades de las distintas edades (en unidades de 10^9 años).

Es importante destacar que las distribuciones de edades resultantes solo tienen dependencia con la distancia en un sistema de referencia elíptico en el plano del cielo centrado en la NmM. Esto se debe a dos aspectos. En primer lugar, no existe una gran cantidad de cúmulos pertenecientes a esta galaxia cuya distancia en la línea de la visual y su edad hayan sido estimadas. Por otro lado, el objetivo de nuestro trabajo consiste en ver la dependencia temporal de las propiedades astrofísicas obtenidas observacionalmente en el plano del cielo.

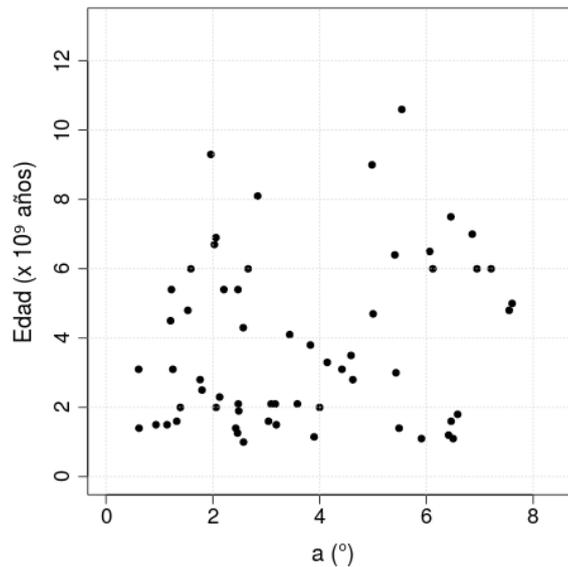


Figura 3.7: *Relación edad-semieje mayor obtenida observacionalmente para los 60 cúmulos listados.*

En la Figura 3.8 se observan las distribuciones de probabilidad de edades para distintos intervalos de valores del semieje mayor a obtenidos para la muestra de 60 cúmulos conocidos (en color negro) y las resultantes para nuestra muestra de trabajo de 600 cúmulos (en color rojo). En los diferentes intervalos se evidencia que en general ambas distribuciones son similares, lo cual confirma que la distribución sintética de edades reproduce la conocida observacionalmente.

- **Cúmulos con edades $< 10^9$ años:** Empleamos los resultados del trabajo de Glatt et al. (2010) de donde obtenemos el histograma de cúmulos de la NmM en el rango de edades $< 10^9$ años más actualizado hasta la fecha. Suponemos que los subconjuntos de cúmulos del grupo B de nuestra muestra, pertenecientes a los distintos intervalos de valores de semieje mayor, siguen esta distribución de edades. De esta manera, estamos suponiendo que en distintos anillos elípticos concéntricos de la proyección de la NmM sobre el plano del cielo, la proporción de cúmulos con una determinada edad respecto del total es la misma. Esta es la hipótesis más simple que concuerda con la distribución del conjunto B, derivada del trabajo de Glatt et al. (2010), y que hemos supuesto debido a la falta de información sobre la relación edad-semieje mayor.

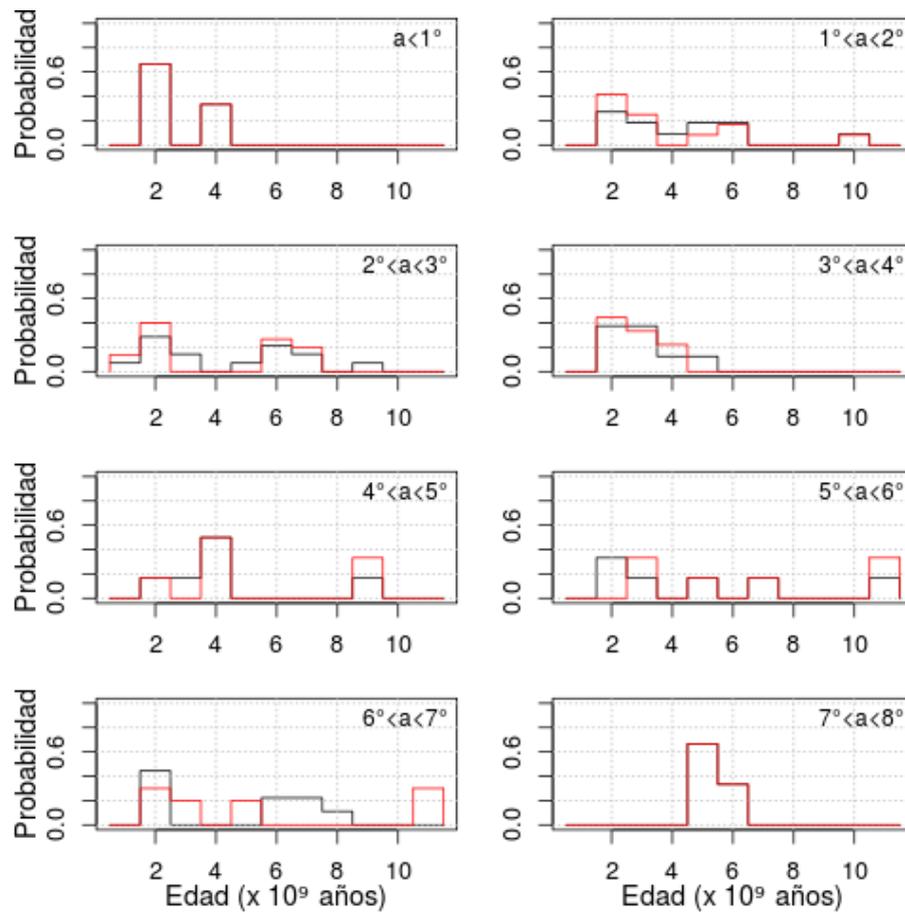
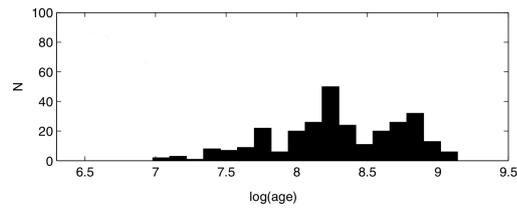
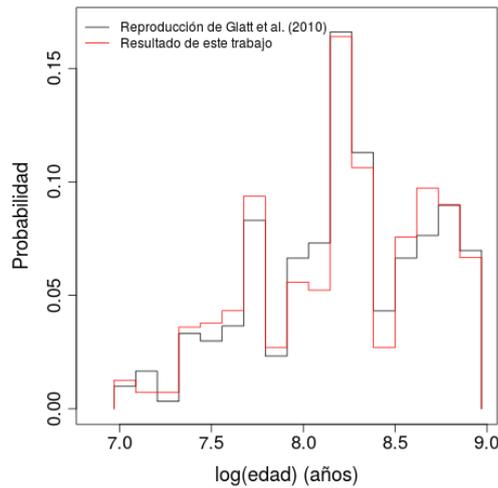


Figura 3.8: Distribuciones de probabilidad de edades de los cúmulos del conjunto *A* clasificadas según los valores de semieje mayor, de la muestra de 60 datos observacionales (curva negra) y la resultante para nuestro catálogo sintético (curva roja).

En la Figura 3.9(a) se muestra el histograma resultante del trabajo de Glatt et al. (2010), mientras que en la Figura 3.9(b) se ha superpuesto a la distribución de probabilidades derivada de este (en negro), la distribución de nuestra muestra (en rojo).



(a) Glatt et al. (2010)



(b) Este trabajo

Figura 3.9: Distribuciones de probabilidad de edades para los cúmulos del conjunto B .

3.2.3. Asignación de metalicidades

Para asignar las metalicidades a los 619 cúmulos de nuestra muestra se tuvo en cuenta el gráfico resultante del trabajo de Piatti y Geisler (2013, Figura 6). En ese gráfico pueden verse las relaciones edad-metalicidad (REM) representativas de las estrellas de campo de la NMM (cuadrados vacíos) y la NmM (triángulos vacíos). A su vez se superponen las respectivas REM de los cúmulos de la NMM (cuadrados rellenos) y la NmM (triángulos rellenos). Las REMs de la NmM muestran que hasta 10^{10} años atrás hay una gran similitud

CAPÍTULO 3. EVOLUCIÓN DINÁMICA

Rango de edades ($\times 10^9$ años)	Valor medio de [Fe/H]	Desviación estándar de [Fe/H]
[0-1)	-0,70	0,20
[1-2)	-0,70	0,14
[2-3)	-0,68	0,20
[3-4)	-1,00	0,20
[4-5)	-1,10	0,25
[5-6)	-1,20	0,25
[6-7)	-1,25	0,25
[7-8)	-1,20	0,20
[8-9)	-1,20	0,20
[9-10)	-1,20	0,25
[10-11)	-1,20	0,25
[11- ∞)	-1,40	0,40

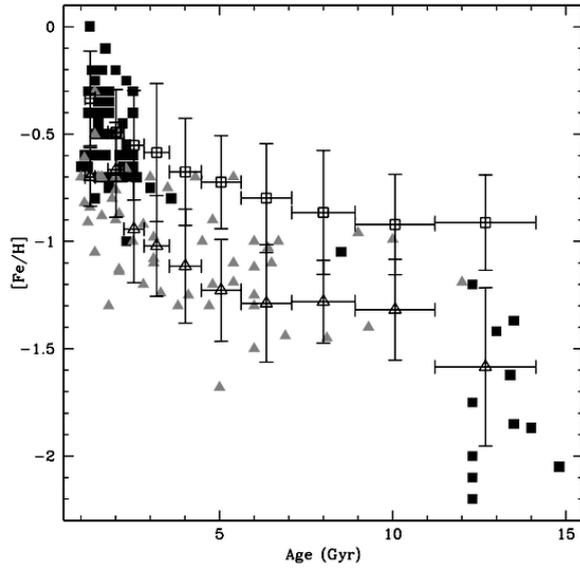
Tabla 3.2: *Valores medios y de desviación estándar de la distribución gaussiana de metalicidades en los distintos intervalos de edades (Piatti y Geisler, 2013).*

entre los valores medios obtenidos para los cúmulos y el valor representativo para las estrellas de campo. Por esta razón empleamos este último para asignar valores de metalicidad a los cúmulos de la muestra sintética, en función de las edades obtenidas previamente.

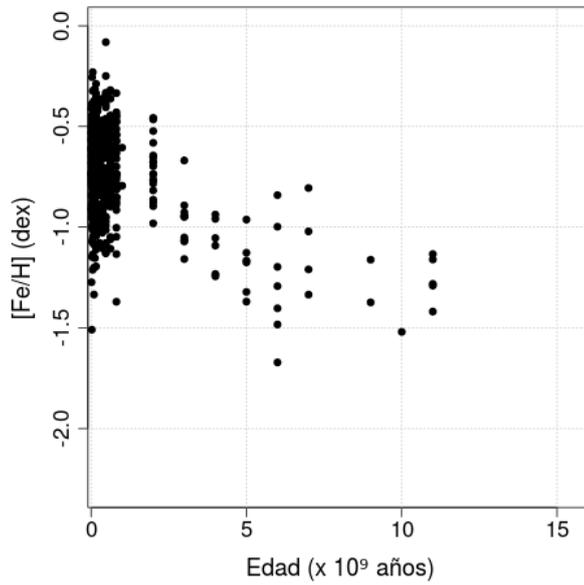
Es importante hacer notar que los resultados del trabajo de Piatti y Geisler (2013) son para el rango de edades $\geq 10^9$ años, por lo que para poder asignarles valores de metalicidad a nuestros cúmulos con edades en el rango $(0-1) \times 10^9$ a partir de sus edades, extrapolamos los valores medios a este rango de edades resultando en un valor medio igual a $-0,7$.

Debido a que las edades sintéticas tienen valores discretos en intervalos de 10^9 años, utilizamos el método de Box-Muller (ver Box y Muller, 1958) para distribuir los valores de metalicidad alrededor del valor medio de la REM, con una desviación estándar para esta distribución gaussiana que toma distintos valores según el intervalo de edades que se esté considerando (ver Tabla 3.2).

En la Figura 3.10 se muestran los resultados de Piatti y Geisler (2013) y la REM resultante para nuestra muestra de 619 cúmulos, luego de aplicar el procedimiento descrito. Se observa que ambas REM, aunque para diferente número de estrellas, resultan similares.



(a) Piatti y Geisler (2012).



(b) Este trabajo.

Figura 3.10: Resultados observacionales (a) y el obtenido para nuestra muestra de 600 cúmulos artificiales (b).

3.3. Dinámica de los cúmulos estelares

La dinámica, estructura y características en general de la NmM han sido estudiadas en reiteradas ocasiones mediante simulaciones computacionales (ver por ejemplo Besla et al., 2012). Hasta la fecha, el potencial de la galaxia sólo ha sido simulado por el potencial del halo de materia oscura de la misma. En nuestro trabajo introducimos otra componente que genera un potencial gravitatorio: el disco estelar galáctico (ver sección §3.1). Es por ello que hemos supuesto que la dinámica de los cúmulos ubicados en las regiones centrales o disco interno, es diferente a la de aquellos cúmulos observados en el halo de la NmM.

3.3.1. Velocidades de los cúmulos estelares inmersos en el disco estelar y de gas

Para el subconjunto de cúmulos en esta región de la galaxia se supuso que su dinámica acompaña la de las estrellas de campo. De esta forma, conociendo la posición del disco estelar cuyos parámetros de su potencial fueron dados en la Tabla 3.1, se procedió a seleccionar los objetos dentro de un cilindro centrado en la NmM, con parámetros:

- radio= $3 \times r_d = 3,3 \text{ kpc}$,
- altura= $3,5 \times (2 \times z_d) = 1,05 \text{ kpc}$,

donde r_d es el radio de escala del potencial del disco y la altura se mide en la dirección perpendicular a este (ver Figura 3.11(a)).

Al conjunto resultante de 292 objetos ubicados dentro de un disco de escala de altura z_d se le asignaron velocidades con una componente en el plano del disco y otra perpendicular a la componente de su posición en este. El módulo de la velocidad depende linealmente de la distancia al centro de la NmM del objeto en el plano del disco. La curva de rotación para estos objetos se muestra en la Figura 3.11(b).

3.3.2. Velocidades de los cúmulos estelares fuera del disco estelar y de gas

En el caso de los 308 cúmulos que no pertenecen al volumen especificado en la Sección §3.3.1 (ver Figura 3.12(a)), se asignaron velocidades cuya di-

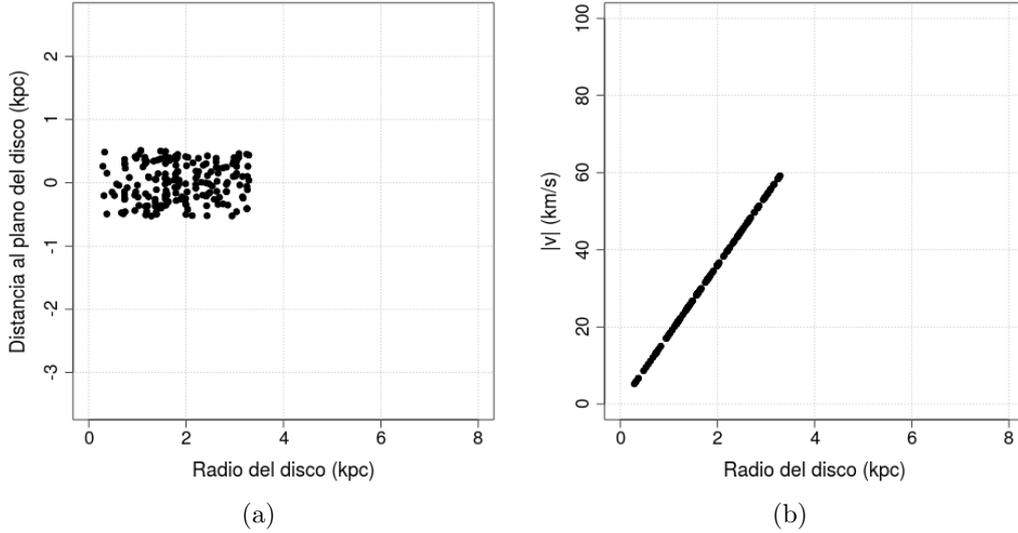


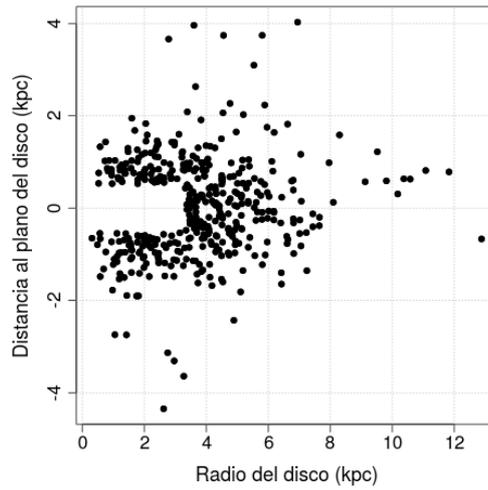
Figura 3.11: *Distribución de cúmulos que pertenecen al subconjunto inmerso en el disco estelar y de gas, en el plano (R,z) (a) y módulo de velocidades en función de la posición para la componente disco (b).*

rección y módulo se generaron al azar. Aun así se impusieron restricciones al módulo de la velocidad:

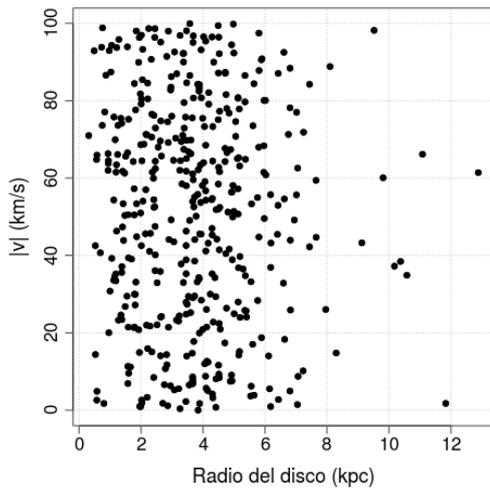
1. Ser menor que la velocidad de escape del potencial definido para la galaxia, en la posición en que se encuentra el cúmulo.
2. Ser menor que 100 km/s.

La primera restricción se debe al hecho de que se buscó trabajar con objetos que pertenecen a la NmM, y por consiguiente esperamos que a tiempo presente estén ligados a ésta, más allá de si la distribución en general se encuentra en equilibrio. En cuanto a la segunda restricción, se impuso de manera que los datos obtenidos no contrasten en gran medida con los valores de velocidades obtenidos observacionalmente para las estrellas de campo de la galaxia (ver, por ejemplo Dobbie et al., 2014). Al introducir estas cotas en el módulo de velocidad espacial nos aseguramos que los objetos pertenecen a la NmM y sus componentes de velocidad (v_x, v_y, v_z) no se apartan de los que se observan en las estrellas del campo.

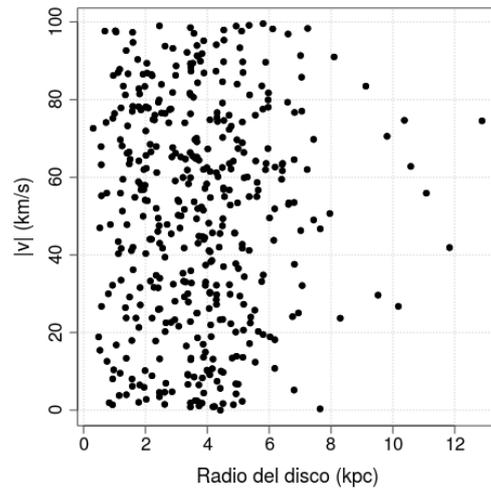
En este trabajo se diseñaron dos escenarios diferentes del potencial galáctico para la NmM:



(a)



(b)



(c)

Figura 3.12: *Distribución de cúmulos que pertenecen al subconjunto fuera del disco estelar y de gas, en el plano (R,z) (a) y módulo de velocidades en función de la posición (en el sistema de referencia del disco), para el potencial de materia oscura (b) y para el potencial conjunto de materia oscura y disco estelar (c).*

- Potencial debido al halo de materia oscura;
- Potencial debido al halo de materia oscura más el disco estelar.

Las velocidades asignadas a los objetos de la muestra son distintas en ambos casos, como puede observarse en las Figuras 3.12(b) y (c). En estos gráficos puede apreciarse que, si bien las velocidades particulares son diferentes dependiendo del escenario escogido, en general representan distribuciones similares.

3.4. Método de resolución de las ecuaciones de movimiento

En el Capítulo anterior hemos descripto cómo construir un catálogo sintético de cúmulos que en cantidad y propiedades astrofísicas (posición, edad, metalicidad, velocidad espacial, etc.) reproduce los datos observacionales más confiables disponibles hasta el presente. En adelante, trazaremos las trayectorias orbitales de estos cúmulos hacia atrás en el tiempo, por un intervalo igual a sus respectivas edades. Con este objetivo se modifica el código de N -cuerpos empleado en el trabajo de Carpintero et al. (2013) de manera que éste sea un programa computacional que siga el movimiento de los cúmulos hacia atrás en el tiempo, bajo la mutua atracción gravitacional y las fuerzas debidas al potencial externo de la propia NmM como así también de la NMM y la VL.

Las simulaciones de N -cuerpos emplean un principio simple: a partir de las posiciones actuales de las partículas se derivan las fuerzas gravitacionales sobre cada una de ellas. Luego se emplean estas fuerzas para evolucionar la posición y momento de cada partícula por un intervalo pequeño de tiempo y nuevamente se procede a calcular las fuerzas. El mayor desafío es escribir códigos que calculen eficientemente las fuerzas gravitacionales para un gran número de cuerpos. A este tipo de códigos se los denomina Solucionadores de Poisson.

Si consideramos la fuerza total sobre una partícula α del sistema de $N = 600$ cúmulos como la suma de 1 a N de la contribución de todas las demás partículas, se sigue:

$$\mathbf{F}_\alpha = \sum_{\beta \neq \alpha} Gm_\alpha m_\beta \frac{\mathbf{r}_\beta - \mathbf{r}_\alpha}{|\mathbf{r}_\beta - \mathbf{r}_\alpha|^3}. \quad (3.16)$$

Cada evaluación de la fuerza total sobre la partícula, involucra el cálculo de $N - 1$ distancias $|r_\beta - r_\alpha|$, y por consiguiente al calcular las fuerzas a las que están sometidas todas las partículas del sistema se necesita un mínimo de $\frac{1}{2}N(N - 1)$ cálculos de distancias. Esto implica que el trabajo computacional por cada paso en el tiempo se incrementa proporcionalmente a N^2 . Existen métodos más apropiados que permiten evaluar de manera más eficiente las fuerzas, y que crecen como $N \log(N)$. Estos son ciertamente mucho más útiles para valores grandes de N , donde la diferencia entre N^2 y $N \log(N)$ es considerable. Por el contrario, para valores pequeños de N , es válida una simulación de N -cuerpos que calcula las fuerzas por suma directa.

Algo que debe tenerse en cuenta es que si dos partículas, dígase α y β , se aproximan lo suficiente entre sí, la ecuación (3.16) que describe la fuerza $\mathbf{F}_{\alpha\beta}$ entre ellas se vuelve muy grande. Para evitar que numéricamente el algoritmo se haga inestable por este motivo, se procede a suavizar las fuerzas, permitiendo seguir la integración en el tiempo con pasos de integración no prohibitivamente pequeños. Este método de suavizado implica reemplazar la ecuación (3.16) por:

$$\mathbf{F}_\alpha = \sum_{\beta \neq \alpha} Gm_\alpha m_\beta S_F(|\mathbf{r}_\beta - \mathbf{r}_\alpha|) \frac{\mathbf{r}_\beta - \mathbf{r}_\alpha}{|\mathbf{r}_\beta - \mathbf{r}_\alpha|} \quad , \quad (3.17)$$

donde la sumatoria es de $\beta = 1$ a $\beta = N$. La función $S_F(r)$ con $r = |\mathbf{r}_\beta - \mathbf{r}_\alpha|$ se denomina *núcleo del suavizado de fuerzas* y es alguna función que tiende a r^{-2} para valores del argumento más grandes que la escala de ablandamiento (ϵ), y tiende suavemente a cero para valores chicos de su argumento. $S_F(r)$ se deriva de otra función $S(r)$ denominada *núcleo de suavizado*, que aparece en la ecuación para el potencial en la posición de la partícula α :

$$\Phi(\mathbf{r}_\alpha) = \sum_{\beta \neq \alpha} Gm_\beta S(|\mathbf{r}_\beta - \mathbf{r}_\alpha|), \quad (3.18)$$

donde nuevamente la sumatoria es de $\beta = 1$ a $\beta = N$. Una forma comúnmente usada de S es

$$S(r) = -\frac{1}{\sqrt{r^2 + \epsilon^2}}. \quad (3.19)$$

Uno de los algoritmos que permite evaluar la suma (3.18) con gran precisión en un número de operaciones aritméticas que crezca como $N \log(N)$ más que como N^2 es el denominado *código árbol*.

En el algoritmo árbol, introducido por Barnes y Hut (1986), primero se agrupan sistemáticamente las partículas del sistema de acuerdo a sus distancias a la posición de la partícula para la cual se está calculando el potencial. Para ello, se coloca un cubo imaginario englobando el sistema completo y se

divide en ocho subcubos iguales, denominados nodos. Si cualquiera de estos nodos contiene más de una partícula se vuelve a dividir en ocho cubos iguales, y así sucesivamente hasta que todos los cubos nodos tengan como máximo una partícula. Esta jerarquía de cubos forma lo que se denomina *árbol octal*, y el cubo original es llamado *raíz* del árbol. Cada cubo luego de la raíz tiene un cubo antecesor y siete cubos hermanos. Cualquier cubo que contiene más de una partícula, tiene ocho cubos sucesores. Claramente se observa una analogía con un árbol real, en el que el tronco se divide en ramas principales, que a su vez se subdividen en otras ramas y así sucesivamente hasta que finalmente se llega a las hojas. Las partículas en un *árbol octal* vienen a ser las hojas.

La suma que se realiza a lo largo de los cubos para calcular el potencial incluye algunos nodos “ramas”, que contienen más de una partícula y a los que se le asignan una única partícula con masa igual a la masa total dentro del cubo y que se posiciona en el centro de masa de éste. Los demás nodos del nivel se “abren” para incluir sus nodos hijos, que pueden ser a su vez nodos ramas o contener una única partícula. Es evidente que si se emplean mayor cantidad de ramas sin “abrir”, se está disminuyendo el tiempo de cómputo al disminuir la cantidad de sumandos que se están calculando. A su vez, teniendo en cuenta que los sumandos pertenecientes a partículas más cercanas a la posición en la cual se desea calcular el potencial poseen un peso mayor en la suma, el método empleado para decidir a cuántos nodos “hojas” se le calcula su término correspondiente en la ecuación (3.18) y por ende, hasta qué distancia alrededor del punto de medición se busca hacer una suma directa, implementa un parámetro denominado ángulo de apertura (θ). Todos los nodos “ramas” empleados tienen $\theta \leq \theta_0$, para un dado valor θ_0 fijado previamente, mientras que los nodos “hojas” tienen $\theta > \theta_0$. Si la simulación representa un sistema con dimensión lineal L , las hojas tienen una dimensión lineal característica $l=L/N^{1/3}$ y se encuentra a una distancia menor a $\sim D = l/\theta_0$; por lo que hay típicamente $\sim (D/l)^3 = \theta_0^{-3}$ nodos “hojas” contemplados en el cálculo de la fuerza.

Finalmente, los distintos términos de la suma (3.18) debidos a pseudo partículas en los centros de masas de los nodos “ramas” se reemplazan por su expansión multipolar hasta un dado orden fijado previamente.

Hasta aquí se ha descrito de manera breve en qué consiste el código árbol, empleado en el trabajo de Carpintero et al. (2013) y el cual es empleado en el presente trabajo. A partir de este se calcula el potencial en la posición de un cúmulo, debido a la presencia de los restantes cúmulos. Lo que resta por señalar es que los potenciales analíticos asignados a los centros de masa de cada galaxia y la fricción dinámica (ver sección §3.1) se calculan como un potencial externo añadido al potencial obtenido por el conjunto de partículas.

Por último, es importante destacar que los centros de masas de las galaxias se toman como partículas con masa cero en la integración, para evitar acelerar al resto con potenciales keplerianos y se les da a cada una, luego del cálculo del árbol en cada paso de integración, el potencial no-masa-puntual que les corresponde; el cual acelera al resto de las partículas en el programa de integración, incluyendo a los demás centros de masa. De esta forma, un paso de integración de este código puede resumirse de la siguiente manera:

1. Generación del árbol.
2. Cálculo del potencial y aceleración sobre cada partícula:
 - En la posición del centro de masa de cada galaxia se calcula la aceleración producto de los potenciales suavizados que modelan las demás galaxias.
 - Para cada cúmulo ligado a una galaxia se calcula la aceleración producto de los potenciales keplerianos de los demás cúmulos y se le suma la aceleración en la posición en que se encuentra, producto de los potenciales suavizados de todas las galaxias.
3. Desplazamiento en el espacio de fase, de todos los elementos del sistema.
4. Avance (hacia atrás) del tiempo.
5. Se actualiza el árbol.
6. Se da paso al siguiente intervalo de integración.

Bibliografía

- Barnes, J. y P. Hut
1986. A hierarchical $O(N \log N)$ force-calculation algorithm. *Nature*, 324:446–449.
- Besla, G., N. Kallivayalil, L. Hernquist, R. P. van der Marel, T. J. Cox, y D. Keres
2012. The role of dwarf galaxy interactions in shaping the Magellanic System and implications for Magellanic Irregulars. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 421:2109–2138.
- Bica, E., C. Bonatto, C. M. Dutra, y J. F. C. Santos
2008. A general catalogue of extended objects in the Magellanic System. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 389:678–690 (B08).
- Box, G. E. y M. E. Muller
1958. A note on the generation of random normal deviates. *The annals of mathematical statistics*, (29):610–611.
- Carpintero, D. D., F. A. Gómez, y A. E. Piatti
2013. On a possible origin for the lack of old star clusters in the Small Magellanic Cloud. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 435:L63–L67.
- Chandrasekhar, S.
1943. Stochastic problems in physics and astronomy. *Rev. Mod. Phys.*, 15:1–89.
- Crowl, H. H., A. Sarajedini, A. E. Piatti, D. Geisler, E. Bica, J. J. Clariá, y J. F. C. Santos, Jr.
2001. The line-of-sight depth of populous clusters in the Small Magellanic Cloud. *Astron. J.*, 122:220–231.
- Dobbie, P. D., A. A. Cole, A. Subramaniam, y S. Keller
2014. Red giants in the Small Magellanic Cloud. I. Disk and tidal stream kinematics. *ArXiv e-prints*.

BIBLIOGRAFÍA

- Glatt, K., E. K. Grebel, y A. Koch
2010. Ages and luminosities of young SMC/LMC star clusters and the recent star formation history of the Clouds. *Ast & Ast*, 517:A50.
- Hernquist, L.
1990. An analytical model for spherical galaxies and bulges. *Astrophys. J.*, 356:359–364.
- Kuzmin, G. G.
1956. A model for a steady-state galaxy admitting of a triaxial velocity distribution. *Astron. Zh.*, 33:27–45.
- Miyamoto, M. y R. Nagai
1975. Three-dimensional models for the distribution of mass in galaxies. *Pub. Astron. Soc. Jap.*, 27:533–543.
- Piatti, A. E.
2011. Towards a comprehensive picture of the star cluster age-metallicity relationship in the Small Magellanic Cloud. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 418:L69–L73 (P11).
- Piatti, A. E. y E. Bica
2012. Washington photometry of candidate star clusters in the Small Magellanic Cloud. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 425:3085–3093 (P12).
- Piatti, A. E. y D. Geisler
2013. The age-metallicity relationship of the Large Magellanic Cloud field star population from Wide-field Washington Photometry. *Astron. J.*, 145:17.
- Plummer, H. C.
1911. On the problem of distribution in globular star clusters. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 71:460–470.
- Toomre, A.
1963. On the distribution of matter within highly flattened galaxies. *Astrophys. J.*, 138:385.

Capítulo 4

Simulaciones y resultados

Para estudiar la trayectoria de nuestra muestra sintética de 619 cúmulos cuyas características a tiempo presente son conocidas, se realizaron un total de 6 simulaciones, que involucran distintos modelos del sistema y parámetros iniciales. Estos modelos y los parámetros utilizados en cada simulación se describen en la Sección §4.1. En todos los casos simulamos un tiempo total de 9×10^9 años, del orden de la edad de los cúmulos catalogados más viejos de esta galaxia. Es de destacar que toda la muestra sintética de cúmulos se hizo evolucionar este intervalo de tiempo y luego se tuvo en cuenta para cada cúmulo el intervalo de evolución acorde a la edad que le fue asignada. Esta es una simplificación computacional que no afecta en medida significativa a los cálculos de aceleración de las demás partículas debido al valor tan pequeño de masa de cada cúmulo respecto al asignado a las galaxias simuladas.

En las siguientes Secciones presentaremos los resultados de cada una de estas simulaciones.

4.1. Modelos empleados

El trabajo consta de seis simulaciones distintas cada una con una complejidad mayor que la anterior, y por ende, un modelo más realista del escenario que buscamos reproducir. Se describen a continuación estas simulaciones:

- **Modelo 1:** El sistema lo componen solo elementos de la NmM, lo cual implica que la simulación no tiene en cuenta las otras dos galaxias y supone a la NmM como un sistema aislado. El potencial no puntual de la galaxia es el debido a su halo de materia oscura y las velocidades iniciales de los cúmulos son las obtenidas en la Sección §3.3 a partir de

este.

- **Modelo 2:** El sistema lo componen solo elementos de la NmM, lo que implica que la simulación no tiene en cuenta las otras dos galaxias y supone a la NmM como un sistema aislado. El potencial no puntual de la galaxia es el debido a su halo de materia oscura y al disco estelar; y las velocidades iniciales de los cúmulos son las obtenidas en la Sección §3.3 a partir de este.
- **Modelo 3:** El sistema lo componen las tres galaxias. El potencial no puntual de la NmM es el debido a su halo de materia oscura y las velocidades iniciales de los cúmulos son las obtenidas en la Sección §3.3 a partir de este.
- **Modelo 4:** El sistema lo componen las tres galaxias. El potencial no puntual de la NmM es el debido a su halo de materia oscura y al disco estelar; y las velocidades iniciales de los cúmulos son las obtenidas en la Sección §3.3 a partir de este.
- La simulación 5 (6) emplea el Modelo 3 (4) pero modifica los valores iniciales de velocidad de los cúmulos. Se le agrega al módulo de estos un valor aleatorio perteneciente al intervalo $[0, 3)$ km/s. Estas dos integraciones tienen el fin de poder estudiar la robustez del programa, más adelante.

En la Tabla 4.1 pueden verse las condiciones iniciales de las tres galaxias en cada simulación. El sistema de referencia empleado es galactocéntrico respecto de la Vía Láctea (J2000). Los parámetros propios del simulador se listan en la Tabla 4.2.

Galaxia	Parámetro	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Vía Láctea	(x, y, z) [kpc]	-	-	(0,0,0)	(0,0,0)
	(v_x, v_y, v_z) [km/s]	-	-	(0,0,0)	(0,0,0)
NMM	Φ	-	-	$\Phi_H + \Phi_D + \Phi_B$	$\Phi_H + \Phi_D + \Phi_B$
	(x, y, z) [kpc]	-	-	$(\frac{-4}{10}, \frac{-413}{10}, \frac{-271}{10})$	$(\frac{-4}{10}, \frac{-413}{10}, \frac{-271}{10})$
	(v_x, v_y, v_z) [km/s]	-	-	$(-57, -226, 221)$	$(-57, -226, 221)$
NmM	Φ	-	-	Φ_H	Φ_H
	(x, y, z) [kpc]	(0,0,0)	(0,0,0)	$(\frac{-153}{10}, \frac{-361}{10}, \frac{-419}{10})$	$(\frac{-153}{10}, \frac{-361}{10}, \frac{-419}{10})$
	(v_x, v_y, v_z) [km/s]	(0,0,0)	(0,0,0)	(19, -153, 153)	(19, -153, 153)
	Φ	-	-	$\Phi_H + \Phi_D$	$\Phi_H + \Phi_D$

Tabla 4.1: Parámetros de las galaxias simuladas, para los distintos modelos. Valores tomados de Kallivayalil et al. (2013); Besla et al. (2012).

Parámetros	
Tiempo de integración [años]	9×10^9
Paso de integración [años]	1×10^6
ϵ [kpc]	0,05
θ [rad]	0,7
cuadрупolos/hexapolos	sí/no

Tabla 4.2: Parámetros del código de integración. Valores tomados de Carpintero et al. (2013).

4.2. Resultados

Para los modelos que tienen en cuenta las tres galaxias (VL, NMM y NmM) comenzamos por detallar las trayectorias de los centros de masas y luego procedemos a observar en detalle la distribución de cúmulos.

En la Figura 4.1 se observan las distancias galactocéntricas de ambas galaxias del Sistema Magallánico a lo largo de su evolución.

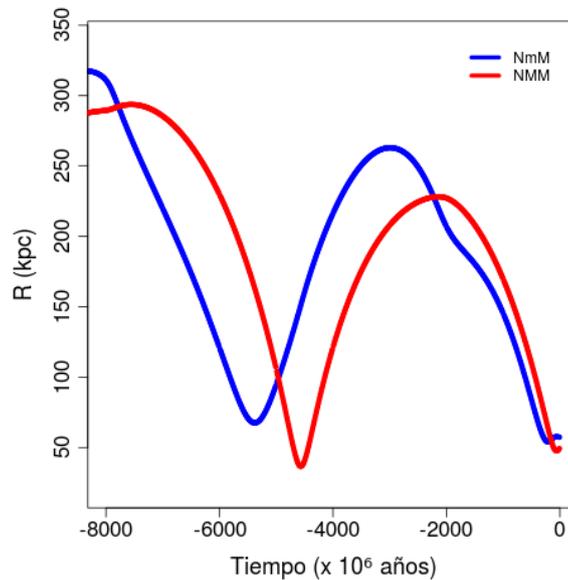


Figura 4.1: *Radio de las órbitas de las Nubes de Magallanes respecto de la VL.*

Los resultados muestran que tanto la NmM como la NMM están en su segundo acercamiento a la VL. En particular, los períodos de acercamiento a la VL dependen mucho de las condiciones actuales y de los modelos usados para las galaxias. Con las incertezas sobre las masas totales de las galaxias, por ejemplo, la NMM podría estar en su primer pasaje por la VL o haber dado una vuelta completa, dependiendo del modelo utilizado. También hay fenómenos adicionales que afectan los resultados globales de las órbitas: el modelado de la fricción dinámica, la pérdida de masa de la NmM desde que nació hasta el presente, entre otros.

Aun así se debe aclarar que el modelo utilizado está simplificado, y que para un mejor estudio de esta cuestión en particular harían falta simulaciones autoconsistentes y mejores datos observacionales para las condiciones iniciales. Otro aspecto a hacer notar es el hecho que en nuestras simulaciones se integra desde la actualidad hacia el tiempo pasado, distinto a lo que realizan

otros autores (ver por ejemplo Besla et al., 2012) los cuales suponen condiciones a tiempo pasado que permiten reproducir al presente las condiciones conocidas. Esto es de relevancia debido a que puede existir un conjunto de condiciones iniciales que evolucionen hacia las condiciones a tiempo presente que conocemos pero con evoluciones dinámicas muy diferentes. Además, los experimentos de N -cuerpos son caóticos, por lo cual los resultados dependen fuertemente de las condiciones iniciales que se asignan, incluso condiciones muy cercanas evolucionan de manera muy distinta. Es por ello que solo se puede confiar en resultados globales y si el programa es robusto para estos en particular.

Al analizar las variaciones de la distancia galactocéntrica de la NmM, es posible vincular las edades correspondientes a los mínimos en la distancia entre ambas galaxias con procesos de formación estelar violenta evidenciados observacionalmente. Si se tiene presente la distribución intrínseca de edades de los cúmulos de la NmM (Piatti et al., 2011) se podría pensar en una correspondencia entre el acercamiento de la galaxia a la VL aproximadamente 5×10^9 años atrás que se observa en la Figura 4.1 con el pico de máxima formación de cúmulos que se observa para esta edad en el histograma de la distribución de edades (ver Figura 2.5(a)).

En la Figura 4.2 se observan proyecciones de las órbitas de las galaxias del Sistema y las curvas tridimensionales que describen.

En cuanto a la distancia relativa de la NmM respecto de la NMM (ver Figura 4.3), encontramos que las galaxias están apartándose de su tercer acercamiento y nuevamente podríamos vincular resultados observacionales con los mínimos en la curva que describe la distancia relativa a lo largo del tiempo. Teniendo presente la distribución intrínseca de edades de los cúmulos de la NmM (Piatti et al., 2011) se podría pensar en una correspondencia entre el acercamiento hace $2,5 \times 10^9$ años con el segundo pico de formación de cúmulos que se observa para esta edad en el histograma de la distribución de edades (ver Figura 2.5(a)). Por su parte, al analizar este último gráfico desde las edades más viejas hacia las jóvenes, uno puede observar una tasa constante de aumento en la formación de cúmulos en los primeros 4×10^9 años, que cambia abruptamente a la edad de $7,5 \times 10^9$ años, hecho que algunos autores (ver por ejemplo Tsujimoto y Bekki, 2009) atribuyen a la interacción de la NmM con la NMM. En nuestros resultados encontramos un acercamiento de ambas hace aproximadamente $7,5 \times 10^9$ años, lo cual está en buen acuerdo con las predicciones teóricas de Tsujimoto y Bekki (2009).

Es de destacar nuevamente que los modelos empleados en este trabajo son muy simples y que al momento no se conoce si las Nubes vienen interactuando

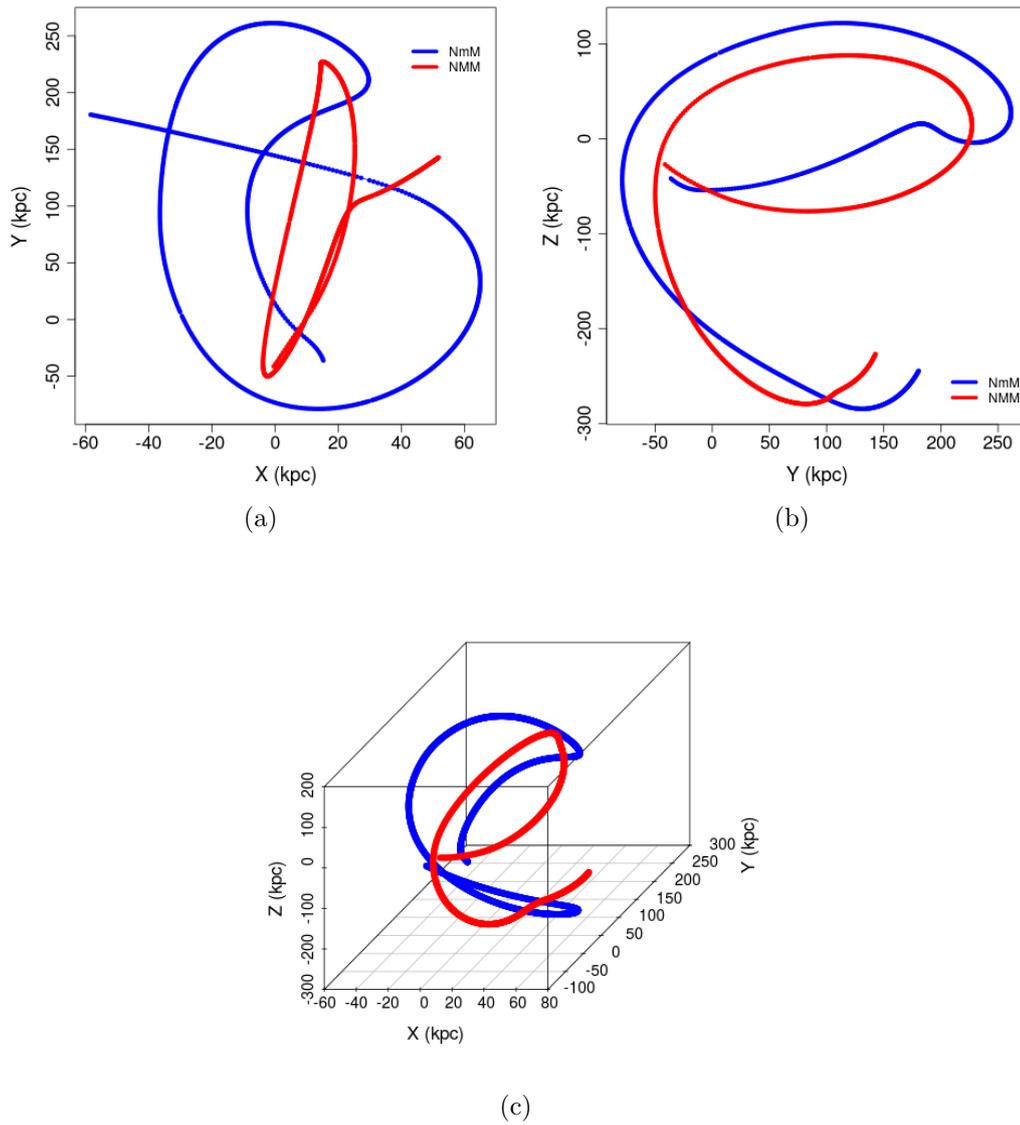


Figura 4.2: *Proyecciones y gráficos 3D de las órbitas de las Nubes de Magallanes, en coordenadas galactocéntricas con eje X en la dirección del radio vector que une al Sol con el centro de la VL, eje Y a la dirección perpendicular al eje X en el plano del disco de la VL y eje Z en la dirección perpendicular a ambas.*

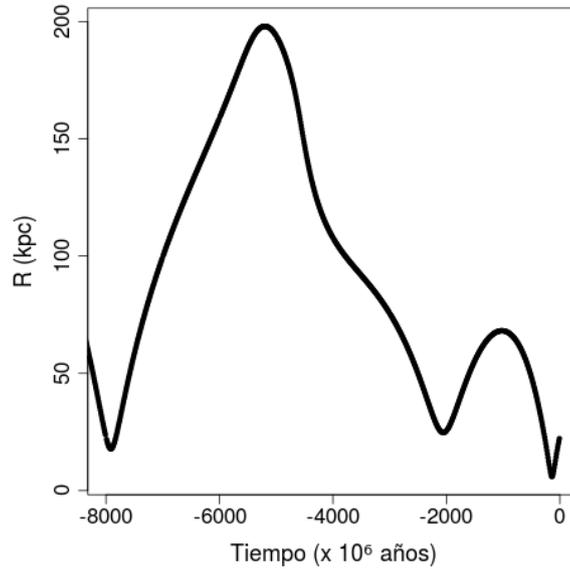


Figura 4.3: *Radio de la órbita de la NmM respecto de la NMM.*

desde el comienzo de sus historias evolutivas o si la NmM se ligó a la NMM hace relativamente poco tiempo.

Un último resultado que destacamos sobre la evolución dinámica de los centros de masas es la trayectoria en el plano (l, b) de las Nubes de Magallanes, donde l =longitud galáctica y b =latitud galáctica. En la Figura 4.4 se muestran las proyecciones en este plano de ambas órbitas en los últimos $1,5 \times 10^9$ años.

Nuestros resultados expuestos en esta figura están en buen acuerdo con los obtenidos por otros autores (ver por ejemplo Guglielmo et al., 2014; Besla et al., 2007).

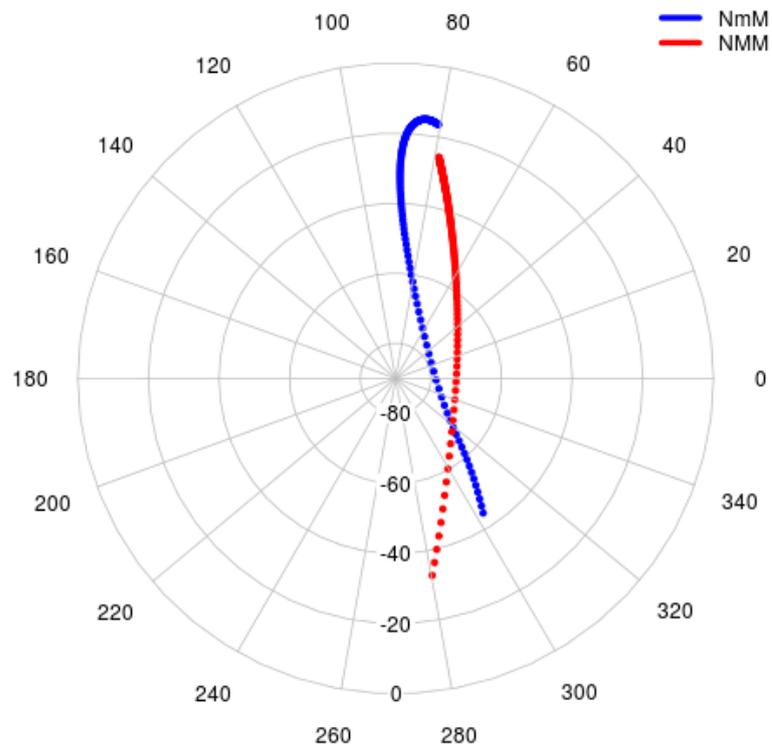


Figura 4.4: *Proyección en el plano (l, b) de las órbitas de las Nubes de Magallanes en nuestras simulaciones numéricas en los últimos $1,5 \times 10^9$ años.*

Bibliografía

- Besla, G., N. Kallivayalil, L. Hernquist, B. Robertson, T. J. Cox, R. P. van der Marel, y C. Alcock
2007. Are the Magellanic Clouds on their first passage about the Milky Way? *Astrophys. J.*, 668:949–967.
- Besla, G., N. Kallivayalil, L. Hernquist, R. P. van der Marel, T. J. Cox, y D. Keres
2012. The role of dwarf galaxy interactions in shaping the Magellanic System and implications for Magellanic Irregulars. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 421:2109–2138.
- Carpintero, D. D., F. A. Gómez, y A. E. Piatti
2013. On a possible origin for the lack of old star clusters in the Small Magellanic Cloud. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 435:L63–L67.
- Guglielmo, M., G. F. Lewis, y J. Bland-Hawthorn
2014. A genetic approach to the history of the Magellanic Clouds. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 444:1759–1774.
- Kallivayalil, N., R. P. van der Marel, G. Besla, J. Anderson, y C. Alcock
2013. Third-epoch Magellanic Cloud proper motions. I. Hubble Space Telescope/WFC3 data and orbit implications. *Astrophys. J.*, 764:161.
- Piatti, A. E., J. J. Clariá, E. Bica, D. Geisler, A. V. Ahumada, y L. Girardi
2011. Washington photometry of 14 intermediate-age to old star clusters in the Small Magellanic Cloud. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 417:1559–1575.
- Tsujimoto, T. y K. Bekki
2009. Chemical signature of a major merger in the early formation of the Small Magellanic Cloud. *Astrophys. J. Let.*, 700:L69–L72.

Capítulo 5

Paleogradientes de metalicidad en la Nube Menor de Magallanes

En las siguientes secciones discutiremos en detalle los resultados de cada una de las simulaciones y analizaremos la robustez del programa, a fin de dar mayor validez a las posibles conclusiones que se detallarán en este Capítulo.

5.1. Análisis de los resultados

Comenzamos analizando los resultados del Modelo 1. En la Figura 5.1 pueden observarse los valores de $[\text{Fe}/\text{H}]$ en función de la distancia al centro de la NmM en el plano del cielo tanto en el tiempo presente (a), como al momento de nacimiento de los cúmulos de nuestra muestra (b). Es notoria la diferencia del valor medio de abundancia metálica para aquellos cúmulos más viejos respecto de los más jóvenes, lo cual solo se debe a nuestro método de asignación de los valores de $[\text{Fe}/\text{H}]$ en función de la edad de los cúmulos y que se describe en la Sección §3.2.3.

Para estudiar los resultados de este primer modelo, primero dividimos en subconjuntos nuestra muestra, según la edad de los cúmulos. A cada uno de estos subconjuntos, se le calculó su valor medio de distancia al centro de la galaxia en el plano del cielo, tanto en la actualidad, r_p , como al momento del nacimiento de este subconjunto, r_n . La razón entre estos valores, nos da un estimado de la contracción que tuvo el grupo de cúmulos a lo largo de toda su vida en la NmM. En la Tabla 5.1 se muestran los valores resultantes. Es visible cómo las razones calculadas para los cúmulos más jóvenes, no se diferencian

CAPÍTULO 5. PALEOGRADIENTES DE METALICIDAD EN LA NUBE MENOR DE MAGALLANES

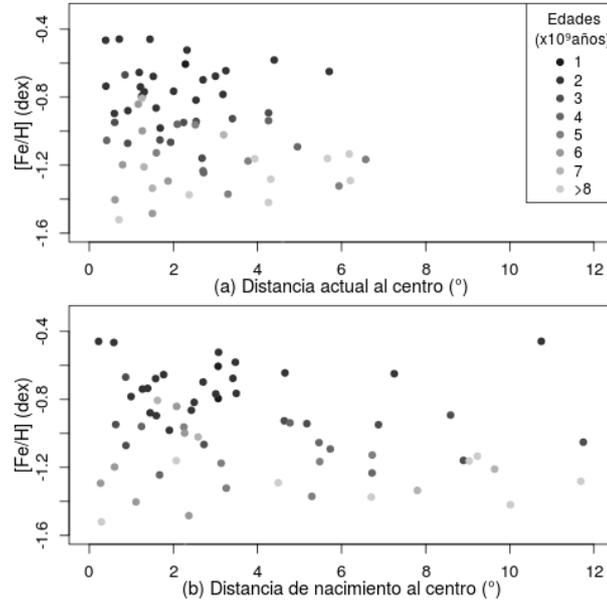


Figura 5.1: *Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos para el Modelo 1. En escala de grises, las edades de los cúmulos de la muestra.*

significativamente respecto de aquellos valores obtenidos para cúmulos que han evolucionado más tiempo en la galaxia. Esto permite concluir que en primera instancia, la distribución espacial global en el plano del cielo del conjunto de cúmulos simulados experimentó una contracción general de un tercio del valor inicial.

Con el propósito de analizar si la contracción de la distribución en distancias de cúmulos es distinta en función de la edad de estos, se realizó un estudio estadístico de los resultados dividiendo al conjunto total de objetos del catálogo en dos submuestras: conjunto A, el cual incluye aquellos cúmulos con edades $t \in [1, 5) \times 10^9$ años y el conjunto B, con edades $t \in [5, 11) \times 10^9$ años .

En el caso de la distribución espacial presente de ambos conjuntos, el test de Kolmogorov-Smirnov permite concluir con un nivel de significación igual a 0,9 que la distribución del conjunto A es distinta estadísticamente de aquella del conjunto B. Las funciones acumuladas normalizadas de distancias r_p de ambas submuestras se presentan en la Figura 5.2.

Por su parte, los resultados del mismo método empleado para la distribución espacial al momento del nacimiento de los cúmulos de ambos conjuntos no permiten rechazar la hipótesis nula, la cual afirma que ambas funciones

CAPÍTULO 5. PALEOGRADIENTES DE METALICIDAD EN LA
NUBE MENOR DE MAGALLANES

Edad ($\times 10^9$ años)	r_p ($^\circ$)	Δr_p ($^\circ$)	r_n ($^\circ$)	Δr_n ($^\circ$)	r_p/r_n	$\Delta(r_p/r_n)$
1	1,77	0,73	3,06	0,01	0,58	0,24
2	2,00	1,36	2,83	2,39	0,71	0,76
3	2,11	1,17	5,10	3,88	0,41	0,39
4	2,85	1,61	4,27	2,27	0,67	0,52
5	3,95	1,94	4,36	1,73	0,91	0,57
6	1,69	1,35	1,57	0,89	1,08	1,06
7	1,81	0,93	5,41	3,91	0,33	0,30
> 8	4,21	1,92	6,69	4,06	0,63	0,48

Tabla 5.1: *Distancia media al centro de la galaxia en el plano del cielo de cada subconjunto de nuestro catálogo, tanto en tiempo presente, r_p , como al momento de su nacimiento, r_n . Se aclara que no se listó el conjunto de edad $t = 8 \times 10^9$ años debido a que este es vacío.*

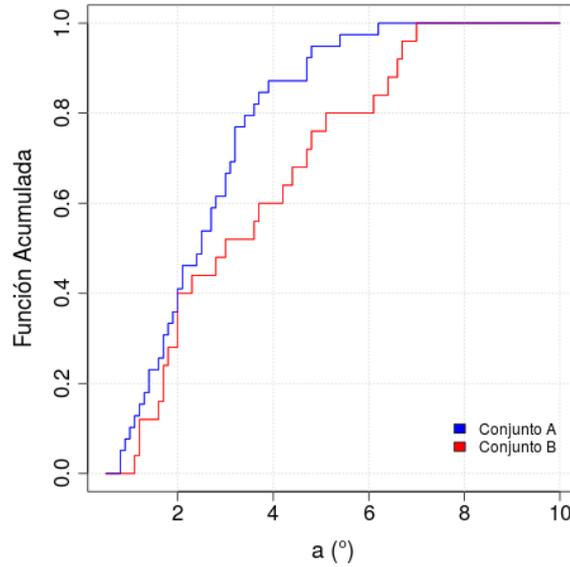


Figura 5.2: *Funciones acumuladas normalizadas de distancias r_p para los conjuntos A y B en todos los Modelos.*

CAPÍTULO 5. PALEOGRADIENTES DE METALICIDAD EN LA
NUBE MENOR DE MAGALLANES

distribución son estadísticamente iguales. Debido a esto, se puede sospechar que las funciones acumulación son las mismas con un nivel de significación igual a 0,9 (ver Figura 5.3). Esto hace notar que posiblemente ambos conjuntos de cúmulos han nacido en regiones espaciales similares pero se han separado a lo largo de su evolución dinámica en la galaxia, con una mayor concentración del conjunto B el cual contiene cúmulos que han orbitado más tiempo en la NmM.

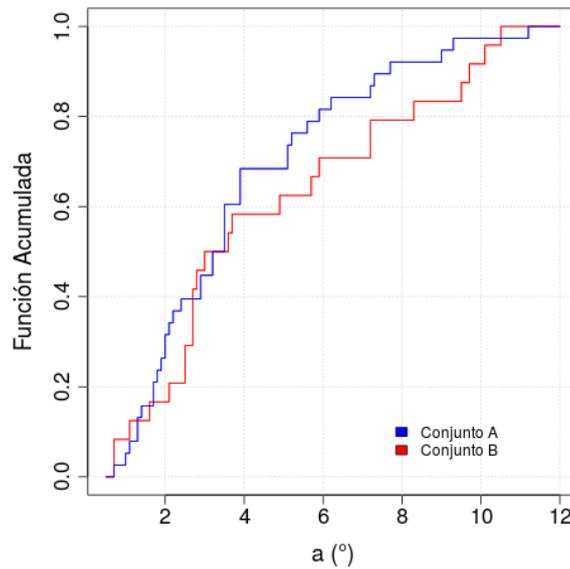


Figura 5.3: *Funciones acumuladas normalizadas de distancias r_n para los conjuntos A y B en el Modelo 1.*

Procedemos a estudiar la correlación de los valores de $[Fe/H]$ en cada subconjunto, en función de las distancias r_p y r_n , para lo cual empleamos el test estadístico χ^2 que se describe a continuación.

Consideramos la hipótesis H_0 : *la muestra de valores de las distancias y la muestra de valores de $[Fe/H]$ son independientes estadísticamente.* Para probar H_0 se emplea el histograma bidimensional h_{kl} de los pares de valores distancia- $[Fe/H]$. Este histograma, en nuestro caso, es de dimensión (8×6) . A partir de este, se calculan los histogramas unidimensionales $\hat{h}_k^{(distancias)}$ y $\hat{h}_l^{([Fe/H])}$ definidos por

$$\hat{h}_k^{(distancias)} = \sum_l h_{kl} \quad ; \quad \hat{h}_l^{([Fe/H])} = \sum_k h_{kl}, \quad (5.1)$$

donde $k = 1-8$ y $l = 1-6$.

Se calcula el número esperado de recuentos n_{kl} , bajo la suposición de que H_0

se mantiene:

$$n_{kl} = \frac{\hat{h}_k^{(distancias)} \hat{h}_l^{([Fe/H])}}{n}, \quad (5.2)$$

donde n es la cantidad de cúmulos del subconjunto que estamos estudiando. Estos recuentos esperados se comparan con los valores medidos para los recuentos del histograma bidimensional h_{kl} por medio del estadístico χ^2 de la siguiente manera

$$\chi^2 = \sum_{kl} \frac{(h_{kl} - n_{kl})^2}{n_{kl}}. \quad (5.3)$$

La interpretación estadística de χ^2 viene dada por la distribución de chi-cuadrado y el número de grados de libertad está determinado por el número de intervalos en el histograma bidimensional menos el número de restricciones y estimaciones.

Por medio de este test encontramos que no existe una dependencia significativa de los valores de abundancia metálica en función de las distancias previamente especificadas. Esta falta de correlación entre ambos pares de parámetros, se evidencia cualitativamente en gráficos de $[Fe/H]$ en función de r_p (a) y r_n (b) para cada subconjunto de igual edad. A modo de ejemplo en la Figura 5.4 se presenta $[Fe/H]$ en función de r_p (a) y r_n (b), para el subconjunto de cúmulos con edades $t = 2 \times 10^9$ años. Los gráficos resultantes para los demás subconjuntos se encuentra en el Apéndice A.

Para el Modelo 2, los resultados se muestran en la Figura 5.5, en la cual pueden observarse los valores de $[Fe/H]$ en función de la distancia al centro de la NmM en el plano del cielo tanto en el tiempo presente (a), como al momento de nacimiento de los cúmulos de nuestra muestra (b).

Para estudiar los resultados de este modelo, nuevamente propusimos dividir en subconjuntos nuestra muestra según la edad de los cúmulos. A cada uno de estos subconjuntos, se le calculó su valor medio de distancia al centro de la galaxia en el plano del cielo, tanto en la actualidad, r_p , como al momento del nacimiento de este, r_n . La razón entre estos valores, nos da un estimado de la contracción que tuvo el grupo (ver Tabla 5.2). Es visible cómo las razones calculadas para los cúmulos más jóvenes no se diferencian significativamente en su conjunto respecto de aquellos valores obtenidos para cúmulos que han evolucionado más tiempo en la galaxia.

Un punto a destacar es la diferencia entre los valores de las razones r_p/r_n obtenidos en este Modelo respecto de aquellos calculados en el Modelo 1 (ver Figura 5.2). Es por ello que nuevamente analizamos si la contracción de la distribución en distancias de cúmulos es distinta en función de la edad

CAPÍTULO 5. PALEOGRADIENTES DE METALICIDAD EN LA NUBE MENOR DE MAGALLANES

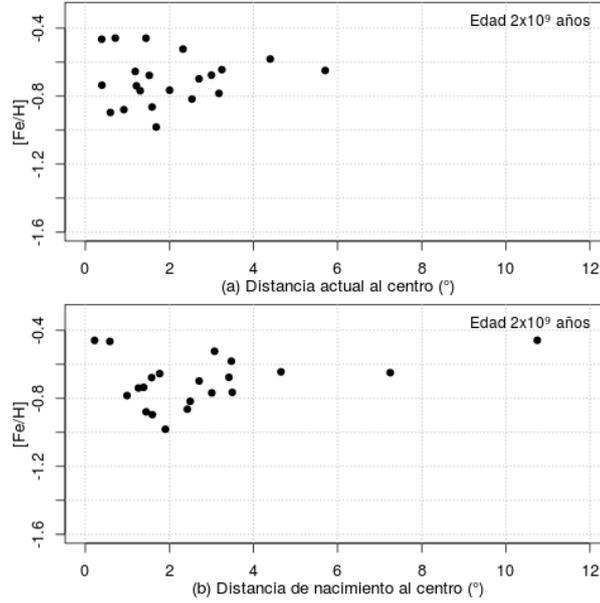


Figura 5.4: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t = 2 \times 10^9$ años.

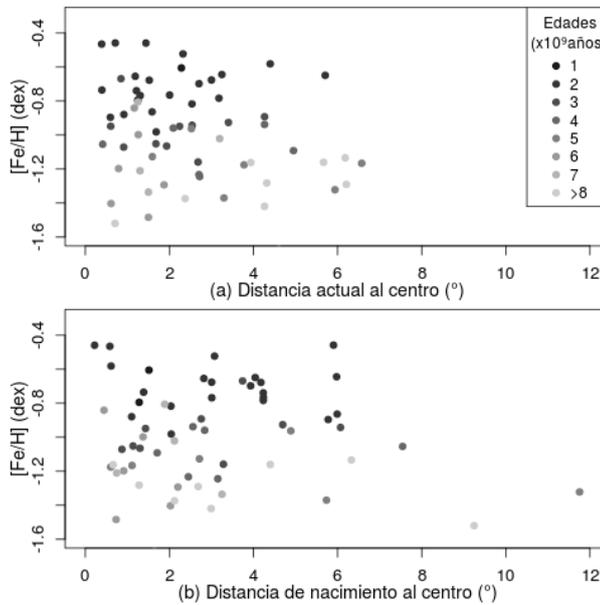


Figura 5.5: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos para el Modelo 2. En escala de grises, las edades de los cúmulos de la muestra.

CAPÍTULO 5. PALEOGRADIENTES DE METALICIDAD EN LA
NUBE MENOR DE MAGALLANES

Edad ($\times 10^9$ años)	r_p ($^\circ$)	Δr_p ($^\circ$)	r_n ($^\circ$)	Δr_n ($^\circ$)	r_p/r_n	$\Delta(r_p/r_n)$
1	1,77	0,73	1,40	0,16	1,26	0,54
2	2,00	1,36	3,26	1,84	0,62	0,54
3	2,11	1,17	6,60	12,11	0,32	0,61
4	2,85	1,61	3,38	2,10	0,85	0,71
5	3,95	1,94	4,47	4,10	0,88	0,92
6	1,69	1,35	1,33	0,67	1,26	1,19
7	1,81	0,93	2,00	1,03	0,91	0,66
> 8	4,21	1,92	3,71	2,86	1,13	1,01

Tabla 5.2: *Distancia media al centro de la galaxia en el plano del cielo de cada subconjunto de nuestro catálogo, tanto en tiempo presente como al momento de su nacimiento. Se aclara que no se listó el conjunto de edad $t = 8 \times 10^9$ años debido a que este es vacío.*

de estos, para lo cual realizamos un estudio estadístico de los resultados dividiendo al conjunto total de objetos del catálogo en dos submuestras: conjunto A, el cual incluye aquellos cúmulos con edades $t \in [1, 5) \times 10^9$ años y el conjunto B, con edades $t \in [5, 11) \times 10^9$ años .

El caso de la distribución espacial presente de ambos conjuntos es el mismo expuesto en el Modelo 1. Para el caso de la distribución espacial al momento del nacimiento de los cúmulos de ambos conjuntos, el método de Kolmogorov-Smirnov permite concluir con un nivel de significación igual a 0,9 que la distribución del conjunto A es distinta estadísticamente de aquella del conjunto B (ver Figura 5.6). Esto hace notar que posiblemente ambos conjuntos de cúmulos han nacido en regiones espaciales diferentes y siguen separados a lo largo de su evolución dinámica en la galaxia.

A continuación estudiamos la correlación de los valores de $[\text{Fe}/\text{H}]$ en cada subconjunto, en función de las distancias r_p y r_n . Por medio del test estadístico χ^2 encontramos que en este caso nuevamente no existe una dependencia significativa de los valores de abundancia metálica en función de las distancias previamente especificadas. Esta falta de correlación entre ambos pares de parámetros se evidencia cualitativamente en gráficos de $[\text{Fe}/\text{H}]$ en función de r_p (a) y r_n (b) para cada subconjunto de igual edad. A modo de ejemplo en la Figura 5.7 se presenta $[\text{Fe}/\text{H}]$ en función de r_p (a) y r_n (b), para el subconjunto de cúmulos con edades $t = 2 \times 10^9$ años. Los gráficos resultantes para los demás subconjuntos se encuentra en el Apéndice A.

Los dos primeros modelos, expuestos anteriormente, contemplan un primer escenario ficticio en el que la galaxia se encuentra aislada y no se con-

CAPÍTULO 5. PALEOGRADIENTES DE METALICIDAD EN LA NUBE MENOR DE MAGALLANES

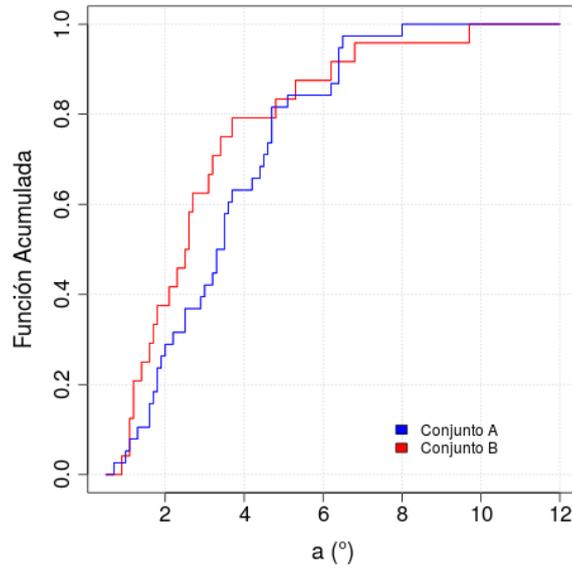


Figura 5.6: *Funciones acumuladas normalizadas de distancias r_n para los conjuntos A y B en el Modelo 2.*

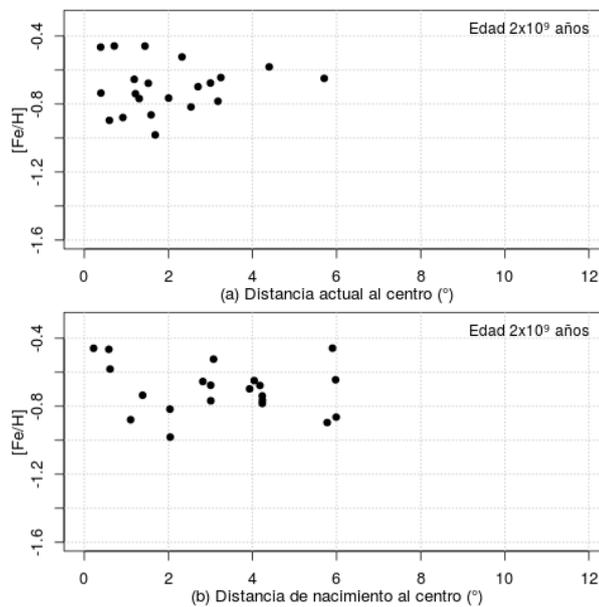


Figura 5.7: *Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t = 2 \times 10^9$ años.*

CAPÍTULO 5. PALEOGRADIENTES DE METALICIDAD EN LA NUBE MENOR DE MAGALLANES

templan posibles perturbaciones de los resultados respecto a interacciones con el medio exterior. Si bien esta suposición claramente no es correcta, a primer orden nos prodría dar una respuesta a nuestro interrogante sobre la evolución en el tiempo de la relación posición-metalicidad. Como resumen de estos modelos, podemos decir que:

1. No se encuentra una diferencia notoria del resultado global al agregar al potencial de la NmM su componente de disco estelar y de gas.
2. El sistema de cúmulos en su conjunto ha experimentado una contracción en su distribución alrededor del centro de la galaxia.
3. Dependiendo del modelo empleado, la contracción resulta diferencial en función de la edad.
4. No se evidencian gradientes de metalicidad para los subconjuntos de cúmulos de igual edad. Esto se aplica a todos los subconjuntos estudiados.
5. Por lo que hasta aquí hemos enumerado, cualquier gradiente observado actualmente no revela la distribución intrínseca de metalicidades sino que el mismo es consecuencia de la contracción diferencial.

Con el fin de considerar un escenario más realista, que contemple las interacciones y posibles perturbaciones debido a las dos galaxias más cercanas, la NMM y la VL, se procede a analizar los resultados de los Modelos 3 y 4. Previo a este análisis, es de destacar que hemos adoptado como radio virial del halo de la NmM el valor de $R_{200} = 57,1$ kpc (Besla et al., 2012) para todo momento en la evolución. De esta manera, todo cúmulo que se encuentre a una distancia $r > R_{200}$ será considerado fuera de la galaxia y no se tendrá en cuenta en los resultados si su edad es mayor al tiempo en que alcanza esta distancia.

En cuanto al Modelo 3, comenzamos analizando la Figura 5.8 en la que se observan los valores de $[Fe/H]$ en función de la distancia al centro de la NmM en el plano del cielo tanto en el tiempo presente (a), como al momento de nacimiento de los cúmulos de nuestra muestra (b).

Para estudiar los resultados de este modelo, propusimos dividir nuevamente en subconjuntos nuestra muestra, según la edad de los cúmulos. A

CAPÍTULO 5. PALEOGRADIENTES DE METALICIDAD EN LA NUBE MENOR DE MAGALLANES

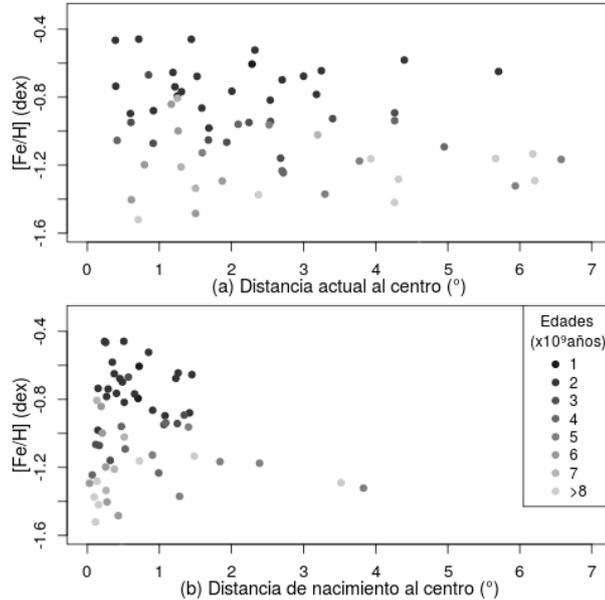


Figura 5.8: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos para el Modelo 3. En escala de grises, las edades de los cúmulos de la muestra.

cada uno de estos, se le calculó su valor medio de distancia al centro de la galaxia en el plano del cielo, tanto en la actualidad, r_p , como al momento del nacimiento de este subconjunto, r_n . La razón entre estos valores nos da un estimado de la contracción que tuvo el grupo de cúmulos a lo largo de toda su vida en la NmM. En la Tabla 5.3 se muestran los valores resultantes. Es visible cómo las razones calculadas para los cúmulos más jóvenes no se diferencian significativamente en su conjunto respecto de aquellos valores obtenidos para cúmulos que han evolucionado más tiempo en la galaxia.

Con el propósito de analizar si la expansión de la distribución en distancias de cúmulos es distinta en función de la edad de estos, se hizo un estudio estadístico de los resultados dividiendo al conjunto total de objetos del catálogo en dos submuestras: conjunto A, el cual incluye aquellos cúmulos con edades $t \in [1, 5) \times 10^9$ años y el conjunto B, con edades $t \in [5, 11) \times 10^9$ años.

El caso de la distribución espacial presente de ambos conjuntos, es el mismo expuesto en el Modelo 1. Por su parte, para la distribución espacial al momento del nacimiento de los cúmulos de ambos conjuntos, el test de Kolmogorov-Smirnov no permiten rechazar la hipótesis nula, la cual afirma que ambas funciones distribución son estadísticamente iguales, es decir, no hay evidencia significativa para concluir que son distintas. Debido a esto,

CAPÍTULO 5. PALEOGRADIENTES DE METALICIDAD EN LA
NUBE MENOR DE MAGALLANES

Edad ($\times 10^9$ años)	r_p ($^\circ$)	Δr_p ($^\circ$)	r_n ($^\circ$)	Δr_n ($^\circ$)	r_p/r_n	$\Delta(r_p/r_n)$
1	1,77	0,73	0,71	0,01	2,48	1,02
2	2,00	1,36	0,63	0,43	3,16	3,03
3	2,11	1,17	0,69	0,52	3,06	2,87
4	2,85	1,61	0,63	0,42	4,54	3,94
5	3,95	1,94	1,94	1,06	2,03	1,49
6	1,69	1,35	0,27	0,15	6,32	6,20
7	1,81	0,93	0,32	0,16	5,66	4,07
> 8	4,21	1,92	0,89	1,27	4,73	7,07

Tabla 5.3: *Distancia media al centro de la galaxia en el plano del cielo de cada subconjunto de nuestro catálogo, tanto en tiempo presente como al momento de su nacimiento. Se aclara que no se listó el conjunto de edad $t = 8 \times 10^9$ años debido a que este es vacío.*

se puede sospechar que las funciones acumulación son las mismas con un nivel de significación igual a 0,9. Las funciones acumuladas normalizadas de distancias r_n de ambas submuestras se presentan en la Figura 5.9.

Esto hace notar que posiblemente ambos conjuntos de cúmulos han nacido en regiones espaciales similares pero se han separado a lo largo de su evolución dinámica en la galaxia, con una mayor expansión del conjunto B el cual contiene cúmulos que han orbitado más tiempo en el NmM.

A continuación estudiamos la correlación de los valores de $[\text{Fe}/\text{H}]$ en cada subconjunto, en función de las distancias r_p y r_n . Por medio del test estadístico χ^2 encontramos que en este caso, nuevamente no existe una dependencia significativa de los valores de abundancia metálica en función de las distancias previamente especificadas. Esta falta de correlación entre ambos pares de parámetros, se evidencia cualitativamente en gráficos de $[\text{Fe}/\text{H}]$ en función de r_p (a) y r_n (b) para cada subconjunto de igual edad. A modo de ejemplo en la Figura 5.10 se presenta $[\text{Fe}/\text{H}]$ en función de r_p (a) y r_n (b), para el subconjunto de cúmulos con edades $t = 2 \times 10^9$ años. Los gráficos resultantes para los demás subconjuntos se encuentra en el Apéndice A.

Para el Modelo 4, los resultados a analizar se muestran en la Figura 5.11, en la cual pueden observarse los valores de $[\text{Fe}/\text{H}]$ en función de la distancia al centro de la NmM en el plano del cielo tanto en el tiempo presente (a), como al momento de nacimiento de los cúmulos de nuestra muestra (b).

Para estudiar los resultados de este modelo, nuevamente propusimos dividir en subconjuntos nuestra muestra según la edad de los cúmulos. A cada uno de estos subconjuntos, se le calculó su valor medio de distancia al cen-

CAPÍTULO 5. PALEOGRADIENTES DE METALICIDAD EN LA NUBE MENOR DE MAGALLANES

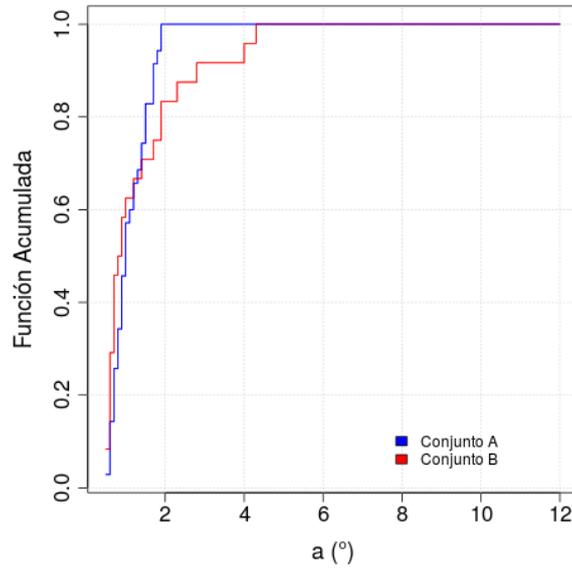


Figura 5.9: Funciones acumuladas normalizadas de distancias r_n para los conjuntos A y B en el Modelo 3.

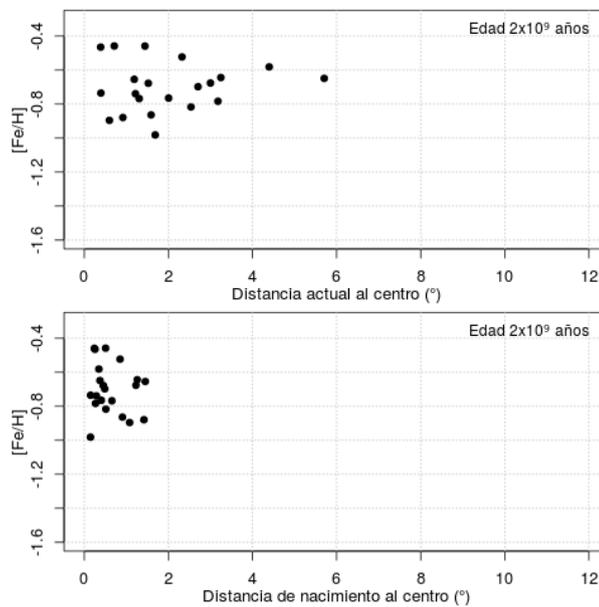


Figura 5.10: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t=2 \times 10^9$ años.

CAPÍTULO 5. PALEOGRADIENTES DE METALICIDAD EN LA NUBE MENOR DE MAGALLANES

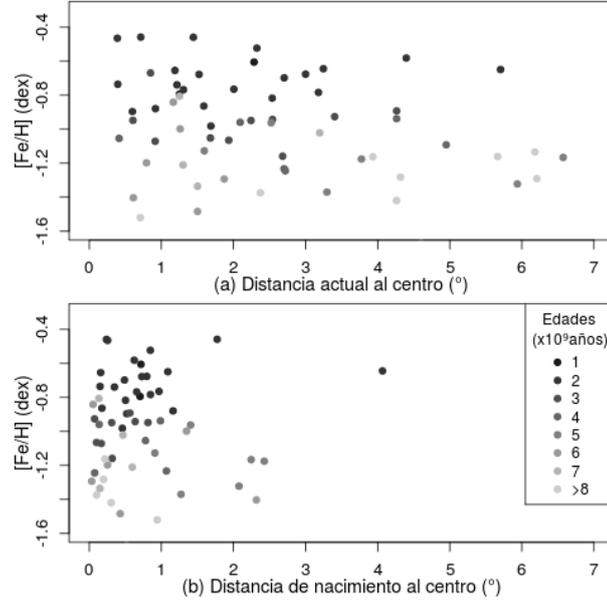


Figura 5.11: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos para el Modelo 4. En escala de grises, las edades de los cúmulos de la muestra.

tro de la galaxia en el plano del cielo, tanto en la actualidad, r_p , como al momento del nacimiento de este, r_n . La razón entre estos valores, nos da un estimado de la contracción que tuvo el grupo de cúmulos a lo largo de toda su vida en la NmM. En la Tabla 5.4 se muestran los valores resultantes. Es visible cómo las razones calculadas para los cúmulos más jóvenes no se diferencian significativamente en su conjunto, respecto de aquellos valores obtenidos para cúmulos que han evolucionado más tiempo en la galaxia.

Un punto a destacar es la diferencia entre los valores de las razones r_p/r_n obtenidos en este Modelo, respecto de aquellos calculados en el Modelo 3. Es por ello que nuevamente analizamos si la expansión de la distribución en distancias de cúmulos es distinta en función de la edad de estos, para lo cual se realiza un estudio estadístico de los resultados dividiendo al conjunto total de objetos del catálogo en dos submuestras: el conjunto A, el cual incluye aquellos cúmulos con edades $t \in [1, 5) \times 10^9$ años y el conjunto B, con edades $t \in [5, 11) \times 10^9$ años.

El caso de la distribución espacial presente de ambos conjuntos, es el mismo expuesto en el Modelo 1. Para el caso de la distribución espacial al momento del nacimiento de los cúmulos de ambos conjuntos, el test de Kolmogorov-Smirnov permite concluir con un nivel de significación igual a 0,9 que la distribución del conjunto A es distinta estadísticamente de aquella

CAPÍTULO 5. PALEOGRADIENTES DE METALICIDAD EN LA
NUBE MENOR DE MAGALLANES

Edad ($\times 10^9$ años)	r_p ($^\circ$)	Δr_p ($^\circ$)	r_n ($^\circ$)	Δr_n ($^\circ$)	r_p/r_n	$\Delta(r_p/r_n)$
1	1,77	0,73	0,71	0,01	2,49	1,03
2	2,00	1,36	0,80	0,85	2,50	3,13
3	2,11	1,17	0,37	0,27	5,66	5,17
4	2,85	1,61	0,61	0,47	4,68	4,48
5	3,95	1,94	1,72	0,61	2,29	1,39
6	1,69	1,35	0,71	0,84	2,38	3,41
7	1,81	0,92	0,34	0,23	5,39	4,63
> 8	4,21	1,92	0,35	0,34	11,92	12,63

Tabla 5.4: *Distancia media al centro de la galaxia en el plano del cielo de cada subconjunto de nuestro catálogo, tanto en tiempo presente como al momento de su nacimiento. Se aclara que no se listó el conjunto de edad $t = 8 \times 10^9$ años debido a que este es vacío.*

del conjunto B (ver Figura 5.12). Esto nos hace notar que posiblemente ambos conjuntos de cúmulos han nacido en regiones espaciales diferentes y siguen separados a lo largo de su evolución dinámica en la galaxia.

A continuación estudiamos la correlación de los valores de $[\text{Fe}/\text{H}]$ en cada subconjunto, en función de las distancias r_p y r_n . Por medio del test estadístico χ^2 encontramos que en este caso nuevamente no existe una dependencia significativa de los valores de abundancia metálica en función de las distancias previamente especificadas. Esta falta de correlación entre ambos pares de parámetros, se evidencia cualitativamente en gráficos de $[\text{Fe}/\text{H}]$ en función de r_p (a) y r_n (b) para cada subconjunto de igual edad. A modo de ejemplo en la Figura 5.13 se presenta $[\text{Fe}/\text{H}]$ en función de r_p (a) y r_n (b), para el subconjunto de cúmulos con edades $t = 2 \times 10^9$ años. Los gráficos resultantes para los demás subconjuntos se encuentra en el Apéndice A.

Los dos últimos modelos expuestos anteriormente contemplan un escenario más realista que en los primeros modelos, en el que la galaxia se encuentra cercana a la NMM y la VL, experimentando fuerzas de interacción con estas galaxias que permite contemplar posibles perturbaciones de los resultados debido a estas interacciones. Como resumen de estos modelos, podemos decir que:

1. El sistema de cúmulos en su conjunto ha experimentado una expansión en su distribución alrededor del centro de la galaxia.
2. La expansión no es independiente de la edad.

CAPÍTULO 5. PALEOGRADIENTES DE METALICIDAD EN LA NUBE MENOR DE MAGALLANES

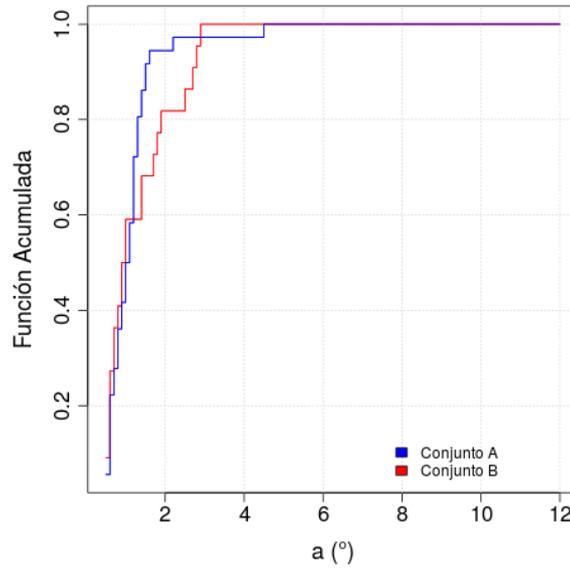


Figura 5.12: *Funciones acumuladas normalizadas de distancias r_n para los conjuntos A y B en el Modelo 4.*

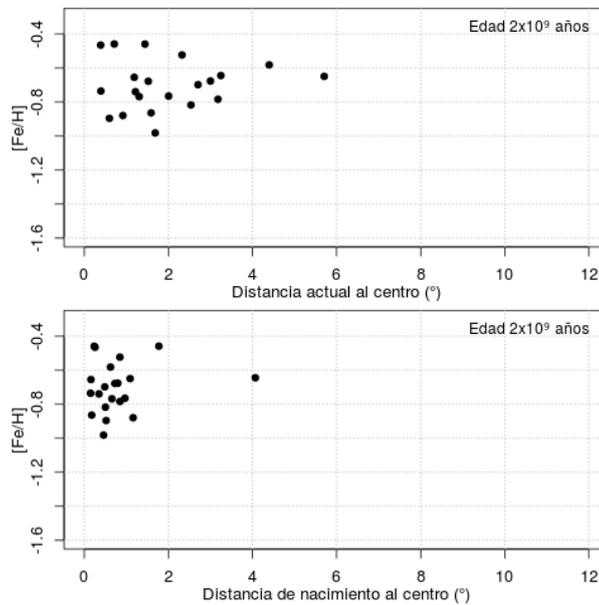


Figura 5.13: *Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t=2 \times 10^9$ años.*

3. No se evidencian gradientes de metalicidad para los subconjuntos de cúmulos de igual edad. Esto se aplica a todos los subconjuntos estudiados.
4. Por lo que hasta aquí hemos enumerado, cualquier gradiente observado actualmente no revela la distribución intrínseca de metalicidades sino que el mismo es consecuencia de la expansión diferencial.

5.2. Robustez del programa

Con el fin de dar solidez a nuestros resultados nos propusimos analizar la robustez del programa desde un punto de vista estadístico. En este sentido, modificamos los módulos de velocidades en un porcentaje igual al error observacional, y repetimos los experimentos para ver si las distribuciones espaciales al momento del nacimiento son distintas respecto de las obtenidas anteriormente.

La simulación 5 (6) emplea el Modelo 3 (4) pero modifica los valores iniciales de velocidad de los cúmulos. Se le agrega al módulo de estos un valor aleatorio perteneciente al intervalo $[0, 3)$ km/s.

Comenzamos analizando los resultados del Modelo 5. La Figura 5.14 muestra los valores de $[\text{Fe}/\text{H}]$ en función de la distancia al centro de la NmM en el plano del cielo tanto en el tiempo presente (a), como al momento de nacimiento de los cúmulos de la nuestra muestra (b). Es visible la existencia de un proceso de expansión neta para el conjunto total de cúmulos, tal como resultó en el Modelo 3.

Para estudiar los resultados de este modelo, propusimos dividir nuevamente en subconjuntos nuestra muestra, según la edad de los cúmulos. Para cada uno de estos, calculamos su valor medio de distancia al centro de la galaxia en el plano del cielo, tanto en la actualidad, r_p , como al momento del nacimiento de este subconjunto, r_n . La razón entre estos valores nos da un estimado de la expansión que tuvo el grupo de cúmulos a lo largo de toda su vida en la NmM. En la Tabla 5.5 se muestran los valores resultantes. Estos permiten concluir que en primera instancia, las razones calculadas para los cúmulos más jóvenes no se diferencian significativamente en su conjunto respecto de aquellos valores obtenidos para cúmulos que han evolucionado más tiempo en la galaxia, tal como sucedió en el Modelo 3.

Con el propósito de analizar si la expansión de la distribución en distancias de cúmulos es distinta en función de la edad de estos, realizamos un

CAPÍTULO 5. PALEOGRADIENTES DE METALICIDAD EN LA
NUBE MENOR DE MAGALLANES

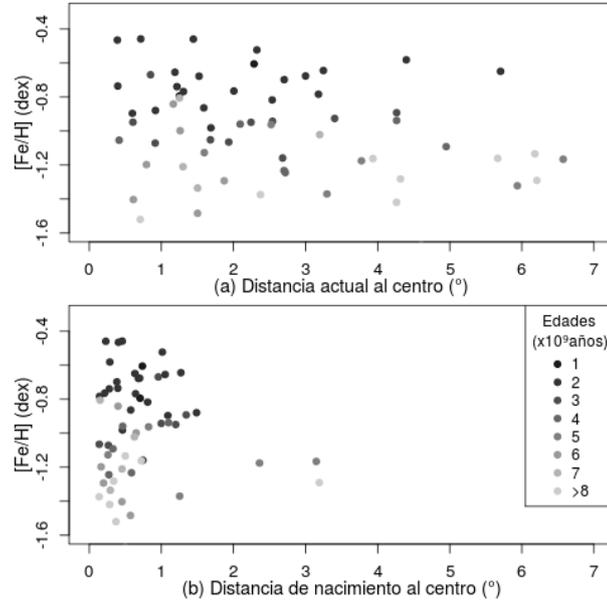


Figura 5.14: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos para el Modelo 5. En escala de grises, las edades de los cúmulos de la muestra.

Edad ($\times 10^9$ años)	r_p (°)	Δr_p (°)	r_n (°)	Δr_n (°)	r_p/r_n	$\Delta(r_p/r_n)$
1	1,77	0,73	0,72	0,02	2,45	1,02
2	2,00	1,36	0,63	0,37	3,19	2,86
3	2,11	1,17	0,81	0,46	2,62	2,07
4	2,85	1,61	0,55	0,33	5,19	4,28
5	3,95	1,94	1,57	1,17	2,51	2,25
6	1,69	1,35	0,42	0,18	4,02	3,67
7	1,81	0,92	0,38	0,21	4,76	3,54
> 8	4,21	1,92	0,79	1,07	5,32	7,61

Tabla 5.5: Distancia media al centro de la galaxia en el plano del cielo de cada subconjunto de nuestro catálogo, tanto en tiempo presente como al momento de su nacimiento. El subconjunto de edad $t = 8 \times 10^9$ años no contiene cúmulos.

CAPÍTULO 5. PALEOGRADIENTES DE METALICIDAD EN LA NUBE MENOR DE MAGALLANES

estudio estadístico de los resultados dividiendo al conjunto total de objetos del catálogo en dos submuestras: conjunto A, el cual incluye aquellos cúmulos con edades $t \in [1, 5) \times 10^9$ años y el conjunto B, con edades $t \in [5, 11) \times 10^9$ años.

El caso de la distribución espacial presente de ambos conjuntos, es el mismo expuesto en el Modelo 3. Por su parte, para la distribución espacial al momento del nacimiento de los cúmulos de ambos conjuntos, el test de Kolmogorov-Smirnov no permiten rechazar la hipótesis nula, la cual afirma que ambas funciones distribución son estadísticamente iguales, es decir, no hay evidencia significativa para concluir que son distintas. Debido a esto, se puede sospechar que las funciones acumulación son las mismas con un nivel de significación igual a 0,9. Las funciones acumuladas normalizadas de distancias r_n de ambas submuestras se presentan en la Figura 5.15.

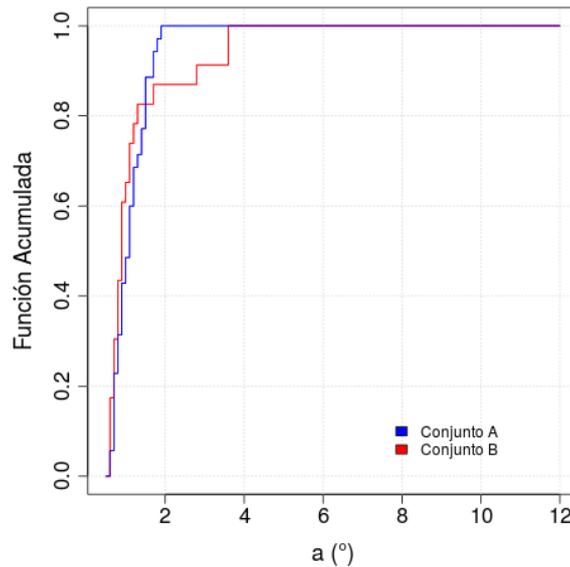


Figura 5.15: *Funciones acumuladas normalizadas de distancias r_n para los conjuntos A y B en el Modelo 5.*

Esto nos permite arribar a las mismas conclusiones que en el Modelo 3 incluso con una veracidad estadística mayor.

A continuación estudiamos la correlación de los valores de $[\text{Fe}/\text{H}]$ en cada subconjunto, en función de las distancias r_p y r_n . Por medio del test estadístico χ^2 encontramos que en este caso, nuevamente no existe una dependencia significativa de los valores de abundancia metálica en función de las distancias previamente especificadas. Esta falta de correlación entre ambos pares de parámetros se evidencia cualitativamente en gráficos de $[\text{Fe}/\text{H}]$ en función de

CAPÍTULO 5. PALEOGRADIENTES DE METALICIDAD EN LA NUBE MENOR DE MAGALLANES

de r_p (a) y r_n (b) para cada subconjunto de igual edad. A modo de ejemplo en la Figura 5.16 se presenta $[\text{Fe}/\text{H}]$ en función de r_p (a) y r_n (b), para el subconjunto de cúmulos con edades $t = 2 \times 10^9$ años. Los gráficos resultantes para los demás subconjuntos se encuentra en el Apéndice B.

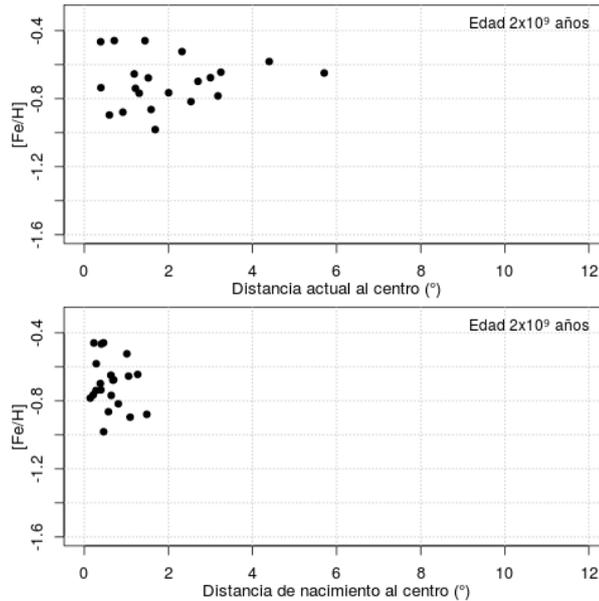


Figura 5.16: *Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t = 2 \times 10^9$ años.*

Para el Modelo 6, los resultados analizados se muestran en la Figura 5.17, en la cual pueden observarse los valores de $[\text{Fe}/\text{H}]$ en función de la distancia al centro de la NmM en el plano del cielo tanto en el tiempo presente (a), como al momento de nacimiento de los cúmulos de nuestra muestra (b). Es visible la expansión del conjunto de cúmulos como resultado de la evolución dinámica en la galaxia.

Para estudiar los resultados de este modelo, nuevamente propusimos dividir en subconjuntos nuestra muestra según la edad de los cúmulos. A cada uno de estos subconjuntos se le calculó su valor medio de distancia al centro de la galaxia en el plano del cielo, tanto en la actualidad, r_p , como al momento del nacimiento de este, r_n . La razón entre estos valores nos da un estimado de la expansión que tuvo el grupo de cúmulos a lo largo de toda su vida en la NmM. En la Tabla 5.6 se muestran los valores resultantes. Es visible cómo las razones calculadas para los cúmulos más jóvenes no se diferencian significativamente en su conjunto, respecto de aquellos valores obtenidos para cúmulos que han evolucionado más tiempo en la galaxia. Esto permite

CAPÍTULO 5. PALEOGRADIENTES DE METALICIDAD EN LA NUBE MENOR DE MAGALLANES

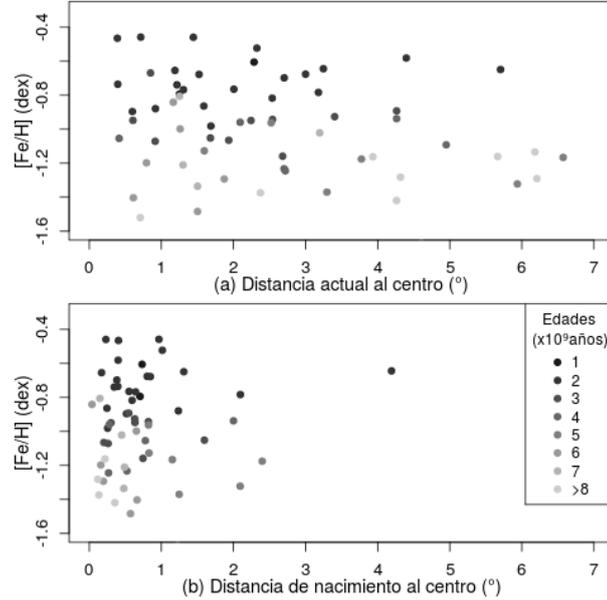


Figura 5.17: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos para el Modelo 6. En escala de grises, las edades de los cúmulos de la muestra.

concluir que, en primera instancia, la distribución espacial global en el plano del cielo del conjunto de cúmulos simulados experimentó una expansión tal como resultó en el Modelo 4.

Nuevamente analizamos si la expansión de la distribución en distancias de cúmulos es distinta en función de la edad de estos, para lo cual realizamos un estudio estadístico de los resultados dividiendo el conjunto total de objetos del catálogo en dos submuestras: conjunto A, el cual incluye aquellos cúmulos con edades $t \in [1, 5) \times 10^9$ años y el conjunto B, con edades $t \in [5, 11) \times 10^9$ años.

El caso de la distribución espacial presente de ambos conjuntos es el mismo expuesto en el Modelo 4. Para el caso de la distribución espacial al momento del nacimiento de los cúmulos de ambos conjuntos, el test de Kolmogorov-Smirnov permite concluir con un nivel de significación igual a 0,9 que la distribución del conjunto A es distinta estadísticamente de aquella del conjunto B (ver Figura 5.18).

A continuación estudiamos la correlación de los valores de $[Fe/H]$ en cada subconjunto, en función de las distancias r_p y r_n . Por medio del test estadístico χ^2 encontramos que en este caso, nuevamente no existe una dependencia significativa de los valores de abundancia metálica en función de las distancias previamente especificadas. Esta falta de correlación entre ambos pares

CAPÍTULO 5. PALEOGRADIENTES DE METALICIDAD EN LA
NUBE MENOR DE MAGALLANES

Edad ($\times 10^9$ años)	r_p ($^\circ$)	Δr_p ($^\circ$)	r_n ($^\circ$)	Δr_n ($^\circ$)	r_p/r_n	$\Delta(r_p/r_n)$
1	1,77	0,73	0,71	0,02	2,46	1,02
2	2,00	1,36	0,80	0,90	2,39	3,03
3	2,11	1,17	0,64	0,42	3,31	2,85
4	2,85	1,61	0,77	0,72	3,71	4,05
5	3,95	1,94	1,42	0,67	2,77	1,88
6	1,69	1,35	0,50	0,41	3,37	3,85
7	1,81	0,93	0,39	0,16	4,63	3,06
> 8	4,21	1,92	0,21	0,11	20,44	14,26

Tabla 5.6: *Distancia media al centro de la galaxia en el plano del cielo de cada subconjunto de nuestro catálogo, tanto en tiempo presente como al momento de su nacimiento. Se aclara que no se listó el conjunto de edad $t = 8 \times 10^9$ años debido a que este es vacío.*

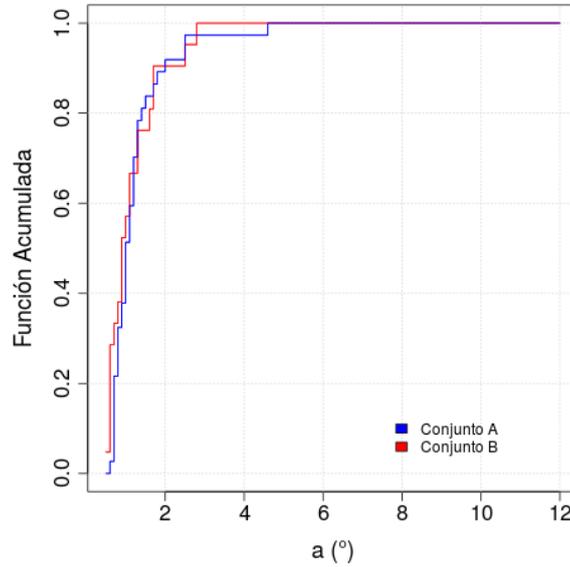


Figura 5.18: *Funciones acumuladas normalizadas de distancias r_n para los conjuntos A y B en el Modelo 6.*

CAPÍTULO 5. PALEOGRADIENTES DE METALICIDAD EN LA NUBE MENOR DE MAGALLANES

de parámetros se evidencia cualitativamente en gráficos de $[\text{Fe}/\text{H}]$ en función de r_p (a) y r_n (b) para cada subconjunto de igual edad. A modo de ejemplo en la Figura 5.19 se presenta $[\text{Fe}/\text{H}]$ en función de r_p (a) y r_n (b), para el subconjunto de cúmulos con edades $t = 2 \times 10^9$ años. Los gráficos resultantes para los demás subconjuntos se encuentra en el Apéndice B.

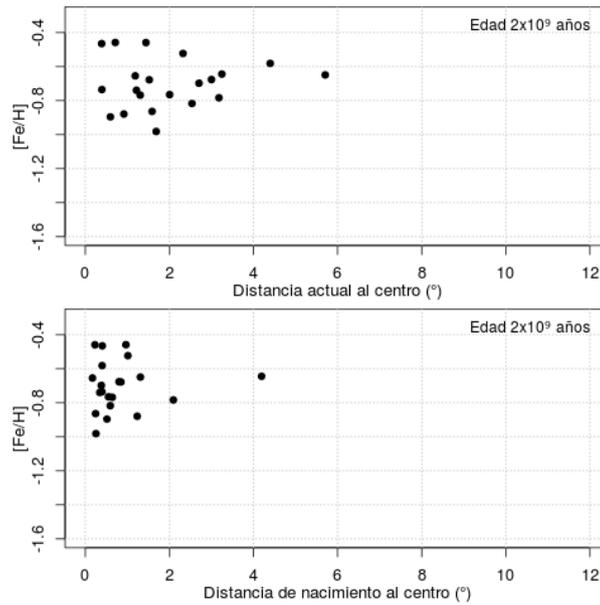


Figura 5.19: *Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t = 2 \times 10^9$ años.*

En este caso, la distribución de cúmulos en el plano $[\text{Fe}/\text{H}]-r_n$ se modifican de forma considerable respecto a los resultados del Modelo 4, aunque la evolución global coincide.

Bibliografía

Besla, G., N. Kallivayalil, L. Hernquist, R. P. van der Marel, T. J. Cox, y D. Keres
2012. The role of dwarf galaxy interactions in shaping the Magellanic System and implications for Magellanic Irregulars. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 421:2109–2138.

Capítulo 6

Conclusiones y perspectivas futuras

A lo largo del trabajo hemos encontrado evidencias sugiriendo que la relación metalicidad-posición de la población de cúmulos de la NmM ha evolucionado a lo largo del tiempo, distando en gran medida de la que se encontraba al momento de formación de las diferentes subpoblaciones de cúmulos.

En un primer escenario en el cual consideramos la galaxia aislada, los resultados sugieren que los cúmulos pertenecientes a ésta han sufrido un acercamiento al centro de la galaxia que se traduce en una contracción global de la nube de cúmulos debido al potencial central que rige gran parte de la evolución de este primer modelo.

En un intento de hacer más realista el escenario en el cual los cúmulos describen sus movimientos orbitales, consideramos el disco estelar y de gas de la galaxia, lo cual no llevó a modificaciones considerables en los resultados.

Es apreciable cómo la evolución de la relación que estamos analizando se modifica por la presencia en el escenario simulado de las galaxias más cercanas a ésta y con visible interacción, la NMM y la VL. Los resultados globales sugieren que en presencia de estas dos galaxias, la población de cúmulos sufre una expansión debida a las fuerzas de marea a las que se encuentran sometidos. Esto no se modifica al considerar el disco estelar y de gas de la NmM. Aun así, los resultados de este último modelo dependen fuertemente de las condiciones iniciales, por lo que dichos resultados no deben ser tomados como confiables al menos en esta instancia del trabajo. Esto no sucede en el escenario previo que igualmente contempla las tres galaxias, por lo que la expansión es un resultado robusto.

Una posible extensión de este trabajo surge de analizar las órbitas descritas por los centros de masas de nuestras galaxias simuladas. Sería interesante estudiar qué variables influyen más significativamente en nuestros resultados,

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

como para que estos no muestren que el SM se está acercando por primera vez a la VL. Posiblemente, un conocimiento más preciso de las masas de las galaxias consideradas, entre otros, podría generar resultados diferentes.

Apéndice A

Relaciones resultantes en modelos simulados

En este apéndice se exponen las figuras que ilustran las relaciones $[\text{Fe}/\text{H}]-r_p$ y $[\text{Fe}/\text{H}]-r_n$ de distintos subconjuntos de nuestro catálogo con cúmulos de igual edad.

Las mismas no fueron incluidas en las secciones anteriores debido a que comprometerían la claridad de explicación, robándole foco al texto que detalla las actividades realizadas.

A.1. Modelo 1

Para el Modelo 1 en el cual se presenta la NmM aislada y se simula solo su halo de materia oscura, los resultados analizados se muestran en las Figuras (A.1–A.7).

A.2. Modelo 2

Para el Modelo 2 en el cual se presenta la NmM aislada y se simula tanto su halo de materia oscura como su disco estelar y de gas, los resultados analizados se muestran en las Figuras (A.8–A.14).

APÉNDICE A. RELACIONES RESULTANTES EN MODELOS SIMULADOS

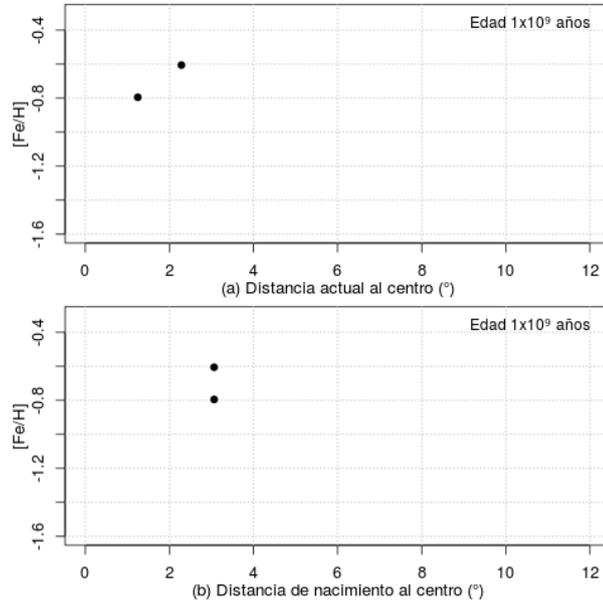


Figura A.1: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t=10^9$ años.

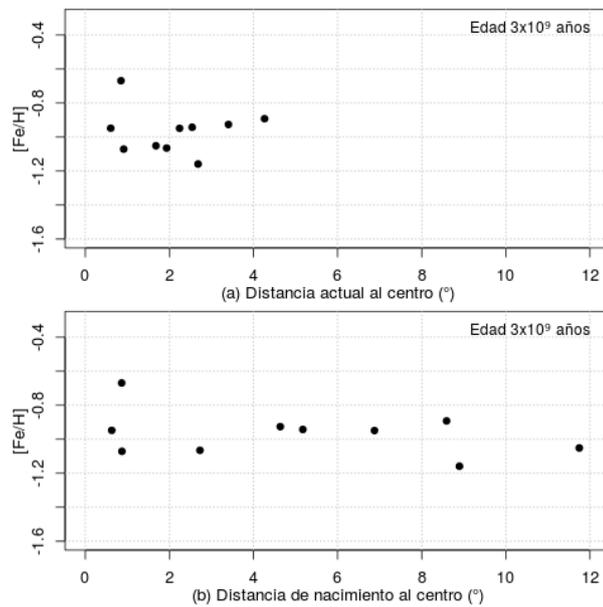


Figura A.2: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t=3 \times 10^9$ años.

APÉNDICE A. RELACIONES RESULTANTES EN MODELOS SIMULADOS

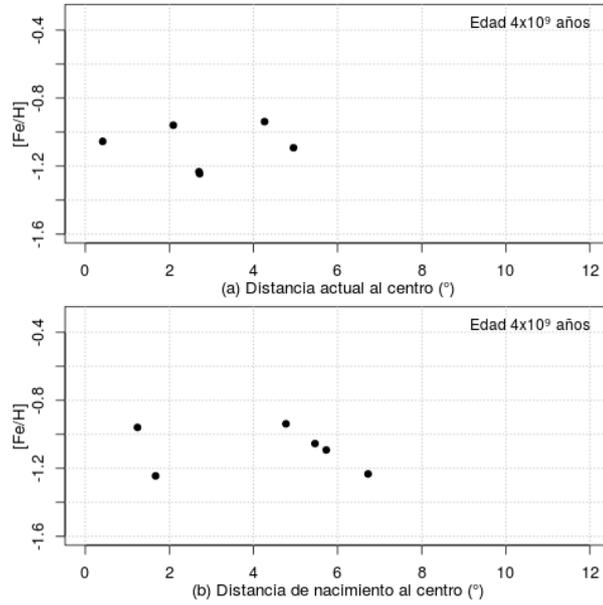


Figura A.3: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t=4 \times 10^9$ años.

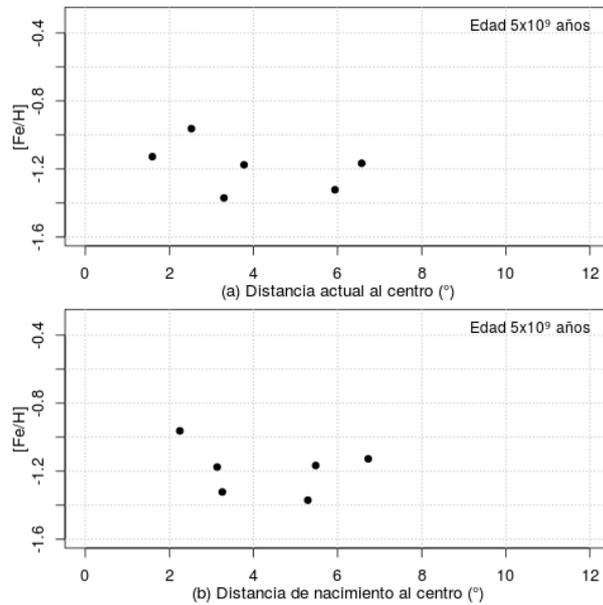


Figura A.4: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t=5 \times 10^9$ años.

APÉNDICE A. RELACIONES RESULTANTES EN MODELOS SIMULADOS

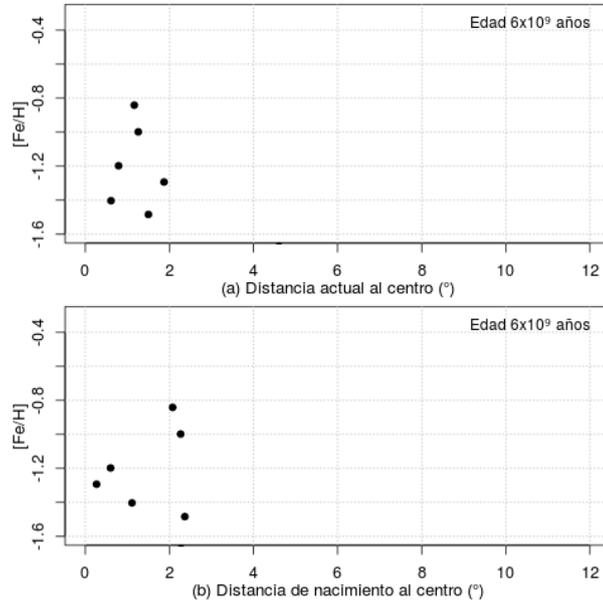


Figura A.5: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t=6 \times 10^9$ años.

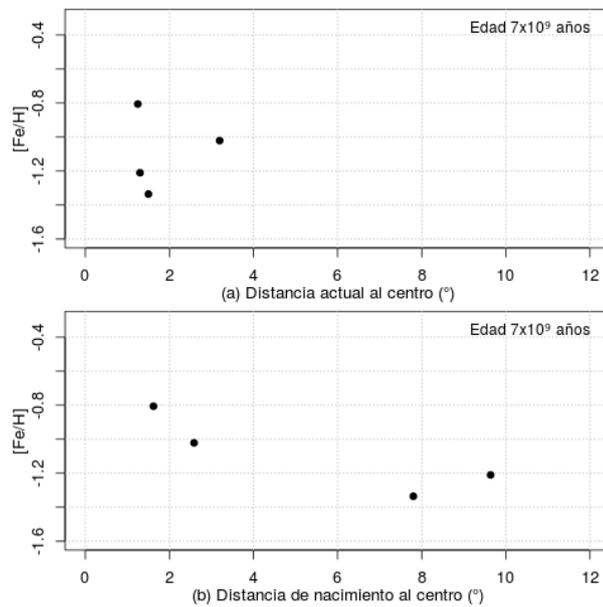


Figura A.6: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t=7 \times 10^9$ años.

APÉNDICE A. RELACIONES RESULTANTES EN MODELOS SIMULADOS

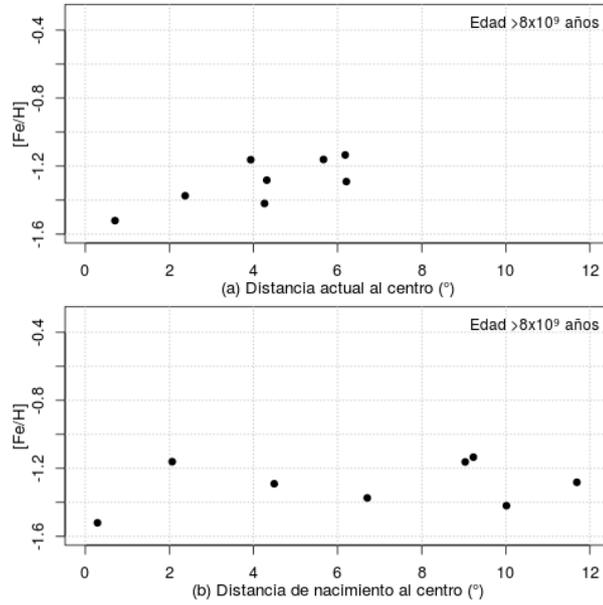


Figura A.7: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t > 8 \times 10^9$ años.

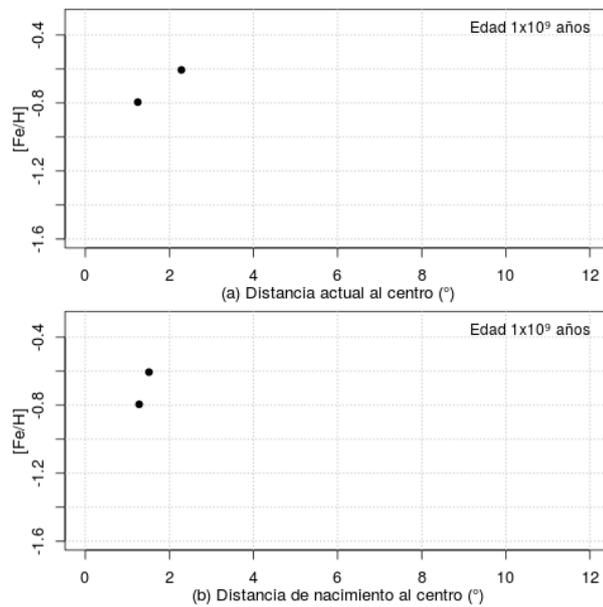


Figura A.8: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t=10^9$ años.

APÉNDICE A. RELACIONES RESULTANTES EN MODELOS SIMULADOS

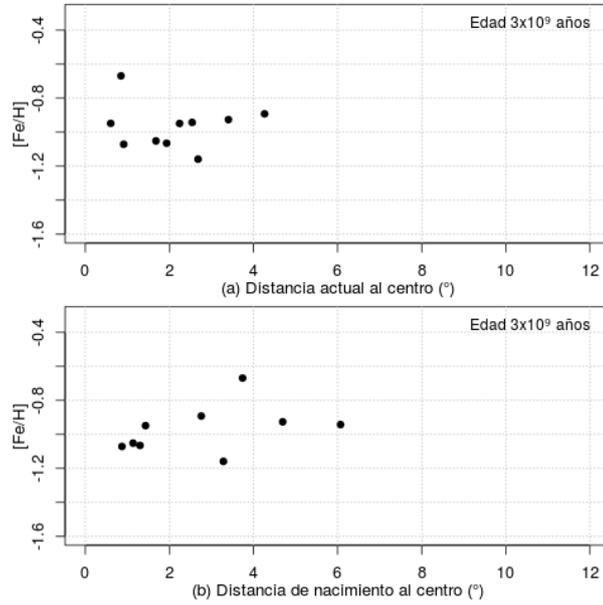


Figura A.9: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t=3 \times 10^9$ años.

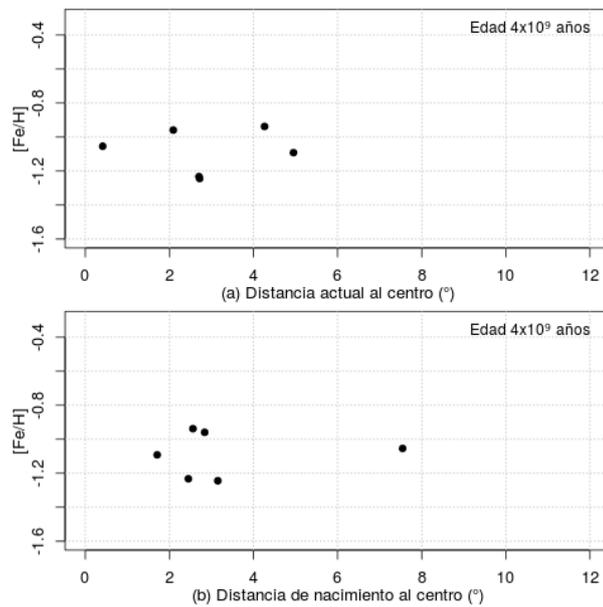


Figura A.10: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t=4 \times 10^9$ años.

APÉNDICE A. RELACIONES RESULTANTES EN MODELOS SIMULADOS

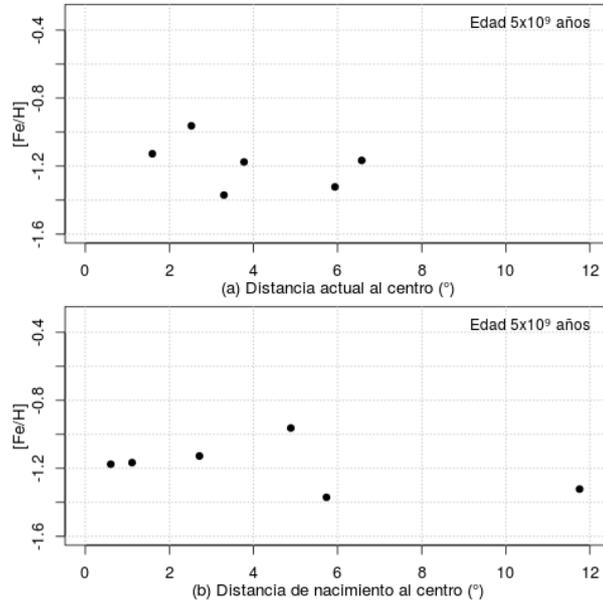


Figura A.11: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t=5 \times 10^9$ años.

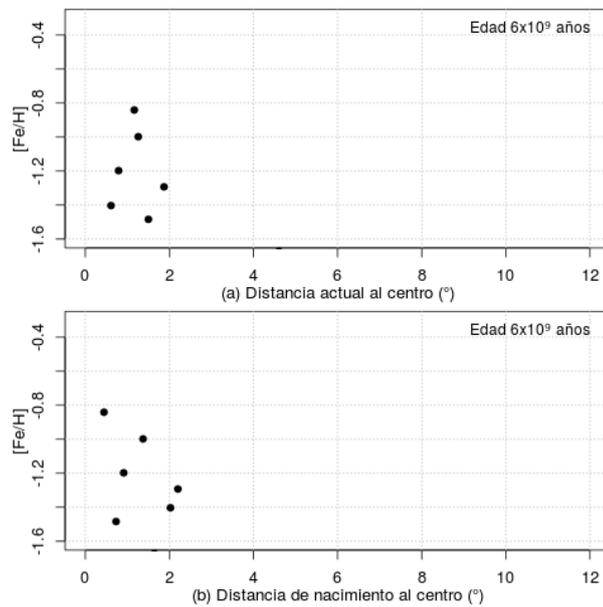


Figura A.12: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t=6 \times 10^9$ años.

APÉNDICE A. RELACIONES RESULTANTES EN MODELOS SIMULADOS

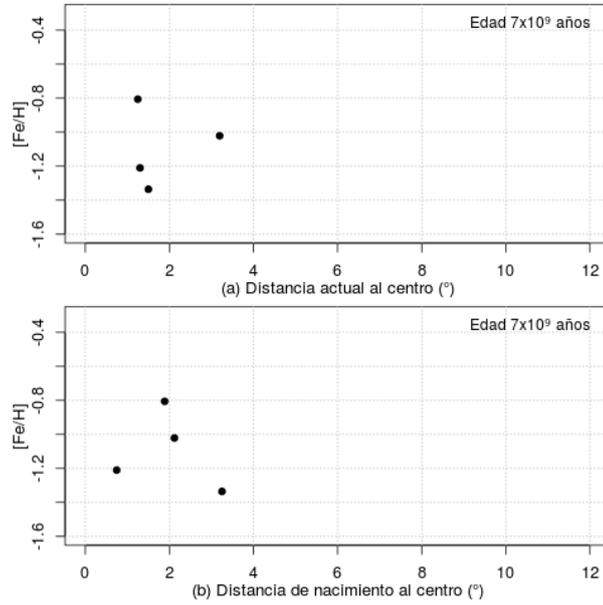


Figura A.13: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t = 7 \times 10^9$ años.

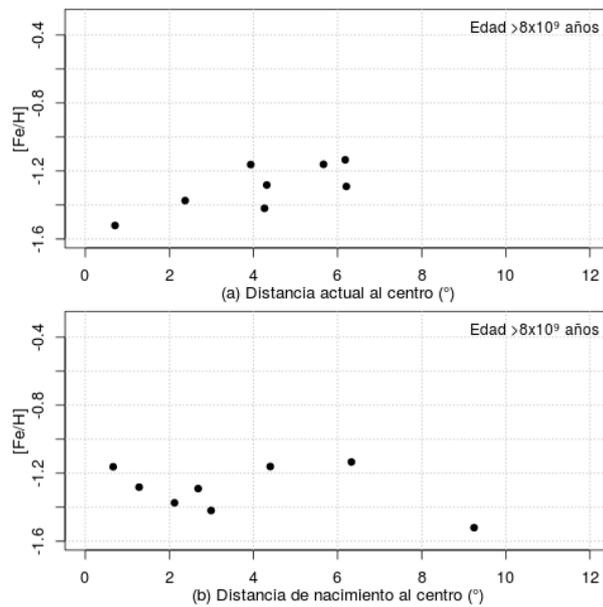


Figura A.14: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t > 8 \times 10^9$ años.

A.3. Modelo 3

Para el Modelo 3 en el cual se presenta la NmM en interacción con la NMM y la VL, y en la que se simula solo el halo de materia oscura de la NmM, los resultados analizados se muestran en las Figuras (A.14–A.21).

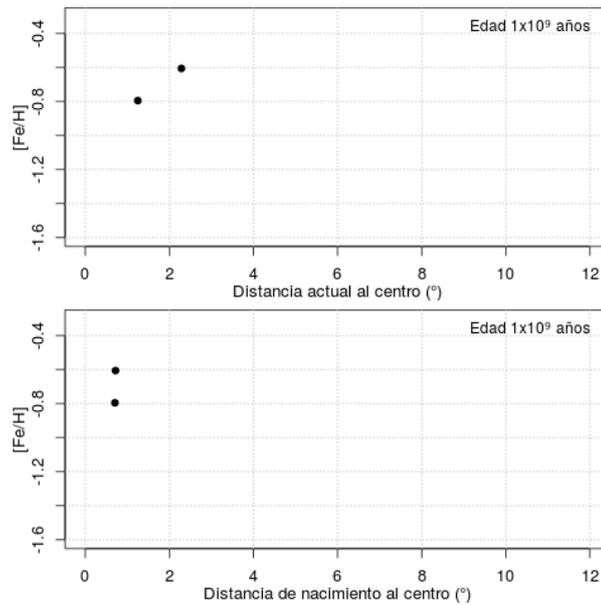


Figura A.15: *Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t = 10^9$ años.*

A.4. Modelo 4

Para el Modelo 4 en el cual se presenta la NmM en interacción con la NMM y la VL, y en la que se simula tanto el halo de materia oscura como el disco estelar y de gas de la NmM, los resultados analizados se muestran en las Figuras (A.22–A.28).

APÉNDICE A. RELACIONES RESULTANTES EN MODELOS SIMULADOS

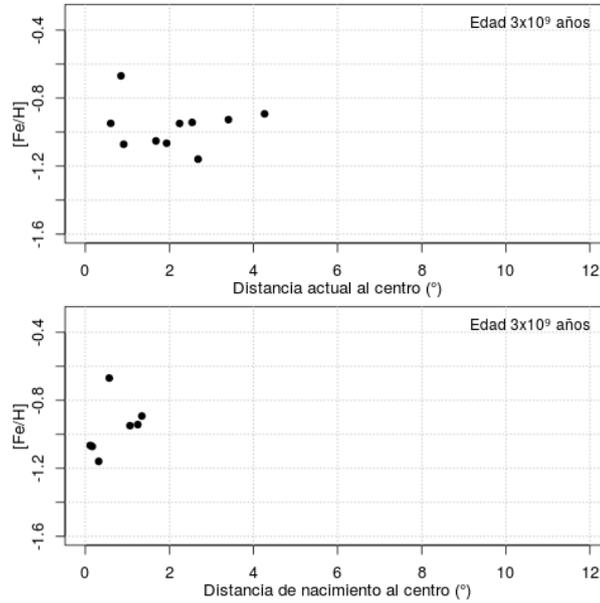


Figura A.16: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t=3 \times 10^9$ años.

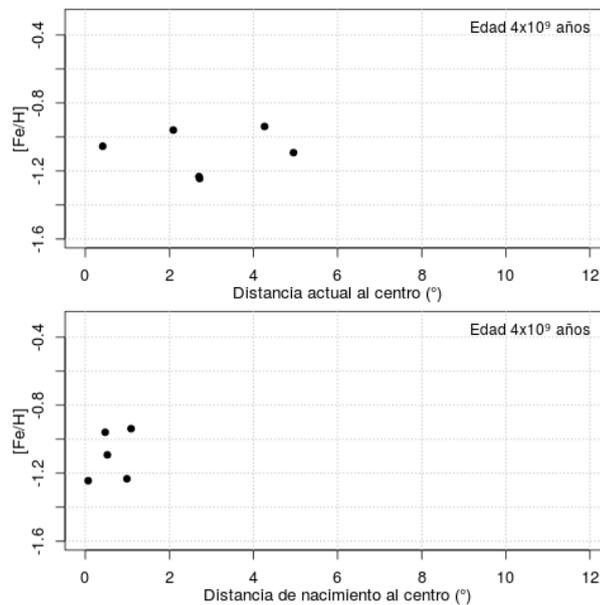


Figura A.17: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t=4 \times 10^9$ años.

APÉNDICE A. RELACIONES RESULTANTES EN MODELOS SIMULADOS

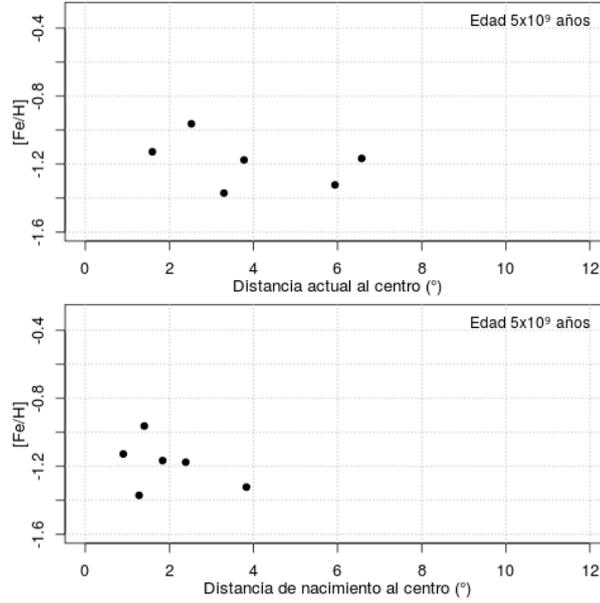


Figura A.18: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t=5 \times 10^9$ años.

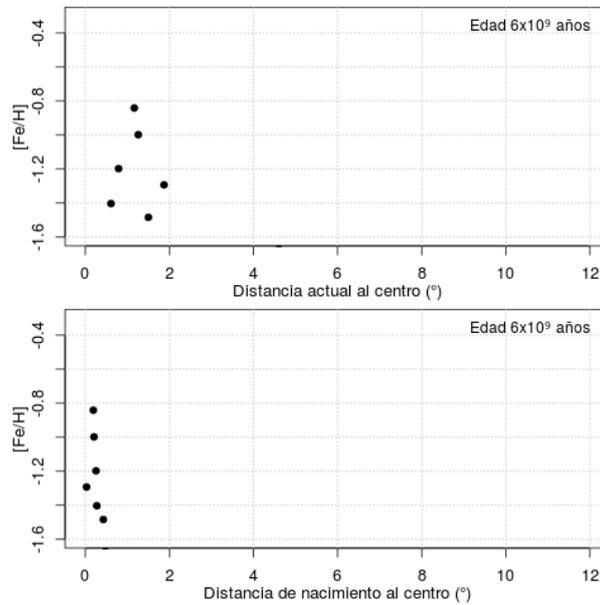


Figura A.19: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t=6 \times 10^9$ años.

APÉNDICE A. RELACIONES RESULTANTES EN MODELOS SIMULADOS

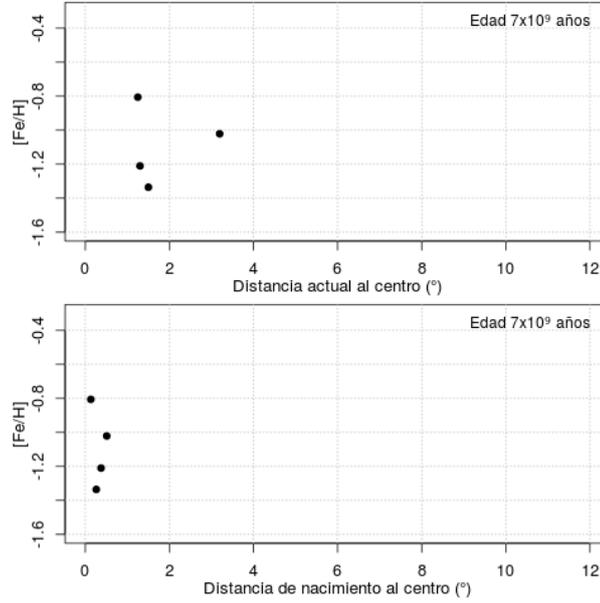


Figura A.20: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t=7 \times 10^9$ años.

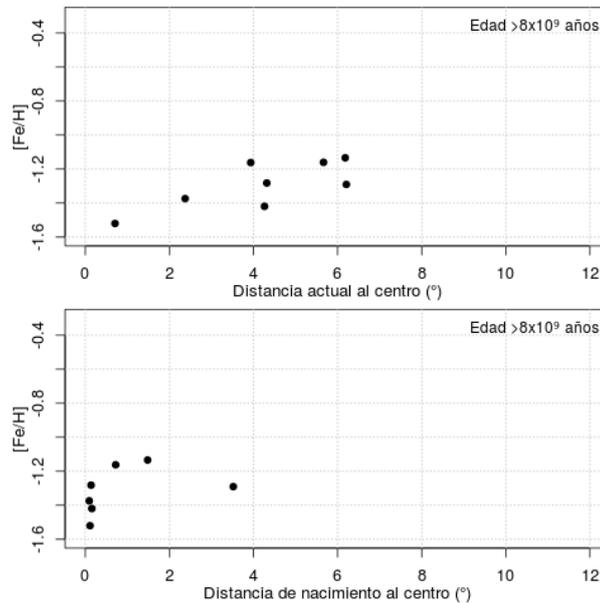


Figura A.21: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t > 8 \times 10^9$ años.

APÉNDICE A. RELACIONES RESULTANTES EN MODELOS SIMULADOS

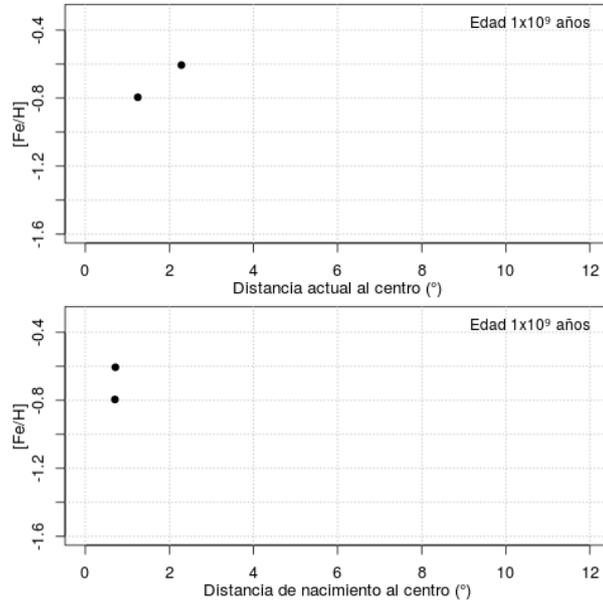


Figura A.22: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t=10^9$ años.

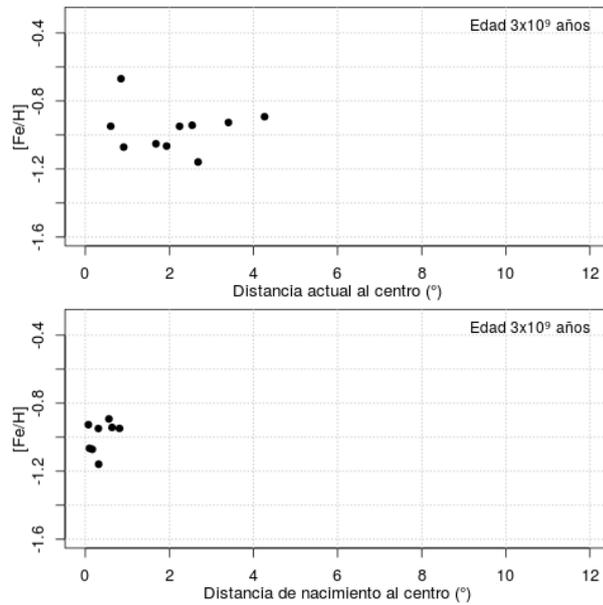


Figura A.23: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t=3 \times 10^9$ años.

APÉNDICE A. RELACIONES RESULTANTES EN MODELOS
SIMULADOS

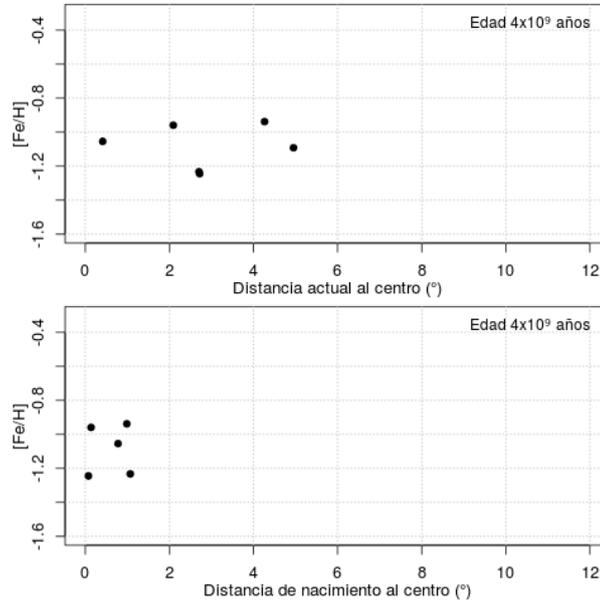


Figura A.24: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t=4 \times 10^9$ años.

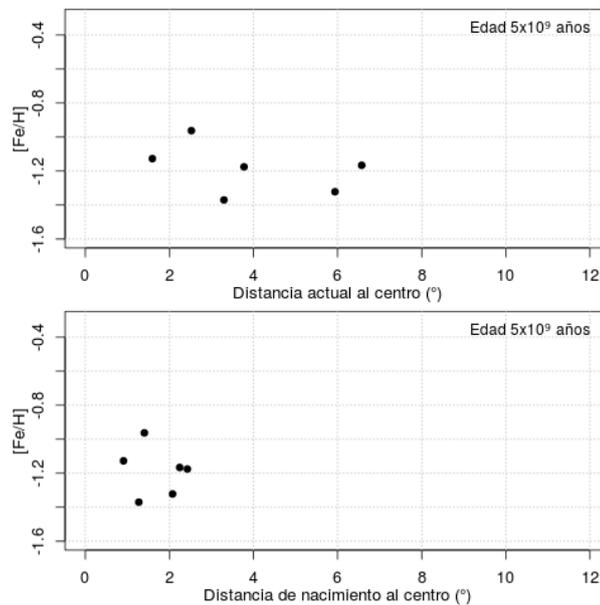


Figura A.25: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t=5 \times 10^9$ años.

APÉNDICE A. RELACIONES RESULTANTES EN MODELOS SIMULADOS

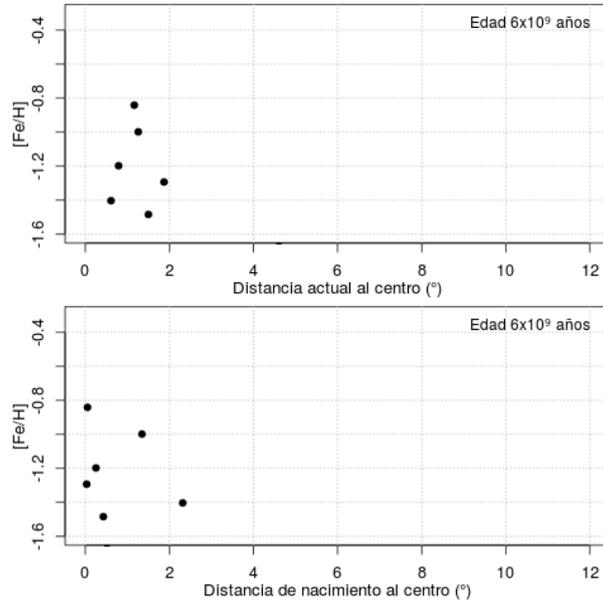


Figura A.26: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t=6 \times 10^9$ años.

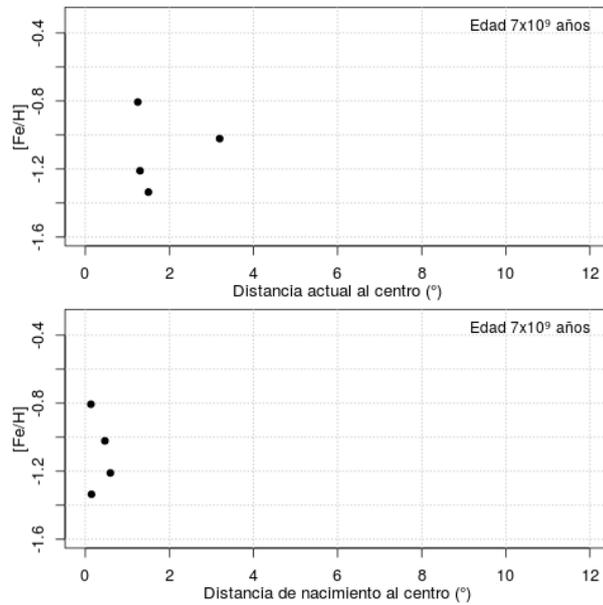


Figura A.27: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t=7 \times 10^9$ años.

APÉNDICE A. RELACIONES RESULTANTES EN MODELOS SIMULADOS

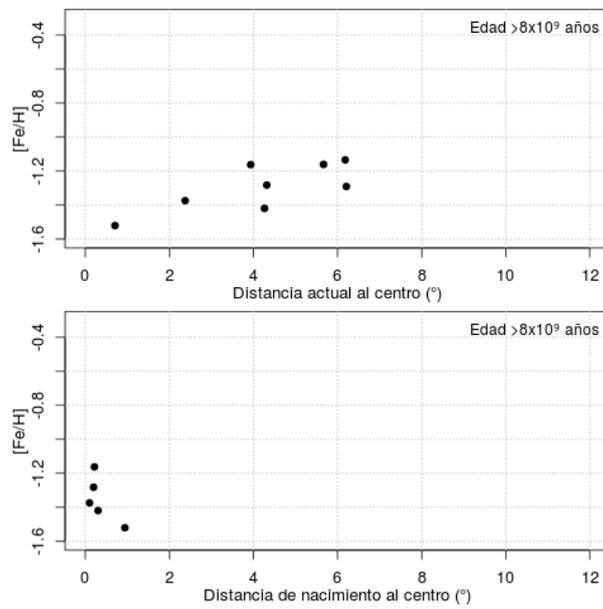


Figura A.28: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t > 8 \times 10^9$ años.

Apéndice B

Relaciones resultantes en modelos para estudio de robustez

En este apéndice se exponen las figuras que ilustran las relaciones $[\text{Fe}/\text{H}]-r_p$ y $[\text{Fe}/\text{H}]-r_n$ de distintos subconjuntos de nuestro catálogo con cúmulos de igual edad para los modelos de estudio de la robustez del programa.

Las mismas no fueron incluidas en las secciones anteriores debido a que comprometerían la claridad de explicación, robándole foco al texto que detalla las actividades realizadas.

B.1. Modelo 5

Para el Modelo 3 en el cual se presenta la NmM en interacción con la NMM y la VL, y en la que se simula solo el halo de materia oscura de la NmM, los resultados analizados se muestran en las Figuras (B.1–B.7).

B.2. Modelo 6

Para el Modelo 4 en el cual se presenta la NmM en interacción con la NMM y la VL, y en la que se simula tanto el halo de materia oscura como el disco estelar y de gas de la NmM, los resultados analizados se muestran en las Figuras (B.8–B.14).

APÉNDICE B. RELACIONES RESULTANTES EN MODELOS PARA ESTUDIO DE ROBUSTEZ

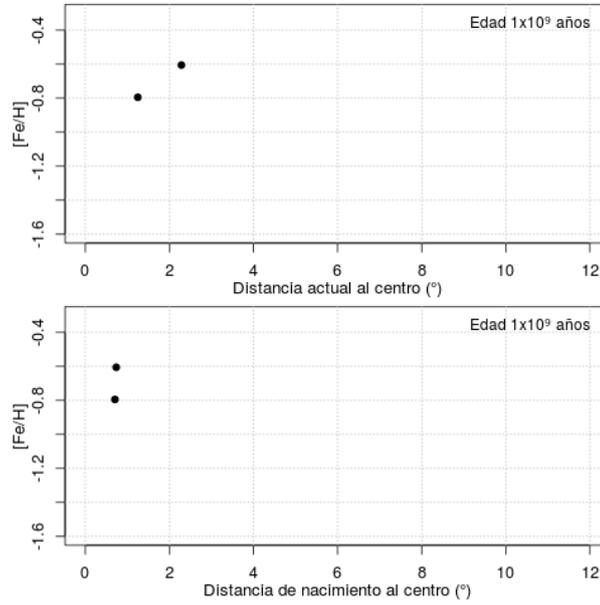


Figura B.1: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t = 10^9$ años.

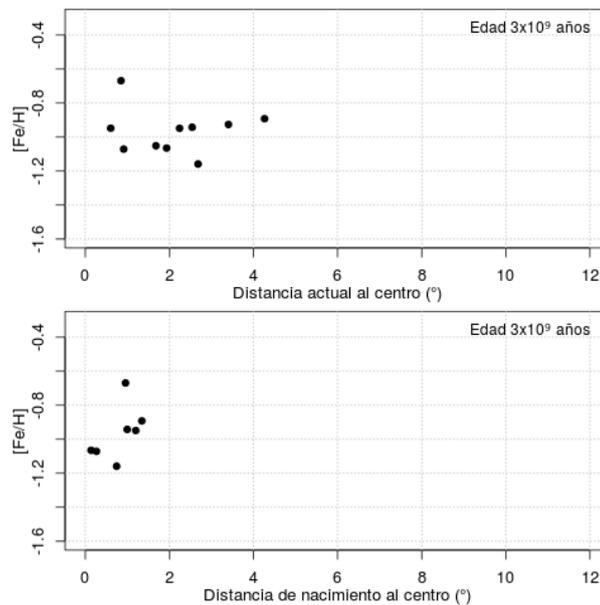


Figura B.2: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t=3 \times 10^9$ años.

APÉNDICE B. RELACIONES RESULTANTES EN MODELOS PARA ESTUDIO DE ROBUSTEZ

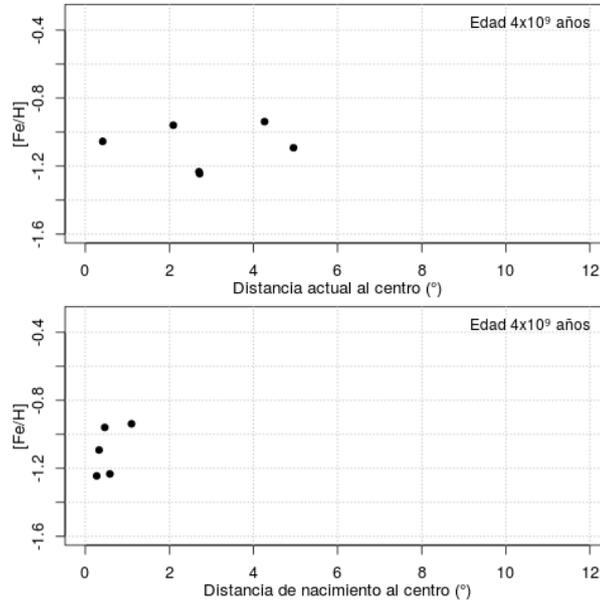


Figura B.3: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t=4 \times 10^9$ años.

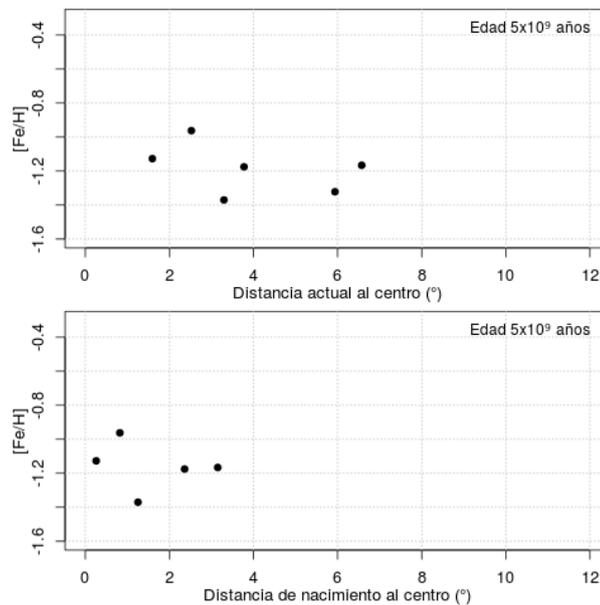


Figura B.4: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t=5 \times 10^9$ años.

APÉNDICE B. RELACIONES RESULTANTES EN MODELOS PARA ESTUDIO DE ROBUSTEZ

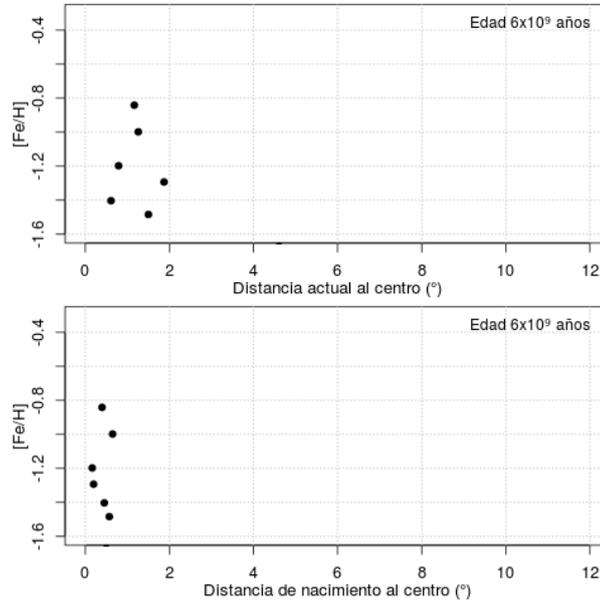


Figura B.5: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t=6 \times 10^9$ años.

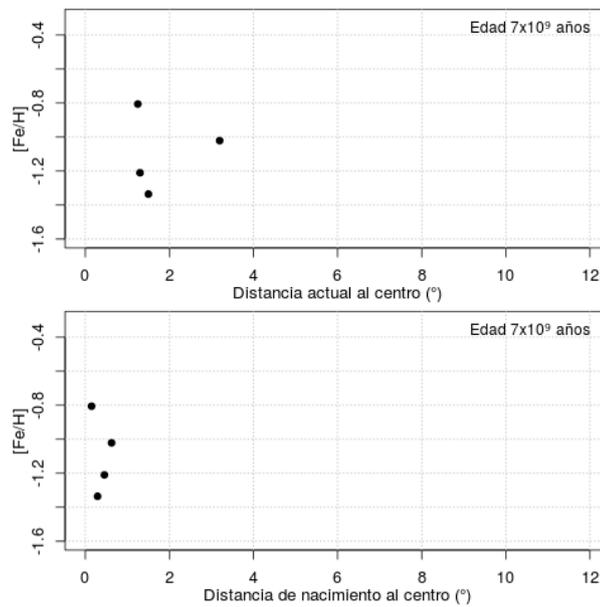


Figura B.6: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t=7 \times 10^9$ años.

APÉNDICE B. RELACIONES RESULTANTES EN MODELOS PARA ESTUDIO DE ROBUSTEZ

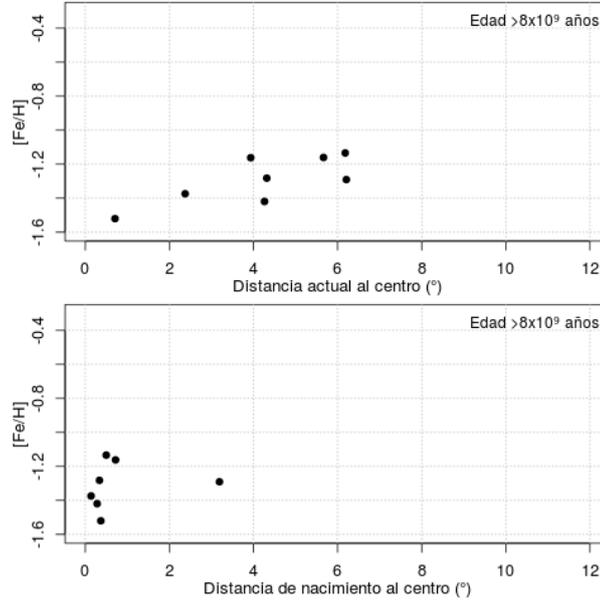


Figura B.7: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t > 8 \times 10^9$ años.

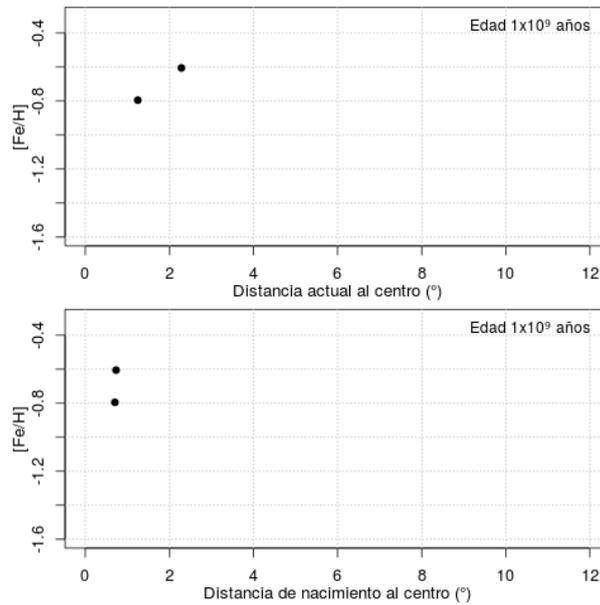


Figura B.8: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t = 10^9$ años.

APÉNDICE B. RELACIONES RESULTANTES EN MODELOS PARA ESTUDIO DE ROBUSTEZ

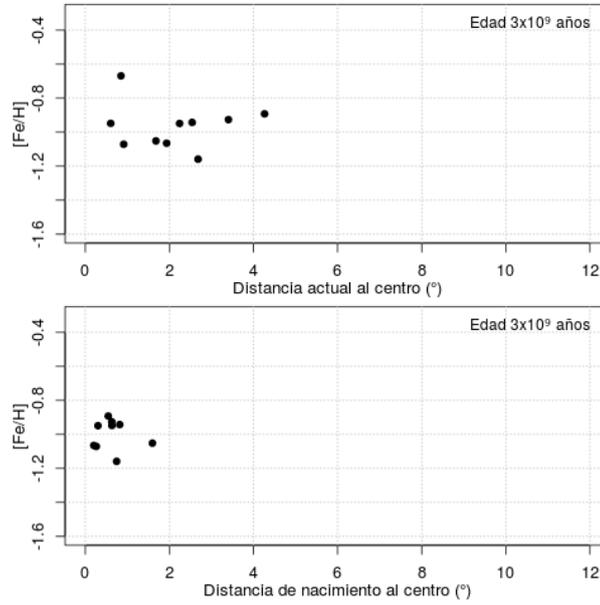


Figura B.9: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t=3 \times 10^9$ años.

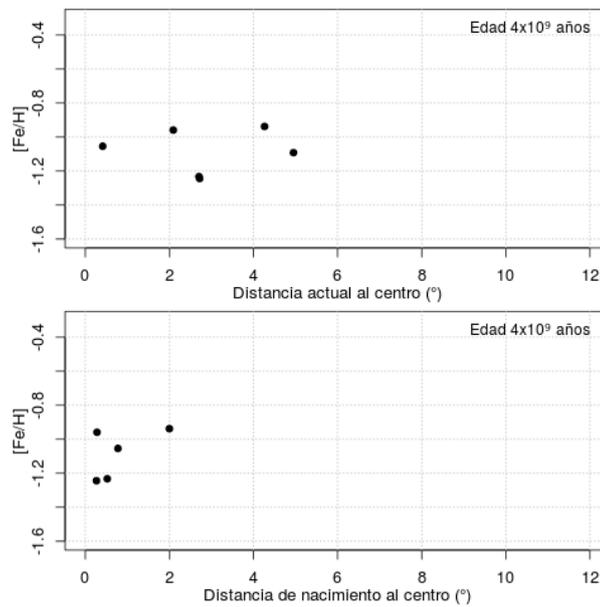


Figura B.10: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t=4 \times 10^9$ años.

APÉNDICE B. RELACIONES RESULTANTES EN MODELOS PARA ESTUDIO DE ROBUSTEZ

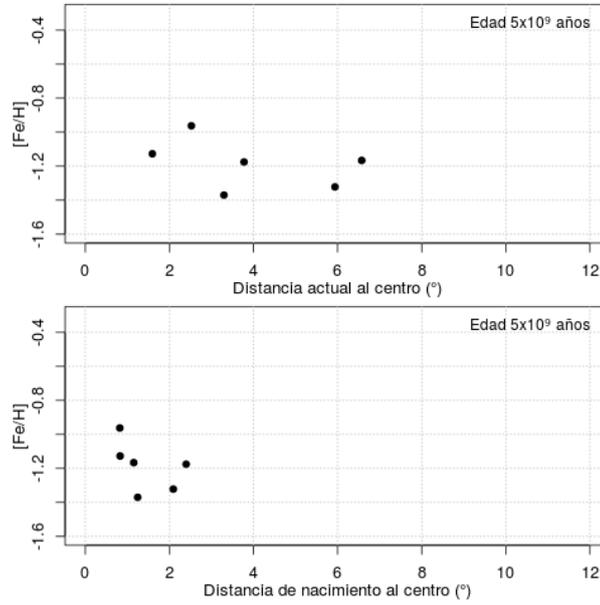


Figura B.11: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t=5 \times 10^9$ años.

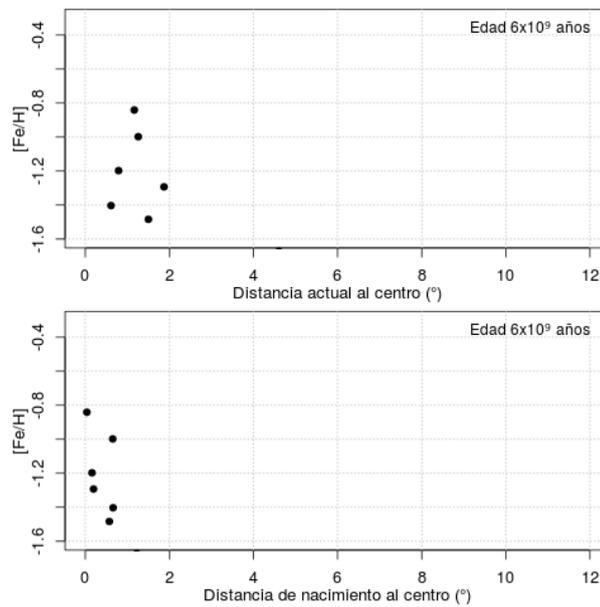


Figura B.12: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t=6 \times 10^9$ años.

APÉNDICE B. RELACIONES RESULTANTES EN MODELOS PARA ESTUDIO DE ROBUSTEZ

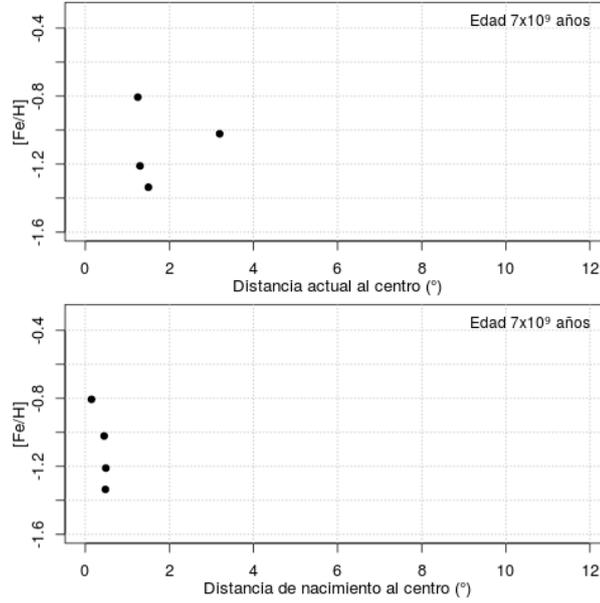


Figura B.13: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t=7 \times 10^9$ años.

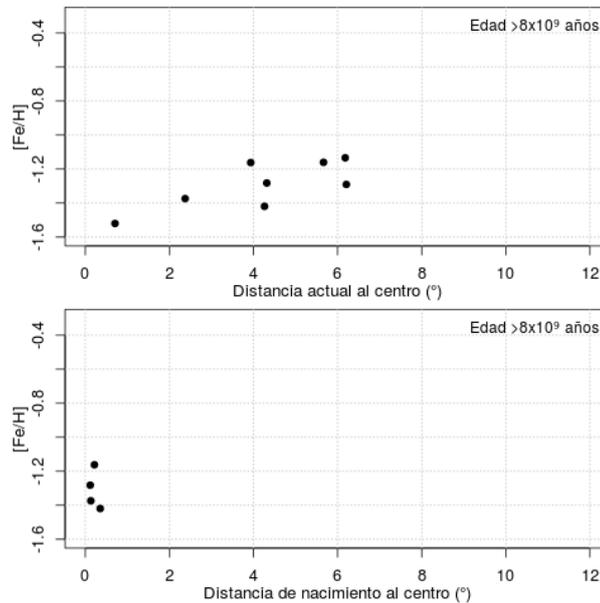


Figura B.14: Abundancia metálica en función de la distancia al centro de la galaxia: a) en el presente, b) al momento del nacimiento de los cúmulos con edades $t > 8 \times 10^9$ años.