
Efectos Sistemáticos en la Diversidad de las Curvas de Rotación de Galaxias Locales

Juan Manuel Pacheco Arias

Trabajo de Grado para Optar el Título de Físico

Director

Juan Carlos Basto Pineda
Doctor en Ciencias Naturales

Codirector

Luis Alberto Núñez de Villavicencio Martínez
Doctor en Ciencias Naturales

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ciencias
Escuela de Física
Bucaramanga
2020

Dedicatoria

A mis padres Yarley y Francisco. Al amor de mi vida Margarita, y a mis amigos Steven, Rolando, Laura y Lucía. Sin ustedes todo esto no hubiera sido posible.

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento a todos los profesores de la Universidad Industrial de Santander que orientaron mi formación, en especial a mi director Juan Carlos Basto y mi codirector Luis Núñez.

Al grupo Halley por su incondicional apoyo a lo largo de toda mi carrera, y cada una de las personas que conocí en el grupo encargadas de enriquecer de manera incalculable mi formación profesional.

A la Universidad Industrial de Santander, a la Facultad de Ciencias y la Escuela de Física, por apoyarme en todos los eventos en los cuales participé.

A mis padres por su apoyo incondicional a lo largo de toda mi formación.

A Margarita por su amor, apoyo, motivación y compañía en cada momento de mi vida.

A mis amigos, Steven, Rolando, Laura y Lucía, que fueron incondicionales en toda mi formación como físico y persona a lo largo de la universidad, y a mis amigos de carrera por las maravillosas discusiones.

Tabla de contenido

Introducción	10
1 Simulaciones, galaxias y cosmología	12
1.1 Modelo cosmológico estándar Λ CDM	12
1.2 Simulaciones cosmológicas	14
1.3 Observaciones vs simulaciones	16
1.4 Curvas de rotación	19
1.5 Pregunta de investigación	23
2 Experimentos con observaciones sintéticas	25
2.1 Caracterización de la población de galaxias de interés	26
2.2 AURORA: observaciones sintéticas	31
2.3 Curvas de rotación sintéticas	39
2.4 Estudio sistemático de factores observacionales	43
3 Resultados	48
3.1 Velocidad circular en las simulaciones	48
3.2 Efecto de factores observacionales	51
3.3 Efecto de errores observacionales	55
3.4 Recomendaciones y perspectivas	58
4 Conclusiones	60
Referencias	62
Apéndice	68

Lista de figuras

1.1	<i>Fondo de radiación cósmico de microondas (CMB), construido a partir de las observaciones del telescopio Planck.</i>	13
1.2	<i>Representaciones visuales de algunas simulaciones de estructuras a gran escala y formación de galaxias, dependiendo del tipo de componentes empleadas y las condiciones iniciales establecidas.</i>	15
1.3	<i>Densidades estelares proyectadas en $z = 0$ para seis simulaciones hidrodinámicas cosmológicas de alta resolución enmarcadas dentro del proyecto Auriga.</i>	16
1.4	<i>Perfiles de densidad de materia oscura para regiones centrales tipo core y para regiones centrales tipo cusp, en comparación con algunos perfiles inferidos a partir de observaciones cinemáticas.</i>	18
1.5	<i>Curvas de rotación para galaxias enanas irregulares con aproximadamente la misma velocidad máxima de rotación y masas similares.</i>	19
1.6	<i>Ejemplo ilustrativo de un cubo de datos producido por un espectrógrafo de campo integral para la galaxia NGC3583.</i>	20
1.7	<i>Mapa de intensidad y velocidad, para observaciones sintéticas.</i>	21
1.8	<i>Visualización de las coordenadas r, R, ϕ, θ y ψ, necesarias para relacionar V_c y V_{los}.</i>	22
1.9	<i>Mapa de velocidades para un modelo idealizado de disco en rotación con elipses tipo KINEMETRY superpuestas.</i>	23
2.1	<i>Imágenes extraídas de la base de datos NED para 3 galaxias del catálogo de observaciones.</i>	26
2.2	<i>Principales características de la muestra de galaxias utilizadas en el estudio de Oman y cols. (2015) a través de histogramas acumulativos normalizados.</i>	27
2.3	<i>Velocidad circular a los 2 kpc ($V_{2\text{kpc}}$) de radio en km s^{-1}, contra la velocidad circular máxima (V_{max}) en km s^{-1}.</i>	28
2.4	<i>Mapas de densidad de gas para las galaxias simuladas en Pineda, Hayward, Springel, y Mendes de Oliveira (2017) en sus proyecciones frontales (face-on).</i>	29
2.5	<i>Mapas bidimensionales de exploración de parámetros para las características más relevantes de la muestra de galaxias simuladas y observadas.</i>	31
2.6	<i>Definición de los ángulos de inclinación (ϕ) y posición (θ).</i>	36
2.7	<i>Principales características asociadas a la clase SpectromObj.</i>	37
2.8	<i>Características generales de las partículas filtradas por el modulo de acople GADGET-AURORA.</i>	38
2.9	<i>Mapas de intensidad y de velocidad para la línea de emisión H_α, en el caso de la galaxia Dwarf1 en su snapshot 500.</i>	39

2.10	<i>Mapas de intensidad y de velocidad para la línea de emisión HI, en el caso de la galaxia Dwarf1 en su snapshot 500.</i>	40
2.11	<i>Mapas de intensidad y de velocidad para la línea de emisión H_α, para la galaxia UGC4325.</i>	40
2.12	<i>Construcción de las curvas de rotación long-slit.</i>	41
2.13	<i>Construcción de las curvas de rotación 2D.</i>	43
2.14	<i>Mapa de intensidad para la línea de emisión H_α, con ángulo de inclinación de 30° y 75°, para la galaxia Dwarf2 snapshot 500.</i>	44
2.15	<i>Mapa de velocidad para la línea de emisión HI, con ángulo de inclinación de 30° (izquierda) y 75° (derecha), para la galaxia Dwarf1 snapshot 500.</i>	45
2.16	<i>Mapa de intensidad para la línea de emisión H_α, para dos valores resoluciones de la galaxia Dwarf1 snapshot 300.</i>	46
2.17	<i>Mapa de velocidad para la línea de emisión H_α, para dos valores resoluciones de la galaxia Dwarf1 snapshot 300.</i>	46
2.18	<i>Mapa de velocidad para la línea de emisión H_α, luego de la pérdida de información y la inclusión de procesos de simulación de ruido, para la galaxia G0 snapshot 500.</i>	47
3.1	<i>Velocidad circular en función del radio para cada una de las simulaciones, construidas con los métodos tradicionales.</i>	49
3.2	<i>Velocidad circular a los 2 kpc de radio vs velocidad circular máxima. Comparación entre los valores obtenidos con los métodos tradicionales para las simulaciones y los datos observacionales.</i>	50
3.3	<i>Curvas de rotación obtenidas al variar los factores observacionales en los experimentos sintéticos.</i>	51
3.4	<i>Velocidad circular a los 2 kpc de radio vs velocidad circular máxima. Comparación entre los valores obtenidos con los experimentos sintéticos para las simulaciones y los datos observacionales.</i>	52
3.5	<i>Variaciones de V_{2kpc} y V_{max} para errores aleatorios de máximo 5° (izquierda) y máximo 10° (derecha) en la determinación del ángulo de inclinación.</i>	55
3.6	<i>Variaciones de V_{2kpc} y V_{max} para errores aleatorios de 10% (izquierda) y 20% (derecha) en la determinación de la distancia a la galaxia.</i>	56
3.7	<i>Variaciones de V_{2kpc} y V_{max} para pérdida de información del 30% (izquierda) y la inclusión de ruido gaussiano en los mapas de velocidad (derecha).</i>	57
4.1	<i>Principales características de la muestra de galaxias utilizadas en el estudio de Oman y cols. (2015), coloreadas según la especie atómica observada.</i>	69

Lista de tablas

2.1	<i>Propiedades básicas de la muestra de galaxias simuladas.</i>	30
2.2	<i>Galaxias albergadas dentro de la muestra de observaciones para cada rango de valores del ángulo de inclinación (Oman y cols., 2015).</i>	44
2.3	<i>Galaxias albergadas dentro de la muestra de observaciones para cada rango de valores de la resolución espacial (Oman y cols., 2015).</i>	45
3.1	<i>Variabilidad porcentual emergente para V_{2kpc} reproducida por las observaciones sintéticas de manera individualizada.</i>	53
3.2	<i>Variabilidad porcentual emergente para V_{2kpc} reproducida por las observaciones sintéticas de manera colectiva.</i>	54
3.3	<i>Variabilidad porcentual emergente para V_{2kpc} reproducida por las observaciones sintéticas en conjunto cuando se incluyen errores en el ángulo de inclinación.</i>	56
3.4	<i>Variabilidad porcentual emergente para V_{2kpc} reproducida por las observaciones sintéticas en conjunto cuando se incluyen errores en la distancia.</i>	57
3.5	<i>Variabilidad porcentual emergente para V_{2kpc} reproducida por las observaciones sintéticas en conjunto cuando se incluye pérdida de información y ruido.</i>	58
3.6	<i>Variabilidad porcentual emergente para V_{2kpc} reproducida por las observaciones sintéticas en conjunto cuando se incluyen más snapshots en la galaxia Dwarf1.</i>	59
4.1	<i>Propiedades básicas de la muestra de galaxias observadas.</i>	70

Resumen

TÍTULO: Efectos Sistemáticos en la Diversidad de las Curvas de Rotación de Galaxias Locales*.

AUTOR: Juan Manuel Pacheco Arias[†]

PALABRAS CLAVE: Curvas de rotación, Efectos sistemáticos, Materia oscura, Cosmología.

DESCRIPCIÓN:

Las observaciones cinemáticas de galaxias en el Universo local son una fuente primaria de información sobre las propiedades de dichos objetos. Esta información, codificada en las curvas de rotación, es fundamental para estudiar la formación y evolución de los sistemas galácticos, así como para cuantificar su contenido de materia oscura. Abonado a lo anterior, las simulaciones cosmológicas de formación de estructuras se han mostrado invaluable para el estudio de la evolución del Universo y el desarrollo de las galaxias en él. Dichas simulaciones han logrado reproducir con éxito un gran número de observaciones en el contexto del paradigma cosmológico Λ CDM. Sin embargo, existen discrepancias notables respecto a algunos resultados observacionales. Una de las más recientes disyuntivas reportadas, es la diversidad de formas en las curvas de rotación de galaxias enanas en el Universo local. Dicha diversidad contrasta con la aparente homogeneidad de curvas en las simulaciones cosmológicas hidrodinámicas. Estudios anteriores, en problemas similares, han mostrado que discrepancias de este tipo pueden aliviarse al considerar cuidadosamente el efecto de factores observacionales en esta comparativa. Por tal motivo, este trabajo cuantificó el impacto que tienen algunos efectos sistemáticos asociados a las observaciones, en la diversidad de las curvas de rotación sintéticas. Como conclusión, nuestros experimentos reprodujeron, de forma espontánea, hasta un 47% de la diversidad reportada en las observaciones. Esto permitió aliviar la tensión entre observaciones y simulaciones, sin la necesidad de alterar el modelo cosmológico estándar de materia oscura fría.

*Trabajo de Grado

[†]Facultad de Ciencias, Escuela de Física, Juan Carlos Basto Pineda (Director)

Abstract

TITLE: Systematic Effects on the Diversity of the Rotation Curves of Local Galaxies*.

AUTHOR: Juan Manuel Pacheco Arias[†]

KEYWORDS: Rotation curves, Systematic effects, Dark matter, Cosmology.

DESCRIPTION:

Kinematic observations of galaxies in the local Universe are a primary source of information about the properties of these objects. This information, encoded in the rotation curves, is fundamental to study the formation and evolution of galactic systems, as well as to quantify their dark matter content. The cosmological simulations of structure formation have proved to be invaluable for the study of the evolution of the Universe and the development of galaxies in it. These simulations have successfully reproduced a large number of observations in the context of the cosmological paradigm Λ CDM. However, there are remarkable discrepancies with respect to some observational results. One of the most recent reported disjunctions is the diversity of shapes in the rotation curves of dwarf galaxies in the local Universe. This diversity contrasts with the apparent homogeneity of curves in cosmological hydrodynamic simulations. Previous studies on similar problems have shown that such discrepancies can be alleviated by considering the effect of observational factors in this comparison. For this reason, this work quantified the impact that some systematic effects, associated to the observations, have on the diversity of the synthetic rotation curves. In conclusion, our experiments spontaneously reproduced up to 47 % of the diversity reported in the observations. This allowed to alleviate the tension between observations and simulations, without the need to alter the standard cosmological model of cold dark matter.

*Bachelor Thesis

[†]Facultad de Ciencias, Escuela de Física, Juan Carlos Basto Pineda (Director)

Introducción

Las galaxias son las piezas fundamentales que componen la estructura a gran escala del Universo, y constituyen el producto final de cerca de $\sim 13,7$ mil millones de años de evolución desde el Big Bang. Su estudio es un área de investigación permanente que aporta información sustancial para entender la historia del cosmos (Fukugita, Hogan, y Peebles, 1996). Enormes catálogos de observaciones se han construido con el objetivo de ahondar en la comprensión de los procesos que rigen la formación y evolución de las galaxias, permitiendo establecer las características de dichos objetos (Schneider, 2014). Así, se ha descubierto que existen tendencias globales universales en muchas de estas propiedades (p.ej. Faber y Jackson (1976); Tully y Fisher (1977)). Sin embargo, las observaciones también han mostrado una gran diversidad en las propiedades lumínicas, morfológicas y espectrales de las galaxias. Entender el origen de esta diversidad es una de las preguntas abiertas más importantes en la astrofísica extragaláctica (Papovich, Dickinson, Giavalisco, Conzelmann, y Ferguson, 2005).

En este contexto, uno de los métodos que ha ganado mayor relevancia en el estudio de la evolución del Universo son las simulaciones numéricas hidrodinámicas, basadas principalmente en el modelo estándar de la cosmología Λ CDM. Estas simulaciones han logrado replicar con éxito la formación de estructuras a gran escala y, más recientemente, han conseguido producir poblaciones de galaxias consistentes con múltiples observaciones (Vogelsberger y cols., 2014). Sin embargo, también se han reportado discrepancias notables a partir de la comparación entre observaciones y simulaciones cosmológicas, cuyo origen es muy importante entender.

Dos de las discrepancias más conocidas en debate son: 1) el problema *cusp – core* (Moore, 1994), que expone la dicotomía entre las regiones centrales de los perfiles de densidad de materia oscura observados (tipo *core*^{*}) y aquellos producidos de forma espontánea en las simulaciones cosmológicas de materia oscura fría (tipo *cusp*[†]); 2) la diversidad de las curvas de rotación de galaxias enanas en el Universo local (Oman y cols., 2015), que no puede ser reproducida por las simulaciones cosmológicas. Dichas problemáticas revisten gran interés porque suscitan dudas sobre el modelo cosmológico estándar Λ CDM y la capacidad de las simulaciones para reproducir la gama de propiedades observadas en galaxias reales.

En el caso del problema *cusp – core*, se ha mostrado que la acción de efectos sistemáticos ob-

^{*}Término proveniente del inglés que se traduce como núcleo. Es usado en la literatura para referirse a perfiles centrales de densidad de materia oscura constantes.

[†]Término proveniente del inglés que se traduce como cúspide. Es usado en la literatura para referirse a perfiles centrales de densidad de materia oscura que crecen hasta divergir en el origen.

servacionales puede generar la ilusión de detección de perfiles de densidad de materia oscura tipo *core* cuando la realidad se corresponde con una tipo *cusp* (Pineda y cols., 2017). Esta alternativa se ha investigado mediante experimentos controlados con simulaciones, mostrando que factores observacionales como: las desviaciones de simetría, el soporte de presión, los movimientos no circulares, la resolución espacial, la distancia y el ángulo de inclinación, bastan para generar dicha ilusión.

Siguiendo esta línea, es claro que sería interesante, y de gran valor, aplicar una metodología similar al problema de la diversidad de curvas de rotación. Así, el objetivo de este trabajo es identificar y cuantificar la incidencia de posibles efectos sistemáticos observacionales en el origen de las variaciones reportadas. Para ello haremos uso de observaciones sintéticas realistas, generadas a partir de simulaciones de galaxias, que nos permitirán establecer ¿hasta qué punto aumenta la diversidad en las curvas de rotación de las simulaciones, al incluir algunos de los efectos sistemáticos a los que están sometidas las observaciones?. Finalmente, se esclarecerá si las discrepancias reportadas atienden efectivamente, o no, a la posible incapacidad de las simulaciones para reproducir los procesos bariónicos realistas.

El primer capítulo de esta tesis de grado presenta el marco teórico indispensable para entender la tensión entre simulaciones y observaciones. Ahí mostramos como los procesos de observación sintéticos son una herramienta para abordar el estudio de esta problemática. El segundo capítulo expone la metodología empleada para la generación de las observaciones sintéticas y el estudio sistemático de los efectos observacionales. También se describe la población de galaxias y simulaciones utilizadas en este estudio. El tercer capítulo presenta los resultados obtenidos, cuantificando la incidencia de los efectos sistemáticos en la diversidad de curvas de rotación, de manera individual y conjunta. Finalmente, el cuarto capítulo describe las conclusiones obtenidas con esta metodología, y enumera algunos aspectos claves a ser considerados para futuros trabajos propuestos.

Este trabajo de grado se encuentra enmarcado dentro del desarrollo del proyecto VIE número 2494, que lleva por título “Simulaciones de galaxias distantes: tras las marcas de fusiones galácticas en los mapas de velocidad”, y toda su documentación y códigos de análisis se encuentran recopilados y presentados en un repositorio Github*.

*https://github.com/juan-pineda/Tesis_2_Curvas_de_rotacion

1. Simulaciones, galaxias y cosmología

*‘Physics is not only about equations, but also about their solutions.’
Volker Springel*

Este capítulo describe el origen de la tensión entre las simulaciones y las observaciones de galaxias, seguido de la exposición de las principales alternativas de solución discutidas en la literatura. Para esto, se hace un recorrido histórico por la evolución de las simulaciones cosmológicas, desde sus inicios como herramientas para explorar las predicciones sobre la estructura del Universo a gran escala en el modelo Λ CDM considerando la presencia de solo materia oscura, hasta el desarrollo de las simulaciones hidrodinámicas de formación de galaxias en un contexto cosmológico.

Posteriormente se expone la problemática, entre los perfiles centrales de densidad de materia oscura extraídos de las simulaciones y los inferidos a partir de las observaciones de galaxias. Mostrando las soluciones planteadas para aliviar dicha tensión como una motivación para el establecimiento de la metodología seguida en este trabajo. Finalmente, se introduce al problema estudiado en esta tesis: la inesperada diversidad en las curvas de rotación de las galaxias enanas en el Universo local (Oman y cols., 2015).

Luego se profundiza en los procesos observacionales para construir las curvas de rotación, identificando las limitaciones instrumentales, y los parámetros sensibles a la aparición de posibles efectos sistemáticos en este tipo de observaciones. Finalmente, se concluye con la pregunta de investigación que motiva esta tesis, y se presenta la metodología empleada para darle respuesta.

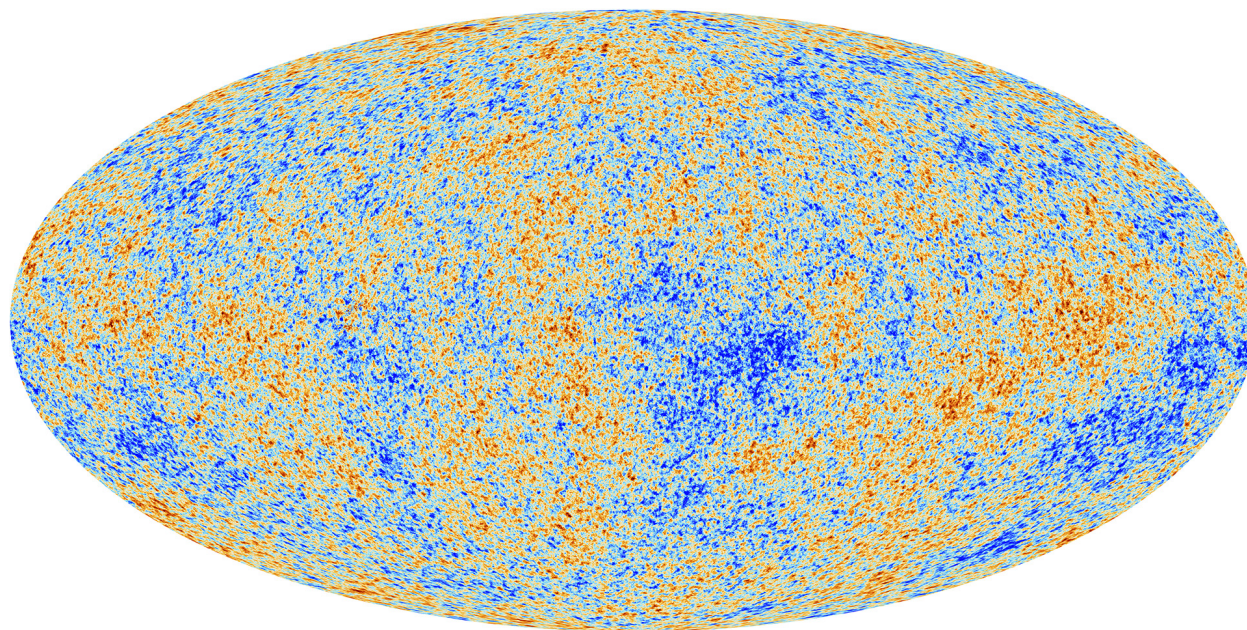
1.1. Modelo cosmológico estándar Λ CDM

El modelo cosmológico estándar contempla la existencia de un Universo denso y caliente en algún instante del pasado, es decir, un Universo con Big Bang. Esto se encuentra firmemente sustentado por tres observables cosmológicos: la expansión del Universo (Hubble, 1929), la abundancia de elementos ligeros (Alpher, Bethe, y Gamow, 1948) y el fondo de radiación cósmica de microondas (CMB) (Alpher y Herman, 1948; Penzias y Wilson, 1965), sumados al sustento teórico provisto por la teoría general de la relatividad. Abonado a lo anterior, el modelo cosmológico estándar necesita de la inclusión del paradigma inflacionario, a través del cual se puede explicar la suavidad e isotropía presentes en el CMB, por medio de una expansión acelerada del universo

justo después de la era de Planck* (Linde, 1982).

Figura 1.1

Fondo de radiación cósmico de microondas (CMB), construido a partir de las observaciones del telescopio Planck.



Nota. Observable fundamental en la corroboración del Big Bang y el elemento por el cual se hace necesaria la inclusión del paradigma inflacionario para dar explicación a las pequeñas anisotropías presentes en él.*.

Las principales componentes del modelo Λ CDM son la constante cosmológica (Λ) y la materia oscura fría (CDM). La materia oscura fría es materia con una dispersión baja de velocidades y que no presenta interacciones electromagnéticas, con lo que solo puede ser detectada de manera indirecta a través de su efecto gravitacional (Rubin, Ford Jr, y Thonnard, 1978; Zwicky, 1933). La constante cosmológica, cuya naturaleza es desconocida, provee del carácter repulsivo a la expansión acelerada del cosmos. Estas dos componentes, CDM y Λ , tienen aproximadamente un 26 % y un 69 %, respectivamente, del contenido energético del cosmos, mientras que la materia bariónica solo compone un 5 %, dejando a la radiación y los neutrinos menos del 1 % del contenido energético total (Ade y cols., 2014).

El modelo Λ CDM ha sido exitoso explicando numerosas observaciones, como las fluctuaciones del CMB (Ade y cols., 2014), las distancias inferidas a través de supernovas de tipo 1a (Betoule y cols., 2014) y las oscilaciones acústicas de los bariones (Blake y cols., 2011). Abonado a lo anterior, este modelo ha permitido determinar la historia de la expansión del Universo mediante la comprensión de las componentes del fluido cosmológico, logrando predicciones estadísticas de la distribución de estructuras a gran escala.

*Período de tiempo en la historia del universo comprendido entre 0 y 10^{-43} segundos

*Tomado de: https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Planck/Planck_and_the_cosmic_microwave_background

En el modelo Λ CDM, se espera que las galaxias habiten dentro de halos de materia oscura. Estos halos fueron las primeras estructuras en colapsar en la historia del cosmos, ya que durante la época en la que materia bariónica y la radiación estaban acopladas, la materia oscura pudo empezar a formar los pozos de potencial, donde después caería el gas para formar las galaxias. Al no ser observables de forma directa, una manera de caracterizar estos halos de materia oscura es a partir de los datos cinemáticos de las galaxias observadas (curvas de rotación), que permiten inferir sus perfiles de densidad asumiendo un estado de equilibrio dinámico.

1.2. Simulaciones cosmológicas

Las simulaciones cosmológicas computacionales se han convertido en una herramienta fundamental para estudiar las propiedades, formación y evolución de galaxias, modelando los principales procesos físicos que determinan dicha formación y evolución (Vogelsberger, Marinacci, Torrey, y Puchwein, 2020). Estos procesos son tan complejos, que el uso de herramientas computacionales supone una gran ventaja en la realización de esta labor.

Las simulaciones se pueden dividir en:

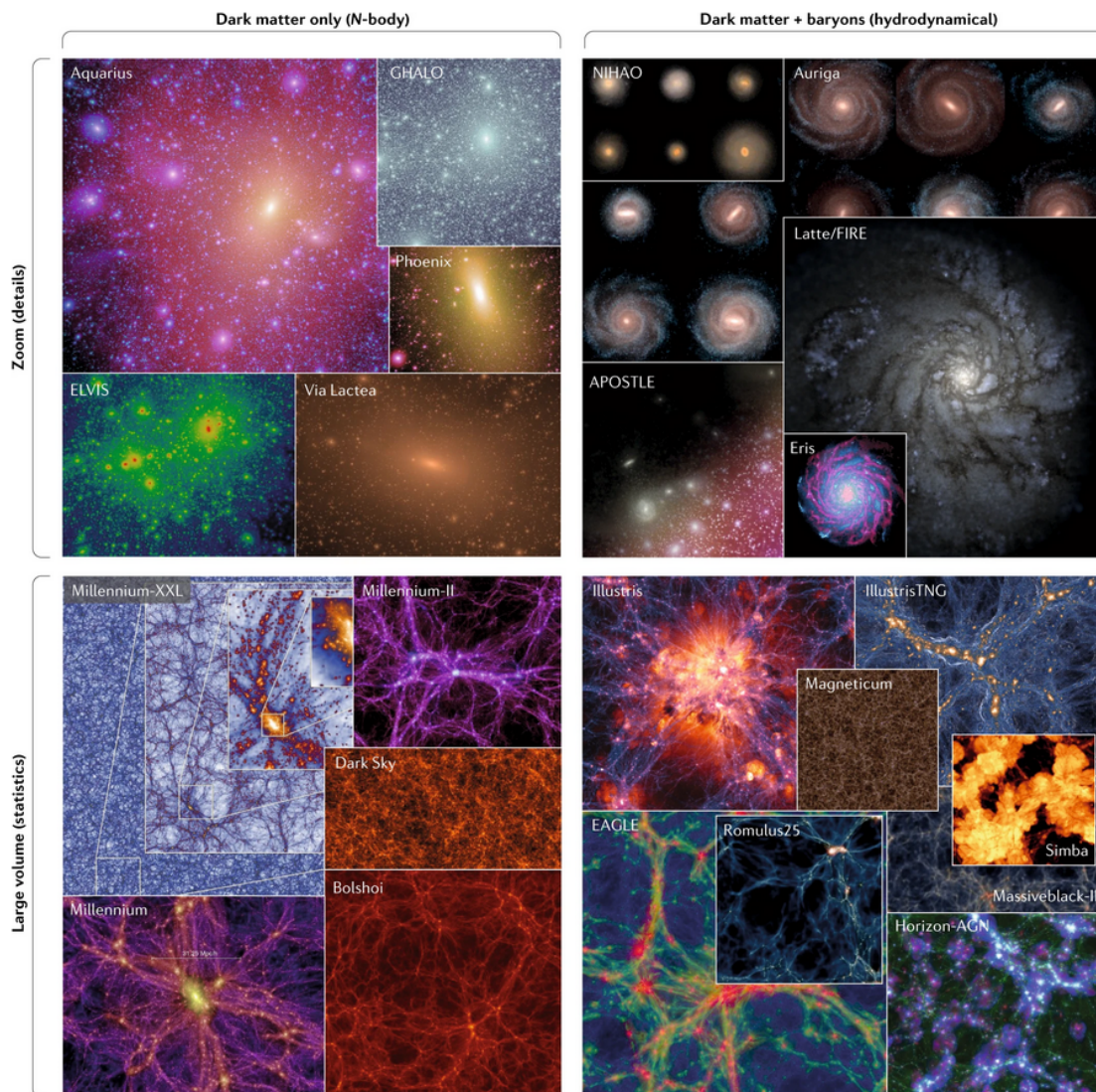
- Tipo grandes volúmenes, que proveen muestras estadísticamente representativas de galaxias y logran reproducir las estructuras a gran escala del Universo.
- Tipo *Zoom-in*, que se encargan de resolver en mayor detalle las pequeñas escalas para estudiar los principales procesos físicos involucrados en la formación y evolución de las galaxias.

Así mismo, las simulaciones también pueden ser clasificadas en: solo materia oscura, como las simulaciones de N cuerpos, y materia oscura y bariónica, como las hidrodinámicas.

Tradicionalmente las simulaciones de solo materia oscura han sido utilizadas para estimar la formación de estructuras a gran escala. Las hidrodinámicas buscan estudiar los procesos de formación de galaxias una vez que la materia bariónica se precipita dentro de los halos de materia oscura, logrando, recientemente, empezar a reproducir con éxito algunas propiedades importantes de las galaxias observadas (Vogelsberger y cols., 2020) como se puede visualizar en la figura 1.2.

Figura 1.2

Representaciones visuales de algunas simulaciones de estructuras a gran escala y formación de galaxias, dependiendo del tipo de componentes empleadas y las condiciones iniciales establecidas.



Nota. En el cuadro superior izquierdo se presentan las visualizaciones de los halos de materia oscura para algunas galaxias, construidas a partir de las simulaciones *Zoom-in* con solo materia oscura (N-cuerpos) en los proyectos: Aquarius, GHALO (Stadel y cols., 2009), ELVIS (Garrison-Kimmel, Boylan-Kolchin, Bullock, y Lee, 2014), Phoenix (Gao y cols., 2012) y Via Lactea. El cuadro superior derecho muestra la visualización de mapas de densidad para galaxias a partir de las simulaciones *Zoom-in* de materia oscura e hidrodinámica en los proyectos: NIHAO (Wang y cols., 2015), Auriga (Grand y cols., 2018), APOSTLE, FIRE (Hopkins y cols., 2018) y Eris. El cuadro inferior izquierdo presenta las visualizaciones de las estructuras a gran escala del universo extraídas de las simulaciones de grandes volúmenes con solo materia oscura (N-cuerpos) en los proyectos: Millennium, Millennium-XXL, Millennium-II, Dark Sky (Skillman y cols., 2014) y Bolshoi. El recuadro inferior derecho se muestran las visualizaciones de las estructuras a gran escala del universo extraídas de las simulaciones de grandes volúmenes de materia oscura e hidrodinámica en los proyectos: Illustris, IllustrisTNG, Magneticum (Dolag, 2015), Simba (Davé y cols., 2019), Massiveblack-II (Khandai y cols., 2015), Romulus 25 y EAGLE (Schaye y cols., 2015).*

Para que las simulaciones puedan ser ejecutadas deben ubicarse dentro de un marco cosmológico con condiciones iniciales que intenten reproducir el espectro de potencia de las fluctuaciones de densidad del Universo temprano, justo después del Big Bang. Suponiendo el modelo estándar Λ CDM, este marco debe contener modelos físicos para la materia oscura, la energía oscura y la gravedad. Además, la evolución de las ecuaciones de las componentes centrales de materia: la materia oscura y el gas, debe ser discretizada.

Para la materia oscura consideramos, un sistema gravitacional sin colisiones, que en la mayoría de los casos serán resueltas haciendo uso del método de N cuerpos empleando diferentes técnicas. La componente gaseosa de la materia bariónica será modelada por medio de las ecuaciones de la hidrodinámica, solucionadas por métodos lagrangianos o eulerianos, aparte de la inclusión de procesos astrofísicos como la formación de estrellas o la inyección de momento y energía al medio interestelar través de supernovas, que han mostrado ser indispensables para la obtención de poblaciones galácticas realistas (Vogelsberger y cols., 2020).

Las simulaciones de interés en el marco de este trabajo son las simulaciones cosmológicas hidrodinámicas basadas en Λ CDM. Esto con el objetivo de generar galaxias individuales realistas y así poder efectuar el proceso de construcción de las observaciones sintéticas, que permita efectuar un estudio sistemático del procesamiento y adquisición de los datos cinemáticos de galaxias en el universo local. En la figura 1.3 se presenta un ejemplo de este tipo de simulaciones y las cantidades físicas que pueden ser estudiadas en ellas.

Figura 1.3

Densidades estelares proyectadas en $z = 0$ para seis simulaciones hidrodinámicas cosmológicas de alta resolución enmarcadas dentro del proyecto Auriga.



Nota. La fila inferior corresponde a proyecciones viendo a las galaxias de perfil (*edge-on*), y la fila superior a proyecciones frontales (*face-on*).

1.3. Observaciones vs simulaciones

Las simulaciones numéricas de carácter cosmológico, fundamentadas en el modelo Λ CDM, han posibilitado un avance sustancial en el entendimiento de la evolución dinámica del Universo (Angulo y cols., 2012; Boylan-Kolchin, Springel, White, Jenkins, y Lemson, 2009; Davis, Efstathiou,

*Tomado de: (Vogelsberger y cols., 2020)

*Tomado de: (Grand y cols., 2018)

Frenk, y White, 1985; Klypin, Yepes, Gottlöber, Prada, y Hess, 2016; Pineda y cols., 2017; Springel y cols., 2005). Sin embargo, y pese a las múltiples simulaciones que son capaces de reproducir las observaciones (Schaye y cols., 2015; Vogelsberger y cols., 2014), existe una variedad de observaciones documentadas que evidencian discrepancias sistemáticas a pequeña escala con respecto a los resultados obtenidos de galaxias simuladas (Flores y Primack, 1994; Moore, 1994).

En este contexto, uno de los debates activos de mayor importancia ha sido la diferenciación en la concentración y distribución de materia oscura en galaxias espirales. Esta problemática, conocida como el problema *cusp-core*, ha recibido considerable atención en la astrofísica extragaláctica y la cosmología, debido a que la caracterización de los perfiles de densidad de los halos de materia oscura es importante en el entendimiento de fenómenos como la estabilidad y morfología de los cúmulos de galaxias (Zwicky, 1933), la forma de las curvas de rotación (Roberts y Whitehurst, 1975) y en última instancia son una predicción del modelo cosmológico.

La problemática *cusp-core* se refiere a una diferencia sustancial en la región central del perfil de densidad de materia oscura determinado a partir de las observaciones cinemáticas, $\rho_{\text{dm,inner}} \sim r^0$ (perfil tipo *core*), y el determinado a partir de simulaciones cosmológicas basadas en el modelo Λ CDM, $\rho_{\text{dm,inner}} \sim r^{-1}$ (perfil tipo *cusp*) (Navarro, 1996). Múltiples hipótesis han sido presentadas para dar solución a esta problemática, algunas apelando a mecanismos físicos que podrían transformar los *cusps* en *cores*, y otras argumentando la posibilidad de que se trate de un falso dilema debido a sesgos sistemáticos en el análisis de las observaciones.

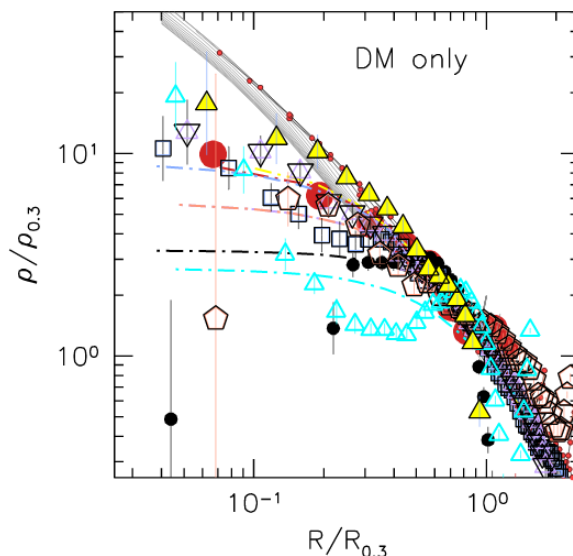
Actualmente la hipótesis más aceptada es que el *feedback** bariónico producto de una intensa actividad de supernovas podría inducir cambios rápidos en el potencial gravitacional central, capaz de extraer suficiente materia oscura como para dar origen a perfiles de densidad tipo *core* (Mashchenko, Wadsley, y Couchman, 2008; Navarro, Eke, y Frenk, 1996; Oñorbe y cols., 2015). Sin embargo, también han sido reportadas implementaciones de *feedback* bariónico en simulaciones numéricas que no reproducen perfiles centrales de tipo *core*, lo cual no impide formación de estructuras galácticas realistas (Ceverino y Klypin, 2009; Gnedin y Zhao, 2002; Lia, Carraro, y Salucci, 2000). Esto muestra que la discusión no ha sido zanjada aún, y es importante explorar explicaciones alternativas.

Una de las alternativas se centra en el rol de los efectos sistemáticos en la construcción de perfiles de densidad de materia oscura a partir de observaciones (Pineda y cols., 2017). Se ha expuesto considerable evidencia que perfiles tipo *cusp* pueden ser erróneamente clasificados como *cores* debido a la incidencia de factores como: la inclinación de la galaxia (Rhee, Valenzuela, Klypin, Holtzman, y Moorthy, 2004), el soporte de presión, una baja resolución espacial y la presencia de movimientos no circulares (Simon, Bolatto, Leroy, Blitz, y Gates, 2005). Estos elementos pueden inducir una pequeña disminución en la curva de rotación galáctica en su región central, suficiente sin embargo para inducir la falsa detección de perfiles tipo *core*.

*Devolución de material, energía y momento estelar al medio interestelar.

Figura 1.4

Perfiles de densidad de materia oscura para regiones centrales tipo *core* y para regiones centrales tipo *cusp*, en comparación con algunos perfiles inferidos a partir de observaciones cinemáticas.



Nota. En la región inicial de los perfiles de densidad se puede evidenciar el origen de la problemática *cusp – core*, dónde claramente las observaciones realistas presentan una tendencia natural a reproducir perfiles tipo *core*, mientras las simulaciones predicen perfiles tipo *cusp* mayoritariamente.*

Otra discrepancia que ha sido reportada recientemente entre observaciones y simulaciones numéricas hace referencia a la diversidad de formas observadas en las curvas de rotación de galaxias enanas en el Universo local, la cual contrasta con los perfiles de velocidad auto-similares de las galaxias producidas por las simulaciones cosmológicas (Oman y cols., 2015), como se puede evidenciar en la figura 1.5.

Las explicaciones plausibles para esta discrepancia son: las simulaciones fallan en la reproducción de la diversidad de los efectos bariónicos en las regiones centrales de las galaxias enanas, el modelo actual de materia oscura no se corresponde con la verdadera naturaleza de la materia oscura o los datos cinemáticos inferidos a partir de las observaciones son incorrectos (Oman y cols., 2015). Nuevamente la intromisión de efectos sistemáticos observacionales, similares a los presentados como explicación a la problemática *cusp – core*, se muestran como una alternativa de solución.

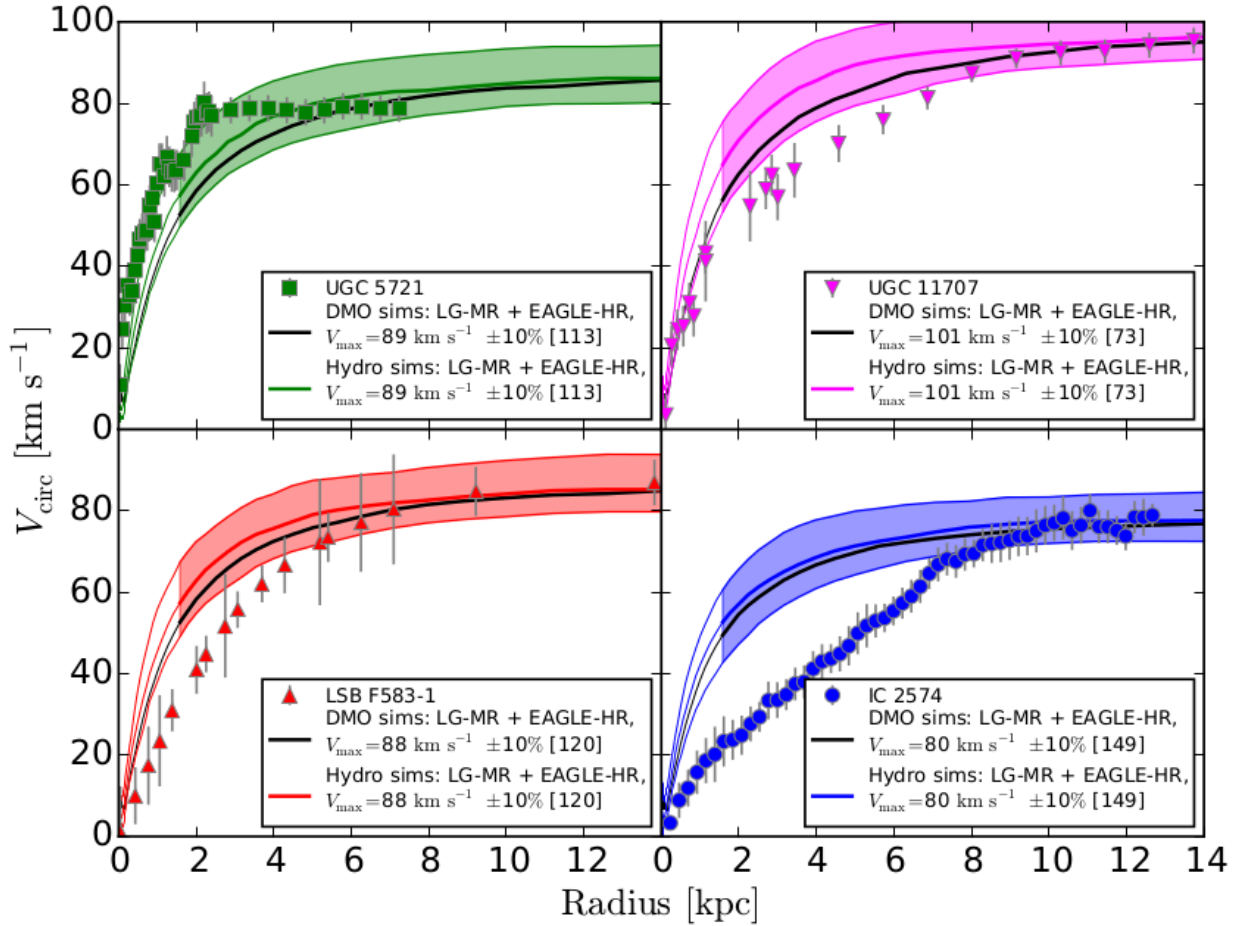
Algunos autores reportan la importancia de factores observacionales que inciden en la diversidad presentada por Oman y cols. (2015). Entre las principales características discutidas destacan: la resolución espacial en la línea de emisión para el hidrógeno neutro (Swaters, Sancisi, Van Albada, y Van Der Hulst, 2009), la determinación del centro y la inclinación de las curvas de rotación para las observaciones de ranura delgada en la línea H_α (Spekkens, Giovanelli, y Haynes, 2005; Swaters, Madore, van den Bosch, y Balcells, 2003), el soporte de presión (Valenzuela y cols., 2007) y

*Tomado de: (Oh y cols., 2015)

la presencia de velocidades no circulares (Oman y cols., 2019).

Figura 1.5

Curvas de rotación para galaxias enanas irregulares con aproximadamente la misma velocidad máxima de rotación y masas similares.



Nota. Cada panel corresponde a una galaxia distinta, según se identifican. Las curvas sólidas corresponden a la media del perfil de velocidad circular de las galaxias formadas en las simulaciones. El área sombreada expresa la varianza en tales perfiles. Los puntos representan la curva de rotación observada para cada galaxia.*

1.4. Curvas de rotación

Las velocidades del gas a lo largo de la línea de visión (V_{los}) en las galaxias, se pueden medir a partir del corrimiento Doppler ($\Delta\lambda$) de una línea de emisión espectral previamente identificada:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{V_{los}}{c}, \quad (1.1)$$

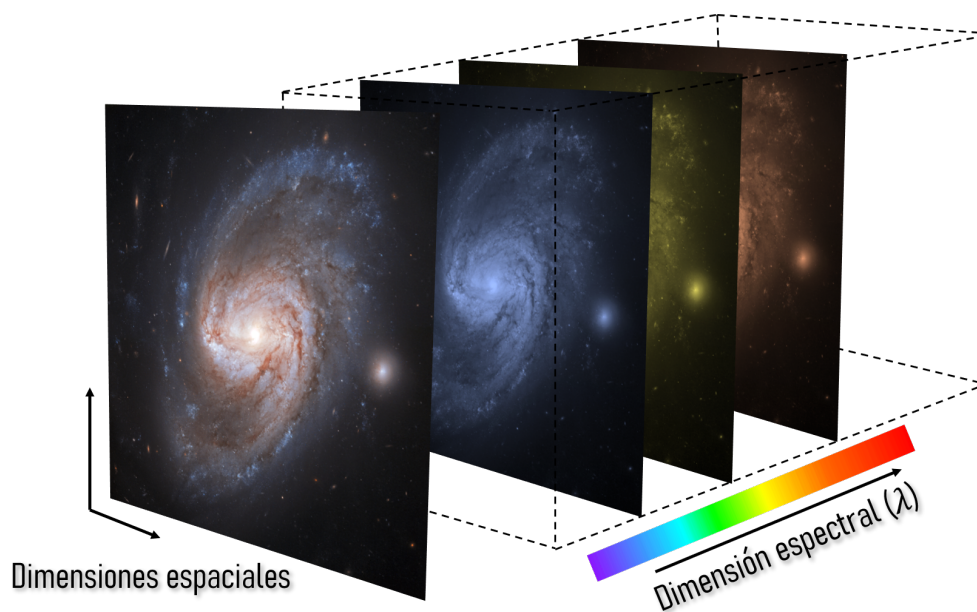
*Tomado de: (Oman y cols., 2015)

donde λ_0 representa la longitud de onda de referencia en un marco de referencia en reposo. Gracias a este principio es posible construir las curvas de rotación y obtener las observaciones cinemáticas de galaxias.

Este proceso de construcción comienza con la obtención de un cubo de datos mediante espectrógrafos de campo integral acoplados a los telescopios. Estos dispositivos registran la luz proveniente de las galaxias y la almacenan en un arreglo tridimensional, como el que se ilustra en la figura 1.6. En este arreglo, las dos dimensiones de la cara frontal corresponden a la imagen proyectada de la galaxia en el campo de visión observado, y la tercera dimensión almacena la información espectral. Es decir que, cada rebanada transversal contiene un mapa de intensidad luminosa en una longitud de onda específica. A su vez, cada secuencia de celdas longitudinales detrás de un píxel contiene el espectro discretizado de la emisión de la región de la galaxia cubierta por dicho píxel.

Figura 1.6

Ejemplo ilustrativo de un cubo de datos producido por un espectrógrafo de campo integral para la galaxia NGC3583.



Nota. Ejemplo ilustrativo de un cubo de datos producido por un espectrógrafo de campo integral para la galaxia NGC3583*, en donde se pueden ver almacenadas múltiples fotografías del mismo objeto para diferentes longitudes de onda, con lo que se tiene la información de las intensidades de cada píxel de la imagen en todo el espectro observado.

El siguiente paso consiste en utilizar la información almacenada en el cubo de datos para reconstruir la cinemática de la galaxia punto a punto, es decir, construir el mapa de velocidad. Para lograr esto es necesario colapsar el cubo a lo largo de su dirección espectral, generando así una distribución bidimensional del flujo luminoso registrado, conocida como mapa de intensidades (ver primer recuadro de izquierda a derecha de la figura 1.7). La intensidad luminosa en cada píxel se

*Tomada de: https://www.nasa.gov/mission_pages/hubble/multimedia/index.html

encuentra descrita por:

$$I = \sum_{\text{ch}} I_{\text{ch}}, \quad (1.2)$$

donde I_{ch} representa la intensidad medida para cada posición espectral, o canal de observación, a lo largo de la posición del píxel.

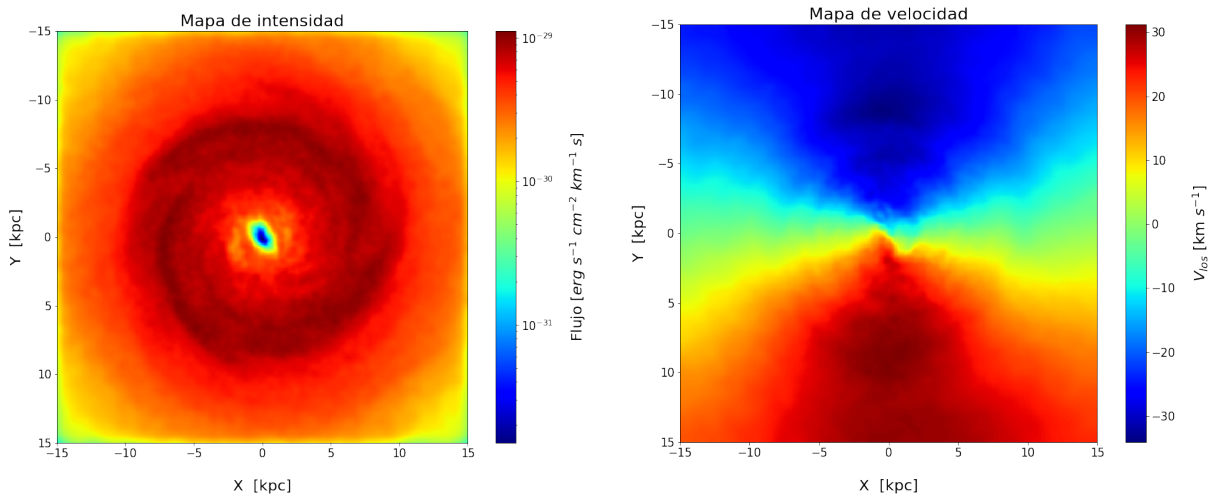
Acto seguido, y gracias al efecto Doppler, es posible construir el mapa de velocidades conociendo que la velocidad será determinada a partir de la posición del pico de la línea de emisión, que en primera aproximación se corresponde con el primer momento de la distribución de intensidades, es decir:

$$\langle V_{\text{los}} \rangle = \frac{\sum_{\text{ch}} I_{\text{ch}} v_{\text{ch}}}{\sum_{\text{ch}} I_{\text{ch}}}. \quad (1.3)$$

Hay que tener en cuenta que, además de los movimientos propios del gas y las estrellas al interior de las galaxias, también existe una velocidad de alejamiento de la galaxia como un todo, producto de la expansión del universo. Por tanto, el ajuste Doppler empleado para la caracterización de V_{los} , debe realizarse con el cuidado de no incluir los corrimientos espectrales de este movimiento global.

Figura 1.7

Mapa de intensidad y velocidad, para observaciones sintéticas.



Nota. De izquierda a derecha: mapa de intensidad y velocidad, para observaciones sintéticas con resoluciones espaciales de $6''$, poder de resolución espectral de 9000, canales de velocidad de $5,2 \text{ km s}^{-1}$ y píxeles de $1,5''$, contruidos a partir de las ecuaciones 1.2 y 1.3.

Luego de finalizar el proceso de construcción de los mapas, es necesario efectuar un ajuste teniendo en cuenta la geometría del plano de la galaxia visto desde nuestra posición, con el objetivo de obtener los valores de la velocidad circular (V_c) en función del radio al centro de la galaxia, y de esta forma poder construir la curva de rotación.

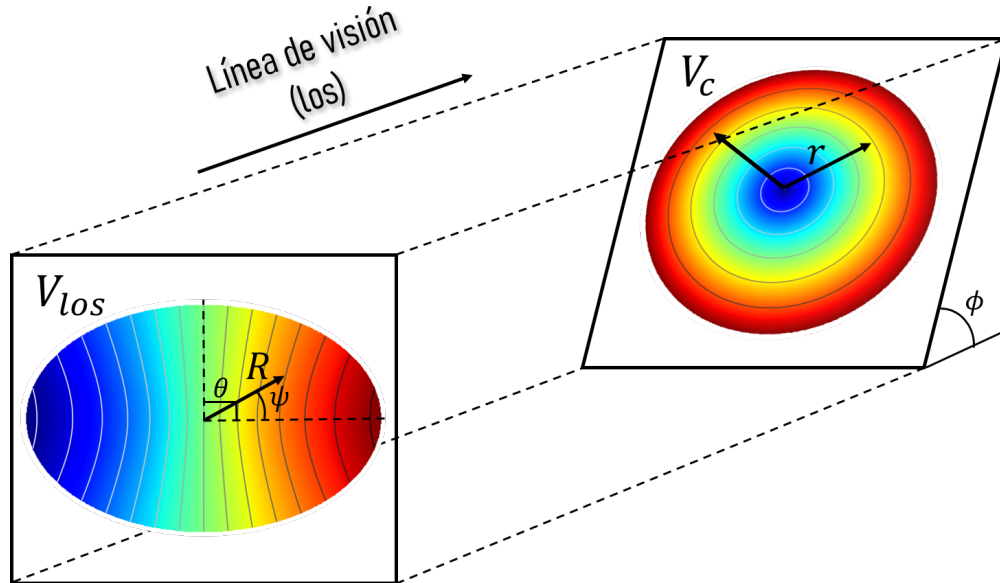
Para lograr lo anterior es necesario recordar que un disco en rotación perfecta, inclinado respecto a nuestra línea de visión, proyecta sus órbitas circulares como elipses en la bóveda celeste, generando un perfil de velocidades dado por (Krajinovic, Cappellari, De Zeeuw, y Copin, 2006):

$$V_{los}(R, \psi) = V_{sys} + \frac{V_c(r) \sin(\phi) \cos(\psi - \theta)}{\alpha}; \quad \alpha \equiv \sqrt{\cos^2(\psi - \theta) + \frac{\sin^2(\psi - \theta)}{\cos^2(\phi)}}, \quad (1.4)$$

donde ϕ representa la inclinación del disco galáctico, θ es el ángulo de posición, V_{sys} es la velocidad sistémica de la galaxia, V_c son los valores para la velocidad circular, y r , R y ψ son las coordenadas de los píxeles en el mapa de velocidad ilustradas en la figura 1.8.

Figura 1.8

Visualización de las coordenadas r , R , ϕ , θ y ψ , necesarias para relacionar V_c y V_{los} .



Nota. Los colores representan los valores de velocidad para el mapa de velocidad circular (azul las regiones más lentas y rojo las regiones más veloces) y el mapa de velocidad a lo largo de la línea de visión (azul las regiones que se alejan desde el eje de referencia establecido y rojo las regiones que se acercan). Las líneas grises sobre los mapas constituyen las curvas de isovelocidad en cada proyección de la galaxia.

Por otro lado, cuando las condiciones de disco en rotación perfecta no se cumplen a cabalidad, una alternativa frecuentemente empleada en la literatura es la extracción de la curva de rotación a partir del mapa de velocidades haciendo uso de la descomposición armónica propuesta en (Krajinovic y cols., 2006) y ejecutada en el software KINOMETRY. En dónde, siguiendo el mismo procedimiento descrito para el caso ideal, se efectúa el seguimiento de la variación de V_{los} , en función del ángulo ψ sobre anillos elípticos, mediante un algoritmo de optimización que permite hallar los mejores coeficientes para la expansión:

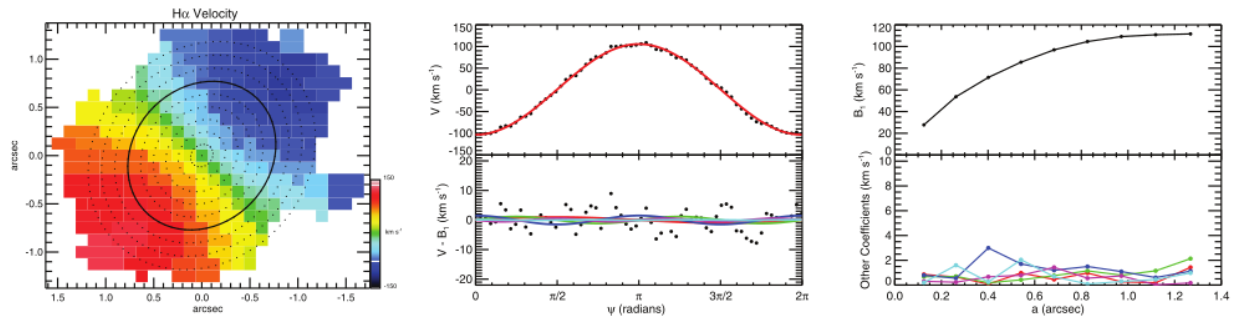
$$V_{los}(R, \psi) = A_0(R) + \sum_{n=1}^N A_n(R) \sin(n\psi) + B_n(R) \cos(n\psi). \quad (1.5)$$

Donde A_n, B_n son los coeficientes de ajuste que bajo ciertas condiciones poseen significado físico, como la representación de los movimientos circulares o la presencia de barras en la galaxia (Krajinovic y cols., 2006).

Haciendo uso de esta metodología, la curva de rotación será construida a partir del ajuste de la ecuación (1.5) sobre elipses en el mapa de velocidad de la galaxia, con el objetivo de estimar el coeficiente B_1 y su dependencia radial, puesto que B_1 representa los movimientos netamente circulares, equivalentes a la velocidad circular V_c del caso idealizado, como se muestra en la figura (1.9).

Figura 1.9

Mapa de velocidades para un modelo idealizado de disco en rotación con elipses tipo KINEMETRY superpuestas.



Nota. De izquierda a derecha: mapa de velocidades para un modelo idealizado de disco en rotación con elipses tipo KINEMETRY superpuestas, $V_{los}(R, \psi)$ para la elipse sólida, con sus respectivos residuos, y finalmente la variación del coeficiente B_1 con respecto al semieje mayor R (la curva de rotación).*

Finalmente, las ecuaciones 1.4 y 1.5, y las suposiciones de las que parten, permiten identificar los puntos claves susceptibles a errores sistemáticos en la construcción de curvas de rotación. Por ejemplo, el ángulo de inclinación de la galaxia observada es un factor fundamental en el proceso de medición y construcción de la curva, con lo que debe ser considerado en un estudio sistemático, al igual que la distancia a la galaxia en cuestión y la resolución espacial y espectral de la observación, puesto que son factores inciden de manera clara en la forma de la curva de rotación reportada.

1.5. Pregunta de investigación

Recientemente se ha probado que existe una diversidad en la forma de las curvas de rotación de galaxias enanas en el Universo local, que no es evidenciada en las galaxias formadas en simulaciones cosmológicas hidrodinámicas basadas en el modelo Λ CDM (Oman y cols., 2015). Esta discrepancia suscita dudas sobre el modelado teórico de la materia oscura y las simulaciones cosmológicas actuales, evidenciando su aparente incapacidad para capturar la complejidad de los procesos físicos presentes en las galaxias reales.

*Tomado de: (Shapiro y cols., 2008)

Sin embargo, existe la posibilidad de que esta variabilidad sea, al menos en parte, el resultado de efectos sistemáticos en el procesamiento de las observaciones (Pineda y cols., 2017). Por esta razón es de vital importancia determinar, ¿hasta qué punto aumenta la diversidad en las curvas de rotación de las simulaciones, al incluir algunos de los efectos sistemáticos a los que están sometidas las observaciones?

Es con la intención de aportar elementos que contribuyan a la solución de este interrogante, que en este trabajo se efectúa un estudio sistemático del impacto, individual y colectivo, de los efectos observacionales en la forma resultante de las curvas de rotación, mediante la generación de un catálogo de observaciones sintéticas realistas a partir de simulaciones. Esto con el objetivo de cuantificar el grado de variabilidad resultante en las curvas una vez los efectos observacionales son modelados, y de esta manera aliviar la tensión entre simulaciones y observaciones.

Para lograr lo anterior serán procesadas 6 simulaciones de galaxias enanas a través de un software de simulación de observaciones realistas, que permitirá la generación de curvas de rotación sintéticas con diferentes parámetros observacionales e instrumentales. Posteriormente dichas curvas serán comparadas con una muestra de 248 galaxias observadas para corroborar si la tensión, producto de la variabilidad, se ve aliviada después de este proceso. Finalmente serán identificados los efectos sistemáticos preponderantes en dicho proceso.

2. Experimentos con observaciones sintéticas

‘No amount of experimentation can definitively prove that I am right; but a single experiment can prove that I am wrong.’
Albert Einstein

El proceso de construcción de observaciones cinemáticas a partir de la información espectral de las galaxias, es bastante complejo y debe ser comentado en detalle para comprender las diferentes aristas del problema abordado en este trabajo. Desde la obtención y procesamiento de los datos por parte de los espectrógrafos, pasando por la generación de los mapas de velocidad, hasta llegar a la creación de las curvas de rotación para cada galaxia, múltiples fenómenos y limitaciones instrumentales y observacionales inciden durante el proceso.

En el caso de las simulaciones, las propiedades cinemáticas de las galaxias pueden ser determinadas con total precisión a partir de la información dinámica almacenada en sus partículas. Este proceso idealizado no considera la incidencia de factores instrumentales en la estimación de dichas propiedades, lo que impide una comparación objetiva entre las observaciones y las simulaciones (Katsianis y cols., 2020). Una solución a esta problemática consiste en mimetizar el impacto de los efectos observacionales realistas en las simulaciones, a través del proceso de observación sintético. Esta metodología permite identificar y cuantificar la incidencia de los efectos sistemáticos que afectan las comparaciones, explorando el espectro de parámetros experimentales de manera controlada; siendo la única metodología que permite dicha exploración sobre objetos astrofísicos, imposibles de reproducir en un laboratorio.

En este capítulo se presentan las principales características de la muestra de galaxias enanas descritas en Oman y cols. (2015), clasificando los parámetros físicos que las describen y definiendo los parámetros observacionales relevantes en la construcción de dicho catálogo. Posteriormente se exhiben las características de la población de galaxias simuladas, demostrando que son representativas del rango de propiedades asociado a las observaciones, garantizando su pertinencia en las comparaciones a realizarse entre ambas poblaciones. Acto seguido se exponen las herramientas computacionales empleadas en la construcción de las curvas de rotación sintéticas, siguiendo el estado del arte. Finalmente, se precisan las características observacionales e instrumentales a variarse en el desarrollo del estudio sistemático, y se define la metodología de comparación para las curvas de rotación observadas y sintéticas.

2.1. Caracterización de la población de galaxias de interés

Esta sección describe la población de galaxias, observadas y simuladas, que fueron empleadas en la realización de este proyecto. Esto con el objetivo de certificar que ambas poblaciones presenten características físicas, dinámicas y morfológicas similares, que las hacen comparables entre sí.

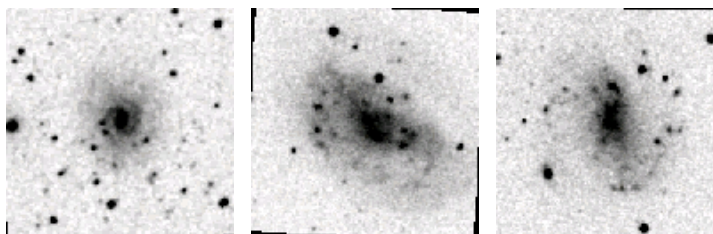
Galaxias observadas

La muestra de galaxias observadas seleccionada para esta tesis es la misma presentada en [Oman y cols. \(2015\)](#). Este catálogo está compuesto por 248 galaxias enanas, ubicadas en el Universo local, con valores de resolución espacial para las observaciones (PSF*) comprendidos entre 0,1 y 1,5 kpc, y poderes de resolución espectral superiores a 3000, lo que garantiza una buena calidad en sus datos. Abonado a lo anterior producto del estudio de [Oman y cols. \(2015\)](#) se pudo evidenciar que este conjunto de galaxias presenta una alta variabilidad en sus curvas de rotación.

El catálogo completo fue construido a partir de 10 fuentes diferentes, a las cuales fue necesario recurrir directamente para recopilar todas las informaciones que serán presentadas en esta sección: ([Kauffmann, Huang, Moran, y Heckman, 2015](#)), ([Oh y cols., 2015](#)), ([Adams y cols., 2014](#)), ([Oh, De Blok, Brinks, Walter, y Kennicutt Jr, 2011](#)), ([De Naray, McGaugh, y De Blok, 2008](#)), ([De Blok y cols., 2008](#)), ([Weldrake, De Blok, y Walter, 2003](#)), ([Swaters y cols., 2003](#)), ([De Blok y Bosma, 2002](#)), ([De Blok, McGaugh, Bosma, y Rubin, 2001](#)).

Figura 2.1

Imágenes extraídas de la base de datos NED para 3 galaxias del catálogo de observaciones.



Nota. Imágenes extraídas de la base de datos NED[†] para 3 galaxias del catálogo descrito en esta sección. De izquierda a derecha: ESO2060140 (obtenida por el telescopio UK48-inchSchmidt en la banda IIIaJ del óptico), UGC4325 (obtenida por el telescopio Palomar48-inchSchmidt en la banda 103aE del óptico) y UGC10310 (obtenida por el telescopio Palomar48-inchSchmidt en la banda 103aE del óptico).

De manera general estas galaxias están clasificadas como enanas tipo disco en rotación, debido a que la mayoría tienen velocidades circulares máximas menores a 150 km s^{-1} ([Spekkens y cols., 2005](#)). Sus distribuciones de luz están descritas por

$$\Sigma(r) = \frac{M}{2\pi h_o} e^{-r/h_o}, \quad (2.1)$$

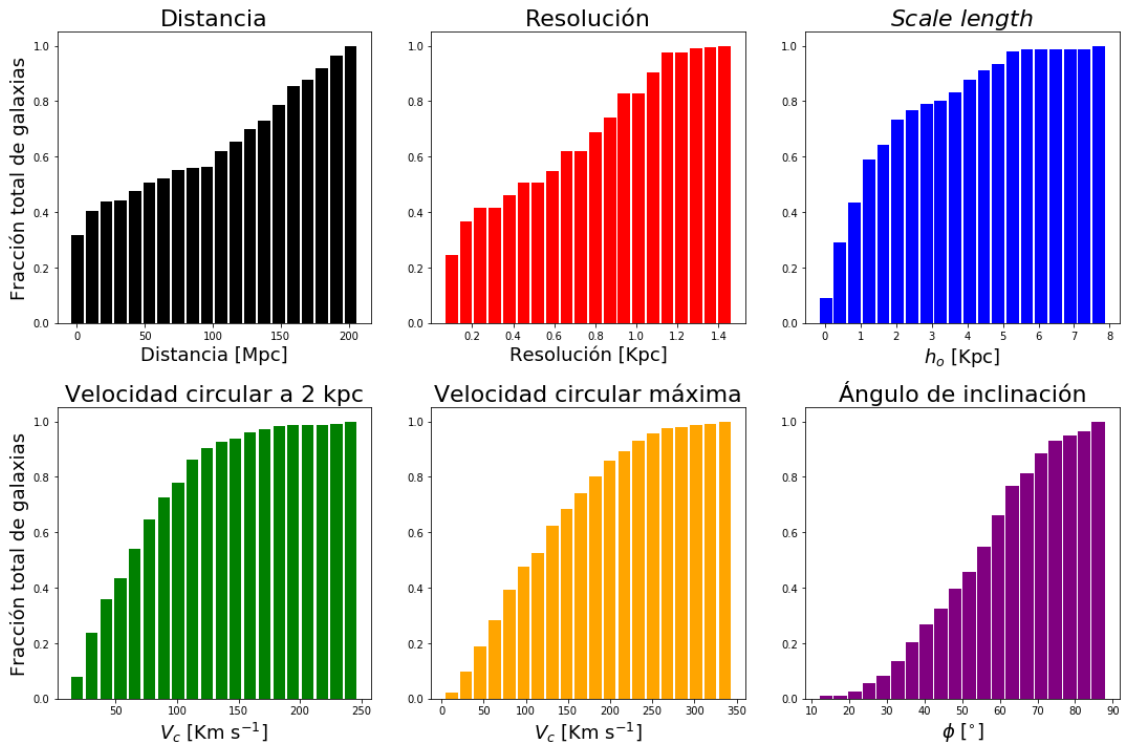
*Abreviatura proveniente del inglés para la expresión *Point Spread Function*

[†]<https://ned.ipac.caltech.edu/>

siendo M la masa, r el radio y h_o el *scale length** estelar (Pineda y cols., 2017), y sus morfologías se corresponden con galaxias espirales e irregulares.

Figura 2.2

Principales características de la muestra de galaxias utilizadas en el estudio de Oman y cols. (2015) a través de histogramas acumulativos normalizados.



Nota. De izquierda a derecha, en la primer fila: distancia a la galaxia en Mpc, resolución espacial de los telescopios en kpc y el *scale length* del disco estelar en kpc. segunda fila: velocidad circular a los 2 kpc de radio en km s⁻¹, velocidad circular máxima en km s⁻¹ y ángulos de inclinación en grados.

Específicamente para esta población se destacan características como: un *scale length* máximo de 8,1 kpc, una distancia máxima de 212 Mpc, un rango de inclinaciones (ϕ) que abarca todo el espectro posible de valores, velocidades circulares máximas (V_{max}) entre 12 y 353 km s⁻¹ con cerca de un $\sim 40\%$ de la muestra por encima del valor límite para galaxias enanas, y velocidades circulares a los 2 kpc de radio (V_{2kpc}) variables entre 18.9 y 253.2 km s⁻¹ (ver figura 2.2).

Para este catálogo de observaciones[†], las curvas de rotación construidas usando espectrógrafos *long-slit* representan un 68,9% del conjunto total, y las generadas con espectrógrafos de campo integral el 31,1% restante. Respecto al tipo de especies atómicas empleadas como trazadores, se tiene que un 39,9% de las observaciones provienen de técnicas de absorción estelar, un 21,4% se

*El *scale length* es el radio en que el disco exponencial que modela la luz de las estrellas en la galaxia, decae un factor de 14,87 respecto a su valor central.

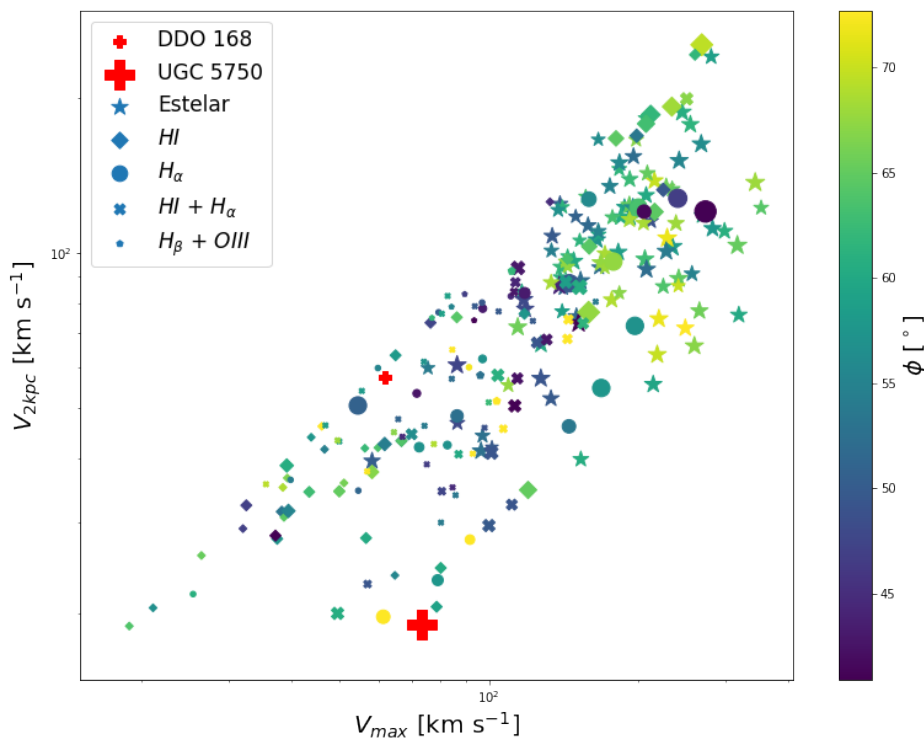
†Consultar el cuadro ?? y la figura 4.1 de los apéndices para visualizar en detalle la información de cada galaxia.

corresponden con observaciones de HI , 20,6% son una combinación de $HI + H_\alpha$, 15,3% son únicamente H_α y el 2,8% faltante son observaciones de las líneas $H_\beta + OIII$.

La alta variabilidad reportada en la forma de las curvas de rotación para esta muestra (Oman y cols., 2015) se evidencia en la dispersión de la V_{2kpc} para galaxias con valores semejantes de V_{max} (ver figura 2.3). En algunos casos, como en el de DDO168 y UGC5750 ($V_{max} \sim 62 \text{ km s}^{-1}$), esto se traduce en diferencias de $\sim 40 \text{ km s}^{-1}$ para la región inicial de las curvas de rotación (ver puntos rojos en la figura 2.3).

Figura 2.3

Velocidad circular a los 2 kpc (V_{2kpc}) de radio en km s^{-1} , contra la velocidad circular máxima (V_{max}) en km s^{-1} .



Nota. Cada punto representa una de las galaxias utilizadas en el estudio de Oman y cols. (2015) separadas por especie atómica. El tamaño de cada figura es proporcional a la resolución espacial de la observación y el color representa la inclinación.

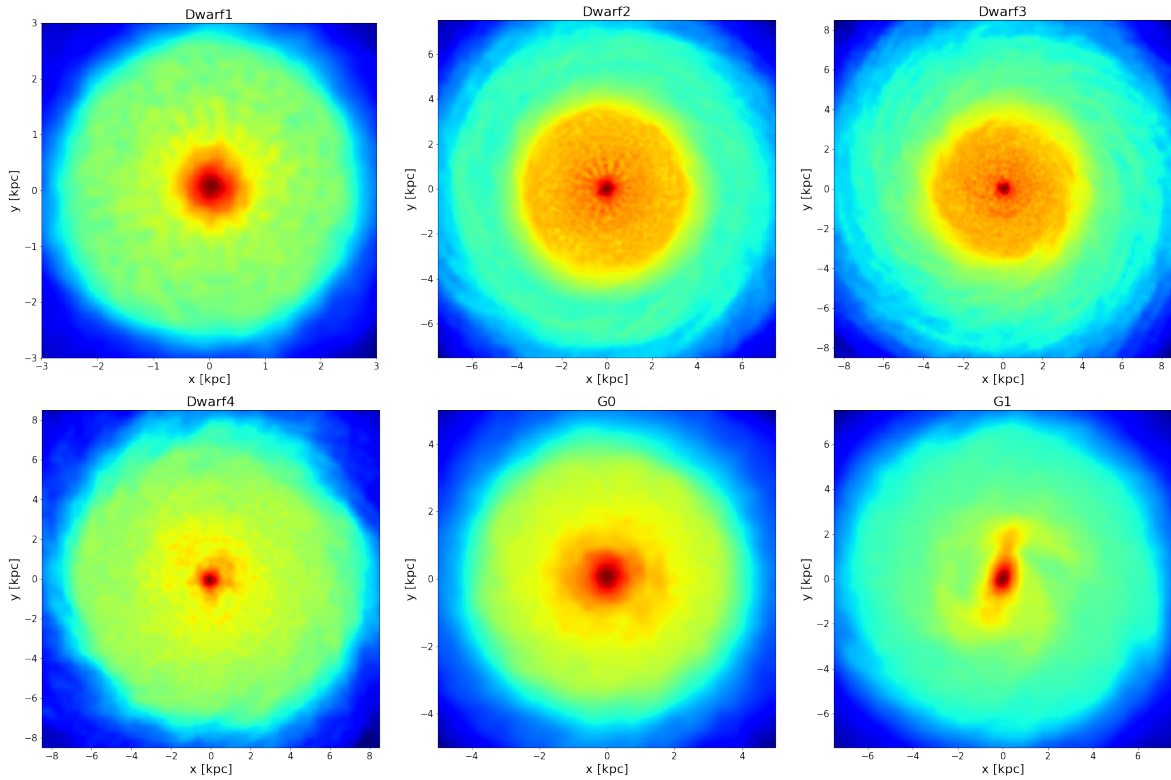
La diversidad evidente de esta población contrasta con la autosimilitud propia de las galaxias simuladas, con lo que naturalmente surge la pregunta de cuánto de esta diversidad podría ser fruto de la influencia de factores que usualmente no son modelados en el análisis de simulaciones como: el tipo de espectrógrafo, la especie atómica trazadora, la resolución espacial y el ángulo de inclinación.

Galaxias simuladas

La muestra de simulaciones usadas en este trabajo está compuesta por las 6 galaxias enanas presentadas en Pineda y cols. (2017) (ver figura 2.4), cuyas principales características se muestran en el cuadro 2.1. Cada galaxia fue simulada como un sistema aislado usando una versión modificada del código hidrodinámico GADGET-2* (Springel, 2005), que incluye los procesos de enfriamiento por fotoionización, y formación y *feedback* estelar.

Figura 2.4

Mapas de densidad de gas para las galaxias simuladas en Pineda y cols. (2017) en sus proyecciones frontales (*face-on*).



Nota. La fila superior, de izquierda a derecha, presenta las galaxias: *Dwarf1*, *Dwarf2* y *Dwarf3*. La fila inferior, de izquierda a derecha, presenta las galaxias: *Dwarf4*, *G0* y *G1*.

Todas las simulaciones están constituidas por un halo de materia oscura en conjunto con un disco exponencial de gas y estrellas que cumplen con la relación de Tully–Fisher bariónica y estelar (Bell y de Jong, 2001). La fracción de masa estelar y masa de gas están cuidadosamente definidas para cada galaxia de forma que se cumplan las relaciones de escala conocidas para el Universo local

$$\log(M_{\star}) = 0,83 + 4,34\log(V_{max}), \quad (2.2)$$

$$f_g = \frac{M_{gas}}{M_{\star} + M_{gas}} = 1 - \frac{M_{\star}^{0,21}}{170}, \quad (2.3)$$

*<https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/gadget/>

donde M_* y M_{gas} son las masas totales de los discos estelares y gaseosos respectivamente y f_g es la fracción de gas. El disco de gas fue modelado de manera que sea tres veces más grande que el disco estelar, tal como indican las observaciones (Broeils y van Woerden, 1994). La estructura vertical del disco fue calculada de forma autoconsistente con el potencial gravitacional y asumiendo equilibrio hidrodinámico bajo la ecuación de estado multifase de Springel y Hernquist (2003). La metodología para la generación de las condiciones iniciales se presenta en Springel (2005).

Tabla 2.1

Propiedades básicas de la muestra de galaxias simuladas.

Modelo	M_{halo} M_{\odot}	M_* M_{\odot}	M_{gas} M_{\odot}	h_o kpc	z_o kpc	h_{gas} kpc	V_{max} km s ⁻¹
<i>Dwarf1</i>	$3,0 \times 10^{10}$	$1,2 \times 10^8$	$3,7 \times 10^8$	0.8	0.16	2.4	57
<i>Dwarf2</i>	$7,0 \times 10^{10}$	$6,0 \times 10^8$	$1,1 \times 10^9$	1.7	0.34	5.1	78
<i>Dwarf3</i>	$1,2 \times 10^{10}$	$1,2 \times 10^9$	$1,6 \times 10^9$	2.5	0.5	7.8	89
<i>Dwarf4</i>	$2,6 \times 10^{10}$	$6,0 \times 10^9$	$3,4 \times 10^9$	3.0	0.6	9.0	119
<i>G0</i>	$5,1 \times 10^{10}$	$1,0 \times 10^9$	$6,1 \times 10^9$	1.1	0.22	3.3	67
<i>G1</i>	$2,0 \times 10^{11}$	$5,0 \times 10^9$	$2,0 \times 10^9$	1.5	0.3	4.5	103

Nota. Columnas de izquierda a derecha: nombre de la galaxia, masa del halo de materia oscura en masas solares, masa estelar en masas solares, masa de gas en masas solares, *scale length* del disco estelar en kpc, *scale height* del disco estelar en kpc, *scale length* del disco de gas en kpc y velocidad máxima de giro para las partículas en km s⁻¹.*

Cada una de las galaxias simuladas fue monitoreada durante un periodo de tiempo de seis mil millones de años. Cada cien millones de años[†] fue almacenada toda la información física de las partículas en *snapshots*[‡]. En este trabajo de tesis fueron analizadas todas las galaxias en 3 instantes diferentes de tiempo, incluyendo el estudio del modelo *Dwarf1* en sus 60 *snapshots* como prueba preliminar para una futura extensión de este trabajo. Finalmente, fue conformado un conjunto de 75 archivos de simulación a ser contrastados con las observaciones realistas.

Para asegurar que la comparación entre ambas poblaciones de galaxias sea objetiva, debe garantizarse que las simulaciones sean representativas de las galaxias observadas. Esto fue confirmado por la exploración de parámetros presentada en la figura 2.5. En ella se muestra la ubicación de las 6 galaxias simuladas, junto a las 248 de la muestra observada, en el espacio de parámetros descrito por el tamaño, la masa estelar, y la masa dinámica. Cabe resaltar que, si bien las simulaciones abarcan un amplio rango de las características exhibidas por las observaciones, ninguna de ellas son representativas de los casos extremos de propiedades como el *scale length* y la masa estelar para la muestra de Oman y cols. (2015).

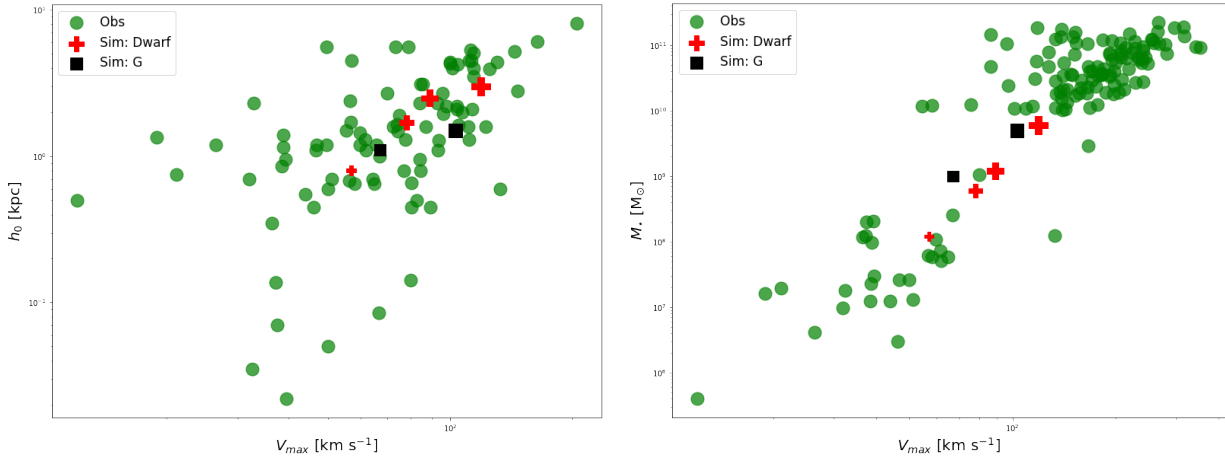
*Tomado de: (Pineda y cols., 2017)

[†]Tiempo orbital de las partículas simuladas en los primeros kiloparsecs.

[‡]Término empleado en la literatura para nombrar los archivos que almacenan información de las simulaciones en un instante preciso de tiempo.

Figura 2.5

Mapas bidimensionales de exploración de parámetros para las características más relevantes de la muestra de galaxias simuladas y observadas.



Nota. En el caso de los puntos representativos de las simulaciones el tamaño representa el *scale length* estelar. De izquierda a derecha se tiene: *scale length* en kpc Vs velocidad circular máxima en km s^{-1} y masa estelar en masas solares Vs velocidad circular máxima en km s^{-1} .

2.2. AURORA: observaciones sintéticas

La herramienta empleada en la generación de las observaciones sintéticas presentadas en este trabajo es el código AURORA*. Este código fue escrito y desarrollado en su mayoría por el director de esta tesis, el Dr. Juan Carlos Basto Pineda. En él se modelan los procesos de emisión de las partículas de gas en las simulaciones, y su registro en el detector, teniendo en cuenta factores como: la densidad, la temperatura, el estado de ionización, la velocidad de las partículas, el corrimiento al rojo, la resolución espacial y espectral del instrumento de medición, la orientación de la galaxia en el cielo, su distancia, etc.

AURORA es un código en PYTHON que permite, a partir de un conjunto de criterios observacionales previamente definidos por el usuario, construir un cubo de datos realista para una galaxia simulada. Dicho cubo de datos puede ser analizado con las herramientas tradicionalmente empleadas en las observaciones de galaxias.

Modelado del proceso de emisión

El primer paso en la construcción de las observaciones sintéticas es el modelado del proceso emisión de luz. Dicho proceso puede efectuarse para el hidrógeno neutro (HI), presente en las regiones frías[†] de las galaxias, y para el hidrógeno ionizado ($H\alpha$), localizado normalmente en regiones de formación estelar. En el primer caso el fenómeno físico responsable de la emisión es el cambio en el estado energético base del átomo de hidrógeno, producto del *spin-flip*[‡] del

*<https://github.com/juan-pineda/Aurora>

[†]Normalmente por debajo de los 10^4 K.

[‡]Término empleado en la literatura para referirse al cambio de orientación en el spin de una partícula.

electrón. Esto se produce de manera natural debido a la separación hiperfina del estado triplete* (más energético) y singlete† (menos energético) del átomo. La diferencia energética de ambos niveles, estimada por la mecánica cuántica, es de $5,87433 \mu\text{eV}$ (Griffiths, 1982), determinando la longitud de onda en reposo asociada a esta línea de emisión (λ_{HI}) como

$$\lambda_{HI} = \frac{c}{\nu} = \frac{h \cdot c}{\Delta E_{HI}} = \frac{4,1357 \times 10^{-15} \cdot 2,9979 \times 10^8}{5,87433 \times 10^{-6}} = 21,106 \text{ cm}, \quad (2.4)$$

siendo h la constante de Planck, ν la frecuencia del fotón emitido, c la velocidad de la luz en el vacío y ΔE_{HI} la diferencia energética entre los niveles citados. Esta longitud de onda se corresponde con ondas de radio.

Este mecanismo prohibido‡ establece una vida media para el estado triplete de 10 millones de años, presentando una tasa de transición de $2,9 \times 10^{-15} \text{ s}^{-1}$. Así, es posible calcular la cantidad de fotones que serán emitidos por un conjunto de átomos de hidrógeno en estado neutro, y conociendo la energía de cada uno de ellos se puede caracterizar la relación masa-luminosidad para este proceso de emisión como (Walter y cols., 2008)

$$\gamma_{HI} = 5,32 \times 10^{18} \text{ erg s}^{-1} M_{\odot}^{-1}. \quad (2.5)$$

Para una mezcla de especies atómicas en estado gaseoso, se tendrá una luminosidad total emitida a través fotones λ_{HI} (L_{HI}) dada por

$$L_{HI} = m \cdot F_{HI} \cdot \gamma_{HI}, \quad (2.6)$$

dónde F_{HI} representa la fracción de HI presente en la mezcla y m la masa total del gas.

Para el caso del hidrógeno ionizado, el proceso de fotoionización y recombinación es el responsable de la emisión de luz por parte del átomo. La línea de emisión H_{α} corresponde a la primera transición de Balmer, en la cual el electrón decae del tercer al segundo nivel de energía ($\Delta E_{H_{\alpha}} = 1,89 \text{ eV}$), asignando a este proceso una longitud de onda en reposo de

$$\lambda_{H_{\alpha}} = \frac{c}{\nu} = \frac{h \cdot c}{\Delta E_{H_{\alpha}}} = \frac{4,1357 \times 10^{-15} \cdot 2,9979 \times 10^8}{1,89} = 656,28 \times 10^{-7} \text{ cm}. \quad (2.7)$$

Para estimar la cantidad de fotones producida por un conjunto de átomos de hidrógeno ionizado, se considera el caso-B de la tasa de recombinación efectiva para H_{α} . Este coeficiente ($C_{H_{\alpha}}$) determina el número de recombinaciones que serán efectuadas para una determinada cantidad de iones, por unidad de volumen y tiempo, en función de la temperatura (T) del gas

$$C_{H_{\alpha}} = C_{H_0} \cdot \left(\frac{T}{1 \times 10^4} \right)^{-0,845}, \quad (2.8)$$

siendo C_{H_0} la constante de proporcionalidad en $\text{cm}^3 \text{ s}^{-1}$. A partir de aquí la luminosidad total emitida en la línea H_{α} ($L_{H_{\alpha}}$) será determinada por

*Estado del átomo de hidrógeno en el que el spin del protón y el electrón son paralelos.

†Estado del átomo de hidrógeno en el que el spin del protón y el electrón son antiparalelos.

‡Nombre que reciben los procesos de emisión o absorción de fotones que no se permiten bajo las aproximaciones de las reglas de selección.

$$L_{H_{\alpha}} = V \cdot n_{H_{\alpha}}^2 \cdot \left(\frac{h \cdot c}{\lambda_{H_{\alpha}}} \right) \cdot C_{H_{\alpha}}, \quad (2.9)$$

donde V representa el volumen del gas y $n_{H_{\alpha}}$ la densidad numérica de iones presentes en la mezcla por unidad de volumen.

Debido a la dispersión de velocidades de átomos y moléculas asociada a la temperatura, las líneas de emisión H_{α} y HI presentan un ensanchamiento espectral. Asumiendo que las partículas en la mezcla se encuentran en equilibrio cinético, las velocidades del sistema siguen la distribución Maxwell-Boltzmann, generando líneas de emisión gaussianas cuya dispersión (σ) se describe como

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{k_B \cdot T}{\mu \cdot m_p} \right)}, \quad (2.10)$$

siendo k_B la constante de Boltzmann, μ el peso molecular medio y m_p la masa del protón.

Las ecuaciones 2.6, 2.9, 2.7, 2.4 y 2.10 caracterizan la luminosidad total, la longitud de onda central y el ancho de las líneas de emisión para cualquier mezcla gaseosa con presencia de hidrógeno, estableciendo las bases del modelado de emisión de luz para las simulaciones de galaxias. En el caso de AURORA este proceso, al igual que el modelado de las características instrumentales, es desarrollado en equipo por los módulos **convolutions.py**, **spectrum_tools.py** y **emitters.py** los cuales serán descritos a continuación.

Emitters.py

Este módulo se encarga de modelar las líneas de emisión de las partículas de gas, usando las características físicas almacenadas en la simulación: energía interna (u), densidad (ρ), masa (m), velocidad (v_z), *smoothing length** (r) y fracción de gas ionizado ($F_{H_{\alpha}}$) para cada partícula.

En primer lugar el código estima el peso molecular medio asumiendo que la mezcla de gas está compuesta solamente de hidrógeno (H) y helio (He) en la proporción cosmológica (76 % y 24 % respectivamente), y que únicamente el H puede alcanzar el estado de ionización. Para números atómicos $A_H = 1$ y $A_{He} = 4$, se obtiene[†]

$$\mu = \frac{4}{3 \cdot (0,76) + 1 + 4 \cdot (0,76) \cdot F_{H_{\alpha}}}. \quad (2.11)$$

Después, el módulo calcula la densidad numérica de iones en cm^{-3} , usando

$$n_{H_{\alpha}} = \frac{\rho \cdot F_{H_{\alpha}} \cdot (0,76)}{m_p}, \quad (2.12)$$

y por último estima la temperatura, en K, a partir de la suposición de gas ideal

*En primera aproximación puede ser interpretado como el tamaño de las partículas simuladas.

†Para la deducción detallada de la ecuación 2.11 remitirse al apéndice.

$$T = \left(\frac{5}{3} - 1\right) \frac{\mu \cdot m_p \cdot u}{k_B}. \quad (2.13)$$

Con el estado del gas definido, **emitters** calcula la luminosidad total de cada partícula, en erg s^{-1} , dependiendo del proceso de emisión indicado por el usuario. Para la generación de observaciones sintéticas a partir de la línea H_α la ecuación 2.9 es evaluada con los parámetros previamente calculados. Por otra parte, para modelar la línea HI se soluciona la ecuación 2.6 para cada partícula teniendo en cuenta que $F_{HI} = 1 - F_{H_\alpha}$. La obtención de observaciones sintéticas a partir de la emisión del hidrógeno neutro fue un proceso construido y añadido a AURORA como parte de este trabajo.

Finalmente, el ancho de la línea de emisión gaussiana de cada partícula se obtiene de la ecuación 2.10, mientras que la longitud de onda central es corregida debido al efecto Doppler* usando

$$\lambda_{H_\alpha obs} = \lambda_{H_\alpha} \cdot \left(\frac{v_z}{c}\right); \quad \lambda_{HI obs} = \lambda_{HI} \cdot \left(\frac{v_z}{c}\right), \quad (2.14)$$

donde λ_{HI} es la longitud de onda en reposo del HI calculada en 2.7, λ_{H_α} la longitud de onda en reposo para la línea H_α calculada en 2.7 y v_z la velocidad a lo largo de la línea de visión para cada partícula en el marco de referencia del observador.

Spectrum_tools.py y Convolutions.py

Este par de módulos son los responsables, dentro de la estructura de AURORA, de calcular a partir de las líneas de emisión de las partículas el flujo luminoso en cada canal espectral de cada pixel. Para lograr lo anterior se modelan los efectos de las resoluciones espaciales y espectrales de los instrumentos de medición, construyendo el cubo de datos de las simulaciones.

El primer paso de dicho proceso es la construcción de un arreglo cuatridimensional para el almacenamiento de información. En las primeras dos dimensiones, correspondientes a la cara frontal del cubo de datos, se codifica la información espacial de la observación sintética. Esto se logra generando una matriz cuadrada cuyo tamaño está definido por el campo de visión suministrado por el usuario. La tercera dimensión de este arreglo es la dimensión espectral del cubo de datos y se construye replicando n veces la cara frontal del cubo, siendo n el número de canales deseados dentro del rango espectral. Por último, la cuarta dimensión, incluida para facilitar el proceso de convolución posterior, se genera replicando m veces el cubo tridimensional, donde m representa el número de *smoothing lengths* existentes dentro de la simulación.

Una vez construido este arreglo, el código asigna cada línea de emisión para las partículas de gas en el cubo que le corresponde según su *smoothing length*. Posteriormente, integrando las líneas de emisión gaussianas dentro de los límites de cada canal espectral, se determina el flujo en dicho canal para el pixel al que cada partícula contribuye, el cual es además atenuado teniendo en cuenta la distancia

*Este proceso se describe en la construcción de las observaciones realistas de la sección 1.4

$$\frac{L}{4\pi D^2 \Delta v} \cdot \int_{v_{ch} - \frac{\Delta v}{2}}^{v_{ch} + \frac{\Delta v}{2}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(v_z - \bar{v})^2}{2\sigma^2}} dv =$$

$$\frac{L}{4\pi D^2 \Delta v} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{v_z - v_{ch} + \Delta v/2}{\sqrt{2}\sigma} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{v_z - v_{ch} - \Delta v/2}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right], \quad (2.15)$$

donde L representa la luminosidad total para cualquiera de las dos líneas de emisión, Δv es el ancho del canal en términos de velocidad, v_{ch} es la velocidad asociada a la longitud de onda central del canal, \bar{v} es la velocidad central de la distribución, erf es la función error y D es la distancia a la galaxia suministrada por el usuario. El poder de resolución espectral es modelado en este proceso a través del ensanchamiento del σ para cada línea de emisión.

Acto seguido se aplican convoluciones espaciales para cada escala en las rebanadas transversales de los cubos, emulando el ensanchamiento de las fuentes puntuales de luz debido el tamaño de las partículas y la PSF. Finalmente, se suman todos los cubos tridimensionales, construyendo un único cubo de datos sintético para la simulación en cuestión, con las características observacionales deseadas por el usuario. Dicho cubo de datos es almacenado y exportado por el código en formato `.fits`. Este formato es tradicionalmente empleado en astronomía y permite almacenar todos los metadatos de las observaciones en su *header*.

Estructura, parámetros y variables

La estructura central de AURORA define tres clases principales de objetos. La primera de estas clases es *RunObj*^{*}, que agrupa todos los parámetros relacionados con el rendimiento computacional del código, y la información necesaria para la lectura y escritura de los archivos de entrada y salida respectivamente. En esta clase el usuario tiene la posibilidad de indicar el método de convolución de su preferencia dentro de algunas opciones ofrecidas por AURORA, al igual que el número máximo de partículas que se van a procesar de forma simultánea aprovechando la naturaleza vectorizada de PYTHON y NUMPY. Entre más grande sea este número de partículas los procesos serán más rápidos, pero esto depende de la capacidad de computo disponible (p.ej. la memoria RAM).

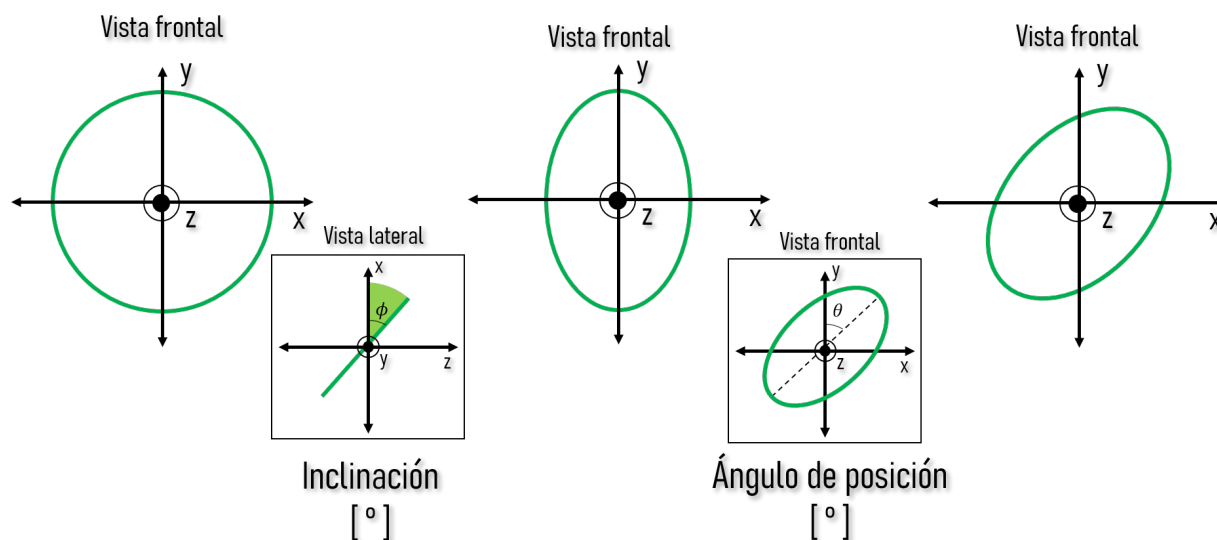
La segunda clase es *GeometryObj*[†], que almacena las variables que determinan la orientación geométrica que tendrán las observaciones sintéticas en la bóveda celeste, verifica la autoconsistencia de los parámetros suministrados por el usuario, efectúa las transformaciones de unidades para las variables de entrada y filtra las partículas de la simulación, si el usuario así lo desea, de acuerdo a las propiedades que se le especifique. Dentro de los parámetros esenciales adscritos a la clase *GeometryObj* se encuentran el ángulo de inclinación (ϕ), el ángulo de posición (θ) y la distancia a la galaxia (ver figura 2.6).

^{*}Para mas información consultar el módulo `configuration.py` de AURORA.

[†]Para mas información consultar el módulo `configuration.py` de AURORA.

Figura 2.6

Definición de los ángulos de inclinación (ϕ) y posición (θ).



Nota. El ángulo de inclinación se calcula a partir de la relación entre ambos semiejes de la galaxia. El ángulo de posición se mide respecto del eje y y el semieje mayor. De izquierda a derecha: galaxia tipo disco en rotación en vista frontal con 0 grados de inclinación y posición, galaxia tipo disco en rotación en vista frontal con ϕ grados de inclinación y 0 grados de posición, galaxia tipo disco en rotación en vista frontal con ϕ grados de inclinación y θ grados de posición.

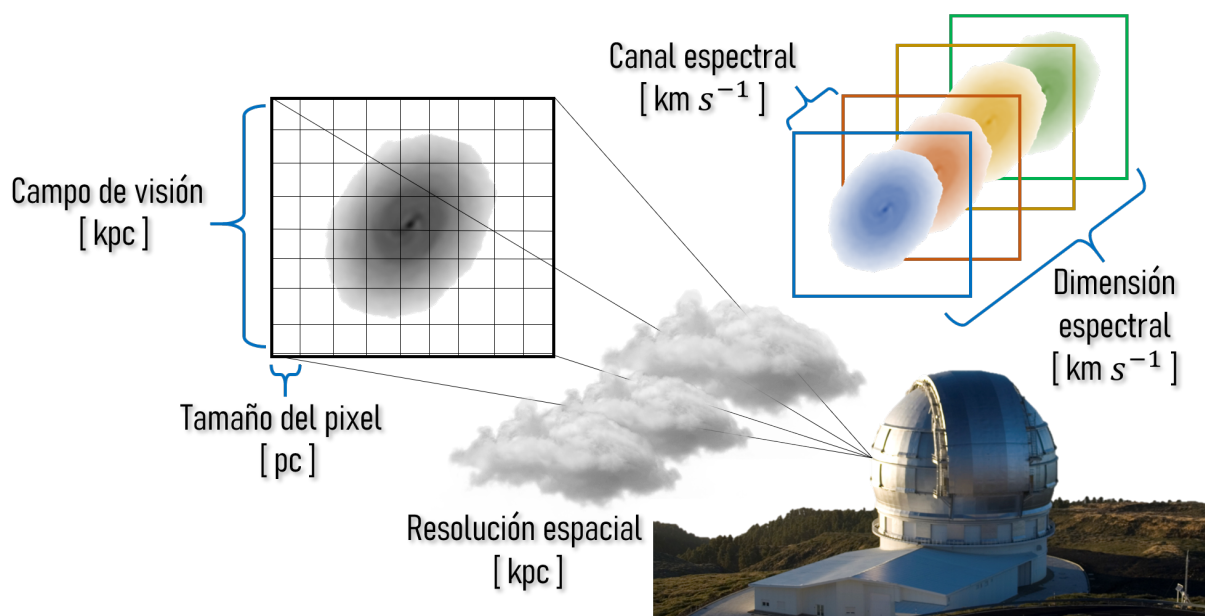
La tercer y última clase es *SpectromObj*^{*}, que agrupa las características instrumentales a emular en la generación de las observaciones sintéticas: la PSF, el poder de resolución espectral, el rango espectral a ser cubierto, el tamaño de los spaxels[†], el campo de visión y el tamaño de los píxeles del telescopio (ver figura 2.7). Finalmente, el código determina si algún parámetro esencial no fue provisto por el usuario y asigna valores preestablecidos típicos de este tipo de observaciones.

^{*}Para mas información consultar el módulo `configuration.py` de AURORA.

[†]Término empleado en la literatura para referirse a los píxeles espectrales.

Figura 2.7

Principales características asociadas a la clase *SpectromObj*.



Nota. La matriz en la esquina superior izquierda representa la cara frontal del cubo de datos y representa el campo de visión en el cielo cubierto por el detector, el cual será muestreado con un número de píxeles definidos por el usuario. El arreglo de la esquina superior derecha ejemplifica la construcción del cubo de datos a partir del ancho del canal espectral y el rango o dimensión espectral determinados por el usuario.

Módulo de acople GADGET-AURORA

AURORA fue diseñado originalmente para postprocesar galaxias modeladas con el código de simulación RAMSES*. Este código, gracias a su malla de refinamiento adaptable (Teyssier, 2002), abarca las dimensiones espaciales de las galaxias con celdas cuyos tamaños (*smoothing lengths*) se dividen a la mitad de forma iterativa a medida que la densidad del gas aumenta. Esta característica discretiza los *smoothing lengths* de las celdas, agrupándolos en escalas de no más de 10 valores diferentes.

Sin embargo, como se explicó en la sección 2.1, la población de galaxias seleccionadas para esta tesis fue generada con GADGET-2, un código de simulación de galaxias de naturaleza lagrangiana (Springel, 2005). Esto se traduce en que, en lugar de celdas, las galaxias son constituidas por partículas, cuyo *smoothing length* se determina a partir de las propiedades locales del medio en el que se resuelven las ecuaciones hidrodinámicas, para cada instante de tiempo[†]. Esta metodología da como resultado una variabilidad casi continua sobre los tamaños de las partículas, y por ende miles o millones de valores diferentes para el *smoothing length*. Lo anterior hace imposible el manejo de estas galaxias en AURORA, debido al aumento exagerado en los tiempos y recursos computacionales. Por tanto, en esta tesis de grado, fue programado un módulo de acople que per-

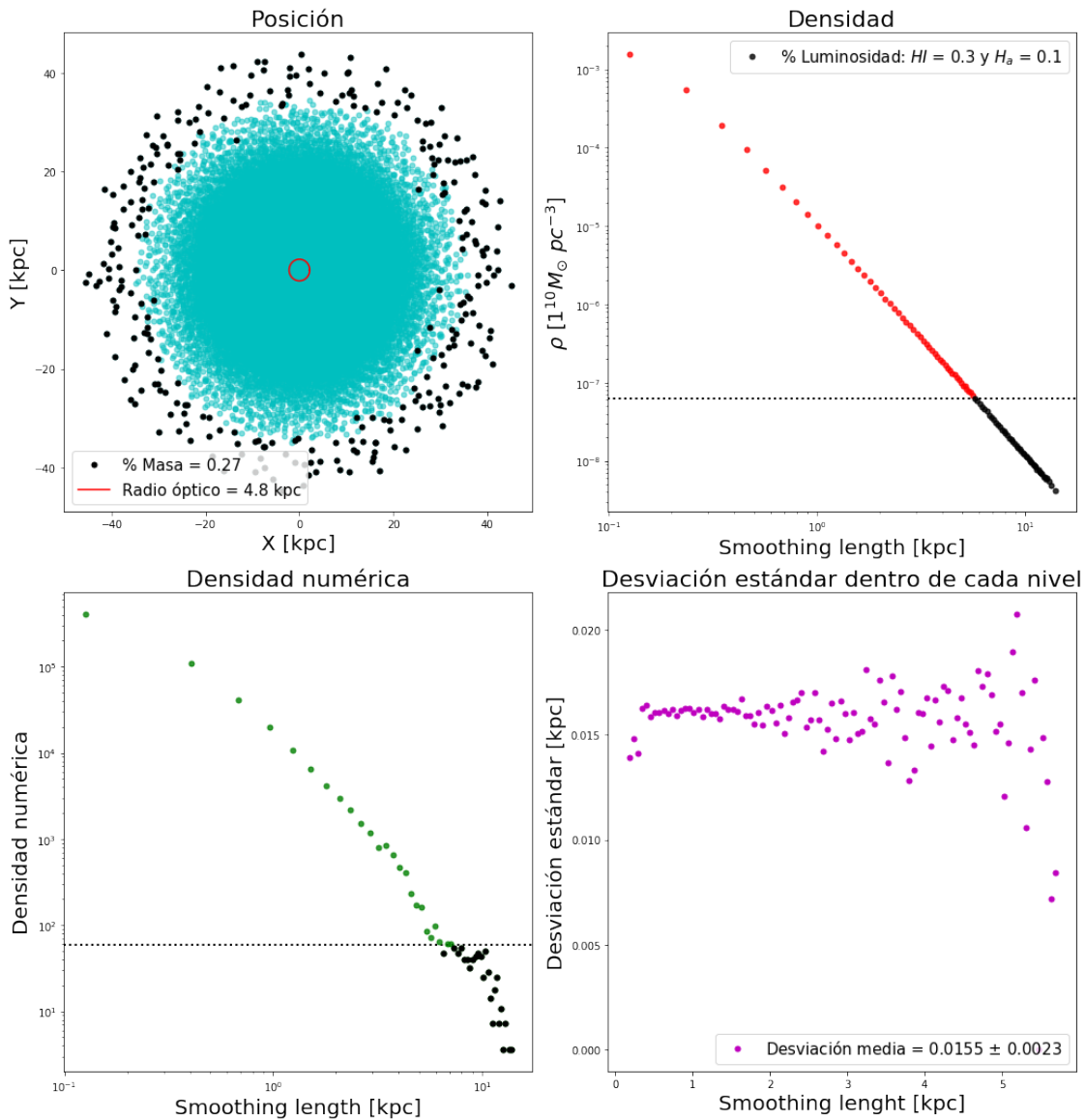
* <https://www.ics.uzh.ch/~teyssier/ramses/RAMSES.html>

[†] Principalmente este tamaño es inversamente proporcional a la densidad de la región que dicha partícula representa.

mite solucionar esta problemática.

Figura 2.8

Características generales de las partículas filtradas por el modulo de acople GADGET-AURORA.



Nota. En la primera fila de izquierda a derecha: posición de las partículas de gas y densidad promedio de cada nivel de escalas. Segunda fila: densidad numérica promedio de cada nivel de escalas y desviación estándar del *smoothing length* en cada escala de tamaños. Las partículas filtradas por el módulo GADGET-AURORA se representan por los puntos y líneas negras, mientras que las empleadas en la conformación de las escalas de tamaño se representan con los puntos azules, verdes, rojos y morados. Esto para la galaxia *G1* en su *snapshot 300*.

El módulo GADGET-AURORA discretiza los valores de *smoothing length* de las partículas de gas agrupándolas en niveles representativos, minimizando la desviación estándar de los valores en

cada nivel (ver cuadro inferior derecho de la figura 2.8). Para evitar un número de niveles elevado que genere un costo computacional prohibitivo, el código establece un umbral de densidad para filtrar algunas partículas.

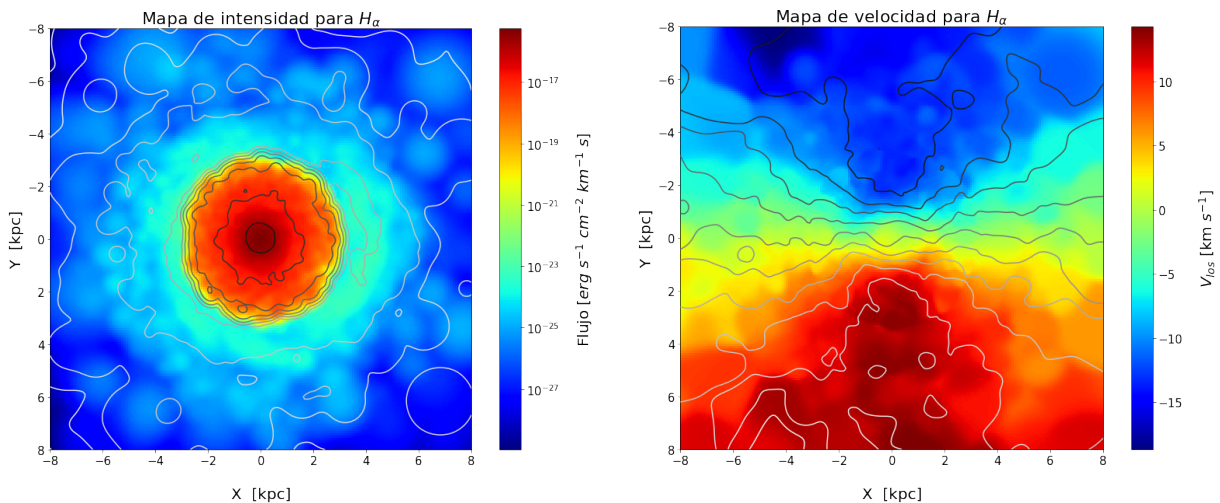
Las partículas que hacen parte de niveles con una densidad promedio menor a $7 \times 10^2 M_{\odot} \text{ pc}^{-3}$ (ver puntos negros en el cuadro superior derecho de la figura 2.8), una densidad numérica promedio menor a 60 pc^{-3} (ver puntos negros en el cuadro inferior izquierdo de la figura 2.8) y que se encuentran en regiones exteriores de la galaxia muy alejadas del radio óptico* (ver puntos negros en el cuadro superior izquierdo de la figura 2.8), son excluidas. Dichas partículas representan un aporte de menos de 0,5 % de la luminosidad total y menos de 0,3 % de la masa total de la galaxia. Finalmente, el módulo exporta un archivo con las escalas de tamaño óptimas que se deben suministrar a AURORA en el conjunto de parámetros iniciales.

2.3. Curvas de rotación sintéticas

Una vez generados los cubos de datos sintéticos con AURORA, el siguiente paso es la construcción de las curvas de rotación. Para esto fueron programadas dos rutinas en PYTHON. Lo primero es la generación de los mapas de intensidad y de velocidad (ver figuras 2.9 y 2.10). Esto se consigue con la metodología descrita en la sección 1.4, a partir del colapso del cubo de datos a lo largo de su dimensión espectral (ver ecuaciones 1.2 y 1.3).

Figura 2.9

Mapas de intensidad y de velocidad para la línea de emisión H_{α} , en el caso de la galaxia *Dwarf1* en su *snapshot 500*.

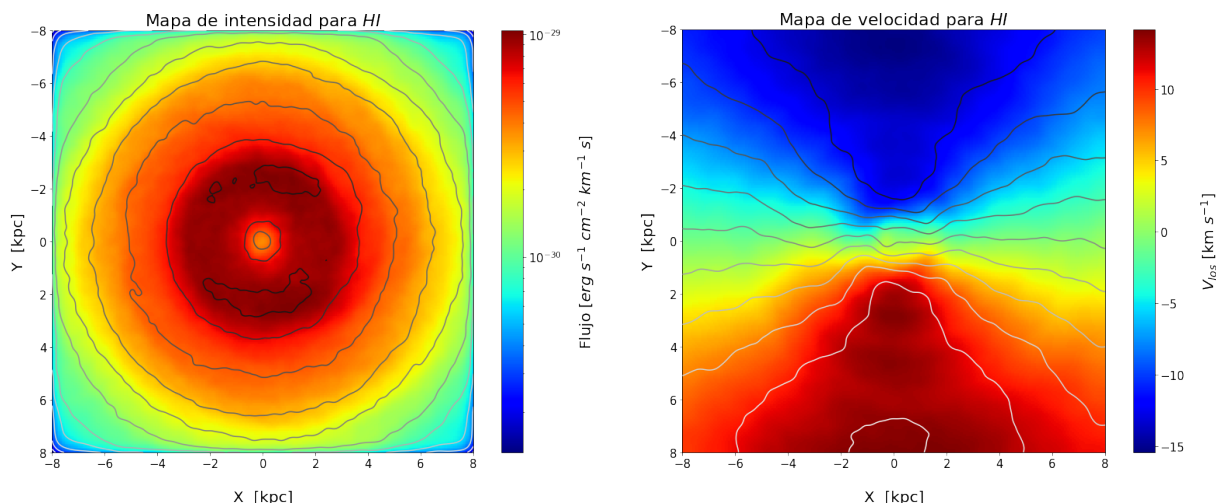


Nota. Mapa de intensidad (izquierda) y mapa de velocidad (derecha) generados por el módulo `datacube.py` de AURORA, para la línea de emisión H_{α} , en el caso de la galaxia *Dwarf1* en su *snapshot 500*. Las líneas representan contornos de isovelocidad en intervalos de $3,5 \text{ km s}^{-1}$, y de flujo. Esto con una inclinación de 15° , una resolución espacial de 200 pc y una distancia de $20,6 \text{ Mpc}$.

*Radio que encierra el 83 % de la luminosidad de una galaxia.

Figura 2.10

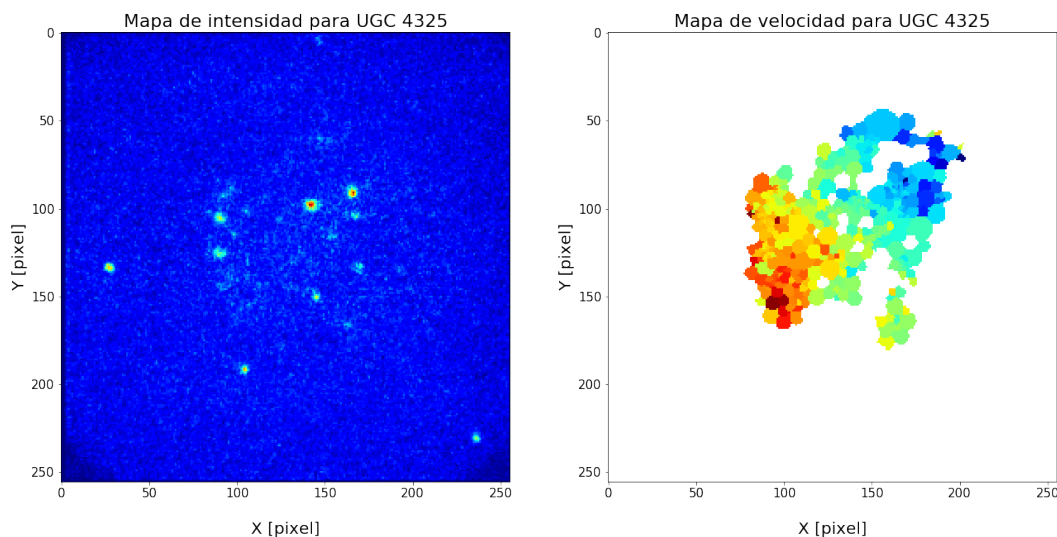
Mapas de intensidad y de velocidad para la línea de emisión HI, en el caso de la galaxia Dwarf1 en su snapshot 500.



Nota. Mapa de intensidad (izquierda) y mapa de velocidad (derecha) generados por el módulo `datacube.py` de AURORA, para la línea de emisión HI, en el caso de la galaxia Dwarf1 en su *snapshot 500*. Las líneas representan contornos de isovelocidad en intervalos de 3,5 km s⁻¹, y de flujo. Esto con una inclinación de 15°, una resolución espacial de 200 pc y una distancia de 6,8 Mpc.

Figura 2.11

Mapas de intensidad y de velocidad para la línea de emisión H_α, para la galaxia UGC4325.



Nota. Mapa de intensidad (izquierda) y mapa de velocidad (derecha) para la línea de emisión H_α, en el caso de la galaxia UGC4325 (presentada en Oman y cols. (2015)). Los cubos de datos para la construcción de los mapas fueron extraídos de la base de datos del *survey* GHASP*.

Los mapas de velocidad sintéticos (recuadros de la derecha en las figuras 2.9 y 2.10) permiten visualizar la estructura de diagrama de araña que forman las regiones de isovelocidad, tal como se describe en la sección 1.4. Las observaciones sintéticas generadas a partir de la emisión de hidró-

geno neutro (figura 2.10) presentan menor nivel de detalle en comparación con las de hidrógeno ionizado (figura 2.9), que a su vez exhiben un disco galáctico mucho más concentrado. Abonado a lo anterior, se pueden distinguir las regiones de formación estelar de la galaxia como secciones parcheadas en los mapas de H_α .

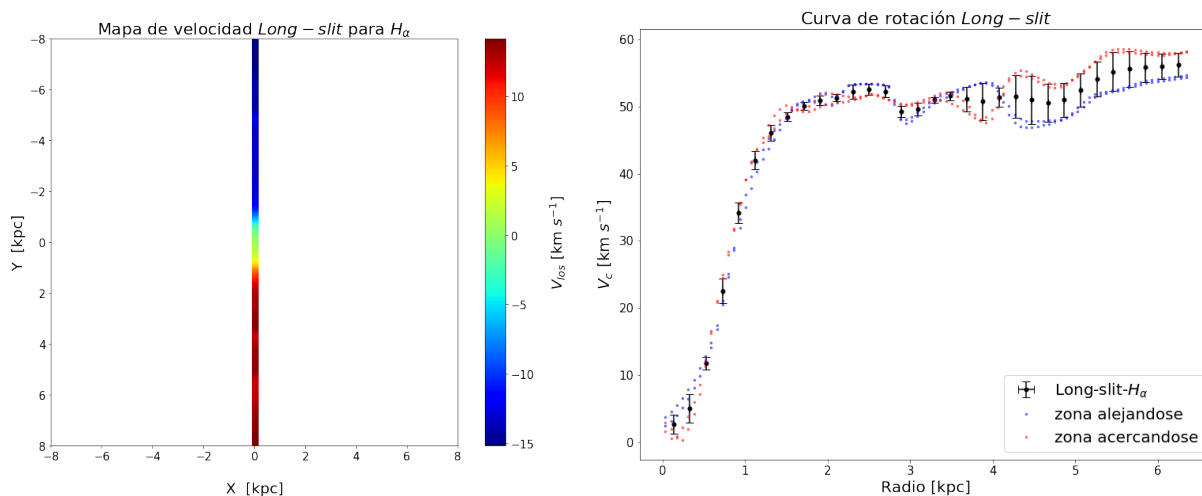
Contrastar los mapas sintéticos con los mapas reales (ver figura 2.11) permite identificar diferencias como: la presencia de ruido, la emisión localizada y la pérdida de información en algunos píxeles de las observaciones, respecto a la emisión homogénea de las galaxias simuladas. Estas variaciones demuestran que el proceso de construcción de las observaciones sintéticas en este experimento sigue siendo idealizado. A partir del mapa de velocidad, la construcción de las curvas de rotación sintéticas se puede realizar siguiendo dos metodologías diferentes.

Curvas de rotación *Long-Slit*

Este proceso de construcción de curvas de rotación está basado en las observaciones generadas a partir de los espectrógrafos de ranura estrecha (*long-slit*), y se aplica a observaciones en H_α . En este caso, el espectrógrafo es empleado en conjunto con una barrera mecánica que limita la entrada de luz a un segmento lineal de la bóveda celeste. Para galaxias espirales en rotación la ranura se ubica a lo largo del semieje mayor, para garantizar la máxima proyección de la velocidad circular en la componente de la velocidad a la largo de la línea de visión (ver figura 1.8 y ecuación 1.4).

Figura 2.12

Construcción de las curvas de rotación long-slit.



Nota. A la izquierda, representación del campo de visión de la ranura estrecha, obtenido luego de la aplicación de la máscara en el mapa de velocidad. A la derecha, curva de rotación de la galaxia *Dwarf1* en su *snapshot 500*. Los puntos en azul son los valores deproyectados de la velocidad circular para la región de la galaxia que se aleja, los puntos en rojo son la velocidad circular para la región que se acerca. Los puntos negros corresponden a los valores de la V_c luego del muestreo de los valores individuales almacenados en los píxeles.

El software simula esta característica aplicando una máscara a los mapas de velocidad sintéticos, de manera que solo las dos columnas de píxeles a lo largo del semieje mayor de las observa-

ciones queden disponibles (ver recuadro izquierdo de la figura 2.12). Acto seguido, los píxeles son muestreados en intervalos del tamaño de la resolución espacial (PSF), promediando los valores de la velocidad dentro de cada bin y reportando la desviación estándar como una medida del error.

Finalmente, dichos valores de V_{los} son evaluados en la ecuación 1.4, conociendo de antemano la inclinación y el ángulo de posición de las observaciones sintéticas, obteniendo la V_c en cada radio de la galaxia (ver recuadro derecho de la figura 2.12). Los efectos de errores sobre estos factores serán analizados en un experimento específico descrito en la sección 2.4.

Curvas de rotación 2D

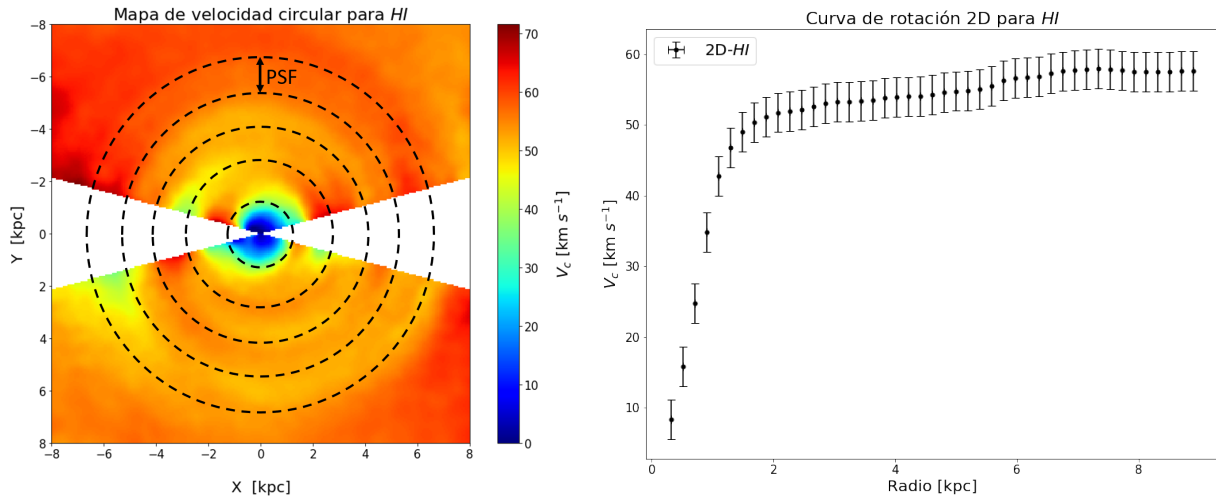
Nos referiremos a este tipo de curvas de rotación como las curvas generadas cuando se dispone de todo el campo de velocidad, para aprovechar al máximo toda la información espacial 2D. Este segundo método sigue la metodología empleada en las observaciones modernas para ambas líneas de emisión (expuesta en la sección 1.4), asumiendo la muestra de galaxias simuladas como discos en rotación perfecta.

A partir de este punto el código evalúa la velocidad circular, V_c , a partir de la componente a lo largo de la línea de visión, V_{los} , reescribiendo la ecuación 1.4 como

$$V_c(r) = \frac{(V_{los}(R) - V_{sys}) \cdot \alpha}{\sin(\phi) \cos(\psi - \theta)}; \quad \alpha \equiv \sqrt{\cos^2(\psi - \theta) + \frac{\sin^2(\psi - \theta)}{\cos^2(\phi)}}, \quad (2.16)$$

Inicialmente, se construyen las curvas de rotación utilizando los valores precisos del centro, ángulo de inclinación (ϕ) y ángulo de posición (θ) con el que fueron generadas las observaciones sintéticas. Los efectos de errores sobre estos factores serán analizados en un experimento específico descrito en la sección 2.4.

Nótese que la división por el factor $\cos(\psi - \theta)$ tiene el potencial de amplificar enormemente pequeños errores en las medidas de V_{los} cuando $\psi - \theta \approx 90^\circ$, lo que induce, incorrectamente, valores de V_c artificialmente altos cerca del semieje menor. Para evitar este tipo de errores, siguiendo la literatura, se aplica una máscara sobre el mapa de velocidad circular en un cono de 15° alrededor del semieje menor (ver recuadro izquierdo de la figura 2.13). Finalmente, el código calcula cada uno de los puntos de la curva de rotación, promediando las velocidades circulares encerradas en elipses concéntricas espaciadas por el tamaño de la PSF, reportando la desviación estándar de cada intervalo como una medida de error (ver recuadro derecho de la figura 2.13). La elipticidad y orientación de dichas elipses son calculadas a partir de ϕ y θ verdaderos.

Figura 2.13*Construcción de las curvas de rotación 2D.*

Nota. A la izquierda, mapa de velocidad circular luego de la aplicación de la máscara. Las elipses representan los intervalos radiales (líneas punteadas). A la derecha, curva de rotación de la galaxia *Dwarf1* en su *snapshot* 500. Los puntos negros corresponden a los valores promedio de la velocidad circular para cada intervalo radial muestreado.

2.4. Estudio sistemático de factores observacionales

En este trabajo se desea estudiar hasta que punto la diversidad de curvas de rotación puede ser originada por la inclusión de factores observacionales. Para ello, se propone el desarrollo de un experimento controlado, variando sistemáticamente algunos de los principales factores implicados en las observaciones. En esta sección se presentan las variaciones empleadas en la generación de las observaciones sintéticas de esta tesis.

Líneas de emisión

El 57,3% de las observaciones presentadas en [Oman y cols. \(2015\)](#) fueron construidas a partir de las líneas de emisión H_α y HI . Ambos trazadores fueron considerados en la construcción de los cubos para las observaciones sintéticas, usando los dos procesos de modelado de emisión luz en AURORA. Los parámetros observacionales fueron elegidos para ser representativos de las observaciones disponibles reportadas en la literatura ([Pineda y cols., 2017](#)), y teniendo en cuenta las apreciaciones presentadas en la sección 2.1.

Para H_α se empleó un tamaño del píxel de $0,7''$, resolución espacial de $2''$, poder de resolución espectral* de 3000, canales espectrales de 20 km s^{-1} y un rango espectral de 600 km s^{-1} . En el caso de HI se utilizaron píxeles de $1,5''$, una resolución espacial de $6''$, un poder de resolución espectral de 9000, un canal espectral de 5 km s^{-1} y un rango espectral de 400 km s^{-1} . Esto permitió generar los mapas sintéticos de intensidad y velocidad para ambas líneas de emisión en cada configuración de parámetros observacionales.

*El poder de resolución espectral (R) se define como $R = \lambda/LSF$, siendo λ la longitud de onda de referencia.

Ángulos de inclinación

Este factor es uno de los parámetros observacionales que incide de manera directa en la forma de las curvas de rotación (ver la ecuación 1.4). Todas las observaciones sintéticas producidas en esta tesis fueron recreadas para cinco ángulos de inclinación distintos: 15°, 30°, 45°, 60° y 75°, reproduciendo el espectro de posibilidades presentado en la muestra de galaxias observadas (ver cuadro 2.2).

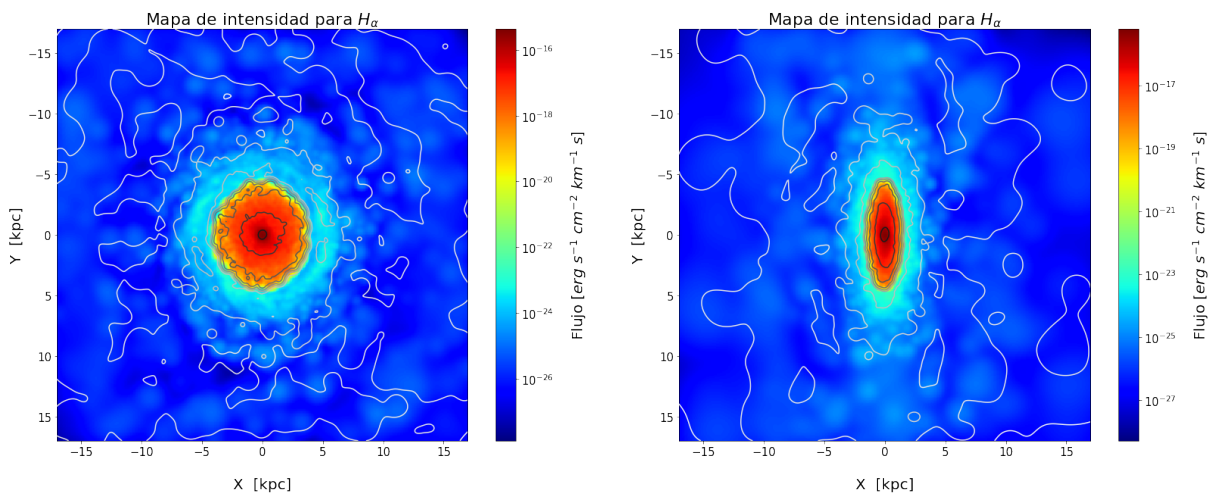
Tabla 2.2

Galaxias albergadas dentro de la muestra de observaciones para cada rango de valores del ángulo de inclinación (Oman y cols., 2015).

Propiedad	Rango	Cantidad de galaxias	Porcentaje
Ángulo de inclinación	< 15°	1	0,4 %
	< 30°	13	5,4 %
	< 45°	65	27,1 %
	< 60°	131	54,6 %
	< 75°	212	88,3 %
	< 90°	248	100,0 %

Figura 2.14

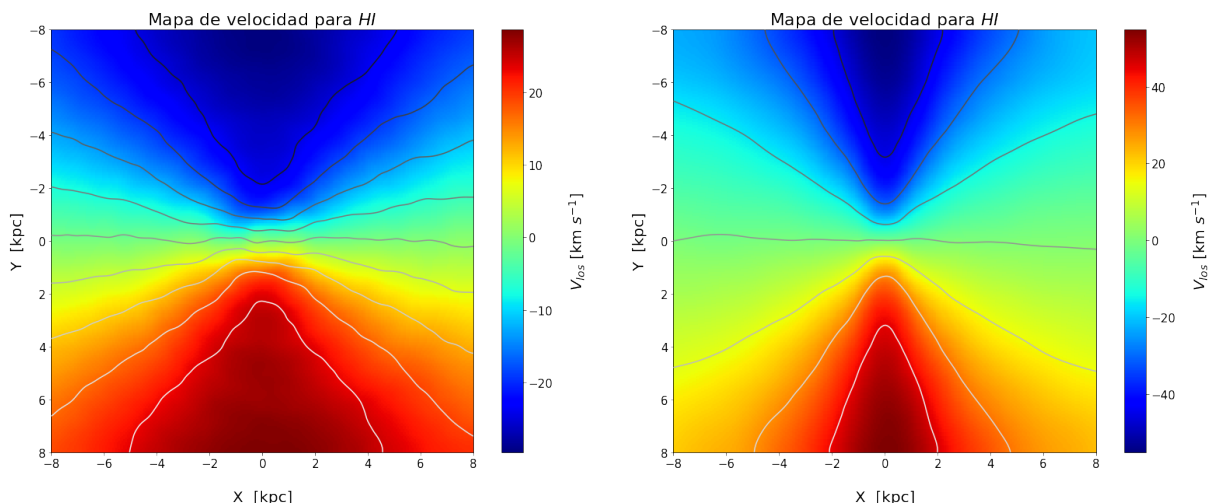
Mapa de intensidad para la línea de emisión H α , con ángulo de inclinación de 30° y 75°, para la galaxia Dwarf2 snapshot 500.



Nota. Las líneas representan contornos de igual flujo. Esto con una resolución espacial de 200 pc y una distancia de 20,6 Mpc.

Figura 2.15

Mapa de velocidad para la línea de emisión HI, con ángulo de inclinación de 30° (izquierda) y 75° (derecha), para la galaxia Dwarfl snapshot 500.



Nota. Las líneas representan contornos de isovelocidad en intervalos de 12 km s^{-1} . Esto con una resolución espacial de 200 pc y una distancia de 6,8 Mpc.

Resoluciones espaciales

La resolución espacial de las observaciones es el factor más relevante en la calidad de los mapas de intensidad y velocidad, pues determina la posibilidad de resolver en mayor o menor detalle la estructura interna de las galaxias. Para este estudio fueron empleados tres diferentes tamaños físicos para las resoluciones: $\sim 200 \text{ pc}$, $\sim 400 \text{ pc}$ y $\sim 800 \text{ pc}$, representativos del rango de valores presentado por Oman y cols. (2015) (ver cuadro 2.3).

Tabla 2.3

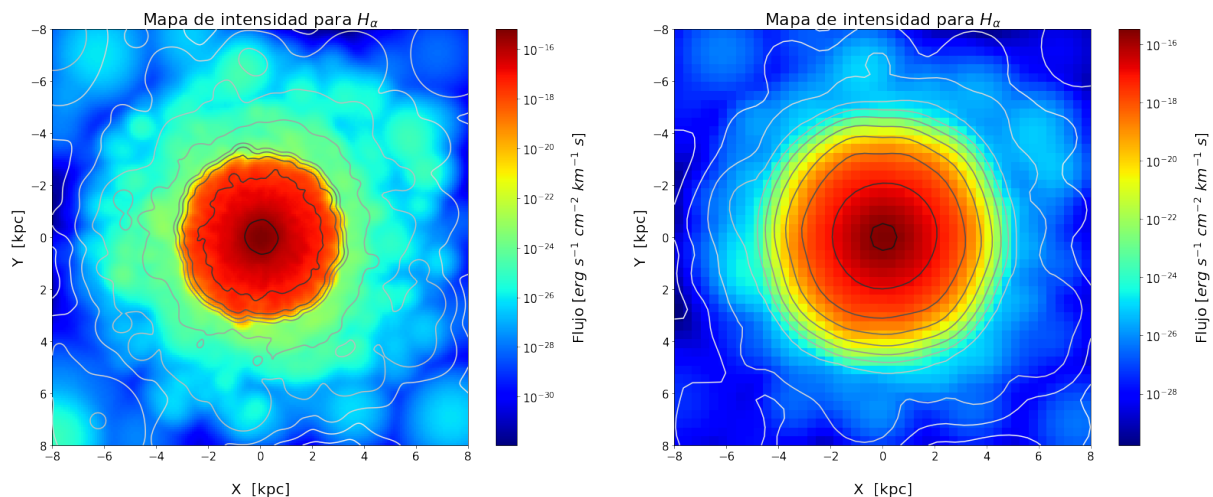
Galaxias albergadas dentro de la muestra de observaciones para cada rango de valores de la resolución espacial (Oman y cols., 2015).

Propiedad	Rango	Cantidad de galaxias	Porcentaje
Resolución espacial	< 200 pc	61	24,6 %
	< 400 pc	103	41,5 %
	< 800 pc	154	62,1 %
	< 1600 pc	248	100,0 %

Estas variaciones fueron modeladas por AURORA mediante la variación de la distancia de diámetro angular. Para observaciones de hidrógeno neutro las observaciones sintéticas situaron a las galaxias en 6,9 Mpc, 13,7 Mpc y 27,5 Mpc respectivamente, de manera que la PSF de $6''$ se correspondiera con un tamaño físico de 200 pc, 400 pc y 800 pc. Por otra parte las observaciones de hidrógeno ionizado fueron situadas a distancias de 20,6 Mpc, 41,2 Mpc y 82,5 Mpc de manera que la PSF de $2''$ representara exactamente los mismos tamaños físicos previamente descritos.

Figura 2.16

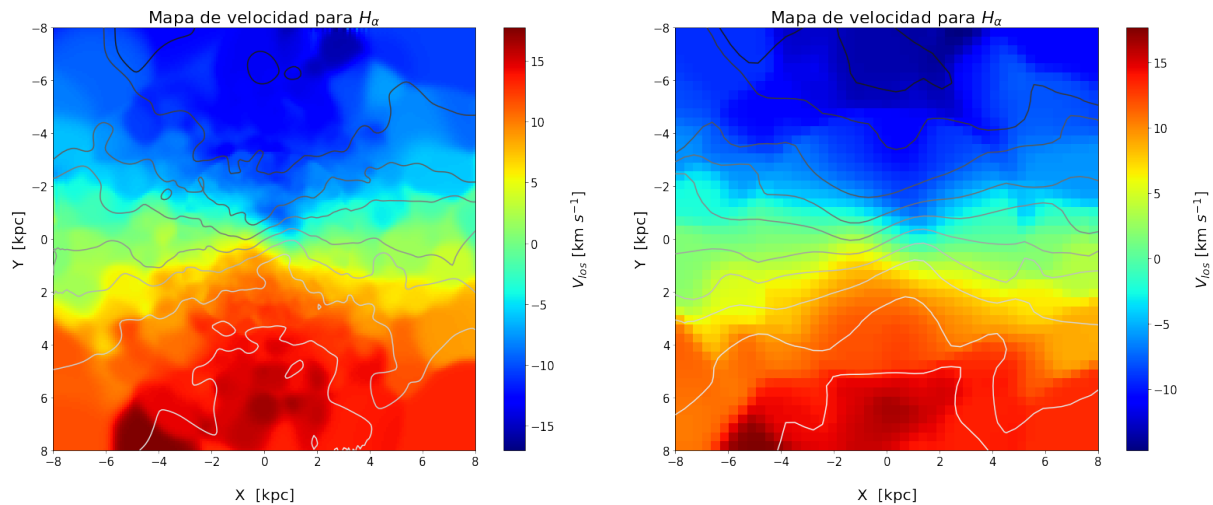
Mapa de intensidad para la línea de emisión H_α , para dos valores resoluciones de la galaxia Dwarf1 snapshot 300.



Nota. Las líneas representan contornos de igual flujo. Esto con una inclinación de 15° .

Figura 2.17

Mapa de velocidad para la línea de emisión H_α , para dos valores resoluciones de la galaxia Dwarf1 snapshot 300.



Nota. Las líneas representan contornos de isovelocidad en intervalos de $3,5 \text{ km s}^{-1}$.

Espectrógrafos

Respecto al método empleado para el análisis de la información espectral, se garantizó que las curvas de rotación 2D fuesen producidas para todos los mapas de velocidad sintéticos. Las curvas tipo *long-slit* solo se generaron para las observaciones de H_α . Es importante recalcar que las observaciones *long-slit* son las más comunes disponibles y aun son muy usadas en la literatura. En particular para el caso de la muestra de [Oman y cols. \(2015\)](#) componen el 68,9% de la totalidad

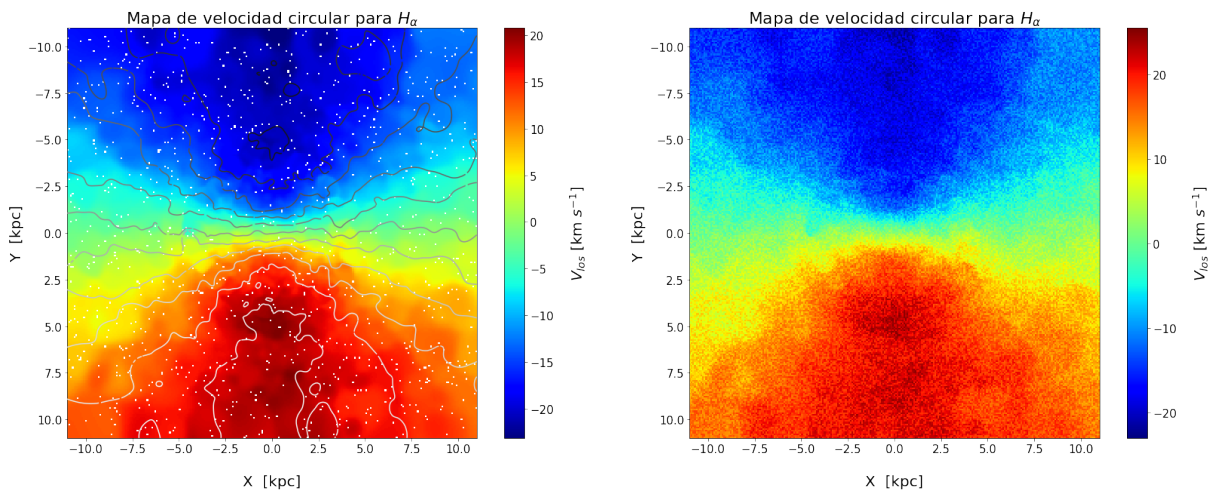
de las observaciones, mientras que el 31,1% restante son observaciones de campo integral. El campo de visión para todas las observaciones sintéticas fue determinado para garantizar la parte plana de las curvas de rotación en ambos casos.

Perturbaciones a los mapas de velocidad ideales

Por último, fueron incluidas perturbaciones en algunos mapas de velocidad, con el objetivo de modelar efectos realistas que afectan a las curvas de rotación (ver figura 2.11). Las alteraciones modeladas incluyen la presencia de ruido aleatorio en los mapas de velocidad, la pérdida de información en los mapas del 30% de píxeles, errores en la determinación del ángulo de inclinación de 5° y 10° , y fallos en la estimación de la distancia a la galaxia en un 10% y 20%. Todos estos valores fueron seleccionados para ser representativos de los errores reportados en la literatura para este tipo de observaciones.

Figura 2.18

Mapa de velocidad para la línea de emisión H_α , luego de la pérdida de información y la inclusión de procesos de simulación de ruido, para la galaxia G0 snapshot 500.



Nota. Las líneas representan contornos de isovelocidad en intervalos de $4,5 \text{ km s}^{-1}$. Esto con una inclinación de 15° , una resolución espacial de 200 pc y una distancia de 20,6 Mpc.

Finalmente, fueron construidos un total de $2 \times 5 \times 3 \times 75 = 2250$ cubos de datos sintéticos, a partir de las variaciones para las líneas de emisión (2), los ángulos de inclinación (5) y las resoluciones espaciales (3), sobre los 75 *snapshots* de la muestra de galaxias simuladas.

3. Resultados

‘The tension between observed and simulated properties can be largely alleviated when methodological bias from observations are taken into account.’
Antonios Katsianis

Como se expone en [Oman y cols. \(2015\)](#), la variabilidad observada en las curvas de rotación de las galaxias enanas, no es reproducida por las simulaciones. En este trabajo, sin embargo, encontramos que esta tensión puede reducirse cuando se introducen factores observacionales en esta comparativa.

En este último capítulo se corrobora la autosimilitud en las curvas de las simulaciones de galaxias, cuando se emplean los métodos tradicionales de construcción. Posteriormente se presentan los resultados de los experimentos sintéticos, cuantificando su variabilidad emergente. Esto con el objetivo de identificar los principales factores observacionales responsables del aumento en la diversidad de las curvas de rotación para las simulaciones.

3.1. Velocidad circular en las simulaciones

En general, los perfiles de velocidad circular para las galaxias simuladas son generados a partir del perfil radial de masa encerrada ($M(< r)$), siendo

$$V_c(r) = \sqrt{\left(\frac{GM(< r)}{r}\right)}, \quad (3.1)$$

donde G es la constante gravitacional universal y r el radio medido desde el centro de la galaxia. Este es el caso de [Oman y cols. \(2015\)](#).

Esta ecuación se deriva de la suposición de distribuciones de masa esféricas, de manera que la velocidad circular de las partículas se determina a partir del potencial gravitacional total. Esto aplica para galaxias enanas con simetría vertical y axial cuyas partículas rotan en equilibrio bajo la sola acción de la gravedad.

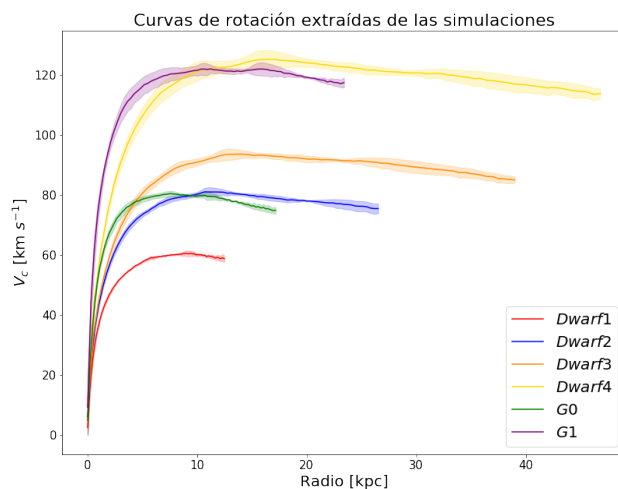
Esta metodología fue empleada en los primeros análisis cinemáticos de las simulaciones de solo materia oscura, y se sigue usando actualmente en simulaciones hidrodinámicas pese a sus limitaciones. La ecuación 3.1 no considera procesos esenciales en la construcción de las curvas de

rotación como los gradientes de presión, la dispersión de velocidades o los movimientos no circulares del gas (Pineda y cols., 2017; Trachternach, De Blok, Walter, Brinks, y Kennicutt Jr, 2008). Un método alternativo, que permite anular dichas limitaciones, sería reportar el valor promedio de las velocidades de giro para las partículas de gas en cada radio dado, aprovechando así toda la información almacenada en las simulaciones. Esto solo es posible cuando la resolución espacial, en términos del número de partículas, es lo suficientemente alta como para que estas cantidades estén bien representadas.

En esta tesis fueron utilizados ambos métodos para caracterizar las curvas de rotación extraídas directamente de las simulaciones, aplicando la ecuación 3.1 y el promedio de velocidades circulares sobre los *snapshots*: 100, 300 y 500 de todos los modelos. Este procedimiento genera 6 curvas de rotación para cada galaxia. El promedio de todas las curvas para cada modelo se presenta como las líneas sólidas de la figura 3.1, mientras el área sombreada de cada línea se corresponde con la desviación estándar. Dicha desviación será considerada como la variabilidad natural en las curvas producto de ambos procesos de medición, y de los múltiples instantes de tiempo analizados.

Figura 3.1

Velocidad circular en función del radio para cada una de las simulaciones, construidas con los métodos tradicionales.

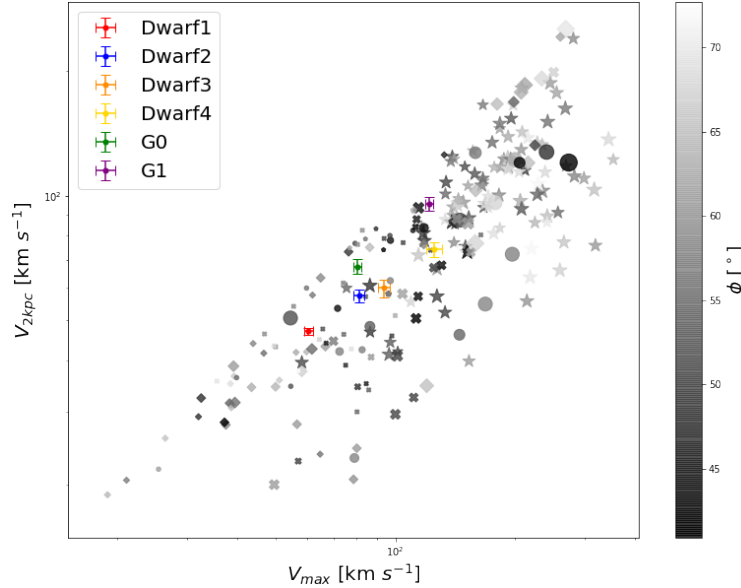


Nota. Los colores indican las 6 galaxias simuladas utilizadas en esta tesis. Las líneas sólidas son el promedio de las 6 curvas de rotación construidas para cada galaxia y el área sombreada representa la desviación estándar. Cada curva contiene la información de los *snapshots*: 100, 300 y 500 y los dos métodos de construcción (ecuación 3.1 y promedio de la velocidad circular).

Como se aprecia en la figura 3.1, todas las posibles formas para cada curva de rotación (área sombreada) son autosimilares. Esto se confirma si se comparan los resultados obtenidos con la variabilidad reportada en las observaciones utilizando el mismo diagrama diagnóstico propuesto por Oman y cols. (2015) (ver figura 3.2).

Figura 3.2

Velocidad circular a los 2 kpc de radio vs velocidad circular máxima. Comparación entre los valores obtenidos con los métodos tradicionales para las simulaciones y los datos observacionales.



Nota. Los puntos en escala de grises corresponden a los valores reportados en la muestra de galaxias observadas en [Oman y cols. \(2015\)](#), mientras los colores indican las 6 galaxias simuladas utilizadas en esta tesis. La barra de error indica la desviación estándar en cada valor de velocidad para las galaxias simuladas considerando los *snapshots*: 100, 300 y 500.

La variación en los valores de V_{max} para las observaciones se puede explicar debido a la diversidad de tamaños para las galaxias en dicha muestra (ver figura 2.2). Por otro lado, se ha argumentado que las discrepancias en los valores de V_{2kpc} para galaxias del mismo tamaño (igual V_{max}), no puede ser predicha por el modelo Λ CDM, ni reproducida por las simulaciones de galaxias.

Solo considerando las variaciones producto de los métodos teóricos de generación de curvas, y los diferentes instantes de tiempo analizados, las galaxias simuladas presentan una variabilidad en V_{2kpc} muy baja. Comparando la desviación estándar para las 6 curvas de cada galaxia, respecto a la desviación estándar de la velocidad circular a los 2 kpc de las observaciones, cada simulación reproduce un porcentaje de la variabilidad observada de: 2,1 % para *Dwarf1*, 4,6 % para *Dwarf2*, 6,7 % para *Dwarf3*, 7,2 % para *Dwarf4*, 6,5 % para *G0* y 8,6 % para *G1*. Esto demuestra la ausencia de cambios notables en la estructura interna de las curvas de rotación para cada simulación, inclusive si son empleados métodos de construcción diferentes.

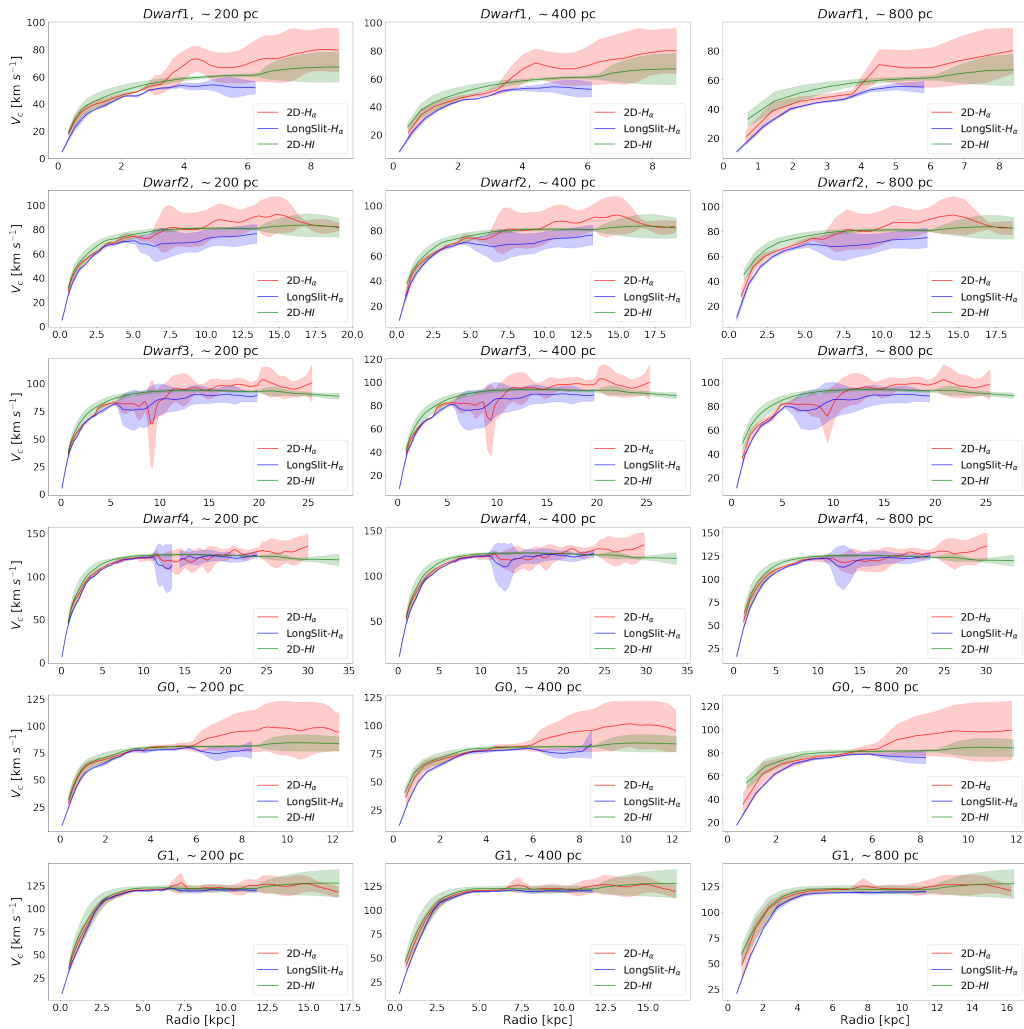
Si se calcula la fracción V_{2kpc}/V_{max} para las 6 galaxias simuladas, con el objetivo de normalizarlas uniformemente, se obtiene un valor promedio de $0,7 \pm 0,1$. La baja desviación para este valor demuestra que este conjunto de simulaciones son autosimilares, lo que permite verificar su baja diversidad, confirmando lo establecido por [Oman y cols. \(2015\)](#). Sin embargo, cuando se simula el proceso de observación sintético para la construcción de las curvas de rotación, incluyendo el efecto de factores observacionales, el panorama de la variabilidad en las simulaciones cambia

de manera drástica.

3.2. Efecto de factores observacionales

Figura 3.3

Curvas de rotación obtenidas al variar los factores observacionales en los experimentos sintéticos.



Nota. El color representa los distintos tipos de observaciones sintéticas y el área sombreada la desviación estándar en las formas producto de los 5 ángulos de inclinación modelados: 15° , 30° , 45° , 60° y 75° . Las columnas, de izquierda a derecha, representan observaciones con ~ 200 pc, ~ 400 pc y ~ 800 pc de resolución espacial. Las filas, de arriba abajo, representan las curvas para las galaxias *Dwarf1*, *Dwarf2*, *Dwarf3*, *Dwarf4*, *G0* y *G1* en el *snapshot 300*.

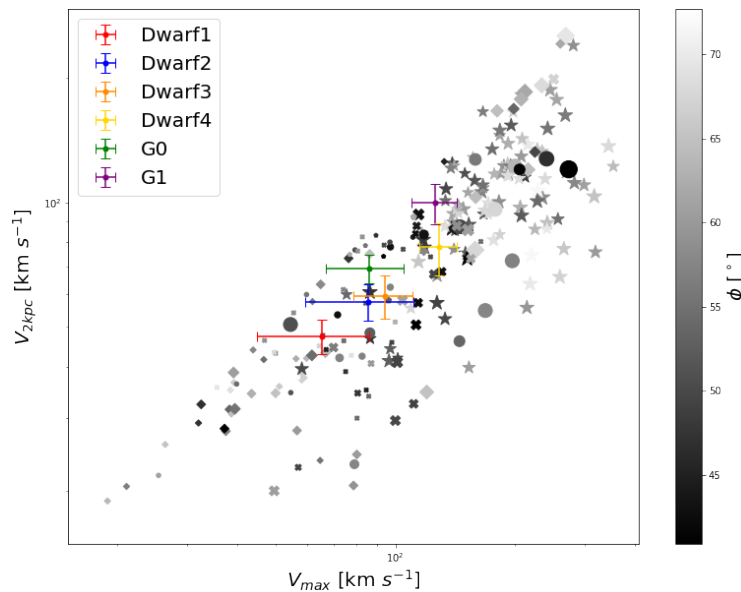
Como se observa en la figura 3.3 la generación de las curvas de rotación a partir de los mapas de velocidad sintéticos tiene una incidencia clara en la morfología de los perfiles de velocidad circular, incrementando notablemente su variabilidad. Cada línea sólida en dicha figura representa el

promedio de las 5 curvas de rotación construidas para cada tipo de observación sintética, a partir de la variación de los ángulos de inclinación. El área sombreada representa la desviación estándar de las 5 curvas sin considerar las barras de error propias de las curvas.

Este incremento se hace más notorio al comparar las observaciones de la muestra de [Oman y cols. \(2015\)](#) con las curvas de rotación sintéticas presentadas en este trabajo (ver figura 3.4). Cada dato para las galaxias simuladas fue construido a partir del promedio, y la desviación estándar (barras de error), de V_{2kpc} y V_{max} de las 135 curvas construidas para cada modelo. Estas curvas se obtienen al combinar las 5 variaciones de ángulo, con los 3 tipos de observaciones y los 3 valores de resolución espacial, para los 3 *snapshots* de cada galaxia. En este caso es sencillo identificar que la variabilidad emergente en las regiones internas de las curvas de rotación a aumentado, puesto que los factores observacionales hacen que las simulaciones abarquen un área mayor en el espacio de valores $V_{2kpc} - V_{max}$ (ver figura 3.4).

Figura 3.4

Velocidad circular a los 2 kpc de radio vs velocidad circular máxima. Comparación entre los valores obtenidos con los experimentos sintéticos para las simulaciones y los datos observacionales.



Nota. Los puntos en escala de grises corresponden a los valores reportados en la muestra de galaxias observadas en [Oman y cols. \(2015\)](#), mientras los colores indican las 6 galaxias simuladas utilizadas en esta tesis con todas las versiones modeladas en los experimentos sintéticos. La barra de error indica la desviación estándar en cada valor de velocidad para las galaxias simuladas, considerando todas las variaciones de los factores observacionales para los *snapshots*: 100, 300 y 500.

Comparando la desviación estándar de V_{2kpc} en las curvas de rotación sintéticas (σ_{sin}), respecto a la desviación presentada por los datos observacionales (σ_{obs}) mediante

$$\Delta_{\%} = \frac{\sigma_{sin} \cdot 100\%}{\sigma_{obs}}, \quad (3.2)$$

se puede cuantificar la variabilidad porcentual emergente ($\Delta\%$) al analizar los factores observacionales de manera individualizada (ver cuadro 3.1).

Tabla 3.1

Variabilidad porcentual emergente para V_{2kpc} reproducida por las observaciones sintéticas de manera individualizada.

Modelo	Emisión	Espectrógrafo	V_{2kpc}		
			Resolución		
			~ 200 [pc]	~ 400 [pc]	~ 800 [pc]
<i>Dwarf1</i>	H_α	2D	$4,8 \pm 1,5 \%$	$6,6 \pm 1,3 \%$	$13,1 \pm 3,8 \%$
	HI	Long-slit	$3,7 \pm 2,8 \%$	$4,6 \pm 3,2 \%$	$5,0 \pm 2,7 \%$
<i>Dwarf2</i>	H_α	2D	$15,7 \pm 2,7 \%$	$17,0 \pm 2,9 \%$	$20,1 \pm 2,2 \%$
	HI	Long-slit	$6,6 \pm 1,8 \%$	$9,8 \pm 1,2 \%$	$15,6 \pm 1,6 \%$
<i>Dwarf3</i>	H_α	2D	$2,3 \pm 0,6 \%$	$3,1 \pm 1,0 \%$	$4,3 \pm 1,7 \%$
	HI	2D	$24,3 \pm 1,7 \%$	$24,8 \pm 1,4 \%$	$28,0 \pm 1,1 \%$
<i>Dwarf4</i>	H_α	2D	$7,2 \pm 3,5 \%$	$10,7 \pm 3,2 \%$	$21,6 \pm 0,7 \%$
	HI	Long-slit	$4,7 \pm 2,8 \%$	$4,2 \pm 1,4 \%$	$3,0 \pm 0,3 \%$
<i>G0</i>	H_α	2D	$29,8 \pm 3,0 \%$	$31,3 \pm 2,9 \%$	$33,2 \pm 2,4 \%$
	HI	2D	$20,0 \pm 3,9 \%$	$24,2 \pm 2,5 \%$	$34,0 \pm 1,8 \%$
<i>G1</i>	H_α	Long-slit	$2,7 \pm 0,1 \%$	$3,9 \pm 0,1 \%$	$6,5 \pm 0,3 \%$
	HI	2D	$46,1 \pm 2,9 \%$	$45,8 \pm 2,4 \%$	$46,7 \pm 2,3 \%$
<i>G0</i>	H_α	2D	$9,7 \pm 2,0 \%$	$13,0 \pm 1,6 \%$	$21,5 \pm 2,0 \%$
	HI	Long-slit	$4,4 \pm 1,6 \%$	$4,1 \pm 0,9 \%$	$3,4 \pm 0,1 \%$
<i>G1</i>	H_α	2D	$18,4 \pm 1,6 \%$	$19,9 \pm 1,4 \%$	$19,0 \pm 1,3 \%$
	HI	Long-slit	$25,4 \pm 4,8 \%$	$29,3 \pm 4,8 \%$	$29,7 \pm 1,4 \%$
<i>G1</i>	H_α	Long-slit	$6,8 \pm 2,2 \%$	$10,5 \pm 4,5 \%$	$14,6 \pm 7,4 \%$
	HI	2D	$38,1 \pm 9,8 \%$	$40,2 \pm 10,0 \%$	$36,4 \pm 6,2 \%$

Nota. Las columnas de izquierda a derecha representan: la galaxia simulada, la línea de emisión modelada, el tipo de observación y los diferentes valores de resolución espacial empleados. En todos los casos se incluye la desviación propia de los 5 ángulos de inclinación explorados.

Como se puede evidenciar en el cuadro 3.1, las curvas de rotación sintéticas generadas a partir de un proceso tipo *long-slit* conservan una baja diversidad en sus formas, sin llegar a superar el 14,6% del valor reportado para las observaciones. Sin embargo, las curvas de rotación construidas a partir de espectrógrafos de campo integrado exhiben una alta variabilidad, entre 4,8% y 46,7%.

El cambio porcentual en la variabilidad para los dos tipos de líneas de emisión, favorece la diversidad para los procesos de emisión de hidrógeno neutro. Sin embargo, respecto a la morfología de las curvas sintéticas, se puede evidenciar en la figura 3.3 que los perfiles de velocidad circular derivados de la línea de emisión H_α , exhiben cambios drásticos en su forma. Esto se puede explicar producto de la presencia, discontinua y aglomerada, del hidrógeno ionizado en las regiones de formación estelar para las galaxias simuladas (ver grumos en los mapas de la figura 2.16). Esta característica también está presente en las observaciones (ver figura 2.11).

La disminución en la calidad de los mapas, producto del aumento en el tamaño físico de la resolución espacial, incrementa de manera significativa la diversidad en las curvas sintéticas. Las variaciones en la resolución suponen un aumento de variabilidad de entre un 1 % y 5,8 % para las curvas tipo 2D, y entre un 0,3 % y 4,1 % para las curvas *long-slit*. Esto se explica debido a que regiones con velocidades de giro diferentes, pasan a ser descritas como una única región de la galaxia con un único valor de velocidad asociado, producto del gran tamaño de los píxeles.

La variabilidad porcentual emergente para todos los factores observacionales de manera conjunta (ver cuadro 3.2), se calculó a partir del promedio de todas las cantidades descritas en el cuadro 3.1 para cada galaxia. Dicha variabilidad, al compararse con los valores previamente calculados para las simulaciones, muestra claramente como la inclusión de los factores observacionales permite aliviar la tensión entre las simulaciones y las observaciones. El proceso de observación sintético permite reproducir en algunos casos el 25 % de la variabilidad de V_{2kpc} reportada en la muestra de [Oman y cols. \(2015\)](#).

Tabla 3.2

Variabilidad porcentual emergente para V_{2kpc} reproducida por las observaciones sintéticas de manera colectiva.

Modelo	V_{2kpc}	
	Simulaciones	Observaciones sintéticas
<i>Dwarf1</i>	2,1 %	$10,1 \pm 2,6$ %
<i>Dwarf2</i>	4,6 %	$13,2 \pm 1,3$ %
<i>Dwarf3</i>	6,7 %	$16,2 \pm 2,2$ %
<i>Dwarf4</i>	7,2 %	$25,6 \pm 1,8$ %
<i>G0</i>	6,5 %	$12,6 \pm 1,4$ %
<i>G1</i>	8,6 %	$25,7 \pm 5,7$ %

Nota. Las columnas de izquierda a derecha representan: la galaxia simulada, la variabilidad natural de las simulaciones y la variabilidad producto del proceso de observación sintético. En las observaciones sintéticas se incluye la desviación en las curvas propia de todos los factores observacionales propuestos en esta tesis.

Finalmente cabe destacar que la galaxia *G1* posee el porcentaje de diversidad global más elevado en sus curvas de rotación, reproduciendo casi el 26 % de los valores observados. Esto se debe a la presencia de una barra desarrollada en su proceso de evolución (ver recuadro inferior derecho en la figura 2.4), de manera que sus partículas de gas exhiben una alta componente de velocidades no circulares. Esto se encuentra en concordancia con lo expuesto en [Oman y cols. \(2019\)](#), donde los autores argumentan que la diversidad observada en las curvas de rotación de la muestra de [Oman y cols. \(2015\)](#) es en parte producida por la presencia de movimientos no circulares. En este trabajo, sin embargo, se encuentra que otros factores, asociados a circunstancias observacionales y no a las características físicas de las galaxias, pueden contribuir al aumento de la diversidad percibida en las curvas de rotación. Tal es el caso de la variedad de inclinaciones y resoluciones espaciales existentes a lo largo de la muestra completa.

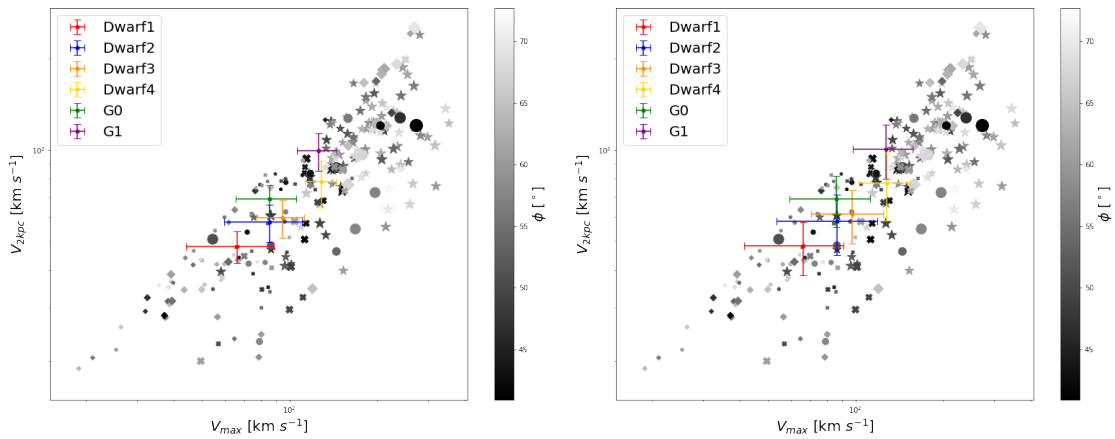
3.3. Efecto de errores observacionales

El efecto de errores en factores observacionales como la inclinación o la distancia, aumenta también la dispersión en los valores de V_{2kpc} registrados en las curvas de rotación sintéticas de las galaxias simuladas. Comúnmente, para las observaciones tipo *long-slit*, se discuten en la literatura errores como: la falta de precisión en el centro de la galaxia, lo que ocasiona que la ranura quede paralela al semieje mayor, y errores en el ángulo de posición, producto de las asimetrías y subestructuras de las galaxias que no permiten establecer bien el semieje mayor.

Debido a que la mayoría de observaciones en esta muestra son *long-slit*, y a su vez muchas galaxias son irregulares, estos errores pueden ser responsables de una pequeña parte de la variabilidad reportada. Con el objetivo de emular estas condiciones en nuestros experimentos sintéticos, fueron generadas nuevamente todas las curvas de rotación incluyendo errores aleatorios en el ángulo de inclinación, que siguen una distribución uniforme, de entre 0° y 5° , y 0° y 10° . Estos errores también afectan la posición de la ranura respecto al semieje mayor. La variabilidad producida en las observaciones sintéticas para estos dos casos se presenta en la figura 3.5.

Figura 3.5

Variaciones de V_{2kpc} y V_{max} para errores aleatorios de máximo 5° (izquierda) y máximo 10° (derecha) en la determinación del ángulo de inclinación.



Nota. Los puntos de colores representan los valores extraídos de las observaciones sintéticas, con su respectiva diversidad (barras de error). Los puntos grises representan las galaxias observadas.

Un error máximo de 5° en el ángulo de inclinación, se traduce en incrementos porcentuales para la variabilidad respecto a los métodos tradicionales de entre $\sim 11,0\%$ y $\sim 24,0\%$, y respecto a las observaciones sintéticas sin errores de entre $\sim 3,0\%$ y $\sim 6,0\%$. Para el caso de un máximo de 10° los rangos de variación son de $\sim 19,0\% - 38,0\%$ y $\sim 12,0\% - 21,0\%$ respectivamente (ver cuadro 3.3).

Tabla 3.3

Variabilidad porcentual emergente para V_{2kpc} reproducida por las observaciones sintéticas en conjunto cuando se incluyen errores en el ángulo de inclinación.

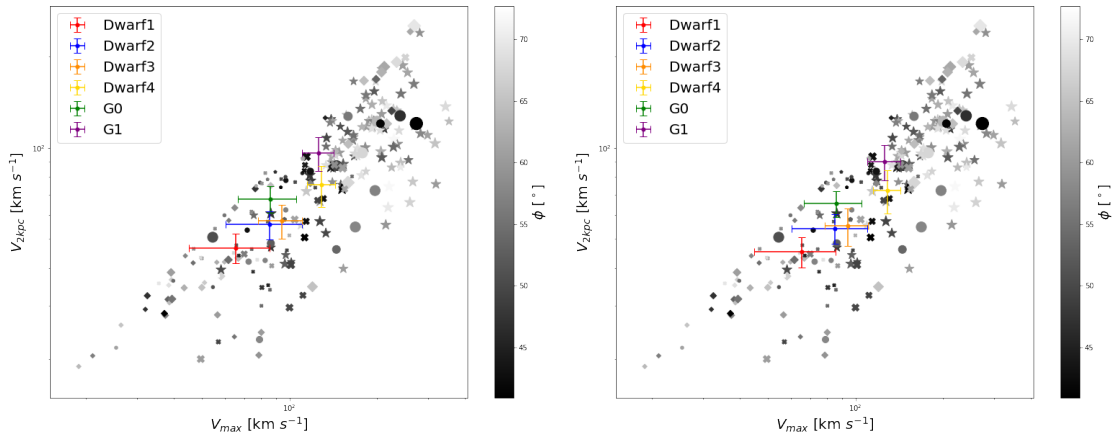
Modelo	Simulaciones	Observaciones sintéticas	V_{2kpc}	
			Errores en el ángulo	
			5°	10°
<i>Dwarf1</i>	2,1 %	$10,1 \pm 2,6$ %	$13,2 \pm 3,8$ %	$21,6 \pm 6,1$ %
<i>Dwarf2</i>	4,6 %	$13,2 \pm 1,3$ %	$18,4 \pm 5,1$ %	$29,8 \pm 8,4$ %
<i>Dwarf3</i>	6,7 %	$16,2 \pm 2,2$ %	$19,3 \pm 4,4$ %	$27,6 \pm 9,7$ %
<i>Dwarf4</i>	7,2 %	$25,6 \pm 1,8$ %	$31,2 \pm 4,2$ %	$43,1 \pm 10,6$ %
<i>G0</i>	6,5 %	$12,6 \pm 1,4$ %	$17,8 \pm 4,3$ %	$29,7 \pm 9,1$ %
<i>G1</i>	8,6 %	$25,7 \pm 5,7$ %	$31,7 \pm 10,3$ %	$46,5 \pm 17,1$ %

Nota. Las columnas de izquierda a derecha representan: la galaxia simulada, la variabilidad natural de las simulaciones, la variabilidad producto del proceso de observación sintético y la variabilidad cuando se incluyen errores aleatorios en los ángulos de máximo 5° y 10°.

Al incluir alteraciones en la estimación de la distancia a la galaxia (ver figura 3.6), se encuentra que un error del 10 % constituye variaciones porcentuales de entre $\sim 10,0$ % y $\sim 19,0$ % respecto a la diversidad de las simulaciones, y de $\sim 0,2$ % – 2,0 % respecto a las observaciones sintéticas sin errores. Mientras que fallos de un 20 % logran incrementos de $\sim 9,0$ % – 20,0 % y $\sim 1,0$ % – 2,0 % respectivamente (ver cuadro 3.4).

Figura 3.6

Variaciones de V_{2kpc} y V_{max} para errores aleatorios de 10 % (izquierda) y 20 % (derecha) en la determinación de la distancia a la galaxia.



Nota. Los puntos de colores representan los valores extraídos de las observaciones sintéticas, con su respectiva diversidad (barras de error). Los puntos grises representan las galaxias observadas.

Tabla 3.4

Variabilidad porcentual emergente para V_{2kpc} reproducida por las observaciones sintéticas en conjunto cuando se incluyen errores en la distancia.

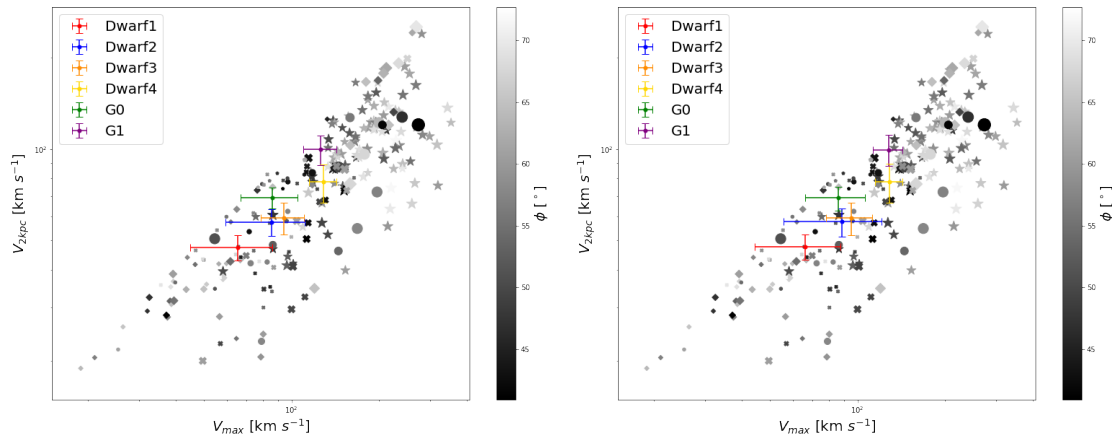
Modelo	Simulaciones	V_{2kpc} Observaciones sintéticas	Errores en la distancia	
			10 %	20 %
<i>Dwarf1</i>	2,1 %	$10,1 \pm 2,6$ %	$11,8 \pm 2,8$ %	$11,7 \pm 3,1$ %
<i>Dwarf2</i>	4,6 %	$13,2 \pm 1,3$ %	$13,4 \pm 1,2$ %	$13,8 \pm 1,4$ %
<i>Dwarf3</i>	6,7 %	$16,2 \pm 2,2$ %	$16,7 \pm 2,1$ %	$17,7 \pm 1,7$ %
<i>Dwarf4</i>	7,2 %	$25,6 \pm 1,8$ %	$26,2 \pm 1,5$ %	$26,9 \pm 1,0$ %
<i>G0</i>	6,5 %	$12,6 \pm 1,4$ %	$15,4 \pm 1,1$ %	$14,5 \pm 1,2$ %
<i>G1</i>	8,6 %	$25,7 \pm 5,7$ %	$27,5 \pm 7,3$ %	$27,3 \pm 7,5$ %

Nota. Las columnas de izquierda a derecha representan: la galaxia simulada, la variabilidad natural de las simulaciones, la variabilidad producto del proceso de observación sintético y la variabilidad cuando se incluyen errores en la distancia de 10 % y 20 %.

Por último, los procesos de pérdida de información e inclusión de ruido gaussiano, fueron modelados en una primera aproximación, a través de la modificación de los mapas de velocidad de todas las observaciones sintéticas. El submuestreo del disco galáctico fue generado a partir de la inclusión de pérdidas del 30 % de los píxeles en todos los mapas de velocidad. Dicho proceso no presentó modificaciones notorias sobre la variabilidad propia de las observaciones sintéticas (ver recuadro izquierdo en la figura 3.7), sin superar incrementos porcentuales del 0,1 % (ver cuadro 3.5). Esto demuestra que los métodos de construcción de curvas de rotación sintéticas, aplicados sobre modelos de galaxias altamente simétricos, son robustos ante pérdidas de información significativas.

Figura 3.7

Variaciones de V_{2kpc} y V_{max} para pérdida de información del 30 % (izquierda) y la inclusión de ruido gaussiano en los mapas de velocidad (derecha).



Nota. Los puntos de colores representan los valores extraídos de las observaciones sintéticas, con su respectiva diversidad (barras de error). Los puntos grises representan las galaxias observadas.

La inclusión de ruido en las observaciones se realizó mediante la suma de valores aleatorios de velocidad sobre algunos píxeles de todos los mapas sintéticos. Dichos valores provenían de una distribución gaussiana con un valor límite de 5 km s^{-1} , siendo este el error mínimo típicamente esperado al contemplar todas las fuentes de incertidumbre en las observaciones. Posteriormente se ejecutó nuevamente la construcción de todas las curvas de rotación, estimando las desviaciones de V_{2kpc} y V_{max} para este proceso (ver recuadro derecho de la figura 3.7). Los aumentos porcentuales en la diversidad de V_{2kpc} , respecto a las observaciones sintéticas originales, van desde un 0,2% hasta un 0,8% producto de la inclusión de ruido (ver cuadro 3.5).

Tabla 3.5

Variabilidad porcentual emergente para V_{2kpc} reproducida por las observaciones sintéticas en conjunto cuando se incluye pérdida de información y ruido.

Modelo	V_{2kpc}			
	Simulaciones	Observaciones sintéticas	Pérdida	Ruido
<i>Dwarf1</i>	2,1 %	$10,1 \pm 2,6 \%$	$10,1 \pm 2,6 \%$	$10,4 \pm 2,4 \%$
<i>Dwarf2</i>	4,6 %	$13,2 \pm 1,3 \%$	$13,2 \pm 1,3 \%$	$14,0 \pm 1,3 \%$
<i>Dwarf3</i>	6,7 %	$16,2 \pm 2,2 \%$	$16,2 \pm 2,2 \%$	$16,7 \pm 3,0 \%$
<i>Dwarf4</i>	7,2 %	$25,6 \pm 1,8 \%$	$25,6 \pm 1,8 \%$	$25,8 \pm 1,7 \%$
<i>G0</i>	6,5 %	$12,6 \pm 1,4 \%$	$12,7 \pm 1,3 \%$	$14,0 \pm 1,8 \%$
<i>G1</i>	8,6 %	$25,7 \pm 5,7 \%$	$25,7 \pm 5,7 \%$	$26,4 \pm 5,3 \%$

Nota. Las columnas de izquierda a derecha representan: la galaxia simulada, la variabilidad natural de las simulaciones, la variabilidad producto del proceso de observación sintético, la variabilidad cuando se incluye pérdida de información y la variabilidad cuando se incluye ruido.

3.4. Recomendaciones y perspectivas

Los resultados aquí expuestos ponen de manifiesto la importancia de los factores observacionales en el análisis de las propiedades cinemáticas de galaxias simuladas, con el objetivo de lograr comparaciones más significativas. Se ha mostrado a su vez que las tensiones, entre simulaciones y observaciones, se ven aliviadas al considerar las características de los datos observados.

La concordancia entre la diversidad de curvas de rotación expuesta por *G1*, y las conclusiones manifestadas por [Oman y cols. \(2019\)](#) respecto a la importancia de los movimientos no circulares para la misma muestra de galaxias, permite validar el proceso de observación sintético desarrollado en conjunto por AURORA y los módulos de construcción de curvas de esta tesis. Además, pone de manifiesto la importancia de realizar estudios sistemáticos para comprender el efecto de todos los factores observacionales presentes en este tipo de problemáticas.

Para futuras implementaciones de esta metodología en la profundización del entendimiento de esta problemática, se propone: la utilización de simulaciones de galaxias derivadas de otros códigos de simulación ajenos a GADGET-2, la inclusión de galaxias simuladas con tamaños más diversos que permitan abarcar todo el rango de *scale lengths* presentado por la muestra observada, la exploración de otros parámetros observacionales aquí no discutidos, como el ángulo de posición, la implementación de un esquema de construcción de curvas 2D por descomposición armónica, simi-

lar al presentado en la sección 1.4 para el código KINOMETRY, y por último aumentar la cantidad de *snapshots* a ser analizados por galaxia. El incremento en los instantes de tiempo implementados mejora notablemente las desviaciones para el cálculo de los promedios de variabilidad (ver cuadro 3.6), permitiendo obtener medidas más robustas.

Tabla 3.6

Variabilidad porcentual emergente para V_{2kpc} reproducida por las observaciones sintéticas en conjunto cuando se incluyen más snapshots en la galaxia Dwarf1.

Modelo	Simulaciones	V_{2kpc}		
		Observaciones sintéticas		
		3 <i>snapshots</i>	30 <i>snapshots</i>	60 <i>snapshots</i>
<i>Dwarf1</i>	2,1 %	10,1 ± 2,6 %	10,2 ± 1,0 %	9,9 ± 0,9 %

Nota. Las columnas de izquierda a derecha representan: la galaxia simulada, la variabilidad natural de las simulaciones, la variabilidad producto del proceso de observación sintético cuando se analizan 3 *snapshots*, 30 *snapshots* y 60 *snapshots*.

4. Conclusiones

La conclusión principal generada en el desarrollo de esta tesis es que la inclusión de factores observacionales, en el proceso de observación sintético, aumenta la diversidad en las curvas de rotación para las galaxias simuladas. Algunas combinaciones de valores para dichos parámetros, logran generar hasta un 47 % de la variabilidad reportada en [Oman y cols. \(2015\)](#). Esto permite aliviar la tensión descrita entre las observaciones y las simulaciones, sin la necesidad de incurrir en la posible incapacidad de las simulaciones para reproducir los procesos bariónicos realistas.

De manera individualizada, el tipo de observación fue el factor observacional que tuvo mayor impacto en el aumento de la diversidad para las curvas de rotación sintéticas, representando variaciones de hasta un 40 %. Las diferentes líneas de emisión contribuyeron principalmente a los cambios en la morfología de los perfiles de velocidad circular, mientras que la variación sistemática de la resolución espacial generó incrementos en la diversidad de hasta un 5 %. De manera conjunta, el promedio de la variabilidad, producto de todos los factores observacionales, dio como resultado porcentajes de diversidad entre 10 % y 26 %. Estos valores fueron calculados para cada una de las galaxias en el proceso de observación sintético, corroborando la incidencia de los movimientos no circulares de GI en la desviación de los valores de V_{2kpc} .

La inclusión de errores en los métodos modelados en esta tesis, permitió identificar que leves variaciones en la determinación del ángulo de inclinación de las galaxias, pueden derivar en aumentos de variabilidad porcentual de hasta 20 % en las curvas de rotación. Este resultado, y las variaciones descritas en menor medida para errores en la distancia o la presencia de ruido, pone de manifiesto la importancia preponderante de un correcto análisis fotométrico de las observaciones previo a la construcción de las curvas de rotación.

La exploración de 2 métodos para la construcción de curvas de rotación directamente de las simulaciones, mostró que los diferentes instantes de tiempo analizados para cada galaxia generan un conjunto de curvas autosimilares. Dicho conjunto no supera en ningún modelo el 9 % de la variabilidad presente en las observaciones. Abonado a lo anterior, las galaxias en conjunto exhiben una fracción V_{2kpc}/V_{max} con valores muy próximos entre sí. Esto permite corroborar la ausencia de diversidad, individual y colectiva, que presentan las simulaciones empleadas en esta tesis cuando son analizadas de la forma tradicional.

Finalmente, se pudo confirmar que la metodología de generación de experimentos sintéticos

presentada y construida en este trabajo, garantiza una comparación objetiva entre las propiedades cinemáticas de ambas poblaciones de galaxias, permitiendo efectuar estudios sistemáticos sobre factores observacionales cuyas conclusiones coinciden con lo reportado por otros autores ([Oman y cols., 2019](#); [Pineda y cols., 2017](#)). Esto posibilita sentar las bases para la profundización del entendimiento de esta y otras problemáticas de este tipo, a partir del análisis de curvas de rotación sintéticas.

Referencias

- Adams, J. J., Simon, J. D., Fabricius, M. H., van den Bosch, R. C., Barentine, J. C., Bender, R., ... others (2014). Dwarf galaxy dark matter density profiles inferred from stellar and gas kinematics. *The Astrophysical Journal*, 789(1), 63.
- Ade, P. A., Aghanim, N., Alves, M., Armitage-Caplan, C., Arnaud, M., Ashdown, M., ... others (2014). Planck 2013 results. i. overview of products and scientific results. *Astronomy & Astrophysics*, 571, A1.
- Alpher, R. A., Bethe, H., y Gamow, G. (1948). The origin of chemical elements. *Physical Review*, 73(7), 803.
- Alpher, R. A., y Herman, R. C. (1948). On the relative abundance of the elements. *Physical Review*, 74(12), 1737.
- Angulo, R., Springel, V., White, S., Jenkins, A., Baugh, C., y Frenk, C. (2012). Scaling relations for galaxy clusters in the millennium-xxl simulation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 426(3), 2046–2062.
- Bell, E. F., y de Jong, R. S. (2001). Stellar mass-to-light ratios and the tully-fisher relation. *The Astrophysical Journal*, 550(1), 212.
- Betoule, M. e. a., Kessler, R., Guy, J., Mosser, J., Hardin, D., Biswas, R., ... others (2014). Improved cosmological constraints from a joint analysis of the sdss-ii and snls supernova samples. *Astronomy & Astrophysics*, 568, A22.
- Blake, C., Davis, T., Poole, G. B., Parkinson, D., Brough, S., Colless, M., ... others (2011). The wigglez dark energy survey: testing the cosmological model with baryon acoustic oscillations at $z=0.6$. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 415(3), 2892–2909.
- Boylan-Kolchin, M., Springel, V., White, S. D., Jenkins, A., y Lemson, G. (2009). Resolving cosmic structure formation with the millennium-ii simulation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 398(3), 1150–1164.
- Broeils, A., y van Woerden, H. (1994). A search for spiral galaxies with extended hi disks. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 107, 129–176.
- Ceverino, D., y Klypin, A. (2009). The role of stellar feedback in the formation of galaxies. *The Astrophysical Journal*, 695(1), 292.

- Davé, R., Anglés-Alcázar, D., Narayanan, D., Li, Q., Rafieferantsoa, M. H., y Appleby, S. (2019). Simba: Cosmological simulations with black hole growth and feedback. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 486(2), 2827–2849.
- Davis, M., Efstathiou, G., Frenk, C. S., y White, S. D. (1985). The evolution of large-scale structure in a universe dominated by cold dark matter. *The Astrophysical Journal*, 292, 371–394.
- De Blok, W., y Bosma, A. (2002). High-resolution rotation curves of low surface brightness galaxies. *Astronomy & Astrophysics*, 385(3), 816–846.
- De Blok, W., McGaugh, S. S., Bosma, A., y Rubin, V. C. (2001). Mass density profiles of low surface brightness galaxies. *The Astrophysical Journal Letters*, 552(1), L23.
- De Blok, W., Walter, F., Brinks, E., Trachternach, C., Oh, S., y Kennicutt Jr, R. (2008). High-resolution rotation curves and galaxy mass models from things. *The Astronomical Journal*, 136(6), 2648.
- De Naray, R. K., McGaugh, S. S., y De Blok, W. (2008). Mass models for low surface brightness galaxies with high-resolution optical velocity fields. *The Astrophysical Journal*, 676(2), 920.
- Dolag, K. (2015). The magneticum simulations, from galaxies to galaxy clusters. *IAUGA*, 29, 2250156.
- Faber, S., y Jackson, R. E. (1976). Velocity dispersions and mass-to-light ratios for elliptical galaxies. *The Astrophysical Journal*, 204, 668–683.
- Flores, R. A., y Primack, J. R. (1994). Observational and theoretical constraints on singular dark matter halos. *arXiv preprint astro-ph/9402004*.
- Fukugita, M., Hogan, C., y Peebles, P. (1996). The history of the galaxies. *Nature*, 381(6582), 489–495.
- Gao, L., Navarro, J. F., Frenk, C. S., Jenkins, A., Springel, V., y White, S. D. (2012). The phoenix project: the dark side of rich galaxy clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 425(3), 2169–2186.
- Garrison-Kimmel, S., Boylan-Kolchin, M., Bullock, J. S., y Lee, K. (2014). Elvis: Exploring the local volume in simulations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 438(3), 2578–2596.
- Gnedin, O. Y., y Zhao, H. (2002). Maximum feedback and dark matter profiles of dwarf galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 333(2), 299–306.
- Grand, R. J., Helly, J., Fattahi, A., Cautun, M., Cole, S., Cooper, A. P., . . . others (2018). Aurigaia: mock gaia dr2 stellar catalogues from the auriga cosmological simulations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 481(2), 1726–1743.
- Griffiths, D. J. (1982). Hyperfine splitting in the ground state of hydrogen. *American Journal of physics*, 50(8), 698–703.

- Hopkins, P. F., Wetzel, A., Kereš, D., Faucher-Giguère, C.-A., Quataert, E., Boylan-Kolchin, M., ... others (2018). Fire-2 simulations: physics versus numerics in galaxy formation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 480(1), 800–863.
- Hubble, E. (1929). A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 15(3), 168–173.
- Katsianis, A., Gonzalez, V., Barrientos, D., Yang, X., Lagos, C., Schaye, J., ... others (2020). The high-redshift $\text{sfr}-m^*$ relation is sensitive to the employed star formation rate and stellar mass indicators: towards addressing the tension between observations and simulations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 492(4), 5592–5606.
- Kauffmann, G., Huang, M.-L., Moran, S., y Heckman, T. M. (2015). A systematic study of the inner rotation curves of galaxies observed as part of the gas and cold gas surveys. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 451(1), 878–887.
- Khandai, N., Di Matteo, T., Croft, R., Wilkins, S., Feng, Y., Tucker, E., ... Liu, M.-S. (2015). The massiveblack-ii simulation: the evolution of haloes and galaxies to $z=0$. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 450(2), 1349–1374.
- Klypin, A., Yepes, G., Gottlöber, S., Prada, F., y Hess, S. (2016). Multidark simulations: the story of dark matter halo concentrations and density profiles. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 457(4), 4340–4359.
- Krajnovic, D., Cappellari, M., De Zeeuw, P. T., y Copin, Y. (2006). Kinemetry: a generalization of photometry to the higher moments of the line-of-sight velocity distribution. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 366(3), 787–802.
- Lia, C., Carraro, G., y Salucci, P. (2000). The dark and luminous matter coupling in the formation of spheroids: a sph investigation. *Arxiv preprint astro-ph/0006012*.
- Linde, A. D. (1982). A new inflationary universe scenario: a possible solution of the horizon, flatness, homogeneity, isotropy and primordial monopole problems. *Physics Letters B*, 108(6), 389–393.
- Mashchenko, S., Wadsley, J., y Couchman, H. (2008). Stellar feedback in dwarf galaxy formation. *Science*, 319(5860), 174–177.
- Moore, B. (1994). Evidence against dissipation-less dark matter from observations of galaxy haloes. *Nature*, 370(6491), 629–631.
- Navarro, J. F. (1996). The structure of cold dark matter halos. En *Symposium-international astronomical union* (Vol. 171, pp. 255–258).
- Navarro, J. F., Eke, V. R., y Frenk, C. S. (1996). The cores of dwarf galaxy haloes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 283(3), L72–L78.
- Oh, S.-H., De Blok, W., Brinks, E., Walter, F., y Kennicutt Jr, R. C. (2011). Dark and luminous matter in things dwarf galaxies. *The Astronomical Journal*, 141(6), 193.

- Oh, S.-H., Hunter, D. A., Brinks, E., Elmegreen, B. G., Schruba, A., Walter, F., ... others (2015). High-resolution mass models of dwarf galaxies from little things. *The Astronomical Journal*, 149(6), 180.
- Oman, K. A., Marasco, A., Navarro, J. F., Frenk, C. S., Schaye, J., y Benítez-Llambay, A. (2019). Non-circular motions and the diversity of dwarf galaxy rotation curves. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 482(1), 821–847.
- Oman, K. A., Navarro, J. F., Fattahi, A., Frenk, C. S., Sawala, T., White, S. D., ... others (2015). The unexpected diversity of dwarf galaxy rotation curves. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 452(4), 3650–3665.
- Oñorbe, J., Boylan-Kolchin, M., Bullock, J. S., Hopkins, P. F., Kereš, D., Faucher-Giguère, C.-A., ... Murray, N. (2015). Forged in fire: cusps, cores and baryons in low-mass dwarf galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 454(2), 2092–2106.
- Papovich, C., Dickinson, M., Giavalisco, M., Conselice, C. J., y Ferguson, H. C. (2005). The assembly of diversity in the morphologies and stellar populations of high-redshift galaxies. *The Astrophysical Journal*, 631(1), 101.
- Penzias, A. A., y Wilson, R. W. (1965). A measurement of excess antenna temperature at 4080 mc/s. *The Astrophysical Journal*, 142, 419–421.
- Pineda, J. C., Hayward, C. C., Springel, V., y Mendes de Oliveira, C. (2017). Rotation curve fitting and its fatal attraction to cores in realistically simulated galaxy observations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 466(1), 63–87.
- Rhee, G., Valenzuela, O., Klypin, A., Holtzman, J., y Moorthy, B. (2004). The rotation curves of dwarf galaxies: a problem for cold dark matter? *The Astrophysical Journal*, 617(2), 1059.
- Roberts, M. S., y Whitehurst, R. N. (1975). The rotation curve and geometry of m31 at large galactocentric distances. *The Astrophysical Journal*, 201, 327–346.
- Rubin, V. C., Ford Jr, W. K., y Thonnard, N. (1978). Extended rotation curves of high-luminosity spiral galaxies. iv-systematic dynamical properties, sa through sc. *The Astrophysical Journal*, 225, L107–L111.
- Schaye, J., Crain, R. A., Bower, R. G., Furlong, M., Schaller, M., Theuns, T., ... others (2015). The eagle project: simulating the evolution and assembly of galaxies and their environments. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 446(1), 521–554.
- Schneider, P. (2014). *Extragalactic astronomy and cosmology: an introduction*. Springer.
- Shapiro, K. L., Genzel, R., Schreiber, N. M. F., Tacconi, L. J., Bouché, N., Cresci, G., ... others (2008). Kinemetry of sins high-redshift star-forming galaxies: distinguishing rotating disks from major mergers. *The Astrophysical Journal*, 682(1), 231.
- Simon, J. D., Bolatto, A. D., Leroy, A., Blitz, L., y Gates, E. L. (2005). High-resolution measurements of the halos of four dark matter-dominated galaxies: deviations from a universal

- density profile. *The Astrophysical Journal*, 621(2), 757.
- Skillman, S. W., Warren, M. S., Turk, M. J., Wechsler, R. H., Holz, D. E., y Sutter, P. (2014). Dark sky simulations: Early data release. *arXiv preprint arXiv:1407.2600*.
- Spekkens, K., Giovanelli, R., y Haynes, M. P. (2005). The cusp/core problem in galactic halos: long-slit spectra for a large dwarf galaxy sample. *The Astronomical Journal*, 129(5), 2119.
- Springel, V. (2005). The cosmological simulation code gadget-2. *Monthly notices of the royal astronomical society*, 364(4), 1105–1134.
- Springel, V., y Hernquist, L. (2003). Cosmological smoothed particle hydrodynamics simulations: a hybrid multiphase model for star formation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 339(2), 289–311.
- Springel, V., White, S. D., Jenkins, A., Frenk, C. S., Yoshida, N., Gao, L., . . . others (2005). Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars. *nature*, 435(7042), 629–636.
- Stadel, J., Potter, D., Moore, B., Diemand, J., Madau, P., Zemp, M., . . . Quilis, V. (2009). Quantifying the heart of darkness with ghalo—a multibillion particle simulation of a galactic halo. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 398(1), L21–L25.
- Swaters, R., Madore, B., van den Bosch, F. C., y Balcells, M. (2003). The central mass distribution in dwarf and low surface brightness galaxies. *The Astrophysical Journal*, 583(2), 732.
- Swaters, R., Sancisi, R., Van Albada, T., y Van Der Hulst, J. (2009). The rotation curves shapes of late-type dwarf galaxies. *Astronomy & Astrophysics*, 493(3), 871–892.
- Teyssier, R. (2002). Cosmological hydrodynamics with adaptive mesh refinement—a new high resolution code called ramses. *Astronomy & Astrophysics*, 385(1), 337–364.
- Trachternach, C., De Blok, W., Walter, F., Brinks, E., y Kennicutt Jr, R. (2008). Dynamical centers and noncircular motions in things galaxies: implications for dark matter halos. *The Astronomical Journal*, 136(6), 2720.
- Tully, R. B., y Fisher, J. R. (1977). A new method of determining distances to galaxies. *Astronomy and Astrophysics*, 54, 661–673.
- Valenzuela, O., Rhee, G., Klypin, A., Governato, F., Stinson, G., Quinn, T., y Wadsley, J. (2007). Is there evidence for flat cores in the halos of dwarf galaxies? the case of ngc 3109 and ngc 6822. *The Astrophysical Journal*, 657(2), 773.
- Vogelsberger, M., Genel, S., Springel, V., Torrey, P., Sijacki, D., Xu, D., . . . Hernquist, L. (2014). Introducing the illustris project: simulating the coevolution of dark and visible matter in the universe. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 444(2), 1518–1547.
- Vogelsberger, M., Marinacci, F., Torrey, P., y Puchwein, E. (2020). Cosmological simulations of galaxy formation. *Nature Reviews Physics*, 2(1), 42–66.

- Walter, F., Brinks, E., De Blok, W., Bigiel, F., Kennicutt Jr, R. C., Thornley, M. D., y Leroy, A. (2008). Things: The hi nearby galaxy survey. *The Astronomical Journal*, 136(6), 2563.
- Wang, L., Dutton, A. A., Stinson, G. S., Maccio, A. V., Penzo, C., Kang, X., . . . Wadsley, J. (2015). Nihao project–i. reproducing the inefficiency of galaxy formation across cosmic time with a large sample of cosmological hydrodynamical simulations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 454(1), 83–94.
- Weldrake, D., De Blok, W., y Walter, F. (2003). A high-resolution rotation curve of ngc 6822: a test-case for cold dark matter. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 340(1), 12–28.
- Zwicky, F. (1933). Die rotverschiebung von extragalaktischen nebeln. *Helvetica physica acta*, 6, 110–127.

Apéndice

Cálculo del peso molecular medio (μ)

Partimos de la definición del peso molecular medio:

$$\mu = \frac{\bar{m}}{m_H}$$

La masa media del conjunto de partículas de gas (\bar{m}), despreciando la masa del electrón, puede ser rescrita como:

$$\bar{m} = \frac{\sum_j n_j m_j + n_e m_e}{\sum_j n_j + n_e} \approx \frac{\sum_j n_j m_j}{\sum_j n_j + n_e}$$

Siendo j la cantidad de especies atómicas presentes en la mezcla.

La masa de cada especie atómica puede ser descrita como:

$$m_j = m_H A_j$$

Siendo m_H la masa del H y A_j el número atómico de la especie en cuestión.

Remplazando esta definición podemos obtener que:

$$\bar{m} \approx \frac{\sum_j n_j A_j m_H}{\sum_j n_j + n_e}$$

Lo que nos permite reescribir μ como:

$$\mu = \frac{\sum_j n_j A_j}{\sum_j n_j + n_e}$$

Conociendo la densidad (ρ) de la mezcla y la proporción de cada especie (X_j) dentro de la misma, podemos reescribir el número de átomos de cada especie (n_j) como:

$$n_j = \frac{\rho X_j}{m_H A_j}$$

Asumiendo una mezcla únicamente conformada por H y He donde solo el H puede alcanzar el estado de ionización, y siendo H_α la proporción de hidrógeno ionizado, el número de electrones

en la mezcla puede ser descrito como:

$$n_e = \frac{\rho X_H H_\alpha}{m_H A_H}$$

Remplazando estas expresiones:

$$\mu = \frac{\sum_j \frac{\rho X_j A_j}{m_H A_j}}{\sum_j \frac{\rho X_j}{m_H A_j} + \frac{\rho X_H H_\alpha}{m_H A_H}}$$

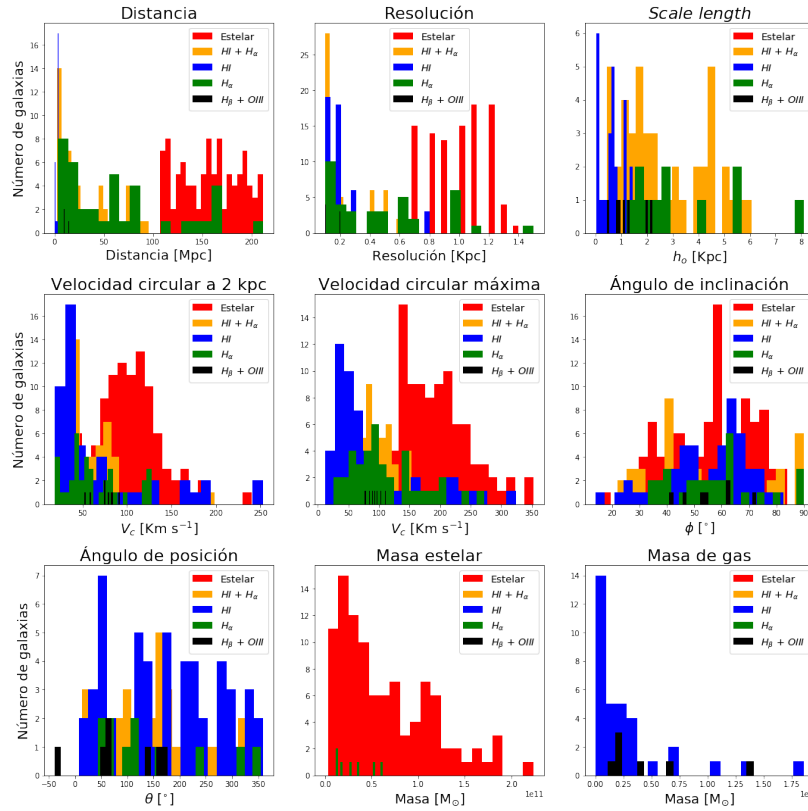
Y finalmente con números atómicos $A_H = 1$ y $A_{He} = 4$ se obtiene que:

$$\mu = \frac{4}{3X_H + 1 + 4X_H H_\alpha}$$

Propiedades básicas de la muestra de galaxias observadas

Figura 4.1

Principales características de la muestra de galaxias utilizadas en el estudio de Oman y cols. (2015), coloreadas según la especie atómica observada.



Nota. De izquierda a derecha, en la primer fila: distancia a la galaxia en Mpc, resolución espacial de los telescopios en kpc y *scale length* del disco estelar en kpc. Segunda fila: velocidad circular a los 2 kpc de radio en km s^{-1} , velocidad circular máxima en km s^{-1} y ángulos de inclinación en grados. Tercera fila: el ángulo de posición en grados, la masa estelar de las galaxias en masas solares y finalmente su masa de gas en masas solares.

Tabla 4.1

Propiedades básicas de la muestra de galaxias observadas.

Galaxia	D Mpc	Tipo Observación	Res Kpc	$V_{2\text{kpc}}$ Km s ⁻¹	V_{max} Km s ⁻¹	Espectrógrafo
GASS 9891	110.5	Stellar abs.	0.8	122.3	353	Long-slit
GASS 9463	152.5	H_{α}	1.1	127.6	239.9	Long-slit
GASS 8096	147.8	Stellar abs.	0.9	122.7	187.4	Long-slit
GASS 7286	115.2	Stellar abs.	0.7	85.3	141.2	Long-slit
GASS 7031	141.8	Stellar abs.	0.9	99.7	171.2	Long-slit
GASS 6583	206.9	Stellar abs.	1.2	88.3	152.9	Long-slit
GASS 57017	138.3	H_{α}	1	96.2	178	Long-slit
GASS 56612	124.2	Stellar abs.	0.7	128.6	156.6	Long-slit
GASS 52297	140.5	Stellar abs.	0.8	84.1	116.5	Long-slit
GASS 51899	165.7	Stellar abs.	1	93.9	139.8	Long-slit
GASS 51416	190.6	Stellar abs.	1.1	77.8	118.3	Long-slit
GASS 51351	125.5	Stellar abs.	0.9	240.1	280	Long-slit
GASS 48356	122.9	Stellar abs.	0.9	124.4	139	Long-slit
GASS 47221	136.2	Stellar abs.	0.8	77	140.4	Long-slit
GASS 42402	197	Stellar abs.	1.2	66	259.1	Long-slit
GASS 42141	154.2	Stellar abs.	1.1	55.6	214.1	Long-slit
GASS 42140	195.7	Stellar abs.	1.2	89.2	240.9	Long-slit
GASS 42025	157.2	Stellar abs.	0.9	86.1	224.3	Long-slit
GASS 41783	158.9	Stellar abs.	1.1	177.4	254.3	Long-slit
GASS 4137	190.6	Stellar abs.	1.1	66.5	127.3	Long-slit
GASS 41323	188.4	Stellar abs.	1.1	41.3	96.4	Long-slit
GASS 4130	191.9	Stellar abs.	1.4	102.8	233.8	Long-slit
GASS 4094	118.2	Stellar abs.	0.7	116.4	193.3	Long-slit
GASS 4057	170	Stellar abs.	1	138.9	192	Long-slit
GASS 4048	177.3	Stellar abs.	1.1	100.3	182.1	Long-slit
GASS 4040	115.2	Stellar abs.	0.7	122.7	140.6	Long-slit
GASS 4038	178.6	Stellar abs.	1.1	71.5	248.4	Long-slit
GASS 40317	174.7	Stellar abs.	1	153.8	195.4	Long-slit
GASS 40257	168.3	Stellar abs.	1	75.3	150	Long-slit
GASS 40247	167.9	Stellar abs.	1.2	162.6	267.4	Long-slit
GASS 3971	182.4	Stellar abs.	1.3	106.8	228.4	Long-slit
GASS 39595	186.3	Stellar abs.	1.1	182	208	Long-slit
GASS 39567	133.6	Stellar abs.	0.8	145.4	182.9	Long-slit
GASS 38964	137.9	Stellar abs.	1	110.2	297.9	Long-slit
GASS 38758	124.6	Stellar abs.	0.9	132.9	233.7	Long-slit
GASS 38472	113.1	Stellar abs.	0.7	89.7	139.1	Long-slit
GASS 3819	194	Stellar abs.	1.2	60.6	86.3	Long-slit
GASS 3817	192.7	Stellar abs.	1.2	71.8	114.3	Long-slit
GASS 3777	169.6	Stellar abs.	1	107.8	134.1	Long-slit
GASS 3645	131.5	Stellar abs.	0.8	115.2	211.9	Long-slit
GASS 3524	162.7	Stellar abs.	1	114.1	237.9	Long-slit
GASS 3524	162.7	H_{α}	1	122.4	199.9	Long-slit
GASS 3509	207.3	Stellar abs.	1.2	187.4	244.8	Long-slit
GASS 3439	165.3	Stellar abs.	1	113	158.3	Long-slit
GASS 3261	160.6	Stellar abs.	1	39.5	58.2	Long-slit
GASS 3189	164.5	H_{α}	1	54.7	168.3	Long-slit
GASS 30811	209.4	Stellar abs.	1.3	103.4	316.1	Long-slit

Galaxia	D Mpc	Tipo Observación	Res Kpc	$V_{2\text{kpc}}$ Km s ⁻¹	V_{max} Km s ⁻¹	Espectrógrafo
GASS 30479	131.9	Stellar abs.	0.8	121.1	137.8	Long-slit
GASS 30338	179	Stellar abs.	1.1	134.1	227.4	Long-slit
GASS 29892	156.7	Stellar abs.	0.9	118.1	268.5	Long-slit
GASS 29842	146	Stellar abs.	1.1	138	215.3	Long-slit
GASS 29555	135.3	Stellar abs.	0.8	44.2	97.1	Long-slit
GASS 27167	162.7	Stellar abs.	1	134.6	175.1	Long-slit
GASS 26822	161	Stellar abs.	1.2	97.2	206	Long-slit
GASS 25214	133.2	Stellar abs.	0.8	46.8	86.4	Long-slit
GASS 24496	180.3	Stellar abs.	1.1	121.2	198.2	Long-slit
GASS 24366	176	Stellar abs.	1.1	123.7	191.7	Long-slit
GASS 24168	111.4	Stellar abs.	0.7	86.3	240.5	Long-slit
GASS 24094	184.6	Stellar abs.	1.1	149.5	183.1	Long-slit
GASS 23450	203.9	Stellar abs.	1.2	92.9	207.5	Long-slit
GASS 23315	140.9	Stellar abs.	0.8	101	133.6	Long-slit
GASS 22999	194.9	Stellar abs.	1.2	63.5	218.1	Long-slit
GASS 21842	192.7	Stellar abs.	1.2	100.7	227.4	Long-slit
GASS 20292	128.1	Stellar abs.	0.8	93.7	166.6	Long-slit
GASS 20133	209.4	Stellar abs.	1.3	73.1	151.5	Long-slit
GASS 20041	132.3	Stellar abs.	0.8	55.4	109.4	Long-slit
GASS 18900	194	Stellar abs.	1.2	151	241.4	Long-slit
GASS 18335	184.6	Stellar abs.	1.1	111.5	281.8	Long-slit
GASS 17684	154.6	Stellar abs.	0.9	91.1	256.2	Long-slit
GASS 17640	149.5	Stellar abs.	0.9	39.8	153.1	Long-slit
GASS 15257	123.3	Stellar abs.	0.7	59.8	75.4	Long-slit
GASS 15181	200.4	Stellar abs.	1.2	74.5	219.8	Long-slit
GASS 14831	190.2	Stellar abs.	1.1	77.2	265.2	Long-slit
GASS 14247	141.3	Stellar abs.	1	75.8	318.3	Long-slit
GASS 14017	169.6	Stellar abs.	1	129.3	207.2	Long-slit
GASS 12460	211.6	Stellar abs.	1.3	136.9	343.4	Long-slit
GASS 12069	166.2	Stellar abs.	1.2	86.3	138.6	Long-slit
GASS 12002	157.2	Stellar abs.	0.9	142.7	208.3	Long-slit
GASS 11956	169.2	Stellar abs.	1	81.1	176.6	Long-slit
GASS 11845	155.5	Stellar abs.	1.1	95.7	167.9	Long-slit
GASS 11824	162.7	H_{α}	1	72.2	196.7	Long-slit
GASS 11808	205.1	Stellar abs.	1.2	122.3	194.9	Long-slit
GASS 11514	183.3	Stellar abs.	1.1	106	164.9	Long-slit
GASS 11437	113.1	Stellar abs.	0.7	83.6	183	Long-slit
GASS 11386	197.9	Stellar abs.	1.2	96.3	148.1	Long-slit
GASS 11349	109.6	Stellar abs.	0.7	98.5	144	Long-slit
GASS 11270	169.2	H_{α}	1	50.6	54.5	Long-slit
GASS 11223	152	Stellar abs.	1.1	117.5	184.3	Long-slit
GASS 11120	116.1	Stellar abs.	0.8	165.7	197.8	Long-slit
GASS 11087	161	Stellar abs.	1	116.1	191.8	Long-slit
GASS 11019	154.2	Stellar abs.	0.9	87.6	133.4	Long-slit
GASS 10949	112.2	Stellar abs.	0.7	94.1	144.1	Long-slit
GASS 10948	110.5	Stellar abs.	0.7	96.2	142.5	Long-slit
GASS 10943	117.8	Stellar abs.	0.7	105.7	152.3	Long-slit

Galaxia	D Mpc	Tipo Observación	Res Kpc	$V_{2\text{kpc}}$ Km s ⁻¹	V_{max} Km s ⁻¹	Espectrógrafo
GASS 10942	107.5	Stellar abs.	0.6	42	101.4	Long-slit
GASS 10884	110.1	Stellar abs.	0.7	93.6	171.1	Long-slit
GASS 10850	152	Stellar abs.	0.9	114.2	204.7	Long-slit
GASS 10841	115.6	Stellar abs.	0.7	165.9	166	Long-slit
GASS 10831	116.9	H_{α}	0.7	127.1	158.9	Long-slit
GASS 10827	128.9	Stellar abs.	0.8	108.5	166.2	Long-slit
GASS 10813	114.8	Stellar abs.	0.7	117.6	149.5	Long-slit
GASS 10447	201.7	Stellar abs.	1.2	57.1	127.2	Long-slit
GASS 10404	154.6	Stellar abs.	0.9	110.2	166	Long-slit
GASS 10358	158.5	Stellar abs.	1	52.2	133.3	Long-slit
GASS 10218	198.7	Stellar abs.	1.2	81.2	117.5	Long-slit
GASS 10019	131.9	Stellar abs.	0.8	117.2	177.2	Long-slit
WLM	1	<i>HI</i>	0.1	35.1	38.5	2D
UGC 8508	2.6	<i>HI</i>	0.1	46.1	46.1	2D
NGC 3738	4.9	<i>HI</i>	0.1	125.6	132.7	2D
NGC 2366	3.4	<i>HI</i>	0.1	41.9	59.8	2D
NGC 1569	3.4	<i>HI</i>	0.1	36.6	39.3	2D
LSB F564-V3	8.7	<i>HI</i>	0.3	38.7	39.2	2D
IC 1613	0.7	<i>HI</i>	0.1	20.5	21.1	2D
IC 10	0.7	<i>HI</i>	0.1		36.4	2D
Haro 36	9.3	<i>HI</i>	0.3	37.6	58.2	2D
Haro 29	5.9	<i>HI</i>	0.2	34.4	43.5	2D
DDO 87	7.7	<i>HI</i>	0.2	28	56.6	2D
DDO 70	1.3	<i>HI</i>	0.1	43.9	43.9	2D
DDO 53	3.6	<i>HI</i>	0.1	29.2	32	2D
DDO 52	10.3	<i>HI</i>	0.3	42.6	61.7	2D
DDO 50	3.4	<i>HI</i>	0.1	31.2	38.8	2D
DDO 47	5.2	<i>HI</i>	0.1	23.7	64.7	2D
DDO 46	6.1	<i>HI</i>	0.2	73.2	76.3	2D
DDO 43	7.8	<i>HI</i>	0.2	31.5	38.3	2D
DDO 216	1.1	<i>HI</i>	0.1	18.9	18.9	2D
DDO 210	0.9	<i>HI</i>	0.1		12	2D
DDO 168	4.3	<i>HI</i>	0.1	57.5	61.9	2D
DDO 154	3.7	<i>HI</i>	0.1	35.8	51.1	2D
DDO 133	3.5	<i>HI</i>	0.1	41.6	46.7	2D
DDO 126	4.9	<i>HI</i>	0.1	30.7	38.7	2D
DDO 101	6.4	<i>HI</i>	0.2	63.3	64.9	2D
CVnIdwA	3.6	<i>HI</i>	0.1	25.9	26.4	2D
UGC 2259	9.9	$H_{\beta} + OIII$	0.1	74	93.4	2D
UGC 11707	15	$H_{\beta} + OIII$	0.2	51.6	103.7	2D
NGC 959	9.9	$H_{\beta} + OIII$	0.1	78.6	84.1	2D
NGC 5949	14.3	$H_{\beta} + OIII$	0.2	92.2	111.2	2D
NGC 5204	3.2	$H_{\beta} + OIII$	0.1	83.2	89.4	2D
NGC 2976	3.6	$H_{\beta} + OIII$	0.1	74.8	76.8	2D
NGC 2552	11.4	$H_{\beta} + OIII$	0.2	57.9	96.1	2D
NGC 2366	3.4	<i>HI</i>	0.2	43.2	66.7	2D
M81 dw B	5.3	<i>HI</i>	0.3	31.6	39.5	2D

Galaxia	D Mpc	Tipo Observación	Res Kpc	$V_{2\text{kpc}}$ Km s ⁻¹	V_{max} Km s ⁻¹	Espectrógrafo
IC 2574	4	<i>HI</i>	0.2	24.5	80	2D
Ho II	3.4	<i>HI</i>	0.2	27.9	37.5	2D
Ho I	3.8	<i>HI</i>	0.2	28.3	37.2	2D
DDO 53	3.6	<i>HI</i>	0.2	32.4	32.5	2D
DDO 154	4.3	<i>HI</i>	0.2	34.5	50	2D
UGC 5750	56.1	H_{α}	0.5	19	73.4	2D
UGC 477	35.5	H_{α}	0.3	41.3	111.7	2D
UGC 4325	10.1	H_{α}	0.1	82.4	110.7	2D
UGC 191	17.6	H_{α}	0.2	78	97.2	2D
UGC 1551	20.2	H_{α}	0.2	42.4	82.5	2D
UGC 1281	5.5	H_{α}	0.1	37.8	45.8	2D
UGC 128	60	H_{α}	0.6	46.1	144.9	2D
UGC 11820	13.3	H_{α}	0.1	80.1	96.9	2D
NGC 959	7.8	H_{α}	0.1	76.7	79.2	2D
NGC 7137	22.5	H_{α}	0.1	76.7	79.2	2D
NGC 4395	3.5	H_{α}	0.1		32.7	2D
LSB F583-4	49	H_{α}	0.5	42.1	95.8	2D
LSB F583-1	32	H_{α}	0.3	42	72.4	2D
LSB F568-3	77	H_{α}	0.7	41.4	114.3	2D
LSB F563-V2	61	H_{α}	0.6	52.9	103.8	2D
LSB F563-1	45	H_{α}	0.4	51.7	146.4	2D
DDO 64	6.1	H_{α}	0.1	59.8	59.8	2D
NGC 925	9.2	<i>HI</i>	0.5	34.7	119.9	2D
NGC 7793	3.9	<i>HI</i>	0.2	76.2	117.9	2D
NGC 7331	14.7	<i>HI</i>	0.8	253.2	268.1	2D
NGC 6946	5.9	<i>HI</i>	0.3	132.5	224.3	2D
NGC 5055	10.1	<i>HI</i>	0.6	185.3	211.6	2D
NGC 4826	7.5	<i>HI</i>	0.4	166.7	180.2	2D
NGC 4736	4.7	<i>HI</i>	0.3	168.7	198.3	2D
NGC 3627	9.3	<i>HI</i>	0.5	178	207.1	2D
NGC 3621	6.6	<i>HI</i>	0.4	102.9	159.2	2D
NGC 3521	10.7	<i>HI</i>	0.6	192.1	233.4	2D
NGC 3198	13.8	<i>HI</i>	0.8	76.7	158.7	2D
NGC 3031	3.6	<i>HI</i>	0.2	242.2	259.8	2D
NGC 2976	3.6	<i>HI</i>	0.2	75	86.2	2D
NGC 2903	8.9	<i>HI</i>	0.5	120.1	215.5	2D
NGC 2841	14.1	<i>HI</i>	0.8		323.9	2D
NGC 2403	3.2	<i>HI</i>	0.2	97.4	143.9	2D
NGC 2366	3.4	<i>HI</i>	0.2	43.2	66.7	2D
IC 2574	4	<i>HI</i>	0.2	20.6	78.5	2D
DDO 154	4.3	<i>HI</i>	0.2	34.5	50	2D
NGC 6822	0.5	<i>HI</i>	0.1	41.8	56.3	2D
UGC 8490	20.5	<i>HI</i> + H_{α}	0.1	30	80.1	Long-slit
UGC 731	8	<i>HI</i> + H_{α}	0.1	61.5	74	Long-slit
UGC 5721	6.7	<i>HI</i> + H_{α}	0.1	76.2	80.4	Long-slit
UGC 4499	13	<i>HI</i> + H_{α}	0.1	46.2	74.2	Long-slit
UGC 4325	10.1	<i>HI</i> + H_{α}	0.1	77	104.6	Long-slit

Galaxia	D Mpc	Tipo Observación	Res Kpc	$V_{2\text{kpc}}$ Km s ⁻¹	V_{max} Km s ⁻¹	Espectrógrafo
UGC 2259	9.8	$HI + H_{\alpha}$	0.1	78.8	93.7	Long-slit
UGC 12732	13.2	$HI + H_{\alpha}$	0.1	45.8	98	Long-slit
UGC 11861	25.1	$HI + H_{\alpha}$	0.1	80.4	164	Long-slit
UGC 11707	15.9	$HI + H_{\alpha}$	0.1	51.3	99.9	Long-slit
UGC 11557	23.8	$HI + H_{\alpha}$	0.1	35.1	84.5	Long-slit
LSB F574-1	96	$HI + H_{\alpha}$	0.5	57.9	104.2	Long-slit
LSB F568-V1	80	$HI + H_{\alpha}$	0.4	67	124.9	Long-slit
LSB F568-3	77	$HI + H_{\alpha}$	0.4	32.5	111.2	Long-slit
LSB F568-1	85	$HI + H_{\alpha}$	0.4	67.9	130.7	Long-slit
LSB F563-V2	61	$HI + H_{\alpha}$	0.3	87.7	113.1	Long-slit
UGC 711	26.4	H_{α}	0.3	27.8	91.6	Long-slit
UGC 5750	56	$HI + H_{\alpha}$	0.5	20	49.6	Long-slit
UGC 5005	52	$HI + H_{\alpha}$	0.5	29.6	100	Long-slit
UGC 4325	10.1	$HI + H_{\alpha}$	0.1	73.8	122.6	Long-slit
UGC 4173	16.8	$HI + H_{\alpha}$	0.2	22.8	57	Long-slit
UGC 3371	12.8	$HI + H_{\alpha}$	0.1	33.9	85.7	Long-slit
UGC 3137	18.4	$HI + H_{\alpha}$	0.2	45.6	106.9	Long-slit
UGC 1281	5.5	$HI + H_{\alpha}$	0.1	37.7	56.9	Long-slit
UGC 1230	51	$HI + H_{\alpha}$	0.5	50.5	112.7	Long-slit
UGC 10310	15.6	$HI + H_{\alpha}$	0.1	38.9	75	Long-slit
NGC 5023	4.8	$HI + H_{\alpha}$	0.1	64.9	84.4	Long-slit
NGC 4455	6.8	$HI + H_{\alpha}$	0.1	44.9	64.4	Long-slit
NGC 4395	3.5	$HI + H_{\alpha}$	0.1	57	84.2	Long-slit
NGC 3274	6.7	$HI + H_{\alpha}$	0.1	82.5	82.6	Long-slit
NGC 2366	3.4	$HI + H_{\alpha}$	0.1	54	55.5	Long-slit
NGC 1560	3	$HI + H_{\alpha}$	0.1	42.6	77.5	Long-slit
NGC 100	11.2	H_{α}	0.1	60	91.2	Long-slit
LSB F563-1	45	$HI + H_{\alpha}$	0.4	57.1	114.1	Long-slit
IC 2233	10.5	$HI + H_{\alpha}$	0.1	40.8	92.8	Long-slit
DDO 64	6.1	$HI + H_{\alpha}$	0.1	46.3	46.9	Long-slit
DDO 52	5.3	$HI + H_{\alpha}$	0.1	43.1	50	Long-slit
DDO 47	4	$HI + H_{\alpha}$	0.1	44	67	Long-slit
DDO 189	12.6	$HI + H_{\alpha}$	0.1	47.6	65.7	Long-slit
DDO 185	5.1	$HI + H_{\alpha}$	0.1	43.3	49.6	Long-slit
UGC 6614	85	H_{α}	0.6	120.2	205.2	Long-slit
UGC 5750	56	H_{α}	0.4	23.2	78.9	Long-slit
UGC 4115	3.2	$HI + H_{\alpha}$	0.1		39.8	Long-slit
UGC 11819	60	$HI + H_{\alpha}$	0.4	73	154.7	Long-slit
UGC 11748	73	$HI + H_{\alpha}$	0.5	198.9	250	Long-slit
UGC 11648	48	$HI + H_{\alpha}$	0.3	74.3	144.6	Long-slit
UGC 11616	73	$HI + H_{\alpha}$	0.5	87.8	142.8	Long-slit
UGC 11583	5	$HI + H_{\alpha}$	0.1	35.6	35.6	Long-slit
UGC 11557	22	$HI + H_{\alpha}$	0.2	34.5	80.4	Long-slit
UGC 11454	91	$HI + H_{\alpha}$	0.7	85.8	152.2	Long-slit
LSB F730-V1	144	H_{α}	1	87.3	145.3	Long-slit
LSB F583-4	49	$HI + H_{\alpha}$	0.4	44.5	69.9	Long-slit
LSB F583-1	32	$HI + H_{\alpha}$	0.2	40.7	86.9	Long-slit

Galaxia	D Mpc	Tipo Observación	Res Kpc	$V_{2\text{kpc}}$ Km s ⁻¹	V_{max} Km s ⁻¹	Espectrógrafo
LSB F579-V1	85	$HI + H_{\alpha}$	0.6	93.5	114.4	Long-slit
LSB F571-8	48	$HI + H_{\alpha}$	0.3	68.1	143.9	Long-slit
LSB F568-3	77	$HI + H_{\alpha}$	0.6	41	101.1	Long-slit
LSB F563-1	23.6	$HI + H_{\alpha}$	0.2	84	112.4	Long-slit
ESO 4880490	22	H_{α}	0.2	62.3	97.1	Long-slit
ESO 4250180	86	H_{α}	0.6		144.5	Long-slit
ESO 3050090	11	H_{α}	0.1	34.6	54.6	Long-slit
ESO 3020120	69	H_{α}	0.5	48.3	86.3	Long-slit
ESO 2060140	60	H_{α}	0.4	83.6	118	Long-slit
ESO 1870510	18	H_{α}	0.1	36.3	39.9	Long-slit
ESO 1200211	15	H_{α}	0.1	21.8	25.4	Long-slit
ESO 0840411	80	H_{α}	0.6	19.7	61.3	Long-slit
ESO 0140040	212	H_{α}	1.5	120.3	272.7	Long-slit

Nota. De izquierda a derecha las columnas representan: nombre de la galaxia, distancia a la galaxia, tipo de línea de emisión empleada en la observación, resolución de la observación, velocidad circular a 2 kpc de radio, velocidad circular máxima y tipo de espectrógrafo. El primer bloque de galaxias hasta la línea horizontal divisora se corresponden con la referencia (Kauffmann y cols., 2015), el segundo (Oh y cols., 2015), el tercero (Adams y cols., 2014), el cuarto (Oh y cols., 2011), el quinto (De Naray y cols., 2008), el sexto (De Blok y cols., 2008), el séptimo (Weldrake y cols., 2003), el octavo (Swaters y cols., 2003), el noveno (De Blok y Bosma, 2002) y finalmente (De Blok y cols., 2001).