

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN JUAN



FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y  
NATURALES

Tesis presentada para obtener el grado académico de Doctora en  
Astronomía

# **Galaxias anilladas: del análisis observacional y simulado a la clasificación automática**

**Por:** Lic. María Julia Fernandez

**Directora:** Dra. Sol Alonso

**San Juan, Argentina**

2025



© 2025, Fernandez, Maria Julia

Ninguna parte de esta tesis puede reproducirse o transmitirse bajo ninguna forma o por ningún medio o procedimiento, sin permiso por escrito del autor.

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

A mis padres y hermanos.«Deo Gratias»

## AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres y hermanos por su apoyo incondicional, su amor y su paciencia a lo largo de este proceso. A mis amigos y colegas, por su compañía, ánimo y comprensión en los momentos más desafiantes. Agradezco especialmente a mi directora, Sol Alonso, por su guía, orientación y compromiso constante, que fueron fundamentales para la realización de este trabajo. Extiendo mi gratitud a quienes colaboraron conmigo y contribuyeron de distintas maneras: Valeria Mesa y Emanuel Sillero. A la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, al grupo GAE y al CONICET, por brindarme el espacio, las herramientas y el apoyo institucional necesarios para llevar adelante esta investigación. A Todos ellos, muchas gracias!

## Resumen

Esta tesis aborda el estudio de galaxias anilladas mediante tres enfoques complementarios: análisis de catálogos observacionales, exploración en simulaciones y clasificación automática con aprendizaje profundo.

En la primera etapa, se investigó la presencia y propiedades de galaxias anilladas considerando distintos tipos de anillos: internos, externos, combinados, nucleares y parciales, en grupos pobres y ricos, integrando catálogos del relevamiento *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS). Se encontró que aproximadamente un tercio de las galaxias con anillos se encuentra en entornos grupales, mayormente en grupos pobres. Los anillos internos son los más comunes y los nucleares, poco frecuentes. Las galaxias anilladas presentan menores tasas de formación estelar, poblaciones más envejecidas y colores más rojos respecto a sus contrapartes sin anillos. Estos efectos se ven acentuados en ambientes de mayor densidad.

En la simulación Illustris TNG50 se identificaron más de 800 galaxias anilladas, confirmando patrones observacionales y aportando información sobre formación estelar, metalicidad y perfiles radiales. Las galaxias con anillos y barras muestran menor fracción de gas, colores más rojos y mayores metalicidades, destacando el rol de la dinámica interna. Los perfiles radiales exhiben huellas claras de los anillos en radios característicos del disco.

Finalmente, se aplicaron modelos de clasificación sobre imágenes del SDSS con arquitecturas como ConvNeXt-Base. La clasificación binaria (anillo vs. no anillo) resultó más robusta que la multiclase, con exactitud y F1 superiores al 88%. Esto valida el uso de redes neuronales profundas como herramienta eficaz y escalable para el análisis morfológico en grandes relevamientos.

En conjunto, la tesis demuestra que los anillos son trazadores clave de la evolución secular de las galaxias discos, vinculados con procesos de regulación del gas, envejecimiento estelar y enriquecimiento químico, parcialmente modulados por el entorno. Su estudio se potencia al integrar observaciones, simulaciones y técnicas de inteligencia artificial, abriendo nuevas perspectivas para la clasificación morfológica y el análisis de la evolución galáctica.

**Keywords** – Catálogos, Galaxias, Anillos, Clasificación, Aprendizaje Automático

## Abstract

This thesis investigates ringed galaxies through three complementary approaches: analysis of observational catalogs, exploration within simulations, and automatic classification using deep learning techniques.

In the first stage, the presence and properties of ringed galaxies were studied considering different ring types: inner, outer, combined, nuclear, and partial, across poor and rich groups, by integrating catalogs from the *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS). It was found that approximately one third of ringed galaxies reside in group environments, mostly in poor groups. Inner rings are the most common, while nuclear rings are rare. Compared to their non-ringed counterparts, ringed galaxies exhibit lower star formation rates, older stellar populations, and redder colors. These effects become more pronounced in denser environments.

In the Illustris TNG50 simulation, more than 800 ringed galaxies were identified, confirming observational patterns and providing insights into star formation, metallicity, and radial profiles. Ringed and barred galaxies show lower gas fractions, redder colors, and higher metallicities, underscoring the role of internal dynamics. Their radial profiles display clear signatures of rings at characteristic disk radii.

Finally, classification models were applied to SDSS images using architectures such as *ConvNeXt-Base*. The binary classification (ring vs. non-ring) proved more robust than the multiclass approach, achieving accuracy and F1 scores above 88%. This validates the use of deep neural networks as an efficient and scalable tool for morphological analysis in large surveys.

Overall, this thesis demonstrates that rings are key tracers of the secular evolution of disk galaxies, linked to processes of gas regulation, stellar aging, and chemical enrichment, partially modulated by the environment. Their study is greatly enhanced by integrating observations, simulations, and artificial intelligence techniques, opening new perspectives for morphological classification and the analysis of galactic evolution.

**Keywords** –Catalogs, Galaxies, Rings, Classification, Machine Learning

# Índice general

<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>I</b>
<b>Resumen</b>	<b>II</b>
<b>Abstract</b>	<b>III</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Morfología de galaxias . . . . .	1
1.1.1. Galaxias espirales . . . . .	3
1.1.1.1. Formación y morfología de los anillos . . . . .	4
1.1.2. Propiedades de las galaxias anilladas . . . . .	8
1.1.3. Galaxias anilladas y el ambiente local . . . . .	10
1.2. Motivación y organización . . . . .	13
<b>2. Datos</b>	<b>20</b>
2.1. Catálogo de galaxias anilladas en SDSS-DR14 . . . . .	20
2.1.1. Relevamiento SDSS-DR14 . . . . .	20
2.1.2. Selección de la muestra . . . . .	23
2.1.3. Clasificación . . . . .	24
2.2. Catálogo de galaxias anilladas en TNG50 . . . . .	30
2.2.1. Simulaciones Illustris TNG50 . . . . .	30
2.2.1.1. Criterios de selección . . . . .	31
2.2.1.2. Clasificación . . . . .	32
2.2.1.3. Identificación de barras en galaxias anilladas . . . . .	34
2.3. Comparación entre los catálogos de galaxias anilladas: SDSS y TNG50 . . . . .	37
<b>3. Galaxias anilladas y su entorno local</b>	<b>42</b>
3.1. Catálogo de grupos y cúmulos de galaxias . . . . .	42
3.1.1. Galaxias anilladas en grupos y cúmulos . . . . .	44
3.1.2. Muestra de control . . . . .	47
3.2. Frecuencia de barras . . . . .	49
3.3. Distribución de las galaxias anilladas en grupos . . . . .	52
3.4. Propiedades . . . . .	54

3.4.1.	Actividad de formación de estrellas y edad de la población estelar . . . . .	54
3.4.2.	Colores . . . . .	61
3.4.3.	Dependencia con la distancia al centro del grupo y la densidad ambiental . . . . .	68
<b>4.</b>	<b>Galaxias anilladas en TNG50</b>	<b>72</b>
4.1.	Propiedades de las galaxias anilladas . . . . .	72
4.1.1.	Muestra Control . . . . .	73
4.1.2.	Actividad de formación estelar . . . . .	75
4.1.3.	Colores . . . . .	78
4.1.4.	Metalicidad . . . . .	83
4.2.	Análisis Estructural de las galaxias con anillos . . . . .	87
4.2.1.	Perfiles radiales . . . . .	87
4.2.2.	Formatos de los anillos . . . . .	89
<b>5.</b>	<b>Clasificación automática</b>	<b>93</b>
5.1.	Clasificación automática de galaxias anilladas . . . . .	93
5.1.1.	Datos . . . . .	94
5.1.1.1.	Desbalance de clases . . . . .	96
5.2.	Preprocesamiento de Datos . . . . .	98
5.2.1.	Preparación de las imágenes . . . . .	98
5.3.	Arquitectura de los modelos considerados . . . . .	100
5.3.1.	EfficientNet-B3 . . . . .	100
5.3.2.	FastMobileNetV2 . . . . .	102
5.3.3.	Transformers para visión por computadora . . . . .	103
5.3.4.	ConvNeXt-Base . . . . .	105
5.3.5.	Estrategia de ensamblado de modelos . . . . .	106
5.3.6.	Funciones de pérdida para escenarios multiclase desbalanceados . . . . .	107
5.3.6.1.	Cross-Entropy Loss . . . . .	107
5.3.6.2.	Focal Loss . . . . .	108
5.3.6.3.	Asymmetric Loss (ASL) . . . . .	109
5.3.6.4.	LDAM Loss . . . . .	109
5.4.	Diseño del entrenamiento . . . . .	109
5.4.0.1.	Pérdida focal mejorada . . . . .	109
5.4.0.2.	Ponderación dinámica de clases . . . . .	110
5.4.0.3.	Ensemble de instantáneas . . . . .	111
5.4.0.4.	Aprendizaje curricular . . . . .	112
5.4.0.5.	Programación de la tasa de aprendizaje . . . . .	113
5.4.0.6.	Integración comunitaria y herramientas . . . . .	114
5.5.	Evaluación de los Modelos . . . . .	115
5.5.1.	Métricas de evaluación . . . . .	115
5.5.2.	Protocolo general de entrenamiento . . . . .	116
5.5.3.	Selección del modelo final . . . . .	118
5.5.4.	Selección de la función de pérdida . . . . .	119

---

5.5.5. Configuración del conjunto de datos . . . . .	119
5.6. Resultados y análisis . . . . .	120
5.6.1. Eficiencia y progreso del entrenamiento . . . . .	124
5.6.2. Comparación con trabajos previos . . . . .	127
<b>6. Conclusiones</b>	<b>130</b>
6.1. Resultados . . . . .	130
<b>Apéndices</b>	<b>141</b>
<b>A.</b>	<b>141</b>
A1. Regresión de Theil–Sen . . . . .	141
A2. Redes Neuronales Convolucionales . . . . .	142
A3. Detalles de configuración experimental y reproducibilidad . . .	143
A3.1. Configuración de entrenamiento . . . . .	143
A3.2. Métricas de evaluación . . . . .	145
A3.3. Protocolo de entrenamiento y validación . . . . .	145
A3.4. Estudios de ablación . . . . .	146
<b>Referencias</b>	<b>147</b>

# Índice de tablas

2.1.1. Números y porcentajes de galaxias con diferentes tipos de anillos. El error corresponde a la semidispersión entre dos clasificaciones visuales independientes. . . . .	27
2.1.2. Números y porcentajes (con intervalos de confianza al 95 %) de galaxias con diferentes tipos de anillos según la morfología, normalizados al total de galaxias anilladas ( $N_{\text{tot}} = 1868$ ). . . . .	29
2.1.3. Números y porcentajes (con intervalos de confianza al 95 %) de galaxias con diferentes tipos de anillos, considerando la presencia de barras, lentes y sistemas en pares. . . . .	29
2.2.1. Números y porcentajes (con intervalos de confianza al 95 %) para galaxias con diferentes tipos de anillos obtenidos a partir de TNG50 y SDSS. . . . .	34
2.2.2. Números de galaxias con diferentes tipos de anillos en Illustris TNG50, para los valores de $z$ disponibles. . . . .	34
2.2.3. Números y porcentajes (con intervalos de confianza al 95 %) de galaxias anilladas barradas y no barradas, para los distintos $z$ analizados en Illustris TNG50. . . . .	36
2.2.4. Números de galaxias barradas con diferentes tipos de anillos, para cada $z$ analizado en TNG50. . . . .	36
3.1.1. Números y porcentajes (con intervalos de confianza al 95 %) de galaxias anilladas y de control en grupos pobres ( $3 \leq N_{\text{rich}} \leq 10$ ) y grupos ricos ( $11 \leq N_{\text{rich}} \leq 50$ ). . . . .	45
3.1.2. Números y porcentajes (con intervalos de confianza al 95 %) de galaxias con distintos tipos de anillos en grupos pobres ( $3 \leq N_{\text{rich}} \leq 10$ ), grupos ricos ( $11 \leq N_{\text{rich}} \leq 50$ ) y en el total de los grupos. . . . .	46
3.2.1. Números y porcentajes (con intervalos de confianza al 95 %) de galaxias barradas y no barradas con diferentes tipos de anillos, normalizados al número total de galaxias anilladas en grupos pobres ( $N = 487$ ), grupos ricos ( $N = 150$ ) y en el total de los grupos ( $N = 637$ ). . . . .	51

3.4.1. Porcentajes con intervalos de confianza binomiales al 95 % de galaxias anilladas y de la muestra de control (CS) en grupos ricos y pobres con baja actividad de formación estelar y poblaciones estelares antiguas. . . . .	57
3.4.2. Porcentajes con intervalos de confianza binomiales al 95 % de galaxias anilladas y de la muestra de control (CS) en grupos ricos y pobres con $(M_u - M_r) > 2.2$ , $(M_g - M_r) > 0.84$ y ambas restricciones simultáneas. . . . .	65
5.1.1. Distribución, números y porcentajes de galaxias con diferentes tipos de anillos, sin anillos y ambiguas. . . . .	96
5.1.2. Distribución, números y porcentajes de galaxias correspondientes a la clasificación binaria (galaxias con y sin anillos). . . . .	97
5.1.3. Distribución, números y porcentajes de galaxias con diferentes tipos de anillos, utilizadas en la clasificación multiclase. . . . .	97
5.3.1. Arquitectura base de EfficientNet-B3. Cada bloque detalla el tipo de operador, la resolución de entrada, el número de canales de salida y la cantidad de capas. . . . .	101
5.6.1. Resultados de los experimentos de clasificación de galaxias anilladas y no anilladas. . . . .	120
5.6.2. Resumen de estudios recientes: tamaño y tipo de imágenes utilizadas. . . . .	128
5.6.3. Resumen de arquitecturas y métricas de desempeño reportadas en la literatura. . . . .	129

# Índice de figuras

1.1.1. Diagrama de diapasón de Hubble que representa la secuencia morfológica de galaxias. Imagen adaptada de <a href="https://jila.colorado.edu/~ajsh/courses/astr1120_03/text/chapter10/110S3.htm">https://jila.colorado.edu/~ajsh/courses/astr1120_03/text/chapter10/110S3.htm</a> . . . . .	2
1.1.2. Panel Superior: Esquema del volumen de clasificación propuesto por Hodge ( <a href="#">Hodge 1966</a> ). Panel inferior: Esquema de clasificación morfológica de galaxias desarrollado por De Vaucouleurs ( <a href="#">de Vaucouleurs 1959</a> ). Imagen adaptada de <a href="https://ned.ipac.caltech.edu/level5/Sandage/Sandage4_4.html">https://ned.ipac.caltech.edu/level5/Sandage/Sandage4_4.html</a> . . . . .	15
1.1.3. Galaxia <i>Cartwheel</i> . Créditos: ESA/Hubble & NASA. . . . .	16
1.1.4. Representación de las resonancias internas, externas y de corotación de Lindblad. Imagen adaptada de <a href="https://ned.ipac.caltech.edu/level5/Sept14/Kormendy/Kormendy4.html">https://ned.ipac.caltech.edu/level5/Sept14/Kormendy/Kormendy4.html</a> . . . . .	16
1.1.5. Imágenes de las galaxias espirales barradas NGC 1433 (panel izquierdo) y NGC 3351 (panel derecho), tomadas por el telescopio James Webb. Créditos: NASA, ESA, CSA, STScI, J. Lee (STScI), T. Williams (Oxford), PHANGS Team. . . . .	16
1.1.6. Ejemplos de galaxias anilladas del catálogo de <a href="#">Nair and Abraham (2010)</a> . Panel superior: Galaxias con anillo interno. Panel central: Galaxias con anillo externo. Panel inferior: Galaxias con anillo i+o.	17
1.1.7. Ejemplos de galaxias anilladas clasificadas por <a href="#">Buta and Combes (1996)</a> . Panel superior: Galaxias con anillo nuclear. Panel inferior: Galaxias con anillo parcial. . . . .	17
1.1.8. Esquemas de estructuras de anillos y brazos espirales, mostrando los <i>manifolds</i> para distintos modelos ( <a href="#">Romero-Gómez et al. 2007</a> ). . . . .	18
1.1.9. Distribuciones de la tasa de formación estelar y la edad de la población estelar. Paneles superiores: $\text{Log}(\text{SFR}/M_*)$ y $D_n(4000)$ para galaxias anilladas (líneas roja continua) y para la muestra de control (líneas negra discontinua). Paneles Inferiores: Distribuciones para distintos tipos de galaxias anilladas; izquierda: con anillo interior (líneas magenta discontinua) y con otros tipos de anillos (líneas azul de trazos); derecha: no barradas (líneas cian discontinua) y con barras (verde de trazos) ( <a href="#">Fernandez et al. 2021</a> ). . . . .	18

1.1.10a) Distribuciones normalizadas de $M_u - M_r$ (panel superior) y $M_g - M_r$ (panel inferior) para galaxias anilladas (líneas rojas continuas) y para la muestra de control (líneas negras de trazos). b) Panel Superior: Distribuciones de metalicidad, $12 + \text{Log}(\text{O} / \text{H})$ , para galaxias anilladas (línea roja continua) y para la muestra de control (línea negra discontinua). Panel Inferior Izquierdo: Galaxias con anillo interior (línea magenta discontinua) y con otros tipos de anillos (línea azul de trazos). Panel Inferior Derecho: Galaxias anilladas no barradas (línea cian discontinua) y con barras (línea verde de trazos) (Fernandez et al. 2021) . . .	19
2.1.1. Telescopio de 2.5 m del SDSS. . . . .	22
2.1.2. Ejemplos de galaxias espirales con diferentes tipos de anillos (Fig. 1 de Fernandez et al. (2021)). . . . .	25
2.1.3. Diferentes tipos de barras, lentes y galaxias con anillos en pares consideradas. . . . .	26
2.2.1. Comparación de los tres volúmenes de la simulación Illustris TNG: TNG50, TNG100 y TNG300, visualizados en densidad proyectada de materia oscura (Nelson et al. 2019a). . . . .	31
2.2.2. Mapas de densidad de columna de gas de cuatro galaxias extraídos de la simulación TNG50 a bajo $z$ . Cada panel muestra la distribución de gas proyectada en unidades de $\log(M_\odot \text{ kpc}^{-2})$ . Los sistemas presentan diversas estructuras anulares y espirales, lo que pone de manifiesto diferentes estados dinámicos y etapas evolutivas. Los paneles corresponden a: (a) Subhalo ID 406122 a $z \sim 0.0$ , (b) Subhalo ID 118180 a $z \sim 0.0$ , (c) Subhalo ID 483898 a $z \sim 0.0$ , (d) Subhalo ID 286507 a $z = 0.02$ . Fuente: <a href="https://www.tng-project.org/media/">https://www.tng-project.org/media/</a> . . . . .	39
2.2.3. Imágenes sintéticas compuestas libres de polvo de los diferentes tipos de galaxias anilladas obtenidas a partir de TNG50, basadas en los flujos de filtro ancho simulados aparentes F115W, F150W y F200W de JWST-NIRCam (Fig. 1 de Fernandez et al. (2025)). . . . .	40
2.2.4. Distribución porcentual de galaxias con distintos tipos de anillos, identificadas en la simulación IllustrisTNG50, en función del redshift. Las barras de error representan intervalos de confianza al 95%. . . . .	40
2.2.5. Distribución porcentual de galaxias barradas con diferentes tipos de anillos, identificadas en la simulación IllustrisTNG50, en función del redshift. Las barras de error representan intervalos de confianza al 95%. . . . .	41
3.1.1. . . . .	45

3.1.2. Ejemplos de galaxias anilladas en un grupo pobre ( <i>Poor Groups</i> , izquierda) y en un grupo rico ( <i>Rich Groups</i> , derecha). Los paneles del costado derecho muestran ampliaciones de las galaxias con anillo externo en dichos grupos. La estrella roja indica el centro de cada grupo. En todas las imágenes, el norte está hacia arriba y el este a la izquierda (Fig. 1 de <a href="#">Fernandez et al. (2024)</a> ). . . . .	46
3.1.3. Fracción de galaxias con diferentes tipos de anillos en grupos pobres ( $3 \leq N_{\text{rich}} \leq 10$ ), grupos ricos ( $11 \leq N_{\text{rich}} \leq 50$ ) y en la muestra total del grupo. Las barras de error corresponden a los intervalos de confianza del 95 %. . . . .	46
3.1.4. Distribuciones normalizadas de redshift (a), magnitud absoluta en banda $r$ (b), parámetro de concentración (c), masa del grupo (d) y densidad ambiental (e), para galaxias anillos en grupos pobres y ricos (líneas azul y magenta, respectivamente) y sus correspondientes muestras de control (histogramas sombreados) (Fig. 2 de <a href="#">Fernandez et al. (2024)</a> ). . . . .	48
3.2.1. Fracción de galaxias barradas y no barradas que albergan diferentes tipos de anillos en grupos pobres (panel izquierdo), grupos ricos (panel central) y en la muestra total del grupo (panel derecho). Los porcentajes están normalizados al número total de galaxias anilladas en cada entorno. Las barras de error indican los intervalos de confianza del 95 %. . . . .	51
3.3.1. Perfil de densidad superficial en función de la distancia proyectada normalizada al centro del grupo, $d_{CG}/R_{200}$ . Panel izquierdo: galaxias anilladas (línea azul) y la muestra de control (línea gris) en grupos pobres. Panel derecho: galaxias anilladas (línea magenta) y la muestra de control (línea gris) en grupos ricos. . . . .	54
3.4.1. $\text{Log}(\text{SFR}/M_*)$ y $D_n(4000)$ en función de las masas estelares. Paneles izquierdos: Galaxias anilladas ( <i>ringed</i> ) en grupos pobres y su correspondiente muestra de control (contornos en azul y gris, respectivamente). Los contornos representan isodensidades que encierran el 18 %, 36 %, 54 %, 72 % y 90 % de los objetos en cada muestra. Los paneles superiores y laterales muestran las distribuciones normalizadas de masa estelar y de cada parámetro para ambas muestras. Paneles derechos: Análogo a los paneles izquierdos para galaxias anilladas y no anilladas en grupos ricos (contornos en magenta y gris, respectivamente) (Fig. 3 de <a href="#">Fernandez et al. (2024)</a> ). . . . .	55

3.4.2. Valores medios de $\text{Log}(\text{SFR}/M_*)$ y $D_n(4000)$ en función del parámetro de concentración, $C$ . Los errores mostrados corresponden a estimaciones obtenidas mediante el método bootstrap. Paneles izquierdos: Galaxias anilladas en grupos pobres (líneas azul con trazo-punto) y su correspondiente muestra de control (líneas negras a trazo). Paneles derechos: Galaxias anilladas en grupos ricos (líneas magenta punteada) y su respectiva muestra de control (líneas negras a trazo) (Fig. 4 de <a href="#">Fernandez et al. (2024)</a> ). . . . .	58
3.4.3. Distribuciones normalizadas de $\text{Log}(\text{SFR}/M_*)$ para galaxias con diferentes tipos de anillos (nucleares, internos, externos, internos+externos y parciales) en grupos pobres y ricos (paneles superiores e inferiores, respectivamente). Las distribuciones grises representan las muestras de control correspondientes (Fig. 5 de <a href="#">Fernandez et al. (2024)</a> ). . . . .	61
3.4.4. Distribuciones normalizadas de $D_n(4000)$ para galaxias que exhiben diferentes tipos de anillos (nucleares, internos, externos, internos+externos y parciales) en grupos pobres y ricos (paneles superiores e inferiores, respectivamente). Las distribuciones grises representan las muestras de control correspondientes (Fig. 6 de <a href="#">Fernandez et al. (2024)</a> ). . . . .	62
3.4.5. Paneles superiores: Diagramas de color-magnitud para galaxias anilladas ( <i>ringed</i> ) en grupos pobres y ricos (contornos azules y magenta, respectivamente), y sus correspondientes muestras de control (contornos grises). Los contornos representan isodensidades que encierran el 18 %, 36 %, 54 %, 72 % y 90 % de los objetos en cada muestra. Los paneles laterales y superiores presentan las distribuciones normalizadas de $M_u - M_r$ y $M_r$ para cada muestra. Paneles inferiores: Diagramas de color-color para galaxias anilladas en grupos pobres (contornos azules), en grupos ricos (contornos magenta) y sus respectivas muestras de control (contornos grises). Los paneles laterales presentan las distribuciones normalizadas de $M_g - M_r$ para cada muestra (Fig. 7 de <a href="#">Fernandez et al. (2024)</a> ). . . . .	63
3.4.6. Valores medios de $M_u - M_r$ y $M_g - M_r$ en función de las masas de los grupos. Paneles izquierdos: Galaxias con anillos en grupos pobres (líneas azul con trazo-punto) y sus respectivas muestras de control (líneas negras a trazo). Paneles derechos: Galaxias con anillos en grupos ricos (líneas magenta punteadas) y sus muestras de control (líneas negras a trazo) (Fig. 8 de <a href="#">Fernandez et al. 2024</a> ). . . . .	66

3.4.7. Distribuciones normalizadas de $M_u - M_r$ para galaxias que exhiben distintos tipos de anillos (nucleares, internos, externos, internos+externos y parciales) en grupos pobres y ricos (paneles superiores e inferiores, respectivamente). Las distribuciones grises representan las muestras de control correspondientes (Fig. 9 de <a href="#">Fernandez et al. (2024)</a> ). . . . .	66
3.4.8. Valores medios de $\text{Log}(\text{SFR}/M_*)$ , $D_n(4000)$ y $M_u - M_r$ en función de la distancia normalizada al centro del grupo, $d_{CG}/R_{200}$ . Paneles izquierdos: Galaxias con anillos en grupos pobres (líneas azul con trazo-punto) y su respectiva muestra de control (líneas negras a trazo). Paneles derechos: Galaxias con anillos en grupos ricos (líneas magenta punteadas) y su muestra de control (líneas negras a trazo) (Fig. 10 de <a href="#">Fernandez et al. (2024)</a> ). . . . .	69
3.4.9. Valores medios de $\text{Log}(\text{SFR}/M_*)$ , $D_n(4000)$ y $(M_u - M_r)$ en función de la densidad ambiental, $Den_1$ . Paneles izquierdos: Galaxias con anillos en grupos pobres (líneas azul de trazo-punto) y su respectiva muestra de control (líneas negras a trazo). Paneles derechos: Galaxias con anillos en grupos ricos (líneas magenta punteadas) y su muestra de control (líneas negras a trazo) (Fig. 11 de <a href="#">Fernandez et al. (2024)</a> ). . . . .	70
4.1.1. Disposición de galaxias con $M_\star > 10^9 M_\odot$ en el espacio de parámetros $\sigma_5 - M_\star$ (pequeños puntos grises). Para cada galaxia anillada (puntos naranja), se muestra su grupo de control de galaxias no anilladas (puntos negros, 5 vecinas más cercanas con el mismo valor $z$ ). Los histogramas muestran las distribuciones de cada variable en cada redshift para las galaxias anilladas y sus respectivas muestras de control. Los valores de $p$ , obtenidos mediante la prueba KS, representativos del ajuste de las distribuciones de ambas muestras para cada magnitud, se presentan en sus respectivos paneles (Fig. 2 de <a href="#">Fernandez et al. (2025)</a> ). . . . .	74
4.1.2. Panel Superior: Distribuciones del $\log(\text{sSFR})$ global para galaxias anilladas en comparación con la muestra de control. Paneles Inferiores: Distribuciones para galaxias con anillos internos versus otros tipos de anillos (panel izquierdo) y galaxias anilladas con barra versus sin barra (panel derecho) (Fig. 3 de <a href="#">Fernandez et al. (2025)</a> ). . . . .	76
4.1.3. Media del $\log(\text{sSFR})$ , con errores bootstrap, en función de la masa estelar. Panel Izquierdo: Valores medios correspondientes al conjunto total de galaxias anilladas, a las galaxias con anillo interno, a galaxias con otros tipos de anillos y a la muestra de control. Panel Derecho: Valores medios para galaxias anilladas con y sin barra (Fig. 4 de <a href="#">Fernandez et al. (2025)</a> ). . . . .	79

4.1.4. Media del $\log(\text{sSFR})$ en función de la $f_{\text{gas}}$ (paneles superiores) y valores medios de $f_{\text{gas}}$ en función de la masa estelar (paneles inferiores). Paneles Izquierdos: Valores medios para todas las galaxias anilladas, galaxias con anillo interno, galaxias con otros tipos de anillos y galaxias de la muestra de control. Paneles Derechos: Valores medios para galaxias anilladas con barra y sin barra. Se presentan los respectivos errores bootstrap (Fig. 5 de <a href="#">Fernandez et al. (2025)</a> ). . . . .	80
4.1.5. Panel Superior: Distribuciones de color, $M_g - M_r$ , de las galaxias anilladas en comparación con la muestra de control. Paneles Inferiores: Distribuciones de color de las galaxias con anillo interno en comparación a otros tipos de anillos (izquierda) y de las galaxias anilladas con y sin barra (derecha) (Fig. 6 de <a href="#">Fernandez et al. (2025)</a> ). . . . .	81
4.1.6. Diagramas de color-magnitud. Panel Superior: Gráficos de contorno de $M_g - M_r$ vs. $M_r$ de galaxias anilladas en comparación con la muestra de control. Panel Inferior: Gráficos de contorno de $M_U - M_r$ vs. $M_r$ para las mismas muestras. Los contornos abarcan el 25 %, 50 %, 75 % y 90 % de los datos de cada muestra (Fig. 7 de <a href="#">Fernandez et al. (2025)</a> ). . . . .	83
4.1.7. Panel Superior: Distribuciones de $12 + \log(\text{O}/\text{H})$ de las galaxias anilladas en comparación con la muestra de control. Paneles Inferiores: Distribuciones de metalicidad de las galaxias con anillo interno frente a otros tipos de anillos (izquierda) y de las galaxias anilladas con y sin barra (derecha) (Fig. 8 de <a href="#">Fernandez et al. (2025)</a> ). . . . .	85
4.1.8. Diagrama masa-metalicidad y distribuciones de masa y metalicidad para galaxias anilladas (naranja) y galaxias de muestra de control (negro). Los contornos encierran el 25 %, 50 %, 75 % y 90 % de los datos de cada muestra. Las líneas discontinuas son ajustes polinómicos de grado 2 calculados mediante una regresión de Theil-Sen. La línea azul continua muestra la relación obtenida por <a href="#">Tremonti et al. (2004)</a> y las líneas discontinuas encierran el 95 % de los datos del SDSS utilizados en dicho trabajo (Fig. 9 de <a href="#">Fernandez et al. (2025)</a> ). . . . .	86

- 4.2.1. Ejemplos de perfiles radiales de densidad de masa superficial de galaxias anilladas. Columna Izquierda: Proyección frontal de una galaxia con un anillo interior (fila superior), un anillo exterior (fila central) y anillos i+o (fila inferior), junto con la malla polar que define las secciones azimutales utilizadas para calcular los perfiles. Columna Central: Perfiles radiales correspondientes a cada sección, identificados con el color que denota sus secciones en la cuadrícula y desplazados a lo largo del eje  $y$ . Los perfiles globales de la galaxia anillada y su grupo de control se representan mediante líneas negras continuas y discontinuas. Columna Derecha: Derivadas de los perfiles (Fig. 10 de (Fernandez et al. 2025)). . . . . 88
- 4.2.2. Columna Izquierda: relación masa-tamaño para los diferentes tipos de galaxias anilladas (anillos internos, externos, i+o y parciales) con sus respectivas muestras de control. Las líneas sólidas muestran las tendencias medianas para cada muestra, construidas a partir de un bineado en masas estelares, mientras que las líneas discontinuas encierran el rango intercuartílico de cada distribución de control. Columnas Central y Derecha: media bootstrap y desviación estándar del apilado, en función de  $r_{50}$ , de las pendientes del perfil de masa radial y residuales obtenidos al aproximar el perfil de pendientes de una galaxia anillada por la mediana de aquellas de su grupo de control (Fig. 11 de (Fernandez et al. 2025)). . . . . 90
- 5.2.1. Ejemplo del *pipeline* de preprocesamiento aplicado a las imágenes. Paneles Superiores: Imagen original, la cual contiene múltiples objetos astronómicos (panel izquierdo). Aplicación de una serie de transformaciones: eliminación de estrellas, recorte, centrado, y ajustes sucesivos hasta obtener la versión final procesada (panel derecho). Paneles Inferiores: Variaciones adicionales utilizadas para aumentar la robustez de los modelos de clasificación: rotación, ajuste de color, traslación+escalado, y aumento de contraste. . . . . 100
- 5.3.1. Esquema general adaptado del modelo *Vision Transformer* (ViT). Panel Izquierdo: La imagen de entrada se divide en parches de tamaño fijo, los cuales son aplanados y transformados en vectores mediante una proyección lineal. A esta secuencia se le agregan codificaciones posicionales y un token de clasificación aprendible. La secuencia completa se introduce en un codificador Transformer estándar, cuya representación final del token de clasificación se utiliza para predecir la clase. Panel Derecho: El diagrama del codificador Transformer está basado en el trabajo de Vaswani et al. (2017), adaptado por Dosovitskiy et al. (2021). 104

5.3.3. Vista general de las arquitecturas de modelos exploradas en este estudio. Se agrupan en tres categorías: arquitecturas CNN (por ejemplo, EfficientNet-B3, ConvNeXt-Base), transformadores de visión (por ejemplo, ViT-B/16, Swin-T) y métodos en conjunto que combinan distintos <i>backbones</i> . Las flechas punteadas indican posibles direcciones para trabajos futuros. . . . .	107
5.3.4. Esquema del flujo de trabajo de entrenamiento de extremo a extremo. El proceso comienza con imágenes de galaxias en bruto, seguido del preprocesamiento y eliminación de estrellas. Luego se aplican técnicas de aumento antes de entrenar el modelo, el cual se mejora mediante un conjunto de instantáneas (snapshot ensemble). Finalmente, se evalúa el rendimiento del modelo utilizando métricas seleccionadas. . . . .	108
5.6.1. Matrices de confusión correspondientes a los experimentos EXP026-B1, EXP026-B2 (binarios) y EXP026-M1, EXP026-M2 (multiclase). . . . .	121
5.6.2. Representación del impacto de la inclusión de la clase 16 (anillos parciales) en las métricas de F1. En la clasificación binaria la degradación es mínima (-0.77 %), mientras que en la multiclase resulta considerable (-6.56 %). . . . .	123
5.6.3. Representación comparativa de desempeño entre formulación binaria y multiclase en los experimentos EXP026-B1, EXP026-B2, EXP026-M1 y EXP026-M2. Panel Izquierdo (a): $F1\text{-score}_{\text{macro}}$ . Panel Derecho (b): Exactitud. . . . .	123
5.6.4. F1-score para los diferentes tipos de anillo (interno, externo, i+o, parcial) en los experimentos multiclase. . . . .	124
5.6.5. Tiempo de entrenamiento y número de épocas requeridas para la convergencia en los experimentos EXP026. . . . .	125
5.6.6. Relación entre el F1-score y el tiempo de entrenamiento. La línea horizontal indica la meta de $F1 \geq 0.85$ . La línea vertical marca un tiempo de entrenamiento máximo (20 minutos). . . . .	126
5.6.7. Progreso de la investigación hacia las metas de desempeño. Se presentan las fases actuales y proyectadas en términos de F1-score para los distintos experimentos. . . . .	126
A2.1. Esquema conceptual de una red neuronal convolucional típica. La imagen de entrada atraviesa varias capas convolucionales y de agrupamiento antes de ser procesada por capas densas para generar una predicción. Fuente adaptada de <a href="#">Géron (2019)</a> . . . . .	143

# Capítulo 1

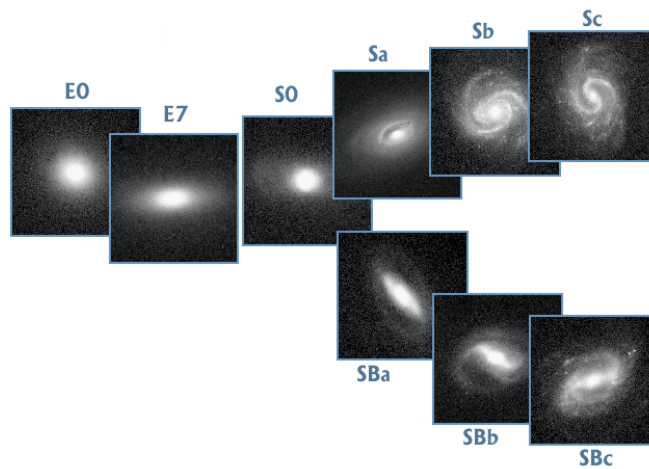
## Introducción

### 1.1. Morfología de galaxias

La morfología galáctica constituye una de las primeras herramientas desarrolladas por la astronomía extragaláctica para la caracterización sistemática de las galaxias. A partir de su apariencia en imágenes ópticas, es posible inferir propiedades estructurales clave tales como la distribución estelar, la presencia de componentes dinámicamente diferenciados (bulbos, discos, barras, etc.), y pistas fundamentales sobre su historia de formación y evolución. La clasificación morfológica ha adquirido un valor interpretativo al relacionarse con procesos físicos subyacentes como la formación estelar, la estabilidad dinámica del disco o las interacciones gravitacionales con otras galaxias.

Históricamente, la primera clasificación significativa fue propuesta por Edwin Hubble en 1926, quien introdujo la llamada **Secuencia de Hubble** (Hubble 1926), que organiza a las galaxias en un diagrama en forma de diapasón (ver Fig. 1.1.1). El sistema propuesto por Hubble clasifica las galaxias según su apariencia visual en imágenes fotográficas, comenzando por las galaxias elípticas (E), seguidas de las espirales normales (S) y espirales barradas (SB), y culminando en las galaxias irregulares (Irr). Las galaxias elípticas se designan con la letra E seguida de un número  $n$  que indica el grado de excentricidad, desde E0 (esféricas) hasta E7 (altamente elípticas). Por convenio,  $n$  es 10 veces la excentricidad de la galaxia, redondeado al número entero más cercano, por lo que si la excentricidad es  $e = 1 - (b/a)$ , entonces,  $n = 10e = 10(1 - b/a)$  con  $a$  y  $b$  los semiejes mayor y menor

de la elipse. La excentricidad aumenta a medida que nos desplazamos a la derecha en el diagrama. Por otro lado, las galaxias espirales se subdividen en tipos Sa, Sb y Sc, dependiendo del tamaño relativo del bulbo y la apertura de los brazos espirales, mientras que las espirales barradas se clasifican como SBa, SBb o SBc con el mismo criterio. Las lenticulares (S0), ubicadas entre las elípticas y las espirales en la secuencia, presentan un disco estelar pero sin brazos espirales definidos, y se interpretan a menudo como productos de procesos de desgasificación o interacciones dinámicas que truncaron su formación estelar.



**Figura 1.1.1:** Diagrama de diapasón de Hubble que representa la secuencia morfológica de galaxias. Imagen adaptada de [https://jila.colorado.edu/~ajsh/courses/astr1120\\_03/text/chapter10/10S3.htm](https://jila.colorado.edu/~ajsh/courses/astr1120_03/text/chapter10/10S3.htm).

Este esquema fue retomado y ampliado por Paul Hodge (Hodge 1966), quien introdujo la primera etapa en el desarrollo del concepto de **volumen de clasificación**. En su representación (ver Fig. 1.1.2), las familias ordinarias (SA) y barradas (SB) se sitúan en lados opuestos de una caja, y dentro de cada familia se distinguen las cepas *r* y *s*, dependiendo de si los brazos espirales parten de un anillo o directamente del núcleo. En este diagrama no se reconocen formalmente los casos intermedios entre las familias barradas y no barradas.

Posteriormente este esquema fue ampliado por Gérard de Vaucouleurs (de Vaucouleurs 1959) en una clasificación tridimensional que, además de conservar la secuencia principal de Hubble, incorpora un tratamiento más completo de las galaxias espirales al considerar tres ejes morfológicos: la presencia e intensidad de barras (SA, SAB, SB), la existencia de anillos (*r*, *rs*, *s*) y la forma de los brazos espirales. Asimismo, introduce el parámetro *T*, que asigna valores numéricos

de  $-5$  a  $+10$  a lo largo de la secuencia morfológica, desde elípticas y lenticulares (tipos tempranos) hasta espirales e irregulares (tipos tardíos). De este modo, el esquema de de Vaucouleurs permite representar de manera más completa la diversidad morfológica de las galaxias, incorporando características que el sistema de Hubble no considera (ver Fig. 1.1.2).

Con el advenimiento de grandes relevamientos como el Sloan Digital Sky Survey (SDSS; York et al. 2000) y el desarrollo de métodos automáticos, se han implementado sistemas de clasificación morfológica más cuantitativos que permiten procesar millones de objetos de forma eficiente, conservando la riqueza interpretativa de los sistemas originales.

La morfología galáctica no es solo una descripción estética, sino que refleja el estado dinámico, el contenido de gas, y la historia de ensamblaje de una galaxia. Por ejemplo, las espirales suelen presentar discos ricos en gas, alta formación estelar y estructuras como brazos y barras que regulan la redistribución angular del material. Las elípticas, en contraste, son sistemas dominados por poblaciones estelares antiguas, con cinemática aleatoria y escasa actividad estelar, presumiblemente formadas por fusiones. Las lenticulares se ubican en un punto intermedio, mientras que las irregulares representan estados evolutivos diversos, frecuentemente asociados a efectos ambientales o fusiones menores (Conselice 2014).

### 1.1.1. Galaxias espirales

Las galaxias espirales representan una fracción significativa de las galaxias en el universo local ( $\approx 70\%$ ), caracterizándose por la presencia de un disco estelar plano, brazos espirales prominentes y, en muchos casos, una barra central. Desde el punto de vista dinámico, las galaxias espirales son sistemas rotacionales dominados por discos estelares y gaseosos, lo que facilita el desarrollo de estructuras no axisimétricas como las barras y los patrones espirales. Estos patrones son comúnmente interpretados como ondas de densidad, una teoría propuesta por Lin y Shu (Lin and Shu 1964), en la cual los brazos espirales no son estructuras materiales permanentes sino regiones de sobredensidad que se propagan a través del disco.

Un componente fundamental de las galaxias espirales es su halo de materia

oscura, cuya existencia se infiere principalmente a partir de las curvas de rotación planas observadas en sus discos. La presencia de este halo extenso y no luminoso garantiza la estabilidad de la galaxia (Ostriker and Peebles 1973), regula la dinámica de sus componentes visibles y juega un papel central en los procesos de acreción y en la evolución a gran escala de estos sistemas (Rubin et al. 1980).

Estudios modernos con imágenes en alta resolución y cinemática detallada han confirmado que una fracción significativa de galaxias espirales presenta barras centrales, lo que sugiere que los procesos internos juegan un papel importante en la redistribución del momento angular y en la evolución morfológica de estos sistemas (Kormendy and Kennicutt 2004). Además, la interacción entre barras, discos y halos oscuros permite la formación de anillos, pseudobulbos y otras estructuras de resonancia (Buta 2013). En particular, los anillos estelares y gaseosos constituyen estructuras especialmente relevantes, y su presencia ofrece una ventana única para investigar los mecanismos de redistribución del momento angular y la coevolución de las estructuras galácticas en galaxias tipo disco (Buta and Combes 1996; Comerón et al. 2014).

En cuanto a la población estelar, los brazos espirales tienden a ser sitios de formación estelar activa, alimentada por el gas frío que se concentra en estas regiones debido a las perturbaciones gravitacionales. Las observaciones multi-longitud de onda muestran que los discos de las galaxias espirales contienen una mezcla compleja de estrellas jóvenes y viejas, lo que refleja una historia de formación estelar prolongada (Kennicutt Jr 1998).

En resumen, las galaxias espirales son sistemas complejos cuya morfología y evolución están fuertemente influenciadas tanto por factores internos como por su entorno, y su estudio es fundamental para comprender la evolución galáctica en el universo cercano.

#### 1.1.1.1. Formación y morfología de los anillos

La morfología galáctica actual reconoce una amplia variedad de estructuras internas, como anillos, barras, lentes, pseudo-bulbos. En particular, los trabajos de Buta y colaboradores (Buta 1995, 2013) han sistematizado la presencia de anillos, clasificándolos según su tamaño relativo al disco y su posible origen resonante. Adicionalmente, estudios como el de Comerón et al. (2014)

han identificado anillos “activos” y “pasivos” en función de su actividad de formación estelar, lo que permite evaluar su estado evolutivo y el papel de resonancias dinámicas o mecanismos tipo *manifold* en su origen.

Los anillos en galaxias de disco pueden tener diversos orígenes, incluyendo colisiones directas entre galaxias e interacciones externas. Un ejemplo representativo es la galaxia *Cartwheel* (Fig. 1.1.3), cuyo anillo se formó tras el paso de una galaxia compañera a través de su disco central. Esta colisión casi frontal generó ondas de densidad que se propagaron hacia el exterior, comprimiendo el gas interestelar y desencadenando episodios intensos de formación estelar. Por otra parte, un subconjunto significativo de galaxias anilladas ha sido objeto de estudio durante décadas debido a su morfología distintiva y su potencial para revelar información sobre la dinámica interna de las galaxias de disco. Estos anillos son el resultado de la **evolución secular** a lo largo de escalas de tiempo prolongadas (Kormendy and Kennicutt 2004).

La evolución secular es impulsada por la redistribución del momento angular dentro de la galaxia, típicamente mediada por estructuras no axisimétricas como barras, espirales o lentes. Estas estructuras inducen patrones de resonancia en el disco que afectan la dinámica del gas y las estrellas. En presencia de una barra galáctica, por ejemplo, es común la aparición de resonancias de Lindblad (ver Fig 1.1.4.), que pueden concentrar material en regiones del disco donde se forman anillos (Buta and Combes 1996).

Las barras generan potenciales gravitatorios que rotan con cierta velocidad de patrón. Este movimiento induce resonancias en distintas regiones del disco:

- **Resonancia de Lindblad Interna (ILR):** Puede dar lugar a anillos internos o circunnucleares.
- **Corrotación (CR):** Región donde las estrellas y el patrón de la barra rotan a la misma velocidad.
- **Resonancia de Lindblad Externa (OLR):** Asociada con anillos externos, muchas veces de gran tamaño.

Estas resonancias actúan como “trampas gravitacionales” donde el gas se acumula, se enfría y desencadena formación estelar, generando así estructuras anulares (Sellwood 1993).

Los anillos seculares se observan con frecuencia en galaxias barradas, como NGC 1433 y NGC 3351 (Fig. 1.1.5). Estos anillos generalmente presentan alineación con el disco galáctico, morfología bien definida y, en muchos casos, actividad de formación estelar concentrada. La estadística observacional del catálogo de galaxias anilladas compilado por Buta (1995) muestra una fuerte correlación entre la presencia de barras y estructuras anulares, lo que refuerza la hipótesis del origen secular.

Además de su interés morfológico, los anillos formados por evolución secular tienen implicancias en la evolución de las galaxias. El transporte de gas hacia el centro debido a resonancias puede alimentar la formación de pseudo-bulbos, modificar la distribución de masa del disco y alterar gradualmente la estructura galáctica (Kormendy and Kennicutt 2004). Por lo tanto, los anillos no son sólo estructuras transitorias, sino parte integral del proceso evolutivo de las galaxias.

El mecanismo de formación de anillos por evolución secular está respaldado tanto por simulaciones teóricas como por evidencia observacional, y representa una vía clave para entender la evolución lenta y continua de las galaxias espirales.

En cuanto a la clasificación los anillos de origen resonante en galaxias se clasifican según su tamaño, ubicación dentro del disco galáctico y su grado de cierre (Buta and Combes 1996; Nair and Abraham 2010; Buta 2017). A continuación se describen las categorías principales reconocidas en estudios morfológicos y dinámicos (ver Fig. 1.1.6 y 1.1.7):

1. **Anillo Interno:** Estructura circular o elíptica cerrada que rodea la barra galáctica (si estuviera presente) o el bulbo central. Está asociada con la **resonancia de Lindblad interna (ILR)** y es común en galaxias barradas.
2. **Anillo Externo:** Anillo cerrado de mayor tamaño, típicamente localizado en la periferia del disco, alrededor de  $\sim 2$  veces el tamaño de la barra. Se forma cerca de la **resonancia de Lindblad externa (OLR)**.
3. **Anillos dobles (I+O):** Algunas galaxias muestran tanto un anillo interno como uno externo, lo cual indica la presencia simultánea de múltiples resonancias. Estos sistemas son particularmente útiles para estudios de dinámica secular.
4. **Anillo Nuclear:** Estructura anular pequeña y cerrada ubicada en el núcleo

galáctico. Se forma cerca de resonancias internas múltiples o ILR doble, y su presencia suele estar relacionada con una barra que canaliza gas hacia el centro. Suele ser un sitio de intensa formación estelar.

5. **Anillos Parciales o Pseudo-anillos:** Estructuras en forma de anillo que no están completamente cerradas. Suelen originarse por la curvatura de los brazos espirales que se enrollan formando un anillo incompleto. Pueden confundirse con anillos completos en observaciones poco profundas.

Adicionalmente, una aproximación alternativa al estudio de la formación de anillos considera la dinámica del gas y de las estrellas en el potencial gravitatorio de la barra a través de *manifolds* o variedades invariantes (ver Fig. 1.1.8). Estos *manifolds*, asociados a los puntos de Lagrange  $L_1$  y  $L_2$  ubicados a lo largo del eje mayor de la barra, actúan como guías para órbitas caóticas que se organizan espacialmente en estructuras delgadas. Esta teoría, propuesta por [Romero-Gómez et al. \(2007\)](#) y desarrollada posteriormente por [Athanassoula et al. \(2010\)](#), permite explicar la formación de anillos y brazos espirales sin requerir estrictamente resonancias, y destaca la importancia de las propiedades del potencial de la barra en la morfología resultante.

Las simulaciones numéricas han sido fundamentales para mejorar nuestra comprensión de las galaxias anilladas a lo largo del tiempo. Estas simulaciones han permitido modelar los complejos procesos gravitacionales e hidrodinámicos dentro de las galaxias, proporcionando una visión integral de cómo la evolución secular moldea las estructuras galácticas a escalas cosmológicas. Uno de los trabajos pioneros en este campo fue realizado por [Schwarz \(1981\)](#), quien analizó la respuesta de un disco gaseoso a una barra estelar rotante usando una simulación con 2000 partículas de gas. Se descubrió que, en ausencia de una resonancia de Lindblad interna, el gas formaba un choque espiral que evolucionaba hacia un anillo alineado con la barra estelar. Además, se observó que el suministro continuo de gas podía mantener esta estructura indefinidamente. Los modelos obtenidos mostraban una semejanza notable con las características de muchas galaxias reales, tanto en la distribución del hidrógeno como en el campo de velocidades. Este trabajo fue posteriormente ampliado por autores como [Combes and Gerin \(1985\)](#); [Byrd et al. \(1994\)](#) y [Rautiainen et al. \(2004\)](#). [Buta and Zhang \(2008\)](#), quienes hallaron que la dinámica de las barras, incluyendo su fuerza y velocidad de patrón, influye

significativamente en la estabilidad y longevidad de los anillos, siendo las barras más fuertes responsables de anillos más prominentes y estables. Además, [Bagley et al. \(2008\)](#), en un estudio sobre galaxias espirales de tipo temprano, revelaron que los anillos externos y pseudo-anillos pueden formarse sin disipación gaseosa, únicamente mediante perturbaciones de una barra gravitacional en crecimiento. Por último, [Treuthardt et al. \(2008, 2009\)](#) estimaron las velocidades de patrón de las barras en galaxias anilladas como NGC 1433, NGC 2523 y NGC 4245, utilizando simulaciones dinámicas.

Si bien las simulaciones numéricas han sido fundamentales para comprender los procesos físicos involucrados en la formación de anillos, otro enfoque complementario proviene del análisis observacional. Diversos catálogos de galaxias anilladas han sido compilados con el fin de caracterizar los distintos tipos de estructuras anulares, analizar sus propiedades morfológicas y facilitar estudios estadísticos a gran escala. En particular, se han desarrollado varios catálogos que recopilan información morfológica detallada de estas galaxias en distintas longitudes de onda. Entre ellos, se destacan el *Southern Ringed Galaxy Catalogue* (CSRG, [Buta \(1995\)](#)) y el *Northern Ringed Galaxy Catalogue GZ2* (GZ2-CNRG, [Buta \(2017\)](#)). Estos catálogos ópticos están diseñados para comparar predicciones morfológicas de modelos de partículas de prueba ([Schwarz 1981, 1984a,b](#); [Byrd et al. 1994](#)). Además, catálogos como el de [Nair and Abraham \(2010\)](#) y el elaborado en nuestro estudio ([Fernandez et al. 2021](#)) se obtuvieron a partir de clasificaciones visuales detalladas de galaxias del SDSS. Otros trabajos, como los de [Buta et al. \(2015\)](#) y [Comerón et al. \(2014\)](#), fueron más allá de las observaciones ópticas para explorar las características de las galaxias anilladas en longitudes de onda del infrarrojo cercano.

### 1.1.2. Propiedades de las galaxias anilladas

En cuanto a cómo se ven afectadas las propiedades de las galaxias en presencia de anillos, varios autores han explorado algunas de las propiedades físicas de las galaxias anilladas. Por ejemplo, [Gusev and Park \(2003\)](#) estudiaron la estructura y la población estelar de la galaxia barrada con anillo NGC 2336, encontrando una tasa de formación estelar (SFR, por su sigla en inglés) típica de galaxias espirales de tipo tardío. También hallaron que los colores del disco externo son característicos de un sistema estelar viejo, con una pequeña contribución

fraccional de una población estelar joven. Asimismo, [Grouchy et al. \(2010\)](#) examinaron las SFRs de dos muestras, una compuesta por 18 galaxias anilladas barradas y otra por 26 galaxias anilladas no barradas, encontrando que ambas muestras presentan propiedades de formación estelar similares en los anillos internos, y que estas no dependen de la forma de los anillos ni de la intensidad de la barra.

[Sil'chenko et al. \(2018\)](#) estudiaron la formación estelar en la galaxia S0 UGC 4599, que presenta un anillo externo. Encontraron que la formación estelar en el anillo está asociada a gas de metalicidad subsolar, probablemente originado por acreción desde un filamento cosmológico, lo que contrasta con otros anillos externos de galaxias S0 previamente estudiados, que suelen presentar metalicidades cercanas a la solar. Además, otros autores ([Buta et al. 2003](#); [Grouchy et al. 2008](#)) exploraron la relación entre la dirección de enrollamiento de los brazos espirales, la presencia de barras y la formación de anillos internos. En particular, [Grouchy et al. \(2008\)](#) identificaron en la galaxia ESO 297-27 un inusual patrón espiral con brazos que se abren en sentidos opuestos (*counter-winding*), constituyendo apenas el segundo caso claro de este fenómeno. Este resultado sugiere que tales configuraciones son transitorias o requieren circunstancias extraordinarias para su formación, lo que refuerza la idea de que la morfología espiral y la generación de anillos internos están fuertemente ligadas a procesos dinámicos peculiares más que a interacciones externas frecuentes. [Martin and Roy \(1994\)](#) mostraron que las galaxias barradas presentan gradientes radiales de abundancia más planos, lo que indica una mezcla radial de gas enriquecido inducida por la barra, fenómeno que podría estar vinculado al desarrollo y enriquecimiento de los anillos. Más recientemente, [Gil et al. \(2023\)](#) analizaron la historia de formación estelar (SFH, por sus siglas en inglés) del anillo exterior de NGC 1291, basándose en espectros integrados y proponiendo que un evento de fusión rico en gas es responsable de la distribución observada de las edades estelares. Además, se observó una correlación entre las poblaciones estelares del anillo exterior y la región interior de la galaxia, lo que sugiere una formación de adentro hacia afuera vinculada al ensamblaje de las barras.

Análisis estadísticos recientes, basados en muestras extensas y bien controladas, han permitido obtener una visión más clara de las propiedades típicas de las galaxias con anillos resonantes. En particular, en nuestro anterior trabajo

(Fernandez et al. 2021), comparamos una muestra de galaxias anilladas con una muestra de control, compuesta por galaxias espirales que no presentan estructuras anilladas, seleccionadas con similares distribuciones de corrimiento al rojo ( $z$ , redshift), magnitud absoluta, índice de concentración y entorno de densidad local. Se encontró que las galaxias anilladas tienden a presentar menores tasas de formación estelar específica ( $sSFR = SFR/M_{\star}$ ) y poblaciones estelares más viejas (trazadas por valores más altos del parámetro  $D_n(4000)$ , Fig. 1.1.9), colores integrados más rojos y metalicidades más altas, respecto a su contraparte de galaxias espirales sin anillos de la muestra de control (Fig. 1.1.10). Estas tendencias son más pronunciadas en galaxias que albergan anillos internos y barras, lo que es consistente con la idea de que las barras canalizan el gas hacia ubicaciones resonantes, potenciando la formación estelar localmente dentro del anillo mientras agotan el gas en el disco circundante. Esta redistribución del gas acelera el envejecimiento de la población estelar y contribuye al enriquecimiento químico en la región del anillo. En conjunto, estos resultados respaldan la visión de que los anillos resonantes no son meros rasgos morfológicos, sino estructuras dinámicamente relevantes vinculadas a la evolución secular de las galaxias disco.

### 1.1.3. Galaxias anilladas y el ambiente local

El estudio de la relación entre las estructuras de las galaxias y su entorno ha sido una línea de investigación clave en la comprensión de la evolución galáctica. En particular, las galaxias anilladas constituyen una clase morfológica cuya frecuencia y propiedades parecen estar influenciadas por el ambiente en el que se desarrollan. Mientras que numerosos estudios han demostrado que ciertas características como la fracción de galaxias elípticas o la actividad de formación estelar se correlacionan con la densidad ambiental, la conexión entre los anillos galácticos y el entorno local ha recibido menor atención sistemática.

Las estructuras anilladas son comúnmente asociadas a resonancias dinámicas internas, frecuentemente inducidas por la presencia de barras. Sin embargo, en ambientes densos como cúmulos o grupos galácticos, los efectos gravitacionales externos pueden alterar significativamente la morfología de una galaxia, provocando desde distorsiones hasta la desaparición de componentes estructurales. Por esta razón, ha resultado de gran relevancia explorar en qué

medida el ambiente local modula la presencia, tipo y frecuencia de anillos, especialmente en regiones donde las interacciones entre galaxias son mas propicias.

Estudios recientes han comenzado a abordar esta cuestión a través del análisis estadístico de muestras de galaxias anilladas dentro de grupos galácticos identificados en grandes relevamientos, como el SDSS. Esta estrategia ha permitido investigar no sólo la frecuencia relativa de anillos en diferentes entornos, sino también comparar propiedades físicas de las galaxias, tales como colores, formación estelar y metalicidad, en función del ambiente. A través de este enfoque, se busca comprender si la formación de anillos responde principalmente a procesos internos como la dinámica de barras o si el entorno tiene un rol determinante en su origen y persistencia ([Fernandez et al. 2024](#)).

La evaluación del ambiente local, por lo tanto, no sólo aporta contexto a las propiedades observadas de las galaxias anilladas, sino que también contribuye a clarificar los mecanismos físicos detrás de la evolución morfológica galáctica. Es ampliamente conocido que las galaxias en ambientes densos, como grupos y cúmulos, presentan propiedades diferentes en comparación con sus contrapartes aisladas (e.g. [Dressler 1980](#), [Balogh et al. 2004](#), [Baldry et al. 2006](#), [Skibba and Sheth 2009](#)). Existe evidencia clara que sugiere que propiedades como la luminosidad, el color y la masa estelar varían sustancialmente con el entorno en el que residen ([Lietzen et al. 2012](#), [Allington-Smith et al. 1993](#)), mientras que otras propiedades, como la estructura, están correlacionadas con el entorno solo de forma indirecta (e.g. [Kauffmann et al. 2004](#), [Blanton et al. 2005](#)). Por ejemplo, una de las correlaciones fundamentales entre los tipos morfológicos de galaxias y el ambiente en el universo local se conoce como la relación morfología-densidad ([Oemler 1974](#), [Dressler 1980](#)). Esta relación muestra que las galaxias formadoras de estrellas, dominadas por discos, residen en regiones de menor densidad que las galaxias elípticas inactivas. A mayor escala, que representa el entorno de la red supercúmulo-vacío, la relación morfología-densidad fue descubierta por primera vez por [Einasto and Einasto \(1987\)](#). De forma similar, [Balogh et al. \(2004\)](#) analizaron la conexión entre color, luminosidad y entorno. Propusieron que la tasa de evolución de una galaxia formadora de estrellas está determinada principalmente por sus propiedades intrínsecas. También sugirieron que cualquier transformación inducida por el ambiente, de color azul

a rojo, ocurre en escalas cortas o a alto redshifts, preservando así la bimodalidad de la distribución de colores.

Respecto a la dependencia entre las galaxias anilladas y el ambiente denso, distintos trabajos muestran resultados contradictorios. En su estudio sobre la relación morfología-entorno a  $z \sim 0$  para galaxias brillantes, [Wilman and Erwin \(2012\)](#) no encontraron una dependencia clara entre la frecuencia de anillos internos y externos y el entorno local. Adicionalmente, [Buta et al. \(2019\)](#) examinaron las morfologías ópticas de galaxias aisladas en la muestra AMIGA (*Analysis of the Interstellar Medium of Isolated Galaxies*), sin encontrar correlación entre la detección de anillos internos y externos o barras galácticas y los parámetros asociados con su aislamiento. Este hallazgo sugiere dos escenarios posibles. En primer lugar, implica que el impacto del entorno sobre la formación de estas estructuras en las galaxias es mínimo. Alternativamente, plantea la posibilidad de que la medición de los parámetros de aislamiento presente un nivel significativo de variación, lo que dificulta diferenciar entre ambientes sutilmente distintos que pueden o no activar la formación de barras y anillos en galaxias aisladas. Los investigadores también consideraron otra explicación para la presencia de barras y anillos en galaxias aisladas: estas estructuras podrían haberse originado en interacciones pasadas, lo cual indicaría que han perdurado durante varios miles de millones de años. Sin embargo, otros autores como [Madore \(1980\)](#), quien analizó una muestra de galaxias espirales cercanas con compañeras, encontró que los anillos son más comunes en sistemas con menos compañeras que el promedio. Asimismo, [Elmegreen et al. \(1992\)](#) estudiaron la influencia del entorno sobre galaxias con anillos externos y pseudo-anillos, encontrando que la fracción de galaxias SB0 y SB0/a con anillos externos es menos frecuente en ambientes densos, mientras que los pseudo-anillos aumentan en abundancia con la densidad ambiental. La fracción de galaxias tardías sin barra con pseudo-anillos externos también disminuye con la densidad.

En este contexto, resulta necesario abordar el estudio de las propiedades de las galaxias anilladas y su relación con el ambiente. Esta problemática constituye una de las principales motivaciones del presente trabajo de tesis.

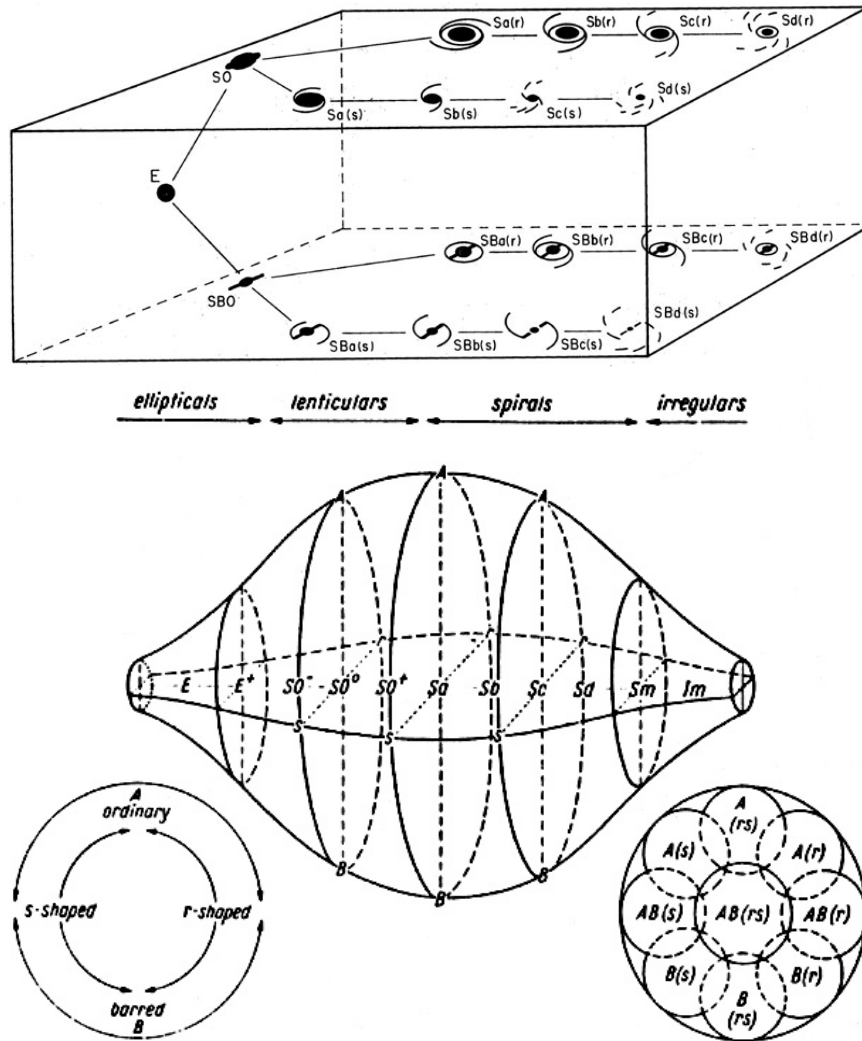
## 1.2. Motivación y organización

A pesar de los numerosos estudios dedicados a casos particulares o a muestras limitadas de las galaxias anilladas, persisten interrogantes fundamentales acerca de la estadística global de estas galaxias, su frecuencia relativa en distintos ambientes y su papel en la evolución de los sistemas de disco. La escasez de estudios sistemáticos en este campo se debe, en gran medida, a la dificultad de identificar y clasificar anillos de manera consistente en grandes volúmenes de datos, lo cual ha constituido históricamente un obstáculo para avanzar en su caracterización detallada. Esta tesis busca integrar tres ejes: observaciones, simulaciones y aprendizaje automático, con el fin de ofrecer una caracterización integral de las galaxias anilladas y de su rol en la evolución de los discos galácticos.

La organización de la tesis refleja este enfoque interdisciplinar. En el primer Capítulo se presentó el marco teórico y contextual, repasando los sistemas de clasificación morfológica tradicionales y modernos, con especial énfasis en la definición y tipología de los anillos. En el segundo Capítulo se introducirán los catálogos observacionales y simulados empleados, que constituyen la base para los análisis comparativos posteriores. El tercer Capítulo se centra en el estudio del entorno, abordando cómo varían las propiedades de las galaxias anilladas en función de su pertenencia a grupos pobres o ricos, estableciendo comparaciones con muestras de control que permiten aislar los efectos propios del ambiente de aquellos ligados a procesos internos. En el cuarto Capítulo se analizan en detalle las propiedades físicas de las galaxias anilladas en las simulaciones, explorando parámetros como la tasa de formación estelar, la fracción de gas y la metalicidad, y se establece una comparación rigurosa con galaxias observadas, lo que permite evaluar hasta qué punto los modelos numéricos reproducen las características de los sistemas reales. El quinto Capítulo está dedicado a la clasificación automática de galaxias con anillos mediante técnicas de aprendizaje profundo. Allí se describen las arquitecturas de redes neuronales empleadas, así como los resultados obtenidos tanto en escenarios binarios (anillo vs. no anillo) como en clasificaciones multiclase que distinguen entre los diferentes tipos morfológicos de anillos. Finalmente, en el sexto Capítulo se presenta una discusión general de los resultados más relevantes, integrando los hallazgos

observacionales, simulados y computacionales, y se señalan posibles líneas de trabajo futuro que podrían ampliar y consolidar el conocimiento acerca de las galaxias anilladas en el marco de la evolución cósmica.

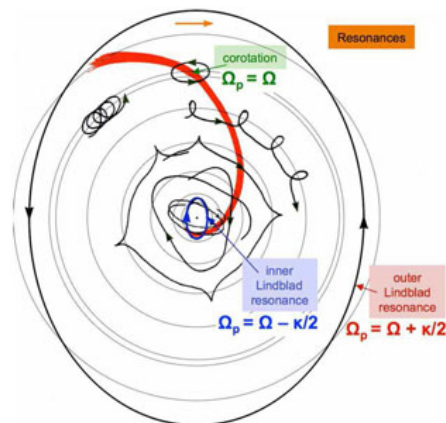
En conjunto, esta tesis propone no solo avanzar en la comprensión de las galaxias anilladas, sino también establecer un puente metodológico entre las observaciones, las simulaciones y las técnicas modernas de *machine learning* (ML). De este modo, se busca aportar una contribución significativa al estudio de la morfología galáctica en la era de los grandes volúmenes de datos, al tiempo que se sientan las bases para investigaciones posteriores que exploren con mayor profundidad la dinámica y evolución de estas estructuras resonantes.



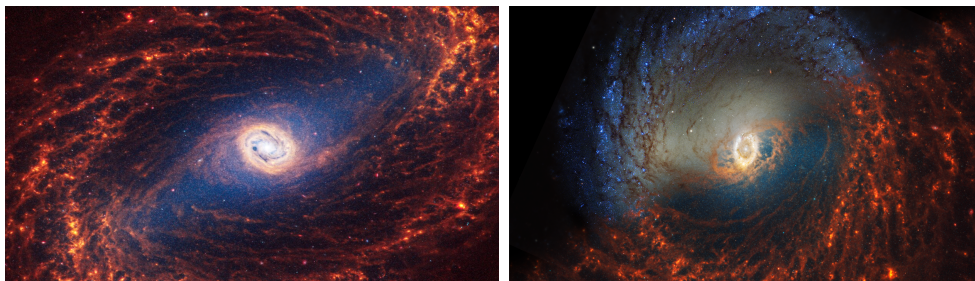
**Figura 1.1.2:** Panel Superior: Esquema del volumen de clasificación propuesto por Hodge (Hodge 1966). Panel inferior: Esquema de clasificación morfológica de galaxias desarrollado por De Vaucouleurs (de Vaucouleurs 1959). Imagen adaptada de [https://ned.ipac.caltech.edu/level5/Sandage/Sandage4\\_4.html](https://ned.ipac.caltech.edu/level5/Sandage/Sandage4_4.html).



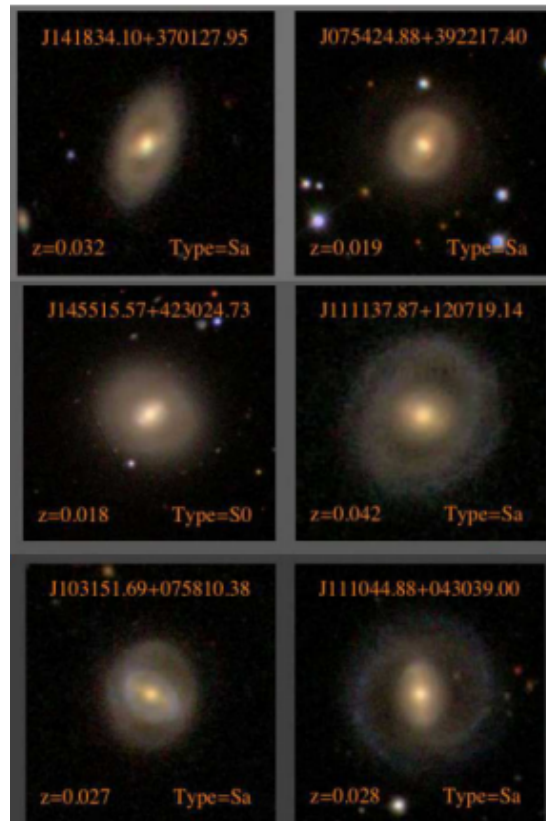
**Figura 1.1.3:** Galaxia *Cartwheel*. Créditos: ESA/Hubble & NASA.



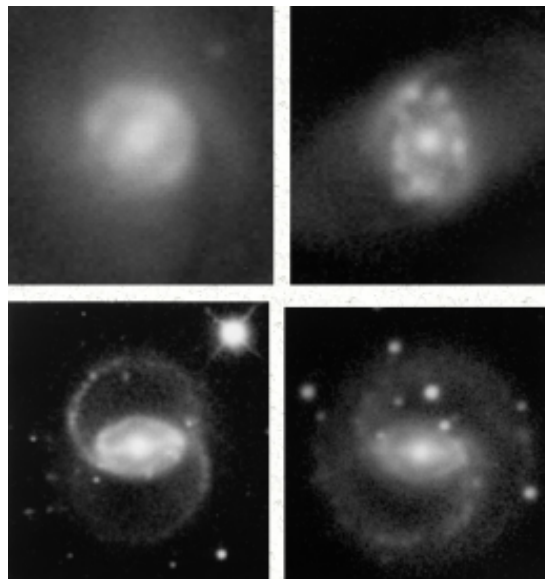
**Figura 1.1.4:** Representación de las resonancias internas, externas y de corotación de Lindblad. Imagen adaptada de <https://ned.ipac.caltech.edu/level5/Sept14/Kormendy/Kormendy4.html>.



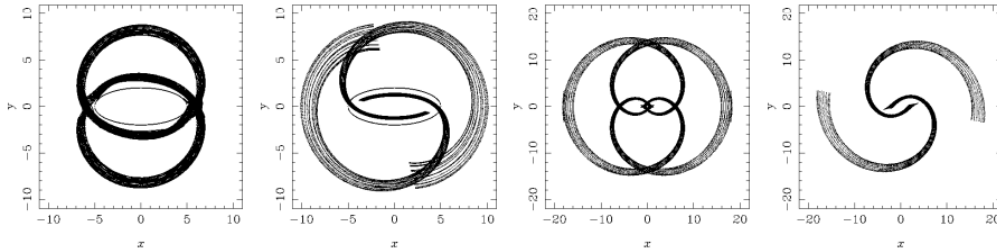
**Figura 1.1.5:** Imágenes de las galaxias espirales barradas NGC 1433 (panel izquierdo) y NGC 3351 (panel derecho), tomadas por el telescopio James Webb. Créditos: NASA, ESA, CSA, STScI, J. Lee (STScI), T. Williams (Oxford), PHANGS Team.



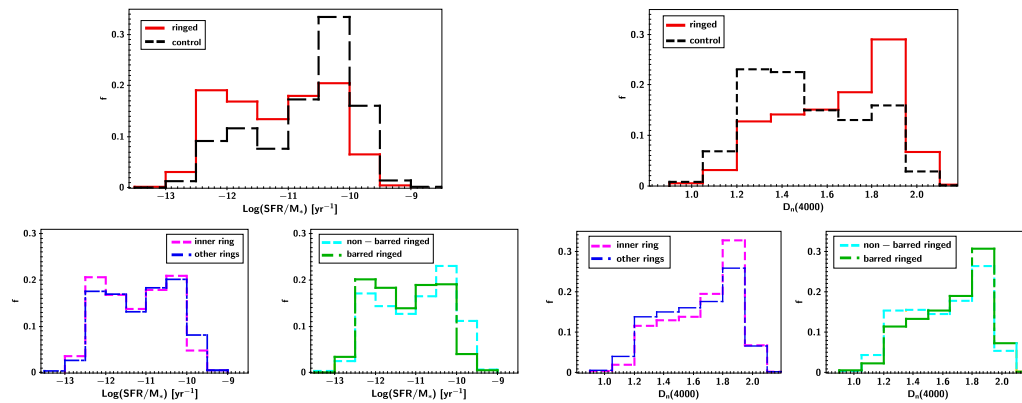
**Figura 1.1.6:** Ejemplos de galaxias anilladas del catálogo de [Nair and Abraham \(2010\)](#). Panel superior: Galaxias con anillo interno. Panel central: Galaxias con anillo externo. Panel inferior: Galaxias con anillo i+o.



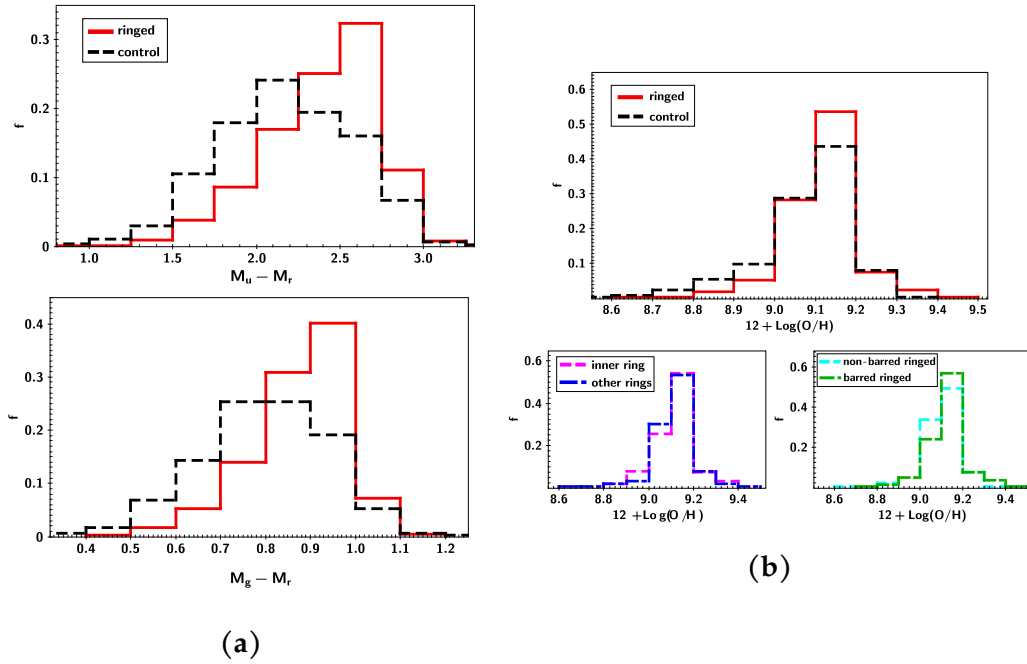
**Figura 1.1.7:** Ejemplos de galaxias anilladas clasificadas por [Buta and Combes \(1996\)](#). Panel superior: Galaxias con anillo nuclear. Panel inferior: Galaxias con anillo parcial.



**Figura 1.1.8:** Esquemas de estructuras de anillos y brazos espirales, mostrando los *manifolds* para distintos modelos (Romero-Gómez et al. 2007).



**Figura 1.1.9:** Distribuciones de la tasa de formación estelar y la edad de la población estelar. Paneles superiores:  $\text{Log}(\text{SFR}/M_*)$  y  $D_n(4000)$  para galaxias anilladas (líneas roja continua) y para la muestra de control (líneas negra discontinua). Paneles Inferiores: Distribuciones para distintos tipos de galaxias anilladas; izquierda: con anillo interior (líneas magenta discontinua) y con otros tipos de anillos (líneas azul de trazos); derecha: no barradas (líneas cian discontinua) y con barras (verde de trazos) (Fernandez et al. 2021).



**Figura 1.1.10:** a) Distribuciones normalizadas de  $M_u - M_r$  (panel superior) y  $M_g - M_r$  (panel inferior) para galaxias anilladas (líneas rojas continuas) y para la muestra de control (líneas negras de trazos). b) Panel Superior: Distribuciones de metalicidad,  $12 + \text{Log}(O/H)$ , para galaxias anilladas (línea roja continua) y para la muestra de control (línea negra discontinua). Panel Inferior Izquierdo: Galaxias con anillo interior (línea magenta discontinua) y con otros tipos de anillos (línea azul de trazos). Panel Inferior Derecho: Galaxias anilladas no barradas (línea cian discontinua) y con barras (línea verde de trazos) (Fernandez et al. 2021)

# Capítulo 2

## Datos

En este capítulo se presenta una descripción detallada de los catálogos de galaxias utilizados en el desarrollo de esta tesis. Por un lado, se introducen las características principales del conjunto de datos observacionales obtenidos a partir del SDSS en su decimocuarta liberación pública (SDSS-DR14), junto con los criterios de selección aplicados para construir la muestra de galaxias con anillos y el procedimiento de clasificación morfológica empleado. Por otro lado, se describe la muestra complementaria proveniente de la simulación cosmológica IllustrisTNG, en particular de su corrida de mayor resolución (TNG50), la cual permite realizar un análisis comparativo entre observaciones y simulaciones. De este modo, se establecen las bases necesarias para el estudio conjunto de las propiedades y la evolución de las galaxias con estructuras en anillo. Los resultados presentados en este capítulo fueron publicados previamente en una revista internacional con referato ([Fernandez et al. 2021, 2025](#))

### 2.1. Catálogo de galaxias anilladas en SDSS-DR14

#### 2.1.1. Relevamiento SDSS-DR14

El SDSS constituye uno de los relevamientos astronómicos más extensos y detallados disponibles, proporcionando información fotométrica y espectroscópica sobre una vasta cantidad de objetos celestes. Su objetivo principal es contribuir significativamente al entendimiento de la evolución y

estructura del universo a gran escala. Este proyecto ha logrado cartografiar aproximadamente un quinto del cielo, permitiendo avances importantes en el abordaje de interrogantes fundamentales sobre el origen y desarrollo del cosmos.

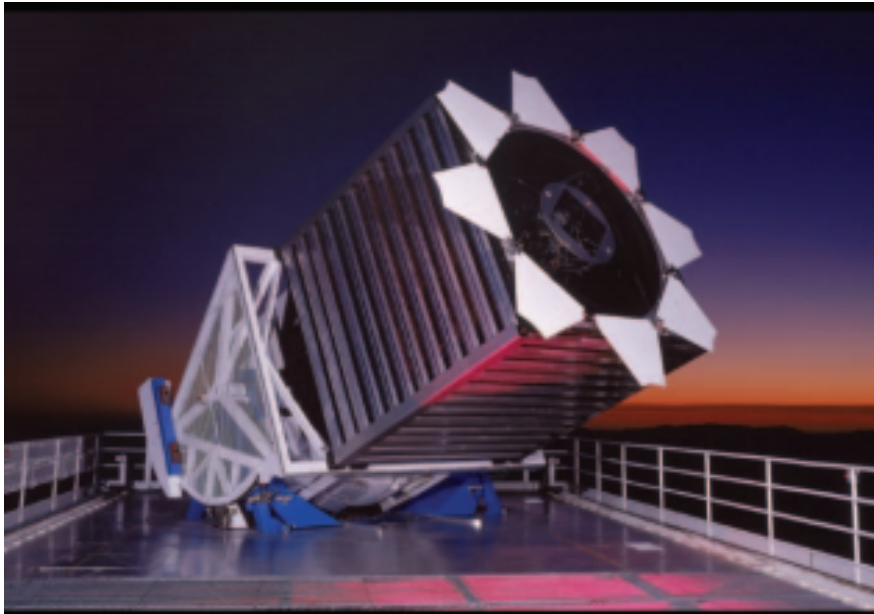
El SDSS es resultado de una colaboración internacional entre múltiples instituciones, tales como la Universidad de Chicago, Fermilab, el Instituto de Estudios Avanzados, el consorcio japonés, la Universidad Johns Hopkins, el Instituto Max Planck de Astronomía, la Universidad de Princeton, el Observatorio Naval de los Estados Unidos y la Universidad de Washington. Las observaciones se realizan desde el Observatorio Apache Point, operado por el Consorcio de Investigación Astrofísica, y financiado por la Fundación Alfred P. Sloan junto con otras agencias como la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), la *National Science Foundation* (NSF), el Departamento de Energía de los Estados Unidos y Monbusho (ver [York et al. 2000](#)).

Las imágenes y espectros fueron obtenidos mediante un telescopio reflector Ritchey-Chrétien de 2.5 metros de apertura (véase Fig. 2.1.1), ubicado en Nuevo México, el cual ha estado operativo desde el año 2000. Este instrumento cuenta con una cámara compuesta por 30 sensores CCD, cada uno con una resolución de 2048 x 2048 píxeles. A su vez, dispone de un sistema espectroscópico capaz de registrar simultáneamente hasta 640 espectros con una cobertura espectral comprendida entre 3800 y 9200 Å.

Cada noche de observación, el sistema generó aproximadamente 200 GB de información, la cual fue procesada y publicada en línea. La base de datos contiene millones de galaxias observadas hasta un corrimiento al rojo  $z = 1$ , cuásares hasta  $z = 6$ , e imágenes tomadas en cinco bandas fotométricas ( $u$ ,  $g$ ,  $r$ ,  $i$ , y  $z$ ), con longitudes de onda centrales de 3543 Å, 4770 Å, 6231 Å, 7625 Å, y 9134 Å, respectivamente. A través del portal SkyServer<sup>1</sup>, es posible acceder tanto a las imágenes como a los espectros utilizando herramientas de consulta muy intuitivas. Por ejemplo, es posible obtener una imagen en color de cualquier zona del cielo observada por el SDSS simplemente introduciendo sus coordenadas.

A lo largo de su desarrollo, el SDSS ha sido dividido en diversas fases: SDSS-I (2000–2005); SDSS-II (2005–2008), que incorporó el *Sloan Supernova Survey*;

<sup>1</sup><https://skyserver.sdss.org/dr14/en/home.aspx>



**Figura 2.1.1:** Telescopio reflector Ritchey-Chrétien de 2.5m, ubicado en Apache Point, Nuevo México, Estados Unidos.

SDSS-III (2008–2014), que incluyó el experimento *Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment* (APOGEE), orientado a estudiar la evolución de la Vía Láctea mediante espectroscopía infrarroja de estrellas, y el *Baryon Oscillation Spectroscopic Survey* (BOSS), diseñado para medir con precisión la escala de oscilaciones acústicas de bariones; y finalmente SDSS-IV (2014–2020), que contempló el proyecto *Mapping Nearby Galaxies at Apache Point Observatory* (MaNGA, Bundy et al. (2015)), dedicado al mapeo de galaxias cercanas utilizando espectroscopía de campo integral.

En este trabajo se hace uso de la versión número 14 del conjunto de datos, conocida como *Data Release 14* (DR14; Abolfathi et al. 2018), correspondiente a la segunda entrega de la cuarta fase (SDSS-IV). El DR14 abarca cinco grandes bloques de datos: imágenes ópticas, espectros, espectros infrarrojos del programa APOGEE, datos de espectroscopía mediante *Integral Field Unit* (IFU) del proyecto de MaNGA, y catálogos derivados con parámetros como magnitudes y desplazamientos al rojo. Cabe destacar que cada nuevo lanzamiento del SDSS es acumulativo, por lo que DR14 incluye los datos de todas las versiones previas.

### 2.1.2. Selección de la muestra

Para nuestro conjunto de datos, a partir de las magnitudes aparentes Petrosian en el sistema AB, se estimaron magnitudes absolutas en el sistema en reposo a  $z = 0.1$  aplicando correcciones  $k$  calculadas utilizando el software `k-correct_v4.2` de [Blanton and Roweis \(2007\)](#) y adoptando un modelo cosmológico con constantes  $\Omega_m = 0,3$ ,  $\Omega_\Lambda = 0,7$ , and  $H_0 = 70 \text{Mpc}^{-1}$  para el cálculo de la distancia de luminosidad. En nuestro análisis usamos las bandas u, g y r del sistema *ugriz*. Las magnitudes han sido corregidas por extinción galáctica; sin embargo, no se ha aplicado una corrección por extinción interna de las galaxias, por lo que los colores derivados no están completamente corregidos por efectos de polvo. Además, obtuvimos varias propiedades físicas disponibles en la base de datos espectroscópica del SDSS mediante consultas en *Structured Query Language* (SQL) en CasJobs<sup>2</sup>. Entre ellas: metalicidades del gas, masas estelares, sSFR, índice de concentración y magnitudes ([Balogh et al. 1999](#); [Brinchmann et al. 2004](#); [Kauffmann et al. 2003](#); [Tremonti et al. 2004](#)).

Con el objetivo de obtener galaxias con anillos, primero consideramos restricciones en corrimiento al rojo,  $0.01 < z < 0.1$ , y magnitud  $g < 16.0$  para excluir todas aquellas galaxias cuyos detalles morfológicos son difíciles de detectar mediante inspección visual.

Además, como fue señalado por [Buta \(2017\)](#), los anillos se vuelven más difíciles de detectar visualmente a medida que aumenta la inclinación del disco. En particular, un anillo interno podría ser difícil de identificar a altas inclinaciones debido al acortamiento por perspectiva y la extinción interna. Por lo tanto, aplicamos una restricción adicional sobre la elipticidad de los objetos, seleccionando galaxias con  $b/a > 0.5$ , donde  $b$  y  $a$  representan el semieje menor y mayor de la galaxia, respectivamente.

Finalmente, para discriminar entre tipos de galaxias elípticas y de disco, se impuso una restricción sobre el índice de concentración  $C^3$  ([Abraham et al. 1994](#)), un parámetro de clasificación morfológica ampliamente validado ([Strateva et al. 2001](#)), también utilizado como buen trazador de la masa estelar ( $M_*$ ) y un índice indirecto de la tasa de formación estelar ([Deng 2013](#)). [Yamauchi et al. \(2005\)](#)

<sup>2</sup><http://skyserver.sdss.org/casjobs/>

<sup>3</sup> $C = r_{90}/r_{50}$  es la razón entre los radios Petrosian que contienen el 90% y el 50% de la luz en la banda r.

realizaron una clasificación morfológica de galaxias utilizando el parámetro  $C$ , encontrando muy buena concordancia con la clasificación visual. Luego, con el fin de obtener galaxias de tipo tardío seleccionamos objetos con un valor de índice de concentración  $C < 2.8$ .

De este modo, se seleccionaron galaxias espirales brillantes orientadas de frente y con  $0.01 < z < 0.1$ , favoreciendo así el posterior proceso de clasificación visual. Con estas restricciones, la muestra comprende 8529 galaxias y, por lo tanto, permite una inspección visual plausible de un gran conjunto de objetos.

### 2.1.3. Clasificación

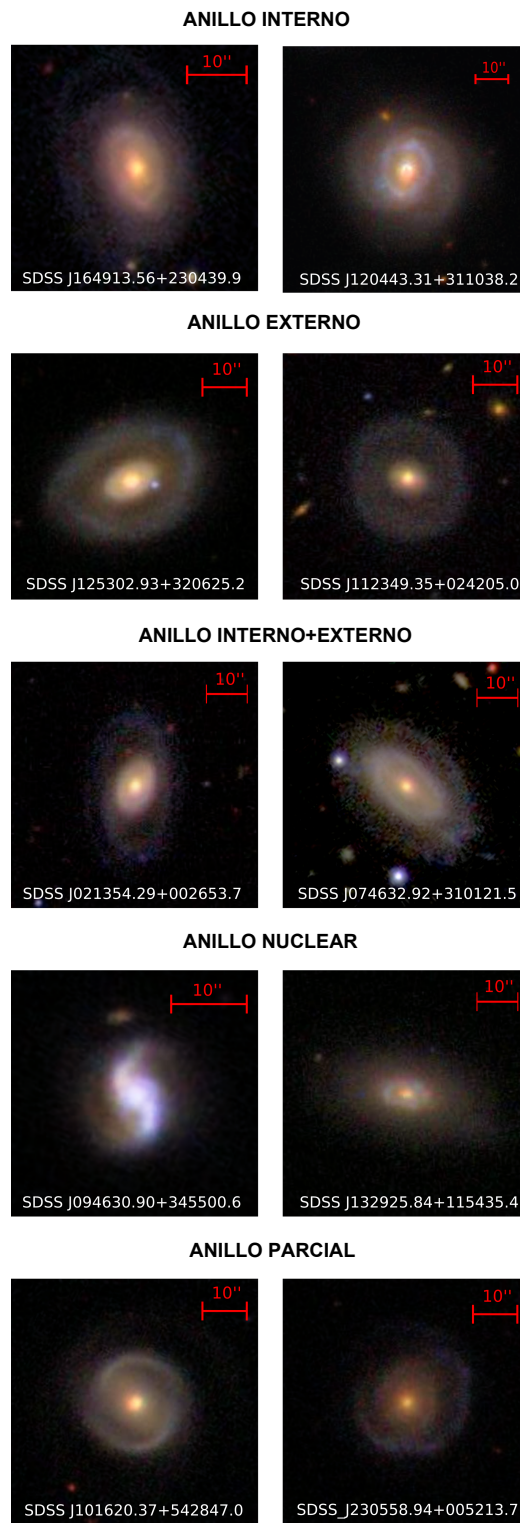
En esta sección describimos el proceso de selección de galaxias con anillos mediante inspección visual. Para esta tarea, utilizamos las imágenes en color combinadas  $g + r + i$ , obtenidas de la lista de imágenes en línea del SDSS-DR14<sup>4</sup>. Luego, mediante una exhaustiva inspección visual, clasificamos las galaxias en función de la presencia de estructuras en forma de anillo. Los anillos se dividieron en cinco tipos: internos, externos, internos + externos, nucleares y parciales, como se muestra en la Fig. 2.1.2.

Es importante resaltar que la resolución espacial tiene un impacto significativo en la detección de anillos nucleares, los cuales suelen ubicarse dentro de un radio de  $\approx 2.2$  kpc respecto al centro galáctico. Este valor debe interpretarse con cautela, ya que la escala física de esta distancia puede variar significativamente dependiendo del tamaño total de la galaxia. En sistemas más compactos, esta distancia puede representar una fracción considerable del disco, mientras que en galaxias más extensas corresponde a una región relativamente más interna. En los casos donde los anillos nucleares excedían este valor, seguimos un enfoque similar al de Comerón et al. (2010), quien aceptaba anillos nucleares de mayor radio únicamente si estaban embebidos en una barra o coexistían con otras estructuras anilladas (interiores y exteriores) en galaxias no barradas. Este criterio busca reducir sesgos morfológicos inducidos por diferencias en resolución o condiciones internas de las galaxias.

En consecuencia, si la galaxia presenta una estructura de anillo, también se consideraron otras características, tales como: tipos morfológicos, barras, lentes

---

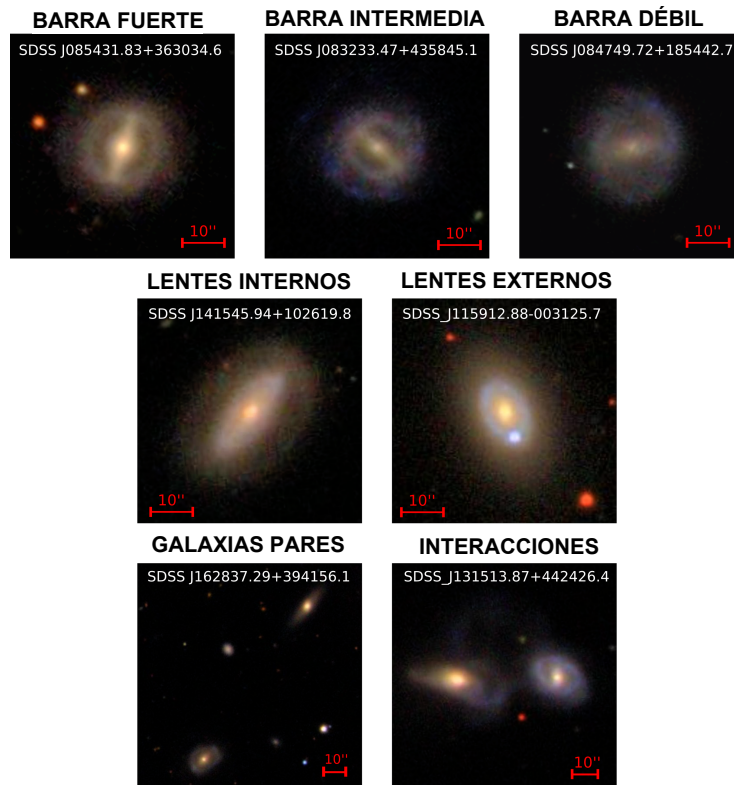
<sup>4</sup><https://skyserver.sdss.org/dr14/en/tools/chart/listinfo.aspx>



**Figura 2.1.2:** Ejemplos de galaxias espirales con diferentes tipos de anillos (Fig. 1 de [Fernandez et al. \(2021\)](#)).

y compañeras en pares con y sin evidencia de interacción.

En cuanto a la clasificación morfológica, adoptamos el sistema que representa la etapa de Hubble de las galaxias, desde elípticas hasta irregulares:  $S0^-/S0/S0^+$ ,  $S0/a$ ,  $Sa$ ,  $Sab$ ,  $Sb$ ,  $Sbc$ ,  $Sc$ ,  $Scd$ ,  $Sd$ ,  $Sdm$ ,  $Sm$  e  $Im$  (e.g., [Nair and Abraham 2010](#); [Buta et al. 2015](#)). En este sistema podemos distinguir entre  $S0^-$ ,  $S0$  y  $S0^+$ , donde el superíndice “-” denota “temprano” y el “+” denota “tardío”. Las galaxias con morfología dudosa fueron marcadas con un signo de interrogación. Una descripción más detallada de los diferentes tipos morfológicos está disponible en [Buta et al. \(2015\)](#).



**Figura 2.1.3:** Ejemplos de galaxias anilladas con diferentes tipos de barras (paneles superiores), con lentes (paneles centrales) y en sistemas pares (paneles inferiores) (Fig. 2 de [Fernandez et al. \(2021\)](#)).

Además de la clasificación de anillos, también reconocimos la presencia de barras fuertes, intermedias y débiles (ver Fig. 2.1.3, paneles superiores), basándonos en los criterios utilizados por [Buta et al. \(2015\)](#) para galaxias  $SA$ ,  $SAB$ ,  $SAB$  y  $SB$ .

Asimismo, se consideraron dos tipos de lentes, definidas como estructuras de brillo superficial casi constante y bordes bien delimitados, asociadas a la

**Tabla 2.1.1:** Números y porcentajes de galaxias con diferentes tipos de anillos. El error corresponde a la semidispersión entre dos clasificaciones visuales independientes.

Tipo de anillo	Número	Porcentaje
Anillo interno	857	46.00 % $\pm$ 3.90 %
Anillo externo	186	10.00 % $\pm$ 0.70 %
Anillos internos + externos	372	20.00 % $\pm$ 2.10 %
Anillo nuclear	111	6.00 % $\pm$ 0.80 %
Anillo parcial	342	18.00 % $\pm$ 1.90 %
<b>Total</b>	<b>1868</b>	<b>100 %</b>

morfología del disco: lentes internas y externas (ver Fig. 2.1.3, paneles centrales). Cabe señalar que no se tomaron en cuenta diferentes combinaciones de lentes en el presente trabajo.

Para completar, identificamos galaxias con anillos en sistemas pares. [Lambas et al. \(2003\)](#) y [Alonso et al. \(2006\)](#) encontraron que una distancia proyectada  $r_p < 100h^{-1}kpc$  y una diferencia de velocidad radial  $\Delta V < 350km/s$  son umbrales convenientes para detectar actividad de formación estelar inducida por interacciones. En particular, para una muestra de pares de galaxias espirales, [Mesa et al. \(2014\)](#) adoptó los valores  $r_p < 50h^{-1}kpc$  y  $\Delta V < 500km/s$ . En esta línea, consideramos galaxias con anillos que tienen una compañera cercana dentro de  $r_p < 50h^{-1}kpc$  y  $\Delta V < 350km/s$ .

Luego, los sistemas se clasificaron en dos categorías: (i) pares: galaxias con anillos que habitan en sistemas binarios que no muestran distorsiones morfológicas, y (ii) interacciones: galaxias con anillos en pares cercanos, donde los campos gravitacionales generan perturbaciones morfológicas. Los paneles inferiores de la Fig. 2.1.3 muestran ejemplos de estas categorías.

En síntesis, la clasificación adoptada para construir el catálogo de galaxias con anillos se resume de la siguiente manera: se obtuvieron 1868 galaxias anilladas con respecto al total de galaxias espirales, lo que representa un porcentaje del 22 % de la muestra. Las restantes 6661 galaxias corresponden a espirales brillantes sin anillos.

También encontramos que, del total de galaxias con estructuras en anillo, el 46 % presentan anillos internos, el 10 % anillos externos, el 20 % ambos anillos internos y externos, el 6 % anillos nucleares, y el 18 % anillos parciales.

La inspección visual fue realizada por la autora de la tesis para mantener un

criterio unificado. Posteriormente, la fiabilidad de la clasificación se evaluó comparándola con la realizada de manera independiente por un colega del grupo de trabajo sobre una submuestra de galaxias anilladas. Dado que la clasificación es inherentemente subjetiva y depende del criterio del observador, se adoptó como estimación de incertidumbre la semidispersión<sup>5</sup>, lo que proporciona una medida directa de la variabilidad introducida por el proceso de inspección humana (ver Tabla 2.1.1).

Teniendo en cuenta los tipos morfológicos, encontramos que el 55.40 % son galaxias Sa, el 14.76 % Sab, el 10.87 % S0/a, el 10.23 % Sb, el 4.01 % S0<sup>-</sup>/S0/S0<sup>+</sup>, el 2.41 % Sc, el 0.64 % Sbc, el 1.45 % dudosas y el 0.21 % Sd.

Además, encontramos que el 36 % de las galaxias con anillos no presentan barras, el 26 % poseen barras intermedias, el 20 % barras débiles y el 18 % barras fuertes, respectivamente.

Los porcentajes de galaxias con anillos que presentan lentes son: 13 % con lentes internas y 11 % con lentes externas. Por último, respecto a pares e interacciones, se encontró que el 10 % están en sistemas de pares de las cuales solo el 2 % presentan interacciones.

Las tablas 2.1.2 y 2.1.3 muestran los números y porcentajes relacionados con las diferentes características consideradas. Como se puede observar, la mayoría de las imágenes en color del SDSS pertenecen al tipo morfológico Sa, siendo las que tienen un anillo interno o una combinación interna + externa las predominantes. La mayoría de las galaxias con barras, lentes y compañeras muestran ser objetos con anillo interno, una barra intermedia y una lente externa. En general, del total de las galaxias anilladas, 8 % están en pares sin interacción. Comerón et al. (2014) encontraron que la frecuencia relativa de anillos externos y pseudo-anillos disminuye significativamente para tipos posteriores a Sb en el catálogo ARRAKIS (*Atlas of Resonance Rings*), mientras que los anillos internos alcanzan su máximo en tipos entre S0<sup>+</sup> y Sb. Según Buta (2017), esta caída hacia tipos más tardías puede deberse a que las galaxias de tipo tardío están subrepresentadas en el catálogo. Este efecto se ve reforzado por el hecho de que los anillos internos también son los más grandes en tamaño en galaxias de tipo temprano. Además, Buta (2017) encontró que las galaxias con barras débiles son predominantes en

<sup>5</sup>La semidispersión entre dos clasificaciones visuales independientes se define como  $\sigma = |f^{(1)} - f^{(2)}|/2$ , donde  $f^{(k)}$  representa la fracción medida por el clasificador  $k$ .

el catálogo de galaxias con anillos obtenido de la base de datos Galaxy Zoo 2 (Lintott et al. 2008).

En concordancia con nuestra clasificación, Nair and Abraham (2010) encontraron que las galaxias con un anillo interno ocurren en el 44 % de la muestra total considerada, mientras que el 13 % de las galaxias tienen un anillo externo, el 8 % poseen ambos anillos interno y externo, y el 11 % tienen un anillo nuclear.

Algunos de nuestros resultados coinciden con investigaciones previas, y las principales diferencias pueden deberse a los distintos criterios de clasificación utilizados en cada caso.

**Tabla 2.1.2:** Números y porcentajes (con intervalos de confianza al 95 %) de galaxias con diferentes tipos de anillos según la morfología, normalizados al total de galaxias anilladas ( $N_{\text{tot}} = 1868$ ).

Morfología	Anillo interno	Anillo externo	Anillos I+O	Anillo nuclear	Anillo parcial
S0 <sup>-</sup> /S0/S0 <sup>+</sup>	34 (1.82 ± 0.61) %	14 (0.75 ± 0.39) %	4 (0.21 ± 0.21) %	21 (1.12 ± 0.48) %	2 (0.11 ± 0.15) %
S0/a	105 (5.62 ± 1.04) %	27 (1.45 ± 0.54) %	5 (0.27 ± 0.23) %	51 (2.73 ± 0.74) %	15 (0.80 ± 0.40) %
Sa	395 (21.15 ± 1.85) %	133 (7.12 ± 1.17) %	355 (19.00 ± 1.79) %	21 (1.12 ± 0.48) %	131 (7.01 ± 1.16) %
Sab	147 (7.87 ± 1.22) %	7 (0.37 ± 0.28) %	6 (0.32 ± 0.25) %	4 (0.21 ± 0.21) %	112 (5.99 ± 1.09) %
Sb	126 (6.75 ± 1.14) %	2 (0.11 ± 0.15) %	2 (0.11 ± 0.15) %	7 (0.37 ± 0.28) %	54 (2.89 ± 0.77) %
Sbc	6 (0.32 ± 0.25) %	0 (0.00 ± 0.00) %	0 (0.00 ± 0.00) %	0 (0.00 ± 0.00) %	6 (0.32 ± 0.25) %
Sc	32 (1.71 ± 0.58) %	0 (0.00 ± 0.00) %	0 (0.00 ± 0.00) %	2 (0.11 ± 0.15) %	11 (0.59 ± 0.35) %
Sd	1 (0.05 ± 0.09) %	1 (0.05 ± 0.09) %	0 (0.00 ± 0.00) %	0 (0.00 ± 0.00) %	2 (0.11 ± 0.15) %
?	11 (0.59 ± 0.35) %	2 (0.11 ± 0.15) %	0 (0.00 ± 0.00) %	5 (0.27 ± 0.23) %	9 (0.48 ± 0.30) %

**Tabla 2.1.3:** Números y porcentajes (con intervalos de confianza al 95 %) de galaxias con diferentes tipos de anillos, considerando la presencia de barras, lentes y sistemas en pares.

Anillos	Interno	Externo	I+O	Nuclear	Parcial	Total
Barras						
Fuerte	220 (12.15±1.52) %	11 (0.61±0.36) %	59 (3.26±0.83) %	1 (0.06±0.09) %	40 (2.21±0.69) %	331 (18.28±1.77) %
Intermedia	266 (14.69±1.63) %	7 (0.39±0.28) %	111 (6.13±1.11) %	0 (0.00) %	102 (5.63±1.07) %	486 (26.83±2.02) %
Débil	190 (10.49±1.41) %	12 (0.66±0.37) %	102 (5.63±1.07) %	2 (0.11±0.15) %	76 (4.20±0.94) %	382 (21.10±1.87) %
Lente						
Interna	71 (3.92±0.89) %	65 (3.59±0.86) %	88 (4.86±0.99) %	5 (0.28±0.24) %	21 (1.16±0.50) %	250 (13.80±1.60) %
Externa	132 (7.29±1.19) %	20 (1.10±0.49) %	7 (0.39±0.28) %	47 (2.60±0.74) %	2 (0.11±0.15) %	208 (11.49±1.47) %
Sistemas pares						
Con interac.	21 (1.16±0.50) %	3 (0.17±0.19) %	2 (0.11±0.15) %	0 (0.00) %	7 (0.39±0.28) %	33 (1.82±0.62) %
Sin interac.	50 (2.76±0.76) %	10 (0.55±0.34) %	20 (1.10±0.49) %	11 (0.61±0.36) %	30 (1.66±0.58) %	121 (6.68±1.15) %

## 2.2. Catálogo de galaxias anilladas en TNG50

### 2.2.1. Simulaciones Illustris TNG50

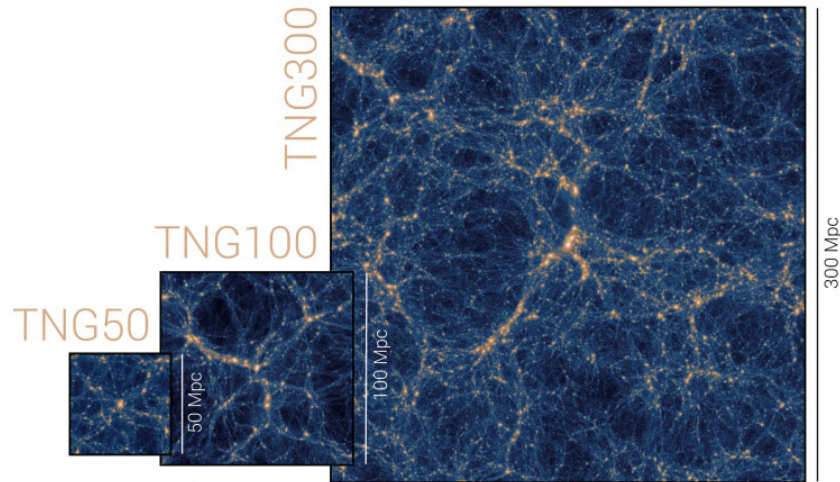
Las simulaciones IllustrisTNG<sup>6</sup> representan una serie de modelos gravomagnetohidrodinámicos del universo (Weinberger et al. 2017; Pillepich et al. 2018), ejecutados utilizando el código AREPO (Springel 2010) para simular la evolución conjunta de la materia oscura, la materia bariónica y los agujeros negros supermasivos desde altos corrimientos al rojo ( $z = 127$ ) hasta la época presente ( $z = 0$ ). Esta serie consiste en tres ejecuciones principales, TNG50, TNG100 y TNG300, que representan tres tamaños físicos diferentes de cajas cosmológicas (volúmenes cúbicos de 50 Mpc, 100 Mpc y 300 Mpc de lado, respectivamente. Ver Fig. 2.2.1), cada una diseñada para investigar distintos fenómenos astrofísicos con distintas resoluciones y escalas de volumen. Se corrieron algoritmos FoF<sup>7</sup> y SubFind<sup>8</sup> para crear catálogos de halos y subhalos (galaxias) con sus respectivos árboles de fusiones. Además, para cada volumen se corrieron versiones de menor resolución en masa y versiones sólo con materia oscura. Todo esto está disponible para los 100 *snapshots* de salida de cada simulación (Nelson et al. 2019b).

Para los propósitos de esta tesis hacemos uso de la simulación más reciente del proyecto, TNG50 (Nelson et al. 2019a; Pillepich et al. 2019), que es la simulación de mayor resolución. Un ejemplo de la resolución de las imágenes puede verse en la Fig. 2.2.2. TNG50, en particular, ha sido diseñada para cerrar la brecha entre las simulaciones cosmológicas de gran volumen y las simulaciones de alta resolución de galaxias individuales. El contenido gaseoso inicial está muestreado por  $2160^3$  celdas con una masa bariónica de  $8 \times 10^4 M_{\odot}$ . Parte de este gas conforma el medio interestelar (ISM) de aproximadamente 20000 galaxias resueltas con masa estelar  $M_{\star} \gtrsim 10^7 M_{\odot}$ , donde la resolución espacial promedio del gas para la formación estelar es aproximadamente de 100 a 140 parsecs. TNG50 proporciona una representación finamente detallada del universo, permitiendo

<sup>6</sup><https://www.tng-project.org/>

<sup>7</sup>Algoritmo estándar Friends-of-Friends (FoF) con una longitud de enlace  $b=0.2$ . El algoritmo FoF se ejecuta sobre las partículas de materia oscura, y los otros tipos (gas, estrellas, BHs) se asignan a los mismos grupos que su partícula de materia oscura más cercana.

<sup>8</sup>El algoritmo Subfind identifica subestructuras gravitacionalmente ligadas considerando todos los tipos de partículas y las asigna a subhalos/galaxias en consecuencia.



**Figura 2.2.1:** Comparación de los tres volúmenes de la simulación Illustris TNG: TNG50, TNG100 y TNG300, visualizados en densidad proyectada de materia oscura (Nelson et al. 2019a).

investigaciones completas sobre las propiedades globales y de pequeña escala de las galaxias con la capacidad de resolver sus detalles estructurales internos junto con su evolución químico-dinámica.

#### 2.2.1.1. Criterios de selección

En el presente estudio, la identificación de galaxias anilladas dentro de la simulación TNG50 se realizó seleccionando galaxias dentro de un rango específico de masa estelar y corrimiento al rojo. Este rango fue definido para asegurar la correspondencia con las características observadas de las galaxias de nuestro catálogo derivado del relevamiento SDSS, presentado en la sección anterior.

Específicamente, nos centramos en galaxias de disco de TNG50, seleccionadas a partir de criterios físicos y cinemáticos disponibles en la base de datos, con masas estelares ( $M_{\star}$ ) comparables a las del catálogo de galaxias anilladas de SDSS. Además, las galaxias fueron seleccionadas de las diferentes salidas de la simulación comprendidas dentro de los últimos 1.3 Giga-años, que se corresponden con redshifts cosmológicos en el rango  $0.01 \leq z \leq 0.1$ , lo que permitirá realizar comparaciones directas con observaciones y estudios previos de galaxias con estructuras anilladas. Utilizamos las 8 salidas correspondientes a los siguientes valores de redshift:  $z = 0.01, 0.02, 0.03, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08$

y 0.1. Además, se establecieron criterios adicionales basados en  $M_{\star}$ <sup>9</sup>, sSFR y tamaño estructural de las galaxias. Solo se incluyeron en el catálogo galaxias con  $M_{\star} \geq 10^9 M_{\odot}$ ,  $\log(\text{sSFR}/\text{yr}^{-1}) > -13$  y radio de masa estelar medio,  $r_{50}$ <sup>10</sup>  $> 1$  kpc. Este umbral para la masa estelar asegura que las galaxias seleccionadas estén resueltas con al menos 10000 partículas estelares para que las estructuras anulares puedan estar bien definidas; la restricción en la sSFR permite que las galaxias seleccionadas mantengan una actividad de formación estelar similar a la muestra de galaxias anilladas de SDSS. El requisito para  $r_{50}$  tiene como objetivo seleccionar galaxias con una estructura lo suficientemente extendida como para facilitar la identificación clara de anillos.

### 2.2.1.2. Clasificación

La clasificación visual de galaxias anilladas dentro de la simulación TNG50 se realizó mediante el análisis de imágenes sintéticas, libres de polvo y en proyección *face-on*, diseñadas para simular observaciones tipo NIRCam y MIRI del Telescopio Espacial James Webb (JWST) en los flujos aparentes de los filtros F070W, F090W, F115W. Estas imágenes fueron construidas a partir de distribuciones de luz de poblaciones estelares y regiones de formación estelar. La descripción completa de las imágenes sintéticas y las mediciones puede encontrarse en [Vogelsberger et al. \(2020\)](#).

El parámetro principal considerado para nuestra clasificación fue la presencia de estructuras anulares. Las categorías de clasificación se basaron en las definiciones establecidas en estudios previos por [Fernandez et al. \(2021\)](#) y [Buta \(2017\)](#), permitiendo una diferenciación detallada entre los distintos tipos de anillos.

Los anillos fueron clasificados en las siguientes categorías: anillo interno, anillo externo, anillos interno + externo (i+o) y anillo parcial o pseudo-anillo.

A cada tipo de anillo se le asignó un valor numérico específico para facilitar su clasificación y análisis estadístico. Cabe destacar que en esta parte del trabajo no se consideraron galaxias con anillos nucleares, ya que podrían sesgar nuestros resultados debido a que su clasificación podría estar sobreestimada por la limitación en la resolución espacial y/o por la modelización del *feedback* del

<sup>9</sup>Se referirá a ( $M_{\star}$ ) a la cantidad definida a partir de `SubhaloMassType[4]` en la base de datos de TNG.

<sup>10</sup>Definido en la base de datos de IllustrisTNG como `SubhaloHalFmassRadType[4]`.

Agujero Negro Supermasivo (SMBH, por sus siglas en inglés) en la simulación (principalmente para galaxias con  $M_{\star} \gtrsim 10^{10.5} M_{\odot}$  - Nelson et al. 2019a), entre otros. Por lo tanto, decidimos investigar este tipo de galaxias anilladas en un estudio posterior. La Fig. 2.2.3 muestra imágenes representativas de los distintos tipos de galaxias anilladas observadas en la simulación. Esto facilita una comprensión más intuitiva del marco de clasificación.

De acuerdo con el proceso mencionado, identificamos 807 galaxias anilladas dentro de las 8 salidas de la simulación que cumplían con los criterios adoptados y que conforman nuestra muestra objetivo. La Tabla 2.2.1 presenta los números y porcentajes<sup>11</sup> correspondientes a los distintos tipos de anillos, junto con sus intervalos de confianza al 95 %. Aproximadamente, el 59 % de estas galaxias poseen un anillo interno, el 22 % un anillo parcial, el 12 % un anillo externo y el 7 % anillos i+o. Además, la Tabla 2.2.2 y la Fig. 2.2.4 muestran la evolución de la fracción de los distintos tipos de anillos en galaxias anilladas en función del corrimiento al rojo, incluyendo sus intervalos de confianza al 95 %, lo que permite una comparación estadísticamente más robusta entre los distintos snapshots de la simulación. Se observa que en  $z = 0.01$ , las galaxias con anillos internos constituyen la fracción más significativa (74 %), mientras que a medida que el corrimiento al rojo aumenta hasta  $z = 0.1$ , esta fracción disminuye levemente a 54 %. Los anillos externos y los anillos i+o exhiben una distribución relativamente estable a lo largo de los corrimientos al rojo disponibles, lo que implica una formación y evolución menos dependiente del tiempo que la de los anillos internos. Por otro lado, las galaxias con anillos parciales parecen ser más comunes a medida que aumenta el corrimiento al rojo, comenzando con un 3 % en  $z = 0.01$  y creciendo hasta un 25 % en  $z = 0.1$ . Este incremento podría interpretarse como una indicación de que los anillos parciales no serían formaciones permanentes, sino características transitorias que emergen y desaparecen como resultado de procesos dinámicos dentro de las galaxias a lo largo del tiempo. Tal comportamiento sería consistente con la noción de que estas estructuras son más sensibles a las interacciones y a la evolución interna de las galaxias, reflejando así una historia de formación y destrucción más compleja en

<sup>11</sup>Los porcentajes se calcularon como  $p = (N_{\text{sub}}/N_{\text{tot}}) \times 100$ . El error estándar asociado a cada porcentaje se estimó como  $EE = \sqrt{p(100 - p)/N_{\text{tot}}}$ . Para una interpretación estadística más robusta, especialmente en muestras pequeñas, se utiliza el intervalo de confianza al 95 %, definido como  $IC_{95} = 1.96 \times EE$ .

**Tabla 2.2.1:** Números y porcentajes (con intervalos de confianza al 95 %) para galaxias con diferentes tipos de anillos obtenidos a partir de TNG50 y SDSS.

Tipo de anillo	Illustris TNG50		SDSS DR14	
	Número	Porcentaje	Número	Porcentaje
Anillo Interno	475	58.86±3.40 %	857	48.78±2.34 %
Anillo Externo	95	11.77±2.22 %	186	10.59±1.44 %
Anillos I + E	58	7.19±1.78 %	372	21.17±1.91 %
Anillo Parcial	179	22.18±2.87 %	342	19.46±1.85 %
<b>Total</b>	<b>807</b>	<b>100 %</b>	<b>1757</b>	<b>100 %</b>

**Tabla 2.2.2:** Números de galaxias con diferentes tipos de anillos en Illustris TNG50, para los valores de  $z$  disponibles.

Tipo de Anillo	$z=0.01$	$z=0.02$	$z=0.03$	$z=0.05$	$z=0.06$	$z=0.07$	$z=0.08$	$z=0.1$
Anillo Interno	23	27	50	65	76	70	83	81
Anillo Externo	4	4	8	11	14	18	17	19
Anillos I+E	3	4	4	6	6	11	11	13
Anillo Parcial	1	4	9	22	34	34	38	37
<b>Total</b>	<b>31</b>	<b>39</b>	<b>71</b>	<b>104</b>	<b>130</b>	<b>133</b>	<b>149</b>	<b>150</b>

comparación con los tipos de anillos más estables. Además, su mayor proporción hacia los valores más altos de  $z$  dentro del rango analizado podría indicar una tendencia evolutiva reciente en el universo local. No obstante, es importante señalar que este estudio se encuentra restringido a  $z \leq 0,1$ , lo que corresponde aproximadamente a los últimos  $\sim 1.3$  Gyr de evolución cósmica. Por lo tanto, no se están explorando etapas verdaderamente tempranas en la formación de las galaxias. Sin embargo, si esta tendencia observada se extrapolara hacia tiempos anteriores, podría sugerirse en forma hipotética que estos anillos serían más frecuentes en fases evolutivas más tempranas, cuando las estructuras galácticas aún no han alcanzado configuraciones dinámicamente más estables. En este contexto, los anillos parciales podrían eventualmente evolucionar hacia anillos externos más definidos, reflejando un proceso de reorganización estructural, en concordancia con los escenarios propuestos en simulaciones numéricas como las de [Elmegreen et al. \(1992\)](#).

### 2.2.1.3. Identificación de barras en galaxias anilladas

La identificación de estructuras de barra en las galaxias anilladas seleccionadas de la simulación TNG50 se realizó mediante su correlación con los datos provistos por el catálogo *Galaxy Morphologies (Kinematic) and Bar Properties* ([Zana et al. 2022](#)). Dicho catálogo se basa en descomposiciones morfo-cinemáticas de

las galaxias obtenidas a partir del análisis de la cinemática estelar utilizando el código MORDOR, el cual permite descomponer cada sistema en cinco componentes morfo-cinemáticos. Cabe destacar que la identificación de barras no constituye una salida directa del código MORDOR, sino que se obtiene a partir de un procedimiento posterior desarrollado por los autores, basado en el análisis de Fourier de la densidad superficial estelar de las galaxias (Zana et al. 2022). Los datos están disponibles para TNG50 en todos los corrimientos al rojo y se encuentran restringidos a subhalos con  $M_{\star} \gtrsim 10^9 M_{\odot}$ , correspondientes a un mínimo de  $10^4$  partículas estelares.

Nuestra investigación reveló que dentro del conjunto de galaxias anilladas identificadas en la simulación TNG50, un notable 64 % (507 galaxias) presentan barras, mientras que el 36 % restante (283 galaxias) no. Esto sugiere que la coexistencia de barras en galaxias anilladas está relacionada con la formación o persistencia de estos anillos en galaxias disco. Además, como puede observarse en la Tabla 2.2.3, hay un aumento constante en el número y porcentaje de galaxias anilladas con barras a medida que  $z$  aumenta. Estos resultados sugieren que, dentro del rango de corrimientos al rojo analizado en esta tesis ( $z \leq 0.1$ ), las barras pueden ser identificadas en distintas etapas del desarrollo reciente de las galaxias en la simulación. Extrapolando este comportamiento, podría especularse que una tendencia similar podría extenderse a épocas cosmológicas más tempranas, permitiendo una comparación cualitativa con los resultados reportados por Rosas-Guevara et al. (2022); no obstante, dicha extrapolación queda fuera del alcance directo del presente análisis. En contraste, el porcentaje de galaxias con anillos sin barras no muestra un aumento tan pronunciado como el de las galaxias con barras, reflejando dinámicas más complejas en la formación de barras y anillos.

La Tabla 2.2.4 y la Fig. 2.2.5 muestran la fracción de galaxias barradas con anillos en función del corrimiento al rojo, incluyendo intervalos de confianza al 95 %. Al comparar estos valores con la población total de galaxias anilladas (Tabla 2.2.2), se observa que en todos los intervalos de  $z$  la fracción de anillos internos es sistemáticamente mayor en la submuestra barrada.

Sin embargo, ambas poblaciones exhiben una disminución de magnitud comparable a lo largo del rango analizado: la fracción decrece de  $\sim 76\%$  a  $\sim 56\%$  en la submuestra barrada y de  $\sim 74\%$  a  $\sim 54\%$  en la población total

**Tabla 2.2.3:** Números y porcentajes (con intervalos de confianza al 95 %) de galaxias anilladas barradas y no barradas, para los distintos  $z$  analizados en Illustris TNG50.

$z$	$N_{\text{barradas}}$	Porcentaje	$N_{\text{no-barradas}}$	Porcentaje
0.01	21	$2.65 \pm 1.12 \%$	10	$1.26 \pm 0.78 \%$
0.02	30	$3.79 \pm 1.33 \%$	8	$1.01 \pm 0.70 \%$
0.03	47	$5.94 \pm 1.65 \%$	24	$3.03 \pm 1.20 \%$
0.05	69	$8.73 \pm 1.97 \%$	33	$4.17 \pm 1.39 \%$
0.06	86	$10.88 \pm 2.17 \%$	42	$5.31 \pm 1.56 \%$
0.07	81	$10.25 \pm 2.12 \%$	49	$6.20 \pm 1.68 \%$
0.08	81	$10.25 \pm 2.12 \%$	61	$7.72 \pm 1.86 \%$
0.10	92	$11.64 \pm 2.24 \%$	56	$7.08 \pm 1.79 \%$
<b>Total</b>	<b>507</b>	<b><math>64.18 \pm 3.34 \%</math></b>	<b>283</b>	<b><math>35.82 \pm 3.34 \%</math></b>

**Tabla 2.2.4:** Números de galaxias barradas con diferentes tipos de anillos, para cada  $z$  analizado en TNG50.

Tipo de anillo	$z=0.01$	$z=0.02$	$z=0.03$	$z=0.05$	$z=0.06$	$z=0.07$	$z=0.08$	$z=0.1$
Anillo Interno	16	22	35	48	53	46	48	52
Anillo Externo	3	3	5	8	6	9	8	9
Anillo I+E	2	3	3	3	5	6	8	10
Anillo Parcial	0	2	4	10	22	20	17	21
<b>Total</b>	<b>21</b>	<b>30</b>	<b>47</b>	<b>69</b>	<b>86</b>	<b>81</b>	<b>81</b>	<b>92</b>

entre  $z = 0,01$  y  $z = 0,1$ . Dado que las diferencias entre ambas muestras son del orden de pocos puntos porcentuales y que los intervalos de confianza al 95 % se superponen en la mayoría de los bins, no puede afirmarse de manera robusta que la evolución con  $z$  sea significativamente distinta entre las dos poblaciones.

En consecuencia, los resultados sugieren que la presencia de barras podría estar asociada a una fracción levemente mayor de anillos internos en el universo local, aunque la evidencia estadística disponible no permite establecer una diferencia significativa en la tendencia evolutiva.

Para los anillos externos y las combinaciones de anillos en galaxias con barra, las proporciones son comparables a las de la población general dentro de los intervalos de confianza asociados, lo que sugiere que la influencia de las barras en la formación o mantenimiento de estos anillos puede no ser tan crítica. Además, la proporción de anillos parciales en galaxias con barra muestra un incremento pronunciado con  $z$ , desde 0 % hasta 23 %. Este hallazgo es consistente con la idea de que, si bien las barras pueden promover la formación de anillos parciales, estos anillos pueden ser más transitorios o menos estables a lo largo del tiempo.

## 2.3. Comparación entre los catálogos de galaxias anilladas: SDSS y TNG50

Una comparación entre la muestra de galaxias anilladas de la simulación Illustris TNG50 y la muestra observacional de SDSS-DR14 (Fernandez et al. 2021, 2025) proporciona valiosa información sobre la representatividad y precisión de los modelos de simulación. Al analizar los datos, encontramos diferencias notables, así como similitudes en la distribución de los tipos de anillos y la frecuencia de barras en ambas muestras.

Observamos que en Illustris TNG50, los anillos internos son ligeramente más prevalentes en la simulación con un 59 % en comparación con un 49 % en el SDSS, tal como se consigna en la Tabla 2.2.1. Sin embargo, debe considerarse que, dado el ángulo sólido del catálogo SDSS, la mayoría de sus galaxias se ubican próximas a  $z \sim 0,1$ . Si bien no se muestra aquí la distribución en redshift de las galaxias anilladas del SDSS, es esperable que siga la tendencia de la población general. En este contexto, el sutil efecto evolutivo observado en la simulación (donde la fracción de anillos internos disminuye levemente hacia mayores valores de  $z$  dentro del rango analizado) podría estar influyendo parcialmente en esta comparación. De hecho, si se considera únicamente el snapshot más cercano a  $z = 0,1$  en TNG50, la fracción de anillos internos es del orden del 54 %, reduciendo la diferencia con SDSS aunque manteniendo la misma tendencia cualitativa.

La frecuencia de anillos combinados (i+o) es menor en TNG50 con un 7 % frente al 21 % en SDSS, lo cual podría sugerir diferencias en las dinámicas galácticas subyacentes o en la resolución de las simulaciones y observaciones. Los anillos parciales presentan una ligera variación, siendo más comunes en TNG50 con un 22 % frente al 19 % en Sloan, mientras que los anillos externos muestran porcentajes similares en ambas muestras, siendo consistentes dentro de los intervalos de confianza estimados (véase la Tabla 2.2.1).

En cuanto a la presencia de barras en galaxias anilladas, tanto el SDSS como la simulación TNG50 muestran una fracción consistente de galaxias anilladas con barra, del orden del 64 % del total. Al considerar las incertidumbres asociadas a estas fracciones, no se detectan diferencias estadísticamente significativas

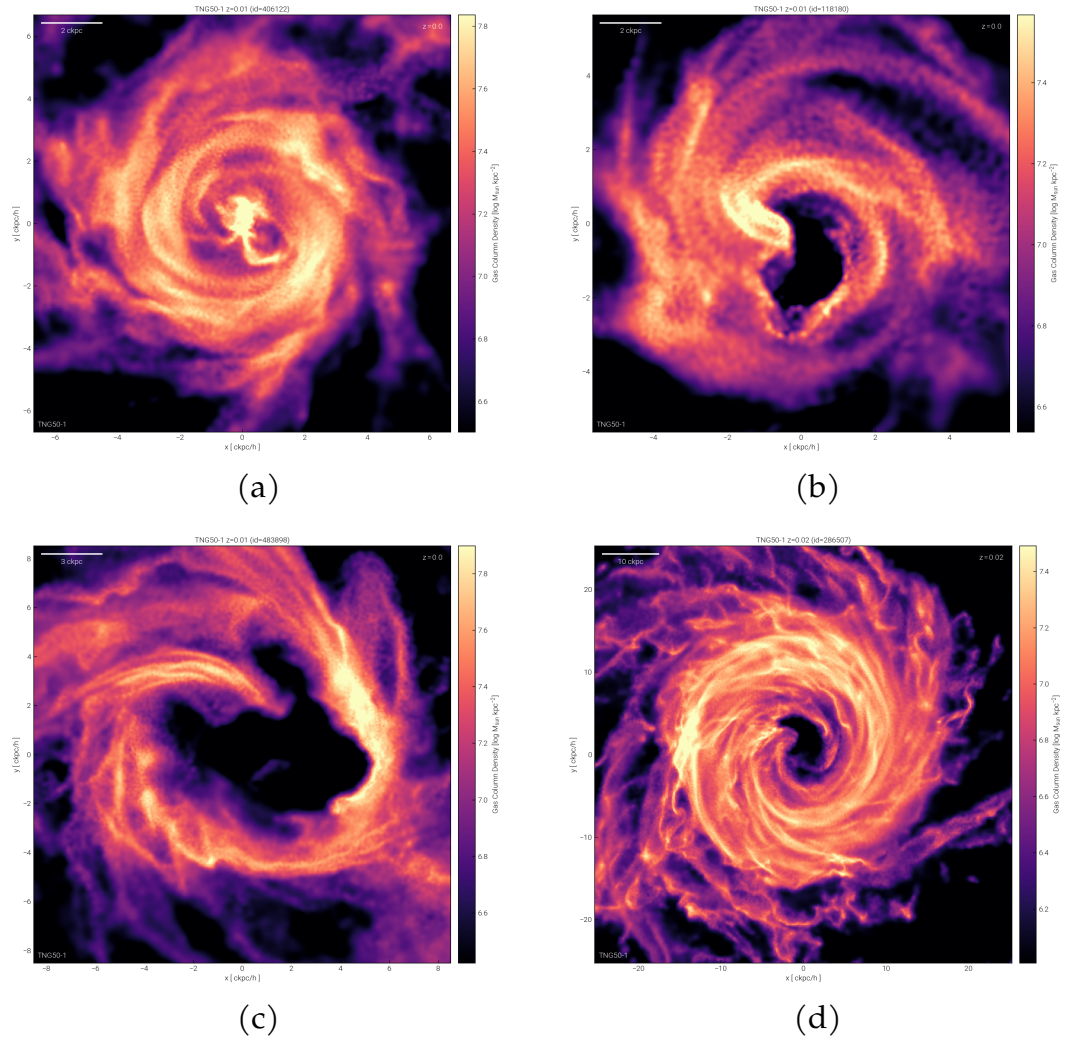
### 38 2.3. Comparación entre los catálogos de galaxias anilladas: SDSS y TNG50

---

entre las muestras observacional y simulada. En este sentido, la coincidencia en la proporción de galaxias anilladas con barra refuerza la idea de que la simulación TNG50 reproduce adecuadamente la frecuencia de barras observada en el universo local. En conjunto, estos resultados indican que las barras constituyen una característica prominente en las galaxias anilladas, tanto en el universo simulado como en el observado. No obstante, dado el rango limitado de corrimientos al rojo analizado en la simulación, este resultado debe interpretarse con cautela. Aun así, la concordancia en los patrones generales de clasificación de anillos y barras sugiere que la simulación TNG50 reproduce aspectos fundamentales de la dinámica y evolución galáctica que influyen en la morfología de las galaxias en el universo local.

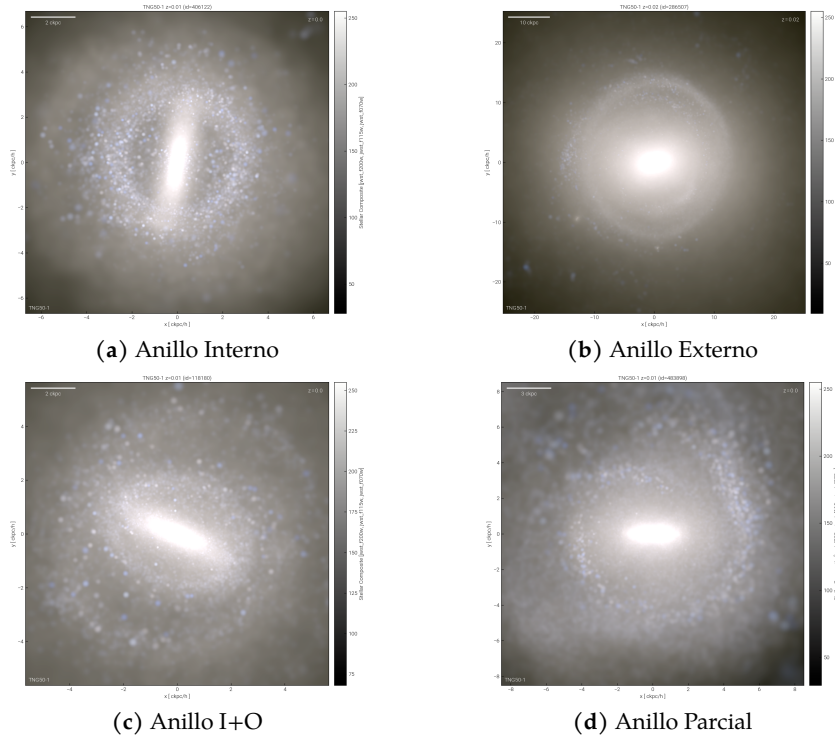
La construcción de catálogos de galaxias anilladas a partir de observaciones (SDSS-DR14) y de simulaciones cosmológicas de alta resolución (TNG50) constituye una herramienta fundamental para el estudio de la formación y evolución galáctica. Contar con ambos enfoques complementarios permite contrastar directamente la información empírica con las predicciones teóricas, evaluando fortalezas y limitaciones. De esta manera, se abre la posibilidad de realizar estudios más robustos sobre el origen, frecuencia y diversidad de las estructuras en anillo, así como sobre su relación con otros componentes morfológicos y dinámicos de las galaxias. En conjunto, estos catálogos proveen una base sólida para investigaciones futuras que integren observaciones y simulaciones en un marco comparativo coherente.

### 2.3. Comparación entre los catálogos de galaxias anilladas: SDSS y TNG50 39

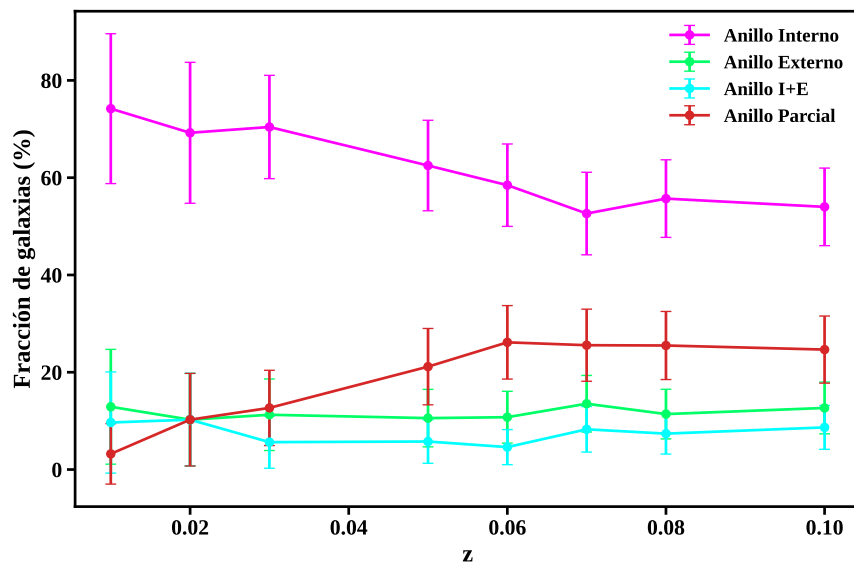


**Figura 2.2.2:** Mapas de densidad de columna de gas de cuatro galaxias extraídos de la simulación TNG50 a bajo  $z$ . Cada panel muestra la distribución de gas proyectada en unidades de  $\log(M_{\odot} \text{ kpc}^{-2})$ . Los sistemas presentan diversas estructuras anulares y espirales, lo que pone de manifiesto diferentes estados dinámicos y etapas evolutivas. Los paneles corresponden a: (a) Subhalo ID 406122 a  $z \sim 0.0$ , (b) Subhalo ID 118180 a  $z \sim 0.0$ , (c) Subhalo ID 483898 a  $z \sim 0.0$ , (d) Subhalo ID 286507 a  $z = 0.02$ . Fuente: <https://www.tng-project.org/media/>.

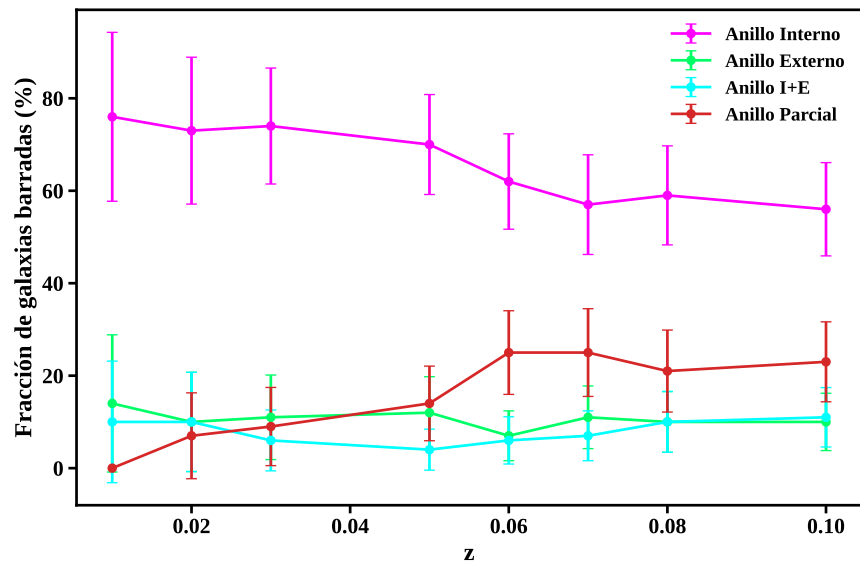
### 40 2.3. Comparación entre los catálogos de galaxias anilladas: SDSS y TNG50



**Figura 2.2.3:** Imágenes sintéticas compuestas libres de polvo de los diferentes tipos de galaxias anilladas obtenidas a partir de TNG50, basadas en los flujos de filtro ancho simulados aparentes F115W, F150W y F200W de JWST-NIRCam (Fig. 1 de [Fernandez et al. \(2025\)](#)).



**Figura 2.2.4:** Distribución porcentual de galaxias con distintos tipos de anillos, identificadas en la simulación IllustrisTNG50, en función del redshift. Las barras de error representan intervalos de confianza al 95%.



**Figura 2.2.5:** Distribución porcentual de galaxias barradas con diferentes tipos de anillos, identificadas en la simulación IllustrisTNG50, en función del redshift. Las barras de error representan intervalos de confianza al 95 %.

## Capítulo 3

# Galaxias anilladas y su entorno local

En el presente Capítulo se propone profundizar en el impacto de los ambientes densos sobre las características que presentan las galaxias anilladas. Con este fin, analizamos galaxias espirales con y sin anillos que habitan en grupos pobres y ricos, con el objetivo de evaluar la influencia del entorno en las propiedades de estas galaxias, tales como la tasa de formación de estrellas, la edad de la población estelar y los colores. Utilizamos catálogos homogéneos y estadísticamente completos; específicamente, la muestra de galaxias anilladas de SDSS ([Fernandez et al. 2021](#)) y el catálogo de grupos construido por [Tempel et al. \(2017\)](#). Los resultados presentados en este Capítulo han sido publicados en una revista internacional con referato ([Fernandez et al. 2024](#)).

### 3.1. Catálogo de grupos y cúmulos de galaxias

El catálogo presentado por [Tempel et al. \(2017\)](#) fue construido a partir de la duodécima liberación de datos del SDSS-DR12, con el propósito de identificar grupos y cúmulos de galaxias, así como sistemas en posible proceso de fusión. Para ello, emplearon una versión modificada del algoritmo *friends-of-friends* (FoF), optimizado específicamente para catálogos limitados por flujo.

La muestra inicial incluyó un total de 584 449 galaxias, seleccionadas de la región principal del SDSS. Consideraron objetos clasificados espectroscópicamente como GALAXY o QSO, y que coincidieran fotométricamente con el tipo GALAXY. Eliminaron entradas espurias mediante inspección visual de objetos brillantes,

aplicaron correcciones por extinción galáctica en la banda  $r$ , y limitaron la magnitud aparente a  $r < 17.77$ , correspondiente a magnitudes Petrosian, consistente con el límite de completitud del muestreo espectroscópico principal del SDSS, con un límite de redshift de  $z = 0.2$  tras corrección por el movimiento respecto al fondo cósmico de microondas (CMB, por sus siglas en inglés). Además, los autores incorporaron redshifts complementarios de catálogos externos como el *Two-degree Field Galaxy Redshift Survey* (2dFGRS), *Two Micron All Sky Survey – Redshift Survey* (2MRS) y el *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies* (RC3). La identificación inicial de grupos la llevaron a cabo mediante el algoritmo FoF, utilizando una longitud de enlace variable con el redshift, ajustada por una ley de tipo arcotangente. En el catálogo original, se adoptó una relación entre las longitudes de enlace radial y transversal de  $b_{\parallel}/b_{\perp} = 12$ .

Dado que el método FoF tiende a unir estructuras próximas que pueden no estar físicamente asociadas, los autores implementaron un proceso de refinamiento de pertenencia en dos etapas: (1) análisis de multimodalidad mediante el paquete `mclust` en R para identificar subcomponentes, y (2) exclusión de galaxias no ligadas gravitacionalmente, utilizando criterios basados en el radio virial  $R_{200}$  y la velocidad de escape. Estas etapas se aplicaron iterativamente en grupos con al menos cinco miembros, y posteriormente evaluaron si las galaxias excluidas formaban grupos independientes no detectados inicialmente.

Para la detección de sistemas en interacción potencial se basaron en una condición geométrica: si la distancia entre los centros de dos grupos era menor a la suma de sus radios efectivos, estos se consideraban parte de un sistema en fusión. El radio del grupo se definió a partir de  $R_{200}$  y de la extensión proyectada en el cielo. Esta metodología permitió identificar 498 sistemas en interacción, la mayoría formados por dos componentes, aunque hallaron casos más complejos, como el cúmulo de Coma, con seis subcomponentes distinguibles.

El catálogo final de [Tempel et al. \(2017\)](#) incluye:

- 88 662 grupos de galaxias con al menos dos miembros.
- 6 873 grupos con seis o más miembros, considerados más robustos.
- Parámetros físicos como masa virial ( $M_{200}$ ), luminosidad total ( $L_r$ ), y la razón masa-luminosidad ( $M/L$ ). Esta masa representa una estimación dinámica del halo del grupo, incluyendo materia oscura, gas y galaxias

miembros, y no corresponde a la simple suma de las masas estelares de las galaxias individuales.

Además de los catálogos de galaxias y grupos, publicaron un catálogo específico de sistemas en fusión. Observaron que el cociente  $M/L$  aumenta levemente con la riqueza del grupo, y que para un mismo rango de masa, los grupos más ricos presentan menores valores de  $M/L$ , lo cual es coherente con una distribución más eficiente de la masa. Este catálogo constituye una herramienta valiosa para estudiar el efecto del entorno en las propiedades galácticas, así como para analizar procesos dinámicos en sistemas en interacción y estructuras de gran escala, como filamentos y supercúmulos.

### 3.1.1. Galaxias anilladas en grupos y cúmulos

Con el objetivo de explorar el entorno de las galaxias con anillos, realizamos una correlación entre nuestro catálogo de galaxias anilladas de SDSS, descrito en el Capítulo 2 (Fernandez et al. 2021) y el catálogo de grupos mencionado (Tempel et al. 2017). Para distinguir entre grupos ricos y pobres, seguimos la metodología de Li et al. (2019), quienes propusieron clasificar como grupos pobres aquellos con  $3 \leq N_{rich} \leq 10$  galaxias, y como grupos ricos los que contienen entre  $11 \leq N_{rich} \leq 50$  galaxias miembro. Este criterio se basa en la correlación entre la riqueza del grupo ( $N_{rich}$ ) y la masa virial ( $M_{200}$ ), estimándose que los grupos se ubican en el intervalo  $13 < \text{Log}(M_{200}/M_{\odot}) < 14.5$ .

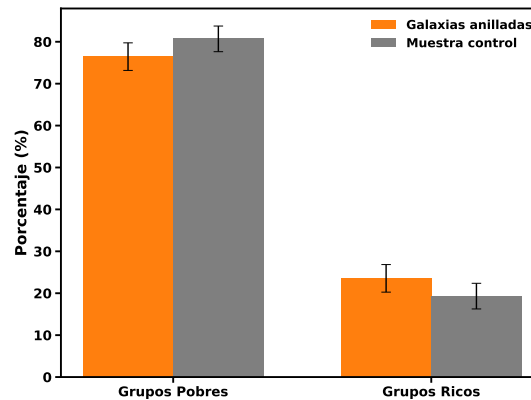
Aplicando este criterio, identificamos 637 galaxias anilladas que se encuentran dentro de agrupamientos galácticos, lo cual representa el 34.1 % de las 1868 galaxias anilladas inicialmente clasificadas. De este subconjunto, alrededor del 76 % están asociadas a grupos pobres, mientras que aproximadamente un 24 % forman parte de grupos ricos, como se detalla en la Tabla 3.1.1. Dado que se trata de una clasificación dicotómica, los errores <sup>1</sup> asociados a ambas fracciones son idénticos.

A fin de caracterizar mejor la morfología de los anillos en función del entorno, analizamos las frecuencias relativas de los diferentes tipos de anillos: internos, externos, combinados (es decir, presencia simultánea de anillos internos y

<sup>1</sup>A lo largo de este capítulo, las incertidumbres asociadas a fracciones y porcentajes se estiman a partir del error estándar binomial. En los casos en que se realizan comparaciones directas entre fracciones, se utilizan intervalos de confianza al 95 % como medida estadística más robusta.

**Tabla 3.1.1:** Números y porcentajes (con intervalos de confianza al 95 %) de galaxias anilladas y de control en grupos pobres ( $3 \leq N_{\text{rich}} \leq 10$ ) y grupos ricos ( $11 \leq N_{\text{rich}} \leq 50$ ).

Galaxias anilladas	Número	Porcentaje
GRUPOS POBRES	487	$76.45 \pm 3.29 \%$
GRUPOS RICOS	150	$23.55 \pm 3.29 \%$
Muestra control	Número	Porcentaje
GRUPOS POBRES	514	$80.69 \pm 3.06 \%$
GRUPOS RICOS	123	$19.31 \pm 3.06 \%$

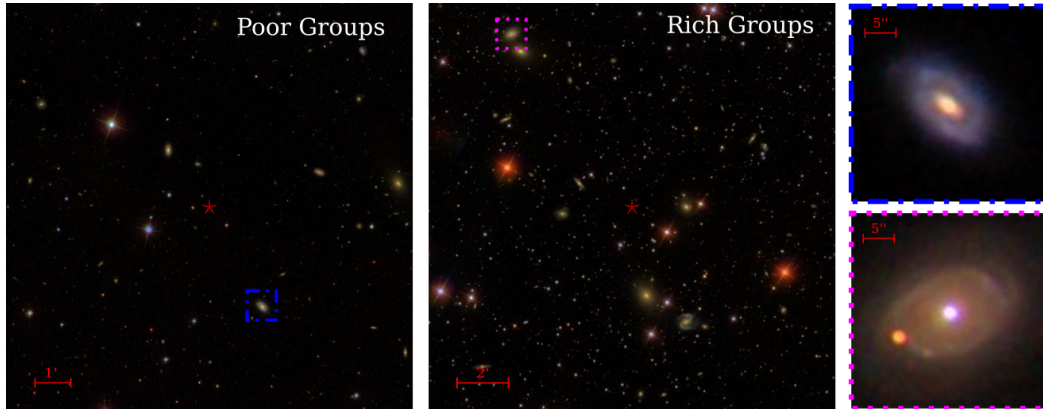


**Figura 3.1.1**

externos), nucleares y parciales. Los casos combinados fueron tratados como una clase particular, sin ser contabilizados dentro de las categorías individuales. La Fig. 3.1.3 muestra ejemplos representativos de galaxias con anillos externos localizados en entornos de grupos ricos y pobres.

En la Tabla 3.1.2 se presentan los porcentajes correspondientes a cada tipo de anillo para los distintos entornos. Aproximadamente el 47% de las galaxias anilladas en grupos muestran anillos internos, siendo este el tipo más frecuente tanto en grupos ricos como pobres. Por otro lado, los anillos nucleares son los menos comunes en ambas muestras y no presentan variaciones significativas en función del ambiente, considerando los errores estadísticos.

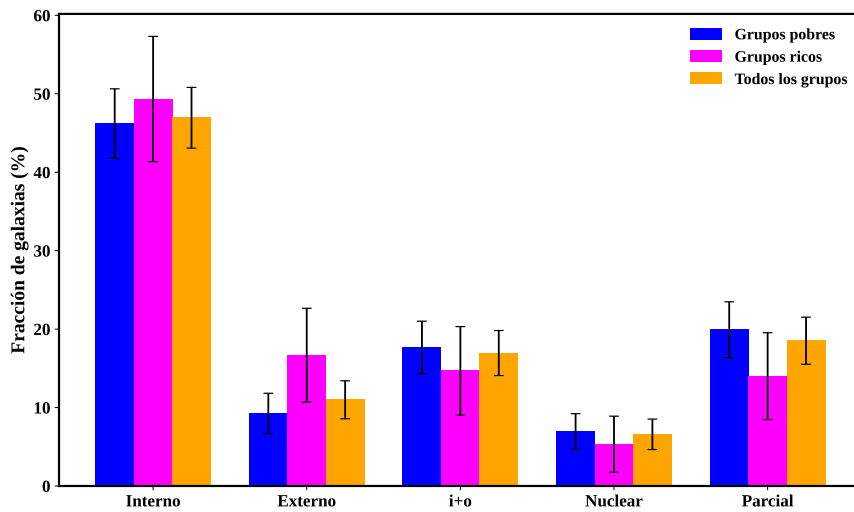
En el caso de los anillos parciales y exteriores, si bien se observan diferencias en las fracciones medidas entre grupos pobres y ricos, los intervalos de confianza correspondientes se solapan, lo que indica que estas variaciones no son estadísticamente significativas. No obstante, la tendencia observada podría ser consistente con escenarios en los que los mecanismos internos juegan un rol relevante en la formación de anillos parciales, en acuerdo con lo sugerido



**Figura 3.1.2:** Ejemplos de galaxias anilladas en un grupo pobre (*Poor Groups*, izquierda) y en un grupo rico (*Rich Groups*, derecha). Los paneles del costado derecho muestran ampliaciones de las galaxias con anillo externo en dichos grupos. La estrella roja indica el centro de cada grupo. En todas las imágenes, el norte está hacia arriba y el este a la izquierda (Fig. 1 de [Fernandez et al. \(2024\)](#)).

**Tabla 3.1.2:** Números y porcentajes (con intervalos de confianza al 95 %) de galaxias con distintos tipos de anillos en grupos pobres ( $3 \leq N_{\text{rich}} \leq 10$ ), grupos ricos ( $11 \leq N_{\text{rich}} \leq 50$ ) y en el total de los grupos.

Tipo	Grupos Pobres		Grupos Ricos		Todos los grupos	
	Número	Porcentaje	Número	Porcentaje	Número	Porcentaje
Anillo interno	225	$46.20 \pm 4.43 \%$	74	$49.33 \pm 7.98 \%$	299	$46.94 \pm 3.87 \%$
Anillo externo	45	$9.24 \pm 2.58 \%$	25	$16.67 \pm 5.98 \%$	70	$10.99 \pm 2.42 \%$
Anillo I+O	86	$17.66 \pm 3.35 \%$	22	$14.67 \pm 5.65 \%$	108	$16.95 \pm 2.87 \%$
Anillo nuclear	34	$6.98 \pm 2.24 \%$	8	$5.33 \pm 3.57 \%$	42	$6.59 \pm 1.94 \%$
Anillo parcial	97	$19.92 \pm 3.56 \%$	21	$14.00 \pm 5.54 \%$	118	$18.52 \pm 3.00 \%$
<b>Total</b>	<b>487</b>	<b>100 %</b>	<b>150</b>	<b>100 %</b>	<b>637</b>	<b>100 %</b>



**Figura 3.1.3:** Fracción de galaxias con diferentes tipos de anillos en grupos pobres ( $3 \leq N_{\text{rich}} \leq 10$ ), grupos ricos ( $11 \leq N_{\text{rich}} \leq 50$ ) y en la muestra total del grupo. Las barras de error corresponden a los intervalos de confianza del 95 %.

por [Buta and Combes \(1996\)](#). Del mismo modo, aunque estudios previos (e.g., [Elmegreen et al. 1992](#)) propusieron que las interacciones gravitacionales intensas podrían afectar la estabilidad de los anillos exteriores, nuestros resultados no permiten confirmar ni descartar esta hipótesis de manera concluyente dentro de las incertidumbres consideradas, dejando abierta la necesidad de estudios futuros con muestras más extensas.

### 3.1.2. Muestra de control

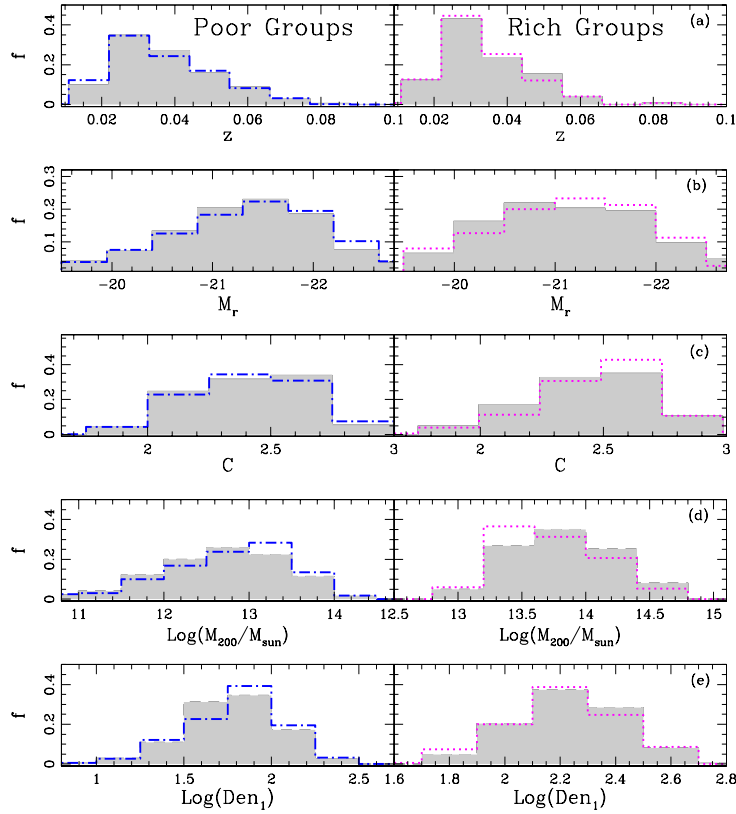
Con el objetivo de analizar el impacto del entorno grupal en las galaxias con anillos y comprender mejor su comportamiento y propiedades, construimos una muestra de control para las galaxias anilladas en grupos pobres y ricos, respectivamente, conformada por galaxias espirales sin estructuras anilladas.

Siguiendo el estudio de [Perez et al. \(2009\)](#), en el cual se establece que una muestra de control adecuada debe coincidir en redshift, morfología, magnitud y densidad ambiental local, se procedió a seleccionar las galaxias sin anillos.

Comenzamos seleccionando galaxias sin anillos que residían en grupos, y que presentaban parámetros similares a los de la muestra general de galaxias con anillos en dichos entornos. Para alcanzar este objetivo, utilizamos el algoritmo de Monte Carlo que permitió igualar las distribuciones de corrimiento al rojo y de magnitud absoluta en la banda  $r$  ( $M_r$ ) entre las galaxias con y sin anillos en grupos.

También seleccionamos galaxias sin anillos cuyos índices de concentración,  $C$ , fueran similares a los de las galaxias anilladas, con el fin de obtener una relación bulbo/disco comparable. De esta manera, cualquier diferencia en los resultados podrá atribuirse a la presencia de anillos, y no a discrepancias relacionadas con la morfología galáctica.

Además, seleccionamos galaxias sin anillos en grupos cuya distribución de masa virial,  $\log(M_{200}/M_\odot)$ , fuera similar a la de las galaxias anilladas. La masa virial del grupo, utilizada para refinar la membresía por [Tempel et al. \(2017\)](#), fue estimada por los autores asumiendo un perfil de densidad de Navarro–Frenk–White (NFW), junto con la dispersión de velocidades de las galaxias miembros y la extensión proyectada del grupo en el cielo. En particular, la masa se aproxima mediante una relación proporcional del tipo  $M_{200} \propto \sigma_v^2 \sigma_{sky}$ ,



**Figura 3.1.4:** Distribuciones normalizadas de redshift (a), magnitud absoluta en banda  $r$  (b), parámetro de concentración (c), masa del grupo (d) y densidad ambiental (e), para galaxias anillos en grupos pobres y ricos (líneas azul y magenta, respectivamente) y sus correspondientes muestras de control (histogramas sombreados) (Fig. 2 de [Fernandez et al. \(2024\)](#)).

donde  $\sigma_v$  ( $\text{km s}^{-1}$ ) representa la dispersión de velocidades en la línea de visión de las galaxias del grupo y  $\sigma_{sky}$  (Mpc) corresponde a la dispersión espacial proyectada o extensión característica del grupo en el plano del cielo.

Para la muestra de control, también elegimos galaxias sin anillos que tuvieran una distribución del parámetro de densidad similar a la de las galaxias con anillos. Para ello, utilizamos el parámetro de densidad,  $Den_1$ , calculado a partir de las luminosidades en la banda  $r$  de SDSS. Este parámetro considera diferentes escalas de suavizado (1, 2, 4 y  $8 h^{-1}$  Mpc), que permiten identificar entornos diversos (véase la Sección 4 de [Tempel et al. 2012](#)). Las longitudes de suavizado más pequeñas representan escalas de grupos, mientras que las más grandes se asocian a cúmulos o supercúmulos. En este estudio se adoptó como estimador de densidad local la densidad ambiental normalizada de las galaxias anilladas en grupos, empleando una escala de suavizado de  $a = 1 h^{-1}$  Mpc. Esto confirma

que el entorno local es comparable entre las galaxias con y sin anillos.

Posteriormente, la muestra obtenida de galaxias sin anillos fue subdividida en función del tipo de grupo, resultando en 514 galaxias (81 %) en grupos pobres y 123 galaxias (19 %) en grupos ricos, como se muestra en las columnas inferiores de la Tabla 3.1.1. Estas submuestras actúan como muestras de control para las galaxias anilladas en ambos entornos (véase los paneles a–e en la Fig. 3.1.4). Para confirmar la validez de esta selección, aplicamos la prueba de Kolmogorov-Smirnov (KS) entre las galaxias anilladas en grupos ricos/pobres y sus respectivas muestras de control. El valor de  $p$  obtenido fue  $p > 0.05$ , lo que apoya la hipótesis nula. Por lo tanto, se considera que el estudio no estará sesgado por diferencias en las propiedades principales entre las galaxias con anillos y las muestras de control correspondientes.

En cuanto a las fracciones de galaxias con anillos en grupos pobres y ricos, la Tabla 3.1.1 muestra que los porcentajes correspondientes a las galaxias anilladas y a las muestras de control son comparables dentro de los intervalos de confianza binomiales al 95 %. En particular, las fracciones de galaxias anilladas en grupos pobres y ricos resultan estadísticamente indistinguibles de las fracciones obtenidas para las galaxias sin anillos en los mismos entornos. Si bien se observan diferencias leves en los valores centrales de los porcentajes, la superposición de los intervalos de confianza indica que dichas diferencias no son estadísticamente significativas y aunque apuntan levemente a una mayor presencia de galaxias con anillos en grupos pobres, se debe actuar con cautela antes de extraer conclusiones definitivas sobre el papel del entorno en su formación o persistencia. Por lo cual, deben considerarse también otros factores internos relacionados con la presencia de anillos en las galaxias.

## 3.2. Frecuencia de barras

Un aspecto importante en el estudio de las galaxias con anillos es la relación entre la presencia de estos anillos y la existencia de estructuras barradas dentro de las galaxias. Diversas investigaciones han abordado esta conexión. [Comerón et al. \(2014\)](#) utilizaron observaciones en el infrarrojo medio para analizar la forma y orientación de anillos y barras en galaxias pertenecientes al  $S^4G$  (*Spitzer Survey of Stellar Structure in Galaxies*). Este estudio permitió la elaboración

del atlas ARRAKIS, enfocado en anillos de resonancia presentes en galaxias representativas del universo local. El análisis estadístico reveló que las galaxias barradas tienden a presentar una frecuencia mayor de anillos exteriores (1.7 veces más) y anillos interiores (1.3 veces más) en comparación con las galaxias no barradas. Sin embargo, los resultados también sugieren que los anillos pueden formarse de manera independiente a la presencia de barras, y que mecanismos alternativos como la existencia de óvalos débiles o modos espirales de larga duración podrían estar involucrados en la formación de anillos en galaxias sin barras. Asimismo, los autores plantean que algunos anillos podrían haber sido formados por barras que ya no están presentes.

Varios autores han analizado el papel del entorno en la aparición de barras (e.g. [Skibba et al. 2012](#); [Corsini et al. 2013](#); [Alonso et al. 2014](#)). Algunos trabajos concluyen que el entorno no tiene una influencia significativa en la presencia de barras, siendo estas determinadas mayormente por procesos internos de la galaxia anfitriona. Otros estudios, sin embargo, han sugerido que la frecuencia de barras podría estar influenciada por el entorno galáctico ([Aguerri et al. 2009](#); [Li et al. 2009](#); [Lee et al. 2012](#); [Skibba et al. 2012](#); [Sarkar et al. 2021](#)).

Dado que nuestro catálogo de galaxias anilladas se basa en un conjunto de datos, en el cual no sólo se identificaron anillos, sino que también se realizó una inspección visual para determinar la presencia o ausencia de barras, decidimos analizar la fracción de galaxias anilladas con y sin barra en grupos ricos y pobres. Para tal fin, calculamos los números y porcentajes de galaxias anilladas barradas en entornos de grupo. Se encontró que 302 ( $\approx 62\%$ ) de las galaxias anilladas en grupos pobres presentan barras, mientras que 185 ( $\approx 38\%$ ) no muestran estructura barrada. En grupos ricos, 92 ( $\approx 61\%$ ) son barradas y 58 ( $\approx 39\%$ ) no lo son.

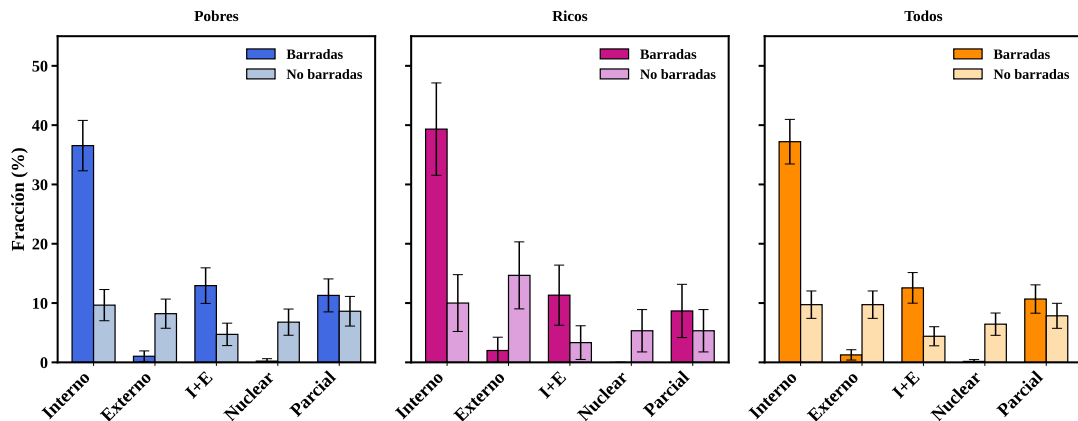
Se observa que aproximadamente un 37% de las galaxias con anillos internos presentan una barra. Además, alrededor del 13% de las galaxias con anillos tanto externos como internos presentan barras, mientras que en aquellas con anillos parciales, las barras están presentes en aproximadamente un 11%. Llama la atención que sólo el 1% y el 0% de las galaxias con anillos externos y nucleares, respectivamente, muestran estructuras barradas y están afectadas por grandes incertidumbres estadísticas debido al bajo número de objetos, por lo que deben interpretarse con cautela. Es notable que, para las distintas submuestras de

galaxias anilladas en grupos, los porcentajes de galaxias barradas son similares, independientemente de si el grupo es pobre o rico (ver Tabla 3.2.1 y Fig. 3.2.1).

**Tabla 3.2.1:** Números y porcentajes (con intervalos de confianza al 95 %) de galaxias barradas y no barradas con diferentes tipos de anillos, normalizados al número total de galaxias anilladas en grupos pobres ( $N = 487$ ), grupos ricos ( $N = 150$ ) y en el total de los grupos ( $N = 637$ ).

Tipo de anillo	Grupos Pobres		Grupos Ricos		Todos los Grupos	
	Barrada	No barrada	Barrada	No barrada	Barrada	No barrada
Anillo Interno	178 (36.55 ± 4.25) %	47 (9.65 ± 2.63) %	59 (39.33 ± 7.79) %	15 (10.00 ± 4.79) %	237 (37.21 ± 3.76) %	62 (9.73 ± 2.31) %
Anillo Externo	5 (1.03 ± 0.90) %	40 (8.21 ± 2.46) %	3 (2.00 ± 2.24) %	22 (14.67 ± 5.65) %	8 (1.26 ± 0.87) %	62 (9.73 ± 2.31) %
Anillo I+O	63 (12.94 ± 3.00) %	23 (4.72 ± 1.89) %	17 (11.33 ± 5.07) %	5 (3.33 ± 2.84) %	80 (12.56 ± 2.58) %	28 (4.40 ± 1.61) %
Anillo Nuclear	1 (0.21 ± 0.41) %	33 (6.78 ± 2.21) %	0 (0.00) %	8 (5.33 ± 3.57) %	1 (0.16 ± 0.31) %	41 (6.44 ± 1.88) %
Anillo Parcial	55 (11.29 ± 2.78) %	42 (8.62 ± 2.50) %	13 (8.67 ± 4.49) %	8 (5.33 ± 3.57) %	68 (10.68 ± 2.39) %	50 (7.85 ± 2.11) %
<b>Total</b>	<b>302 (62.02 ± 4.30) %</b>	<b>185 (37.98 ± 4.30) %</b>	<b>92 (61.33 ± 7.81) %</b>	<b>58 (38.67 ± 7.81) %</b>	<b>394 (61.87 ± 3.76) %</b>	<b>243 (38.13 ± 3.76) %</b>

**Nota.** Los intervalos de confianza al 95 % se calcularon asumiendo una distribución binomial, con  $EE = \sqrt{p(100 - p)/N}$  e  $IC_{95} = 1.96 \times EE$ . Las fracciones correspondientes a clases con muy bajo número de objetos ( $n \leq 1$ ) deben interpretarse con cautela.



**Figura 3.2.1:** Fracción de galaxias barradas y no barradas que albergan diferentes tipos de anillos en grupos pobres (panel izquierdo), grupos ricos (panel central) y en la muestra total del grupo (panel derecho). Los porcentajes están normalizados al número total de galaxias anilladas en cada entorno. Las barras de error indican los intervalos de confianza del 95 %.

Asimismo, estudiamos la fracción de galaxias barradas dentro de las muestras de control. Los resultados indican que aproximadamente un 24 % y un 19 % de las galaxias de control en grupos ricos y pobres, respectivamente presentan barras. Al comparar estos valores con las fracciones observadas en galaxias anilladas, se evidencia una relación entre la presencia de anillos y la existencia de barras en las galaxias. En ambos tipos de grupos, las galaxias anilladas tienden a ser barradas, mientras que las galaxias sin anillos están mayormente dominadas

por morfologías no barradas. Estos resultados podrían estar indicando que el entorno grupal no es el factor principal que determina la existencia de barras en las galaxias, y que la formación de anillos podría estar más estrechamente vinculada con procesos internos de la galaxia que con influencias externas del entorno ([Wilman and Erwin 2012](#); [Buta et al. 2019](#)).

### 3.3. Distribución de las galaxias anilladas en grupos

En cúmulos virializados y evolucionados, el núcleo presenta un entorno de densidad extrema donde diversos mecanismos físicos afectan la morfología y evolución de las galaxias. Además, el proceso de fusión tiende a concentrar las galaxias más luminosas en la región central del cúmulo ([Robotham et al. 2010](#)). Como consecuencia, se observa una mayor concentración de galaxias con signos de interacción hacia el centro de los grupos (e.g. [Ellison et al. 2010](#); [Alonso et al. 2004, 2012](#)).

En este contexto, el análisis de la fracción de galaxias anilladas en las regiones más densas, hacia el núcleo de los cúmulos, en comparación con las zonas externas de menor densidad, puede ofrecer indicios sobre los mecanismos físicos que influyen en la formación y evolución de los anillos galácticos. Por lo tanto, resulta de interés determinar si las galaxias con anillos presentan una ubicación particular dentro de grupos pobres y ricos en comparación con sus respectivas muestras de control.

Asumiendo un perfil de NFW, [Tempel et al. \(2017\)](#) estimaron el radio virial del grupo,  $R_{200}$ , como el radio de una esfera dentro de la cual la densidad media de materia es 200 veces superior a la densidad media del universo. Sin embargo, bajo la hipótesis de virialización, ciertos parámetros dependientes del modelo, como el radio virial, presentan incertidumbre en grupos con menos de cinco galaxias miembro ([Li et al. 2019](#); [Tempel et al. 2017](#)).

Para evitar sesgos en nuestro análisis, se excluyeron los grupos con menos de cinco galaxias miembro de los catálogos de grupos pobres, tanto en las muestras de galaxias anilladas como en las de control. Tras esta depuración, se conservaron 191 grupos pobres con galaxias anilladas y 205 grupos en la muestra de control correspondiente. Este criterio se aplicó exclusivamente en los estudios de distribución espacial de las galaxias dentro de los grupos, y no

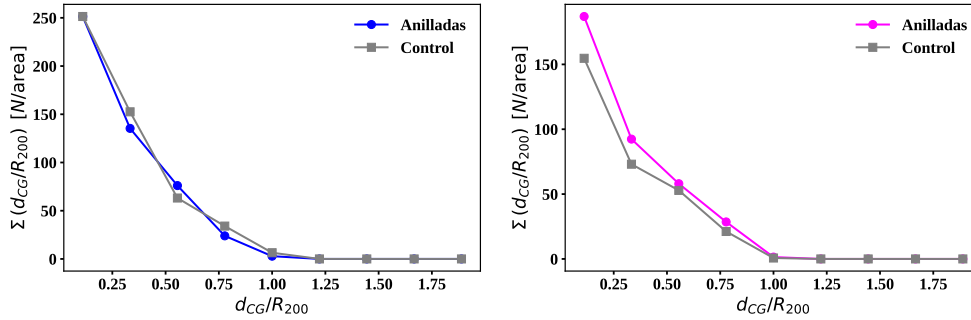
en otros análisis presentados en este capítulo. Para evaluar el impacto de esta exclusión sobre las distribuciones mostradas en la Fig. 3.1.4, se realizaron análisis complementarios mediante la prueba de K-S. En grupos ricos no se detectaron diferencias significativas ( $p > 0.05$  en todas las variables consideradas), mientras que en grupos pobres las distribuciones de  $z$ ,  $M_r$  y  $C$  permanecieron consistentes entre muestras, aunque se observaron discrepancias en algunas propiedades ambientales, particularmente en  $\log M_{200}$  ( $p = 5.6 \times 10^{-7}$ ) y en  $\log \text{Den}_1$  ( $p = 0.0057$ ). Estos resultados indican que la exclusión de grupos con menor riqueza no altera los patrones generales de las propiedades estructurales, aunque puede introducir diferencias ambientales leves en el régimen de grupos pobres.

Estudiamos la distribución de la distancia proyectada normalizada al centro del grupo,  $d_{CG}/R_{200}$ , para las galaxias anilladas en grupos pobres y ricos, junto con sus respectivas muestras de control. Los resultados obtenidos mostraron que las galaxias con anillos no presentan una localización preferencial dentro de los grupos en comparación con las galaxias sin anillos. Ambas categorías exhiben comportamientos similares, lo cual fue confirmado mediante la prueba de Kolmogorov–Smirnov (KS). En grupos pobres se obtuvo  $D = 0.067$  y  $p = 0.725$ , mientras que en grupos ricos se obtuvo  $D = 0.077$  y  $p = 0.781$ , indicando en ambos casos  $p > 0.05$ .

Como análisis complementario, se calculó la densidad superficial de galaxias en función de la distancia normalizada,

$$\Sigma(R) = \frac{N}{\pi(R_{\text{out}}^2 - R_{\text{in}}^2)},$$

donde  $N$  es el número de galaxias contenidas en anillos concéntricos definidos en la variable  $R = d_{CG}/R_{200}$ . Los valores  $R_{\text{in}}$  y  $R_{\text{out}}$  corresponden a los límites inferior y superior de cada bin radial adoptado en el análisis, determinados a partir de la discretización uniforme del rango de  $R$  considerado. Los perfiles obtenidos muestran un comportamiento decreciente similar para ambas muestras, reforzando la ausencia de segregación radial significativa.



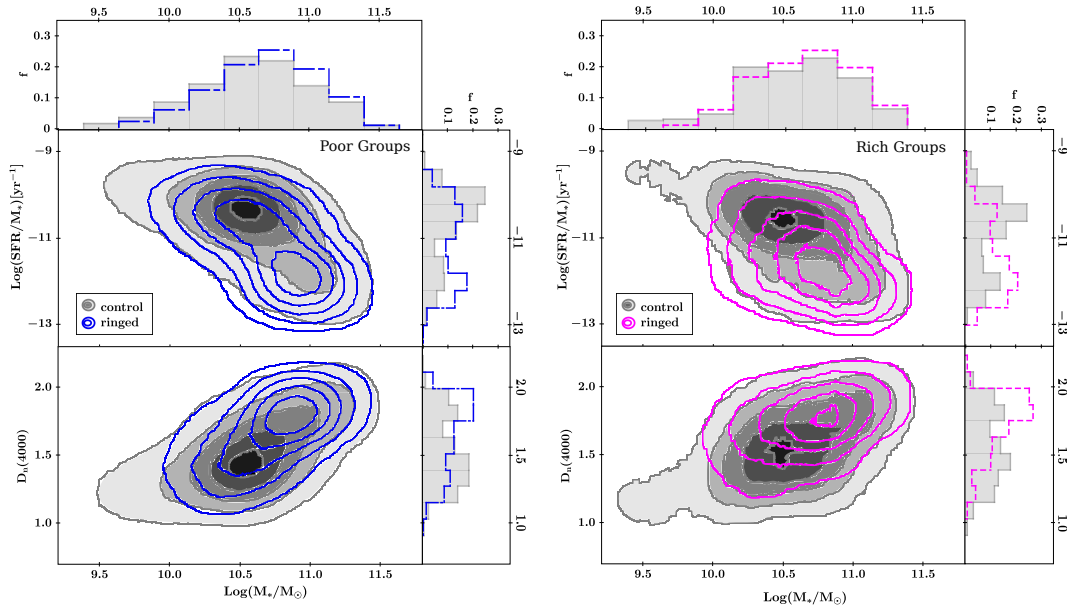
**Figura 3.3.1:** Perfil de densidad superficial en función de la distancia proyectada normalizada al centro del grupo,  $d_{CG}/R_{200}$ . Panel izquierdo: galaxias anilladas (línea azul) y la muestra de control (línea gris) en grupos pobres. Panel derecho: galaxias anilladas (línea magenta) y la muestra de control (línea gris) en grupos ricos.

## 3.4. Propiedades

El objetivo de esta sección es explorar los efectos de los entornos grupales sobre las características de las galaxias anfitrionas con estructuras anilladas. Para ello se analizan diversas propiedades, tales como la actividad de formación estelar, las poblaciones estelares y los colores de las galaxias anilladas. Estas propiedades se comparan con respecto a las galaxias de las muestras de control en grupos pobres y ricos, descritas previamente.

### 3.4.1. Actividad de formación de estrellas y edad de la población estelar

Para evaluar el impacto del entorno en la formación estelar y en la edad de las poblaciones estelares de galaxias anilladas que residen en grupos pobres y ricos, se empleó la  $sSFR$ , un parámetro ampliamente utilizado como indicador de la actividad de formación estelar en las galaxias. Este parámetro se estima en función de la luminosidad de la línea  $H\alpha$  y se normaliza utilizando las masas estelares. Las masas estelares incluidas en este análisis fueron obtenidas por el equipo de MPA/JHU (Instituto Max Planck de Astrofísica/Universidad Johns Hopkins) mediante ajustes fotométricos, y presentan discrepancias menores respecto a las derivadas por [Kauffmann et al. \(2003\)](#) y [Gallazzi et al. \(2005\)](#) usando índices espectrales, siendo las diferencias despreciables. Además, las  $SFR$  se obtuvieron del catálogo MPA/JHU, calculadas según los métodos de



**Figura 3.4.1:**  $\text{Log}(\text{SFR}/M_*)$  y  $D_n(4000)$  en función de las masas estelares. Paneles izquierdos: Galaxias anilladas (*ringed*) en grupos pobres y su correspondiente muestra de control (contornos en azul y gris, respectivamente). Los contornos representan isodensidades que encierran el 18%, 36%, 54%, 72% y 90% de los objetos en cada muestra. Los paneles superiores y laterales muestran las distribuciones normalizadas de masa estelar y de cada parámetro para ambas muestras. Paneles derechos: Análogo a los paneles izquierdos para galaxias anilladas y no anilladas en grupos ricos (contornos en magenta y gris, respectivamente) (Fig. 3 de [Fernandez et al. \(2024\)](#)).

[Brinchmann et al. \(2004\)](#). La estimación del SFR para galaxias formadoras de estrellas sigue el modelo de [Charlot and Longhetti \(2001\)](#), mientras que para otras clases de galaxias, como las de núcleos activos (AGN, por sus siglas en inglés), compuestas y con baja relación señal/ruido (S/N), se emplea una metodología similar a la de [Brinchmann et al. \(2004\)](#). No obstante, los autores originales implementaron ciertas modificaciones. Las correcciones de apertura para las SFR se realizaron ajustando modelos estocásticos a la fotometría de las regiones externas de las galaxias, abordando así sesgos observados en estudios previos.

También incorporamos el índice espectral  $D_n(4000)$  ([Kauffmann et al. 2003](#)), el cual constituye un indicador de la edad de las poblaciones estelares, aunque no proporciona una estimación directa de la edad en términos absolutos. Este índice se define a partir de la discontinuidad espectral en torno a  $4000 \text{ \AA}$ , originada por la acumulación de numerosas líneas de absorción metálicas en una

región estrecha del espectro, y resulta particularmente sensible a la presencia de poblaciones estelares viejas. Valores más elevados de  $D_n(4000)$  están asociados a poblaciones estelares más envejecidas, mientras que valores menores indican la presencia de estrellas más jóvenes. En este análisis utilizamos la definición de  $D_n(4000)$  obtenida por Balogh et al. (1999), como la razón entre las densidades de flujo promedio en las bandas continuas estrechas (3850-3950 Å y 4000-4100 Å). El uso de este índice permite caracterizar de manera más robusta el estado evolutivo relativo de las poblaciones estelares de las galaxias en estudio, sin realizar una estimación directa de sus edades.

La Fig. 3.4.1 muestra las distribuciones conjuntas de  $\log(\text{sSFR})$  y  $D_n(4000)$  en función de la masa estelar, junto con sus distribuciones marginales, para galaxias anilladas y no anilladas en grupos pobres y ricos.

En el plano  $\log(\text{sSFR})-\log(M_*)$  se observa que, para una misma masa estelar, las galaxias de la muestra de control presentan valores sistemáticamente mayores de sSFR que las galaxias anilladas. Asimismo, la dependencia de la sSFR con la masa estelar difiere entre ambas poblaciones: mientras que en la muestra de control la relación es aproximadamente constante o débilmente dependiente de la masa, en las galaxias anilladas se observa una pendiente más pronunciada, indicando una disminución más marcada de la actividad de formación estelar hacia mayores masas.

En el plano  $D_n(4000)-\log(M_*)$  se aprecia que, para una misma masa estelar, las galaxias anilladas presentan valores mayores del índice espectral  $D_n(4000)$ , lo que es consistente con poblaciones estelares más envejecidas. En este caso, la dependencia de  $D_n(4000)$  con la masa estelar es similar en ambas muestras, sugiriendo que la diferencia principal radica en un desplazamiento sistemático hacia valores mayores en las galaxias anilladas.

Las distribuciones marginales normalizadas de  $\log(\text{sSFR})$  y  $D_n(4000)$  refuerzan estas tendencias. Las diferencias entre distribuciones fueron cuantificadas mediante la prueba de K-S, obteniéndose niveles de significancia estadística superiores al 99.8 %, lo que indica que ambas poblaciones no provienen de la misma distribución.

En contraste, las distribuciones de masa estelar para las muestras anilladas y de control muestran comportamientos similares, lo cual fue confirmado mediante

**Tabla 3.4.1:** Porcentajes con intervalos de confianza binomiales al 95 % de galaxias anilladas y de la muestra de control (CS) en grupos ricos y pobres con baja actividad de formación estelar y poblaciones estelares antiguas.

Restricción	$\log(\text{SFR}/M_\star) < -10.6$	$D_n(4000) > 1.5$
% Anilladas en grupos pobres	$66.12 \pm 4.20$	$70.23 \pm 4.06$
% CS en grupos pobres	$43.39 \pm 8.76$	$46.69 \pm 8.82$
% Anilladas en grupos ricos	$80.66 \pm 6.32$	$84.00 \pm 5.87$
% CS en grupos ricos	$53.66 \pm 4.31$	$56.91 \pm 4.28$

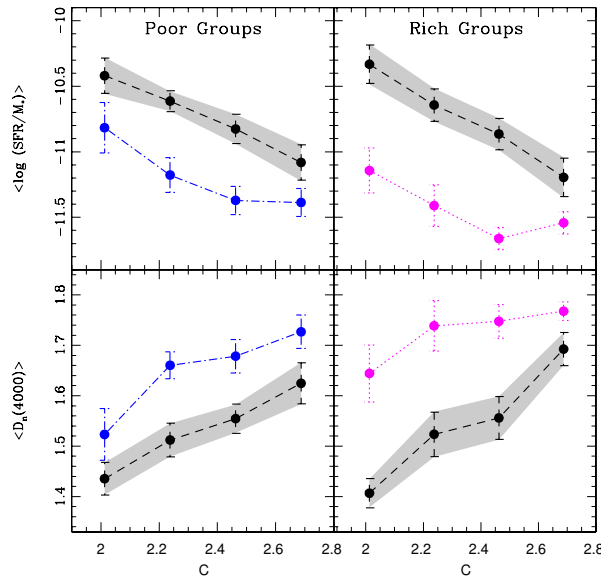
la prueba KS ( $p > 0.05$ ), indicando que las diferencias observadas en sSFR y  $D_n(4000)$  no están impulsadas por sesgos en la distribución de masas.

Además, se observa que el valor cercano a  $\log(\text{sSFR}) \approx -10.6$  divide las distribuciones en dos poblaciones bien diferenciadas. Este umbral corresponde al promedio de las medianas obtenidas para las muestras de control y es consistente con valores adoptados en la literatura para definir galaxias apagadas (*quenched*). Por ejemplo, Wetzel et al. (2012) utilizaron  $\log(\text{sSFR}) < -11$  a  $z = 0$ , mientras que Cora et al. (2018) emplearon un umbral de  $-10.7$ .

De manera similar, el índice espectral  $D_n(4000)$  muestra una distribución bimodal en torno a  $D_n(4000) \approx 1.5$ , valor comúnmente asociado a la transición entre poblaciones estelares jóvenes y envejecidas. La Tabla 3.4.1 cuantifica los porcentajes de galaxias con baja actividad de formación estelar y poblaciones estelares envejecidas en las distintas muestras analizadas, utilizando estos umbrales como referencia. Las incertidumbres asociadas corresponden a intervalos de confianza binomiales al 95 %.

En conjunto, estos resultados indican que, en entornos grupales, las galaxias anilladas presentan una menor actividad de formación estelar y valores mayores de  $D_n(4000)$  en comparación con las galaxias sin anillos de las muestras de control. Esta tendencia es particularmente pronunciada en los grupos ricos.

Asimismo, la Fig. 3.4.2 muestra la relación entre el  $\text{Log}(\text{SFR}/M_\star)$  y  $D_n(4000)$  respecto al índice de concentración  $C$  para galaxias anilladas y no anilladas en grupos ricos y pobres. Los errores fueron estimados mediante el método Bootstrap (Barrow et al. 1984), tanto en esta figura como en las siguientes (bandas sombreadas). En cada iteración del Bootstrap se generó una muestra de arranque mediante muestreo aleatorio con reemplazo a partir de los datos originales. Para cada realización se calcularon los valores medios de los



**Figura 3.4.2:** Valores medios de  $\text{Log}(\text{SFR}/M_*)$  y  $D_n(4000)$  en función del parámetro de concentración,  $C$ . Los errores mostrados corresponden a estimaciones obtenidas mediante el método bootstrap. Paneles izquierdos: Galaxias anilladas en grupos pobres (líneas azul con trazo-punto) y su correspondiente muestra de control (líneas negras a trazo). Paneles derechos: Galaxias anilladas en grupos ricos (líneas magenta punteada) y su respectiva muestra de control (líneas negras a trazo) (Fig. 4 de [Fernandez et al. \(2024\)](#)).

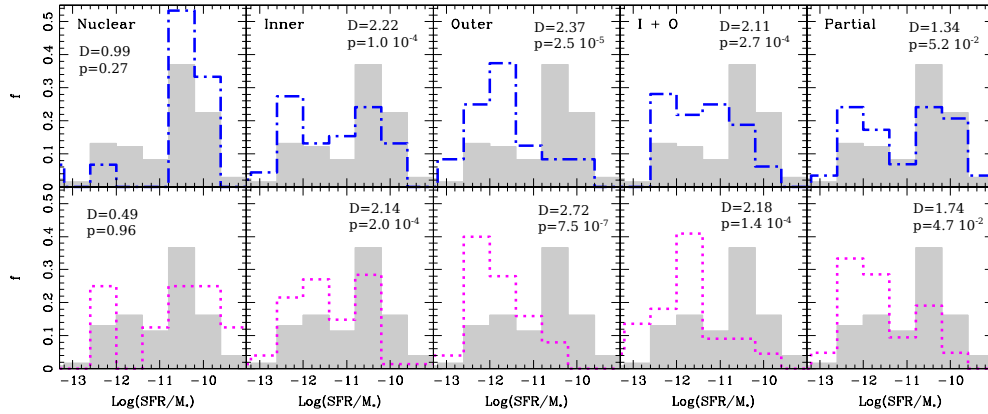
parámetros en bins del índice de concentración  $C$ . Los valores finales mostrados corresponden a la media de las realizaciones bootstrap, mientras que los errores asociados se estimaron como la desviación estándar entre las realizaciones. En este trabajo se realizaron 100 iteraciones bootstrap. Observamos que los tipos morfológicos más tempranos (mayores valores de  $C$ ) presentan baja eficiencia de formación estelar y poblaciones estelares antiguas. Además, la figura revela que la presencia de estructuras anilladas en galaxias conlleva una menor actividad de formación estelar y poblaciones estelares más envejecidas en comparación con galaxias sin anillos de las muestras de control correspondientes. Este efecto es particularmente notable en las muestras de galaxias asociadas a grupos ricos en todos los tipos morfológicos.

Con el fin de proporcionar un análisis más completo de los diferentes tipos de anillos y sus implicaciones en las tendencias observadas, examinamos las distribuciones normalizadas del  $\text{Log}(\text{SFR}/M_*)$  para galaxias con diferentes tipos de anillos en grupos pobres y ricos en la Fig. 3.4.3. Comparamos estas

distribuciones con sus respectivas muestras de control. Una correspondiente a grupos pobres y otra a grupos ricos, ambas se mantienen fijas para todos los tipos de anillos considerados. Es evidente que, en general, las galaxias con distintos tipos de anillos en entornos grupales presentan menores niveles de actividad de formación estelar en comparación con las galaxias sin estructuras anilladas. Esta tendencia es particularmente pronunciada para galaxias con anillos externos, internos + externos y parciales en grupos ricos. En contraste, las galaxias espirales con anillos nucleares muestran valores de  $\text{Log}(\text{SFR}/M_*)$  similares a los de las galaxias de control, indicando niveles de formación estelar comparativamente más altos. Esta tendencia se hace más evidente en grupos pobres. De manera similar, la Fig. 3.4.4 demuestra que las galaxias anilladas presentan poblaciones estelares más antiguas en comparación con sus contrapartes de control, independientemente del tipo de anillo y del entorno (grupos pobres/ricos). No obstante, las galaxias con anillos internos y externos exhiben los valores más altos de  $D_n(4000)$  con una señal pronunciada hacia poblaciones estelares más antiguas. Por otro lado, las galaxias que albergan anillos nucleares demuestran una población estelar más joven (valores bajos de  $D_n(4000)$ ), similar a la de la muestra de control, especialmente cuando residen en grupos pobres. Además, en todos los paneles de las Fig. 3.4.3 y 3.4.4, se han medido las diferencias del  $\text{Log}(\text{SFR}/M_*)$  y  $D_n(4000)$  entre las distribuciones de galaxias anilladas, con distintos tipos de anillos, y sus respectivas muestras de control en los grupos pobres y ricos. Estas diferencias se determinaron mediante el test de Kolmogorov–Smirnov, el cual cuantifica la máxima separación vertical entre las funciones de distribución acumulada de cada par de muestras. El nivel de significancia alcanzado para estas comparaciones es del 99.99 %, determinado mediante la estadística KS. Los valores de  $D$  y  $p$  resultantes revelan diferencias estadísticamente significativas entre las distribuciones en la mayoría de los casos. La diferencia significativa entre los anillos nucleares y otras clases de anillos en términos de sSFR y  $D_n(4000)$  radica principalmente en el hecho de que los anillos nucleares son usualmente sitios de formación estelar (Buta and Combes 1996; Knapen 2005; Comerón et al. 2010), y a menudo dominan la actividad de formación de estrellas de toda la galaxia anfitriona. Además, observaciones de galaxias cercanas han demostrado que los entornos de los anillos nucleares pueden albergar grandes poblaciones de cúmulos estelares jóvenes y masivos

([Mazzuca et al. 2008](#); [Ma et al. 2018](#)). Asimismo, la SFR en los anillos nucleares está afectada por muchos factores, como la intensidad de las perturbaciones no axisimétricas en las galaxias, la tasa de afluencia de gas y la fuerza del campo magnético ([Yang et al. 2022](#); [Seo and Kim 2013](#); [Seo et al. 2019](#)). Por ejemplo, las tasas de formación estelar parecen ser más bajas en galaxias con anillos nucleares y campos magnéticos fuertes, como en aquellas con fuertes barras ([Tabatabaei et al. 2018](#); [Ma et al. 2018](#)).

En nuestro trabajo previo demostramos que la presencia de una estructura anillada en galaxias espirales se encuentra claramente asociada a una disminución de la actividad de formación de estrellas y envejecimiento de las poblaciones estelares, sin distinguir el entorno en el que dichas galaxias habitan ([Fernandez et al. 2021](#)). De manera consistente, el análisis presentado en esta sección, centrado específicamente en galaxias anilladas ubicadas en entornos grupales, arroja resultados alineados con los reportados anteriormente, reforzando estas tendencias. En consecuencia, los hallazgos de esta investigación revelan que, a escala global, las galaxias anilladas que habitan en entornos grupales más densos, es decir grupos ricos en comparación con grupos pobres, experimentan una disminución en su tasa de formación estelar. En estos ambientes, es plausible que las galaxias más masivas presenten tasas de formación estelar más bajas, debido a que la mayor frecuencia de interacciones en grupos ricos favorece el agotamiento de sus reservas de gas. Por el contrario, en entornos grupales menos densos, como los grupos pobres considerados en este trabajo, las galaxias más masivas pueden mantener tasas de formación estelar relativamente más altas durante períodos más prolongados, asociado a una menor incidencia de interacciones que aceleren dicho agotamiento. Sin embargo, al analizar galaxias con tipos específicos de anillos, encontramos que el entorno puede afectar de manera diferente a cada categoría de anillo, lo que podría influir en la actividad de formación estelar. En el caso de los anillos nucleares, es posible que las galaxias estén experimentando ciertos procesos internos que favorecen el flujo de gas hacia el núcleo, aumentando así su tasa de formación estelar. En contraste, las galaxias con anillos externos y parciales podrían estar experimentando procesos de agotamiento de gas, lo que lleva a una disminución en la formación estelar. En la misma dirección, algunos estudios han demostrado que la tasa de formación estelar en los anillos externos



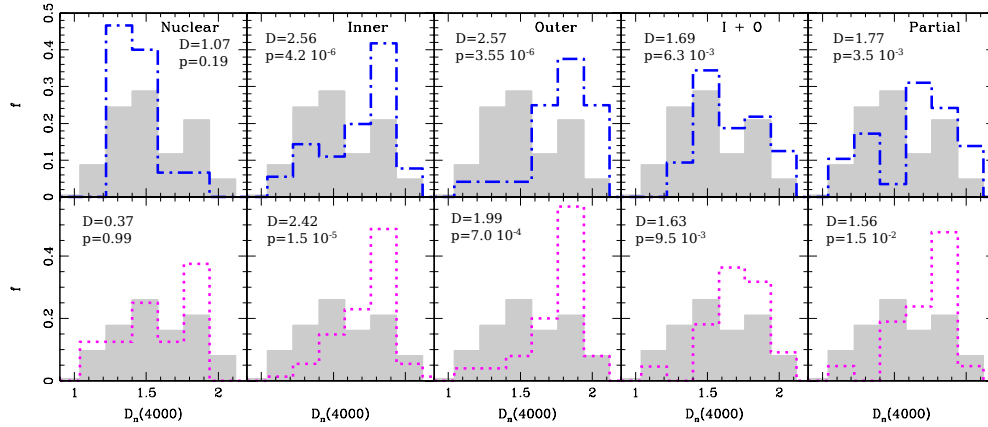
**Figura 3.4.3:** Distribuciones normalizadas de  $\text{Log}(\text{SFR}/M_*)$  para galaxias con diferentes tipos de anillos (nucleares, internos, externos, internos+externos y parciales) en grupos pobres y ricos (paneles superiores e inferiores, respectivamente). Las distribuciones grises representan las muestras de control correspondientes (Fig. 5 de [Fernandez et al. \(2024\)](#)).

es baja ([Kostiuk and Sil'chenko 2016](#); [Katkov et al. 2022](#)), y este efecto parece acentuarse aún más por el efectos del entorno.

### 3.4.2. Colores

Los colores de las galaxias se relacionan claramente con las poblaciones estelares dominantes y la morfología, y por lo tanto con la formación estelar, el contenido de gas y el entorno ([Feldmann et al. 2017b](#); [Pandey and Sarkar 2020](#)). En este contexto, también es plausible una conexión con la presencia de estructuras anilladas en galaxias disco. Así, con el objetivo de caracterizar los colores de las galaxias con anillos en ambientes grupales, en esta sección analizamos los colores de galaxias con y sin anillos que habitan grupos ricos y pobres.

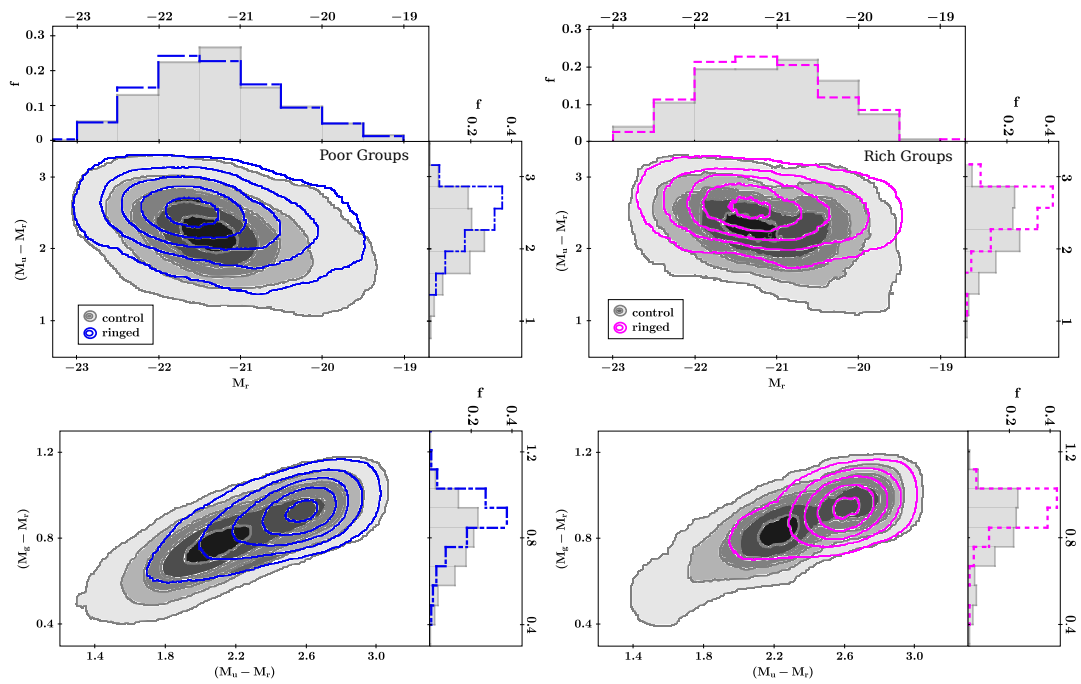
En la Fig. 3.4.5 se muestra el diagrama color-magnitud ( $M_u - M_r$  frente a  $M_r$ ) para las galaxias con estructuras anilladas habitando en grupos ricos y pobres. También se incluyen las muestras de control correspondientes. En este tipo de diagramas se distinguen generalmente tres regiones principales: la **nube azul**, dominada por galaxias con colores azules y alta actividad de formación estelar; el **valle verde**, que representa una región de transición asociada a galaxias en proceso de apagado de la formación estelar; y la **secuencia roja**, compuesta mayoritariamente por galaxias con colores rojos y poblaciones estelares envejecidas ([Baldry et al. 2004](#); [Blanton and Moustakas](#)



**Figura 3.4.4:** Distribuciones normalizadas de  $D_n(4000)$  para galaxias que exhiben diferentes tipos de anillos (nucleares, internos, externos, internos+externos y parciales) en grupos pobres y ricos (paneles superiores e inferiores, respectivamente). Las distribuciones grises representan las muestras de control correspondientes (Fig. 6 de [Fernandez et al. \(2024\)](#)).

2009). Se observa que las galaxias con anillos se encuentran mayormente entre el **valle verde** y la **secuencia roja**, con un exceso de ellas en la **secuencia roja**, especialmente en los grupos ricos, mientras que las galaxias de las muestras de control tienden a situarse en el **valle verde** y en la región de la **nube azul** del diagrama. A una magnitud absoluta fija, las galaxias con estructuras anilladas presentan sistemáticamente colores más rojos que las galaxias de las muestras de control, mostrando además una relación color–magnitud con una pendiente más plana. La discrepancia entre las distribuciones de colores (paneles derechos) también fue evaluada mediante la estadística KS, con un nivel de confianza del 99.8%. En cambio, las distribuciones de  $M_r$  tanto para las muestras con anillos como para las de control en grupos pobres y ricos presentan patrones comparables (ver paneles superiores de la Fig. 3.4.5).

Los valores  $M_u - M_r \approx 2.2$  y  $M_g - M_r \approx 0.84$  corresponden a umbrales comúnmente adoptados para separar galaxias con colores azules de aquellas con colores más rojos ([Strateva et al. 2001](#)). En las distribuciones analizadas no se identifican picos claramente bimodales; sin embargo, a partir de estos valores se evidencia un exceso de galaxias con estructuras anilladas hacia colores más rojos en comparación con las galaxias de las muestras de control. En particular, el límite  $M_g - M_r \approx 0.84$  coincide con el valor medio de la distribución de color de las galaxias de las muestras de control (ver Tabla 3.4.2).



**Figura 3.4.5:** Paneles superiores: Diagramas de color-magnitud para galaxias anilladas (*ringed*) en grupos pobres y ricos (contornos azules y magenta, respectivamente), y sus correspondientes muestras de control (contornos grises). Los contornos representan isodensidades que encierran el 18%, 36%, 54%, 72% y 90% de los objetos en cada muestra. Los paneles laterales y superiores presentan las distribuciones normalizadas de  $M_u - M_r$  y  $M_r$  para cada muestra. Paneles inferiores: Diagramas de color-color para galaxias anilladas en grupos pobres (contornos azules), en grupos ricos (contornos magenta) y sus respectivas muestras de control (contornos grises). Los paneles laterales presentan las distribuciones normalizadas de  $M_g - M_r$  para cada muestra (Fig. 7 de [Fernandez et al. \(2024\)](#)).

Con el fin de cuantificar el exceso de galaxias con colores rojos en las muestras anilladas respecto a las muestras de control, se adoptaron umbrales en los índices de color  $M_u - M_r$  y  $M_g - M_r$ . En particular, se consideraron galaxias que satisfacen  $(M_u - M_r) > 2.2$  y, de manera independiente,  $(M_g - M_r) > 0.84$ . Adicionalmente, se analizó la fracción de galaxias que cumplen simultáneamente ambas condiciones, es decir,  $(M_u - M_r) > 2.2$  y  $(M_g - M_r) > 0.84$ , lo que permite identificar de forma más conservadora a las galaxias ubicadas en la secuencia roja (Tabla 3.4.2). En todos los entornos se observa un exceso significativo de galaxias rojas en las muestras anilladas respecto a las muestras de control, siendo esta diferencia particularmente marcada en grupos ricos.

Los resultados indican que, tanto en grupos pobres como en grupos ricos, las galaxias anilladas presentan sistemáticamente una mayor fracción de sistemas con colores rojos en comparación con las galaxias de control. Al considerar los intervalos de confianza binomiales al 95 %, estas diferencias resultan estadísticamente robustas, siendo más pronunciadas en los grupos ricos. Además, los paneles centrales de la Fig. 3.4.5 muestran la relación color-magnitud para galaxias anilladas y de control en grupos pobres y ricos. En estos diagramas se observa que, a magnitud fija, las galaxias anilladas tienden a presentar colores más rojos que las galaxias sin anillos de las muestras de control. Esta diferencia es más evidente en grupos ricos, donde las galaxias anilladas se concentran preferentemente en la secuencia roja, mientras que las muestras de control muestran una mayor dispersión hacia la nube azul.

Por otra parte, los paneles inferiores de la Fig. 3.4.5 muestran los diagramas color-color para ambas poblaciones. Se aprecia que, a color  $M_u - M_r$  fijo, las galaxias anilladas presentan valores sistemáticamente mayores de  $M_g - M_r$ , lo que indica una tendencia hacia poblaciones estelares más envejecidas y con menor actividad de formación estelar. En comparación, las galaxias de las muestras de control exhiben una fracción ligeramente mayor de colores azules. Esta diferencia es particularmente pronunciada en grupos ricos y también se observa en grupos pobres, aunque en menor medida.

Además, la Fig. 3.4.6 muestra la relación entre los índices de color  $M_u - M_r$  y  $M_g - M_r$  y la masa del halo del grupo anfitrión,  $\log(M_{200}/M_\odot)$ , para galaxias anilladas en grupos pobres y ricos. Para construir esta figura, las galaxias fueron agrupadas en bins de  $\log(M_{200}/M_\odot)$  y, en cada bin, se calculó el valor medio

**Tabla 3.4.2:** Porcentajes con intervalos de confianza binomiales al 95 % de galaxias anilladas y de la muestra de control (CS) en grupos ricos y pobres con  $(M_u - M_r) > 2.2$ ,  $(M_g - M_r) > 0.84$  y ambas restricciones simultáneas.

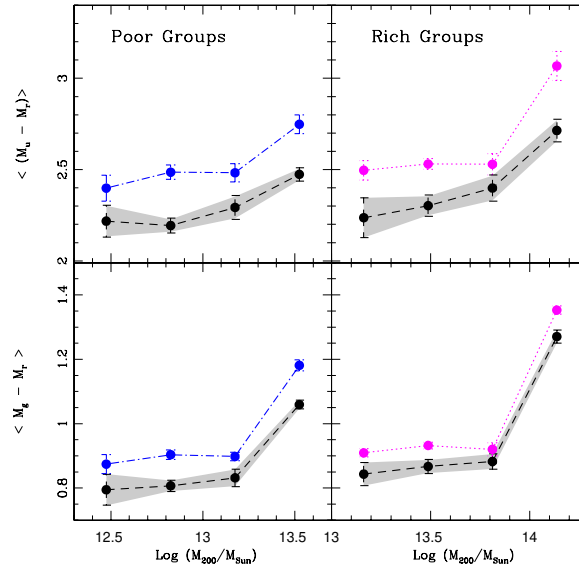
Restricciones	$(M_u - M_r) > 2.2$	$(M_g - M_r) > 0.84$	Ambas condiciones
% Anilladas en grupos pobres	75.56 ± 3.81	71.05 ± 4.02	68.38 ± 4.12
% CS en grupos pobres	49.03 ± 4.31	43.19 ± 4.27	40.86 ± 4.23
% Anilladas en grupos ricos	87.33 ± 5.34	86.00 ± 5.56	84.00 ± 5.86
% CS en grupos ricos	58.54 ± 8.58	56.10 ± 8.64	52.85 ± 8.69

del índice de color. Las bandas sombreadas representan las incertidumbres estimadas mediante el método Bootstrap. Para referencia, también se muestran los resultados correspondientes a las muestras de control (líneas punteadas).

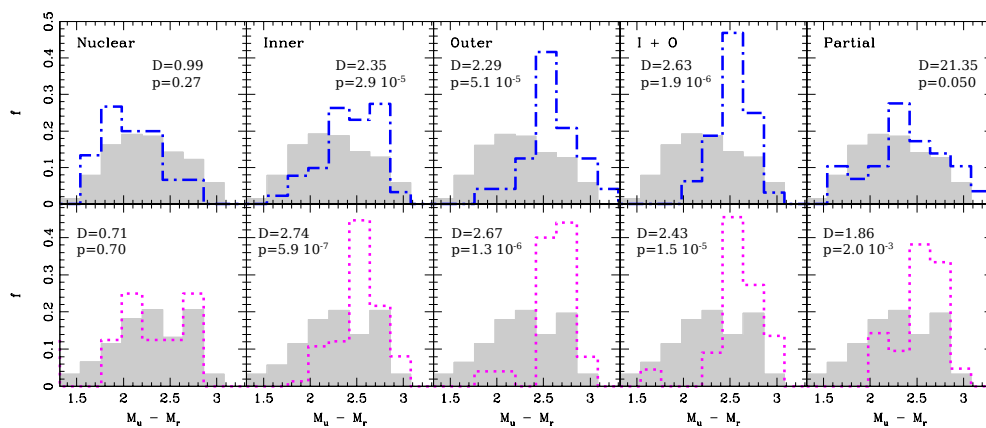
Se observa que, masas de grupo mayores, las galaxias presentan colores progresivamente más enrojecidos (mayores valores de  $M_u - M_r$  y  $M_g - M_r$ ). Asimismo, a masa de grupo fija, las galaxias con estructuras anilladas exhiben colores sistemáticamente más rojos que las galaxias sin anillos de sus respectivas muestras de control. Adicionalmente, las galaxias en grupos ricos con  $\log(M_{200}/M_\odot) > 13.8$  alcanzan los valores más elevados de enrojecimiento, siendo esta tendencia especialmente evidente en la muestra de galaxias anilladas.

En la Fig. 3.4.7, nuestro objetivo fue realizar un análisis detallado del impacto de los distintos tipos de anillos sobre las tendencias de color observadas en galaxias que habitan en entornos grupales. Presentamos las distribuciones de  $M_u - M_r$  de galaxias que exhiben distintos tipos de anillos en grupos pobres y ricos, comparadas con sus respectivas muestras de control. Es evidente que las galaxias con diferentes tipos de anillos muestran colores más rojos en comparación con las galaxias sin estructuras anilladas excepto para estructura nucleares donde no hay diferencias. Esta tendencia es particularmente significativa en galaxias con anillos internos, externos e internos + externos en grupos ricos. Sin embargo, las galaxias espirales con anillos nucleares en grupos pobres presentan poblaciones más azules, comparables a las de su muestra de control correspondiente. Además, las comparaciones de las distribuciones de  $M_u - M_r$  en todos los paneles de la Fig. 3.4.7 entre las galaxias con diferentes tipos de anillos y sus muestras de control respectivas arrojaron un nivel de significancia del 99.99 %, mediante la estadística KS.

En nuestro estudio previo (Fernandez et al. 2021), informamos que las galaxias con anillos presentan diferencias significativas en sus propiedades respecto



**Figura 3.4.6:** Valores medios de  $M_u - M_r$  y  $M_g - M_r$  en función de las masas de los grupos. Paneles izquierdos: Galaxias con anillos en grupos pobres (líneas azul con trazo-punto) y sus respectivas muestras de control (líneas negras a trazo). Paneles derechos: Galaxias con anillos en grupos ricos (líneas magenta punteadas) y sus muestras de control (líneas negras a trazo) (Fig. 8 de (Fernandez et al. 2024)).



**Figura 3.4.7:** Distribuciones normalizadas de  $M_u - M_r$  para galaxias que exhiben distintos tipos de anillos (nucleares, internos, externos, internos+externos y parciales) en grupos pobres y ricos (paneles superiores e inferiores, respectivamente). Las distribuciones grises representan las muestras de control correspondientes (Fig. 9 de Fernandez et al. (2024)).

de aquellas sin anillos. Particularmente, encontramos un exceso de galaxias anilladas con colores rojos y que estos efectos son más pronunciados para galaxias que presentan anillos internos y barras, respecto a sus contrapartes con otros tipos de anillos y sin barras. Además, los diagramas color-magnitud y color-color mostraron que las galaxias con anillos están mayormente concentradas en la región roja, mientras que los objetos espirales sin anillos se ubicaban preferentemente hacia la zona azul. Estos resultados se reproducen tanto en grupos ricos como en grupos pobres. El hecho de encontrar tendencias consistentes en distintos entornos sugiere que la influencia del anillo sobre las propiedades globales de la galaxia sería más determinante que el efecto del entorno grupal en sí mismo. En otras palabras, la presencia de un anillo parecería constituir el factor dominante en la supresión de la formación estelar y en el envejecimiento de la población estelar, mientras que el entorno actuaría como un modulador secundario. Además, procesos comunes en entornos de alta densidad, como la presión de arrastre, la evaporación y las interacciones de marea que remueven gas de los discos (Hashimoto et al. 1998), pueden acelerar el consumo de gas en galaxias con anillos que residen en grupos. El consumo acelerado de gas en los anillos galácticos debido a interacciones de la galaxia anfitriona con el entorno puede afectar el color de la galaxia disminuyendo la formación de estrellas, envejeciendo y enrojeciendo la población estelar existente. Nuestros resultados difieren levemente de los de Kelvin et al. (2018), quienes clasificaron visualmente una muestra de galaxias en el universo local ( $z < 0.06$ ) con masas estelares en el rango de  $10.25 < \text{Log}(M_*/M_\odot) < 10.75$ , y examinaron variaciones en la estructura galáctica según la morfología y el color de la galaxia. Encontraron un exceso de galaxias con anillos en la **valle verde** en comparación con la **secuencia roja** y la **nube azul**. Por otro lado, autores como Holwerda et al. (2022) investigaron el agrupamiento de una muestra de galaxias del *Galaxy And Mass Assembly* (GAMA) en un mapa autoorganizado. Adoptaron el mismo criterio de color que Kelvin et al. (2018) para definir la región del **valle verde** (ver también Kelvin et al. 2018; Bremer et al. 2018), pero consideraron un rango de masas más amplio. Estos autores encontraron que la zona del **valle verde** está poblada por varias subpoblaciones intermedias de galaxias, compuestas por elípticas y espirales. Además, las múltiples poblaciones de la zona del **valle verde**, intercaladas entre las poblaciones rojas y azules en el mapa

autoorganizado, apoyan la idea de que la población de galaxias de la región del **valle verde** es una población intermedia que no representa necesariamente una transición de una población a otra, sino que ocupa un nicho entre las poblaciones galácticas principales.

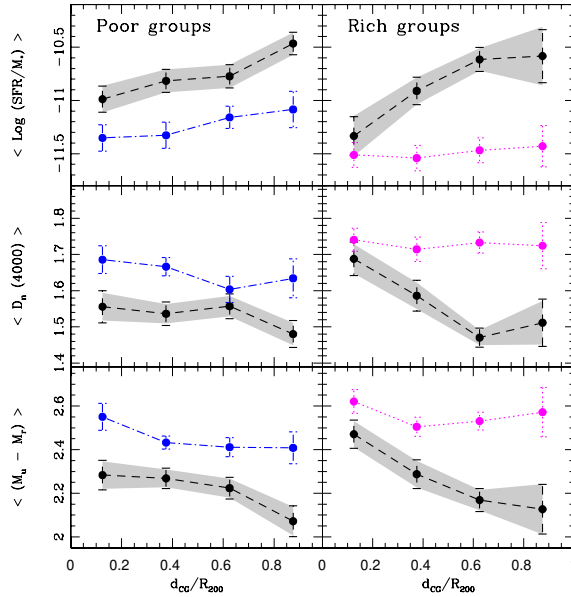
Cuando los autores [Holwerda et al. \(2022\)](#) restringieron su análisis al rango de masas usado por [Kelvin et al. \(2018\)](#) y [Bremer et al. \(2018\)](#), notaron que su muestra se reducía significativamente a galaxias rojas. De modo similar, nosotros también probamos restringiéndonos a este rango de masas y cortes de color (ver [Kelvin et al. \(2018\)](#)), lo que resultó en una disminución significativa de galaxias, dejándonos con casi ninguna galaxia en la **nube azul**. En este trabajo el valle verde se identifica de acuerdo con la separación observada entre la nube azul y la secuencia roja en los diagramas color-color y color-magnitud previamente definidos, considerando además un rango de masas más amplio y restringiendo el análisis a galaxias espirales. Considerando esto, creemos que cualquier diferencia entre nuestros resultados y los de [Kelvin et al. \(2018\)](#) podría atribuirse principalmente a los distintos criterios usados, tales como rangos de masa, umbrales de color para definir cada región, y la inclusión de galaxias elípticas en sus estadísticas, las cuales no fueron consideradas en este trabajo.

### 3.4.3. Dependencia con la distancia al centro del grupo y la densidad ambiental

En esta sección se explora la relación entre la actividad de formación estelar, el color y la edad de la población estelar en función de la distancia al centro del grupo y la densidad ambiental, con el fin de mejorar la comprensión de cómo se comportan las diferentes características de las galaxias con anillos en entornos grupales.

Está ampliamente establecido que las regiones centrales de los grupos y cúmulos están dominadas por galaxias con colores más rojos en comparación con aquellas situadas en las regiones más externas ([Rodríguez-Martín et al. 2022](#); [Mercurio et al. 2021](#)).

La Fig. 3.4.8 muestra la variación de los valores medios de  $\log(\text{SFR}/M_*)$ ,  $D_n(4000)$  y  $M_u - M_r$  en función de la distancia proyectada normalizada al centro del grupo,  $d_{CG}/R_{200}$ , tanto para galaxias con anillos como para aquellas

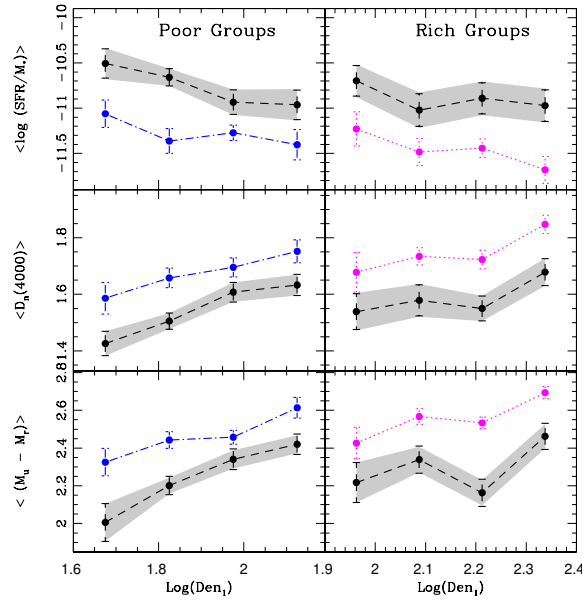


**Figura 3.4.8:** Valores medios de  $\text{Log}(\text{SFR}/M_*)$ ,  $D_n(4000)$  y  $M_u - M_r$  en función de la distancia normalizada al centro del grupo,  $d_{CG}/R_{200}$ . Paneles izquierdos: Galaxias con anillos en grupos pobres (líneas azul con trazo-punto) y su respectiva muestra de control (líneas negras a trazo). Paneles derechos: Galaxias con anillos en grupos ricos (líneas magenta punteadas) y su muestra de control (líneas negras a trazo) (Fig. 10 de [Fernandez et al. \(2024\)](#)).

sin anillos en grupos pobres y ricos. Para construir esta figura, las galaxias fueron agrupadas en bins de  $d_{CG}/R_{200}$  y, en cada bin, se calculó el valor medio del parámetro correspondiente. Las bandas sombreadas representan las incertidumbres estimadas mediante el método Bootstrap, obtenidas a partir del remuestreo con reemplazo dentro de cada bin.

Se puede observar que las galaxias con anillos presentan una menor actividad de formación estelar, poblaciones estelares más viejas y colores más rojos en comparación con sus contrapartes sin anillos de las muestras de control, a lo largo de todas las distancias al centro del grupo. Esta tendencia es más evidente en las galaxias con anillos ubicadas en grupos pobres. Sin embargo, resulta interesante notar que, en los grupos ricos, la distribución de estas propiedades a lo largo de todo el rango de distancias al centro del grupo se mantiene relativamente constante, lo que sugiere que la variación de dichas propiedades es independiente de la posición dentro de los grupos ricos.

Adicionalmente, se analizaron los valores medios de  $\text{Log}(\text{SFR}/M_*)$ ,  $D_n(4000)$  y



**Figura 3.4.9:** Valores medios de  $\text{Log}(\text{SFR}/M_*)$ ,  $D_n(4000)$  y  $(M_u - M_r)$  en función de la densidad ambiental,  $Den_1$ . Paneles izquierdos: Galaxias con anillos en grupos pobres (líneas azul de trazo-punto) y su respectiva muestra de control (líneas negras a trazo). Paneles derechos: Galaxias con anillos en grupos ricos (líneas magenta punteadas) y su muestra de control (líneas negras a trazo) (Fig. 11 de [Fernandez et al. \(2024\)](#)).

$M_u - M_r$  en función de la densidad ambiental ( $Den_1$ ) para galaxias con anillos en grupos pobres y ricos, así como para sus respectivas muestras de control (véase la Fig. 3.4.9). Se observa que, a medida que aumenta la densidad ambiental, las galaxias experimentan una disminución en la actividad de formación estelar, un incremento en la edad de la población estelar y un desplazamiento hacia colores más rojos. Asimismo, las galaxias con anillos, tanto en grupos pobres como ricos, presentan una actividad de formación estelar menos eficiente que las galaxias sin anillos de las muestras de control respectivas, en todos los rangos de densidad ambiental. Además, en todo el intervalo de  $Den_1$ , las galaxias con estructuras anilladas que residen en grupos pobres y ricos tienden a exhibir poblaciones estelares más viejas y rojizas en comparación con sus muestras de control correspondientes.

En este contexto, la menor actividad de formación estelar, las poblaciones estelares más antiguas y los colores más rojos observados en las galaxias con anillos en comparación con sus contrapartes sin anillos sugieren que la presencia de una estructura anillada podría ser indicativa de una historia de formación

---

o de una vía evolutiva diferente. Asimismo, la tendencia observada de una disminución en la actividad de formación estelar, un envejecimiento de la población estelar y un desplazamiento hacia colores más rojos con el aumento de la densidad ambiental es coherente con la idea de que las propiedades de las galaxias están influenciadas por el entorno que las rodea.

# Capítulo 4

## Galaxias anilladas en TNG50

Numerosos estudios han explorado diversos aspectos de las galaxias anilladas; sin embargo, persiste una brecha significativa en el examen detallado de sus propiedades dentro de simulaciones y su comparación con observaciones. Al abordar esta brecha, nuestro propósito es mejorar la comprensión sobre la formación y evolución de las galaxias anilladas. Como objetivo principal de este Capítulo se pretende analizar las propiedades de las galaxias anilladas simuladas y compararlas con los datos observacionales. Para tal propósito, utilizamos el catálogo de 807 galaxias anilladas descrito en el Capítulo 2, construido a partir de las simulaciones Illustris TNG50. Como se analizó previamente, este conjunto constituye una adecuada representación de las galaxias anilladas observacionales, lo que permite establecer comparaciones directas y coherentes entre datos empíricos y resultados de simulaciones.

### 4.1. Propiedades de las galaxias anilladas

Como punto inicial, para establecer una comparación entre las propiedades de galaxias anilladas simuladas y observadas (considerando parámetros como la actividad de formación estelar, el color y la metalicidad), organizamos nuestro catálogo obtenido a partir de Illustris TNG50 en cuatro grupos específicos, siguiendo la clasificación realizada para el catálogo de galaxias anilladas de SDSS: (i) galaxias con anillo interno, (ii) galaxias con otros tipos de anillos, como anillos dobles (i+o), externos o parciales, (iii) galaxias anilladas barradas, y (iv) galaxias anilladas no barradas ([Fernandez et al. 2021](#)).

En el caso de galaxias con anillos internos y otros tipos de anillos, ambos grupos pueden presentar barras o no. De igual forma, las galaxias anilladas barradas o no barradas pueden presentar cualquier tipo de anillo.

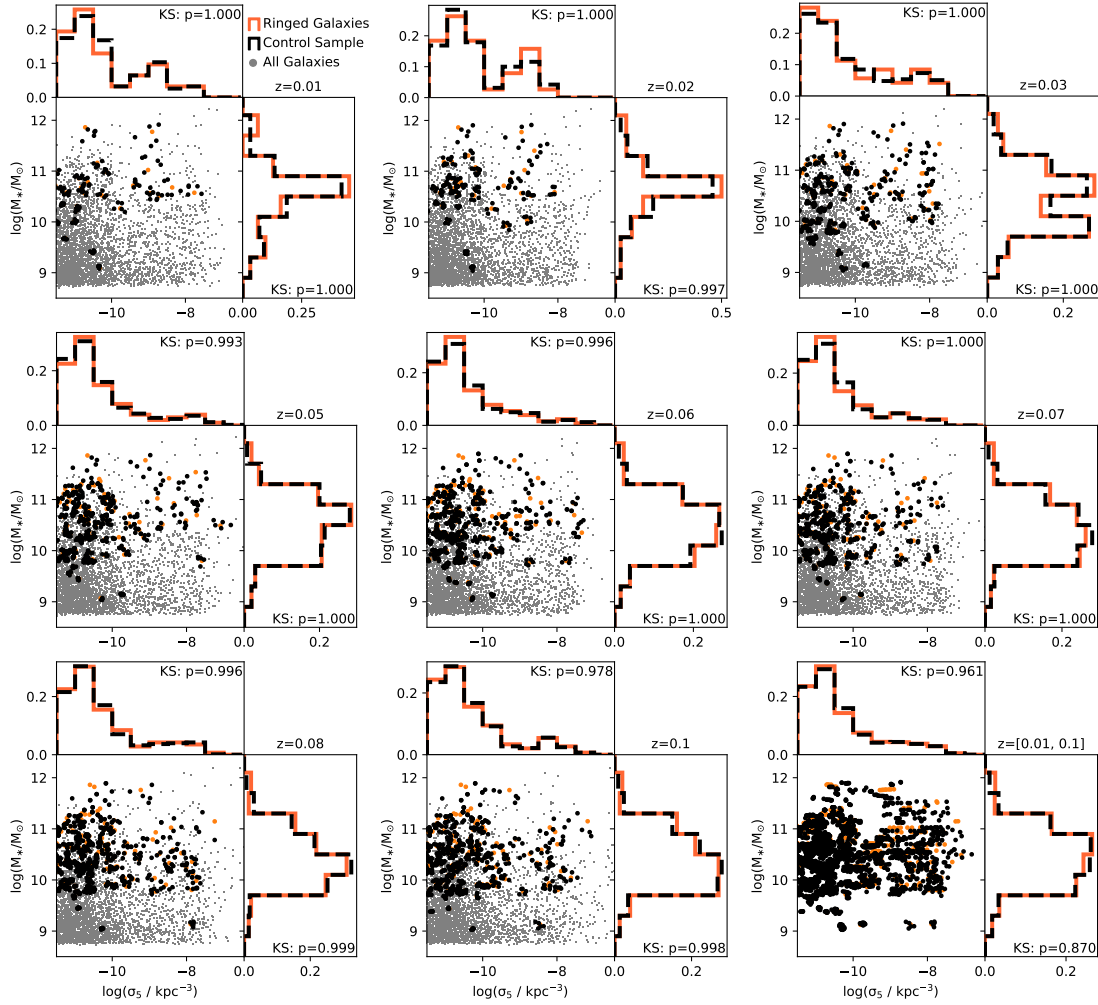
#### 4.1.1. Muestra Control

Para evaluar con precisión la relación entre los anillos y las propiedades de las galaxias simuladas que los albergan, así como para caracterizar estas estructuras anulares, establecimos una muestra de control adecuada basada en criterios análogos a los empleados en [Fernandez et al. \(2021\)](#). Restringimos nuestra selección a galaxias de disco simuladas sin anillos que coincidan con las distribuciones de corrimiento al rojo,  $M_\star$  y densidad ambiental de la muestra objetivo ([Perez et al. 2009](#)). Utilizamos  $\sigma_5 = 5/(\frac{4\pi}{3}d_5^3)$  como indicador de la densidad ambiental. Este valor fue calculado para cada galaxia de la muestra, en función de su distancia al quinto vecino galáctico más cercano con  $M_\star \geq 10^{10}M_\odot$  ( $d_5$ ).

Para construir una muestra de control para cada galaxia anillada clasificada, seleccionamos sus cinco galaxias no anilladas más cercanas en el espacio de parámetros  $\sigma_5 - M_\star$ , ubicadas al mismo corrimiento al rojo. Es importante señalar que la búsqueda de vecinas se llevó a cabo en un espacio de parámetros normalizado, donde cada dimensión fue escalada a la unidad, con el fin de evitar sesgos numéricos debido a las diferencias de escala entre las propiedades. Un total de 4035 galaxias de TNG50 conforman la muestra general de control.

Mediante el método descrito, obtuvimos galaxias de control con distribuciones en  $M_\star$  y  $\sigma_5$  similares a las de la muestra de galaxias anilladas, y seleccionadas en los mismos snapshots (valores discretos de  $z \leq 0.1$ ) que dichas galaxias. Esto fue corroborado mediante la aplicación de la prueba de bondad de ajuste KS, la cual arrojó valores de  $p > 0.05$  para la hipótesis nula en todos los corrimientos al rojo, lo que indica que las muestras objetivo y de control son subconjuntos de una misma distribución. En la Fig. 4.1.1 se observan la masa en función de la densidad local de las galaxias anilladas y sus correspondientes galaxias de control en cada salida de la simulación. Además, se incluyen las distribuciones marginales de cada propiedad. De esta forma, cualquier diferencia observada en las características de las galaxias puede estar asociada principalmente a la presencia de estructuras anilladas. En consecuencia, al comparar los resultados

de la muestra de control con los de las galaxias anillo, podemos explorar cómo se relacionan los procesos responsables de la formación de anillos con las propiedades de las galaxias. Además, esta comparación, permite distinguir los efectos propios de los anillos de otras variables que también inciden en la evolución galáctica.



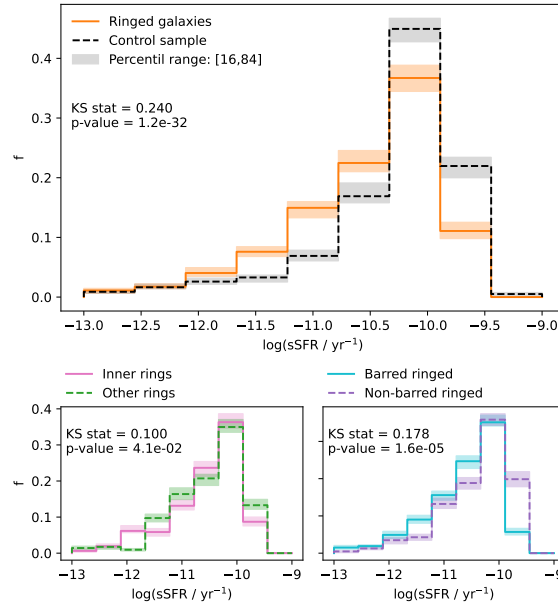
**Figura 4.1.1:** Disposición de galaxias con  $M_{\star} > 10^9 M_{\odot}$  en el espacio de parámetros  $\sigma_5 - M_{\star}$  (pequeños puntos grises). Para cada galaxia anillada (puntos naranja), se muestra su grupo de control de galaxias no anilladas (puntos negros, 5 vecinas más cercanas con el mismo valor  $z$ ). Los histogramas muestran las distribuciones de cada variable en cada redshift para las galaxias anilladas y sus respectivas muestras de control. Los valores de  $p$ , obtenidos mediante la prueba KS, representativos del ajuste de las distribuciones de ambas muestras para cada magnitud, se presentan en sus respectivos paneles (Fig. 2 de [Fernandez et al. \(2025\)](#)).

### 4.1.2. Actividad de formación estelar

Como se mencionó, en la simulación TNG50 evaluamos cuantitativamente la actividad de formación estelar considerando, para cada galaxia, su masa estelar total<sup>8</sup> y su tasa global de formación estelar. La primera se obtiene sumando la masa de todas las partículas estelares asignadas al subhalo y la segunda, sumando las tasas de formación estelar individuales de todas las células de gas dentro del subhalo<sup>1</sup>, respectivamente. En el presente estudio, utilizamos la sSFR calculada a partir de estas propiedades, lo que proporciona una medida directa de la tasa neta a la que se están formando nuevas estrellas a partir del gas dentro de estas subestructuras.

La Fig. 4.1.2 presenta las distribuciones del  $\log(\text{sSFR})$  global para galaxias con anillos y para la muestra de control. Además, se incluyen bandas que representan el rango percentil [16, 84], capturando el 68 % de la dispersión de los datos. Estas se calcularon mediante el método bootstrap, lo que permite visualizar la variabilidad en las distribuciones debida a la incertidumbre del muestreo. Como se observa en la figura, las distribuciones para las galaxias anilladas y la muestra de control presentan diferencias sistemáticas. En particular, las galaxias anilladas muestran valores menores de sSFR en comparación con la muestra de control. Esta diferencia puede cuantificarse utilizando la prueba KS, que revela una discrepancia significativa entre ambas distribuciones (estadístico  $\text{KS}=0.240$ ,  $\text{p-value}=1.2 \times 10^{-32}$ ). Las medianas de  $\log(\text{sSFR})$  son  $-10.36$  (IC95 %  $[-10.41, -10.31]$ ) para las galaxias anilladas y  $-10.14$  (IC95 %  $[-10.16, -10.12]$ ) para la muestra de control, sin superposición entre los intervalos de confianza. La escasa superposición entre las bandas de error bootstrap refuerza que las galaxias anilladas presentan una menor actividad de formación estelar en comparación con la muestra de control. En particular, la figura diferencia entre galaxias con anillos internos y otros tipos de anillos (subpanel inferior izquierdo), así como entre galaxias anilladas con y sin barras (subpanel inferior derecho). No obstante, las galaxias anilladas con anillo interno y barra presentan un leve desplazamiento hacia menores valores de sSFR en comparación con aquellas con otros tipos de anillos y sin barras. Esta observación se ve respaldada por los resultados de la prueba KS, que proporcionan soporte estadístico

<sup>1</sup>La tasa global de formación estelar se toma de la propiedad `SubhaloSFR` de la base de datos de IllustrisTNG.



**Figura 4.1.2:** Panel Superior: Distribuciones del  $\log(\text{sSFR})$  global para galaxias anilladas en comparación con la muestra de control. Paneles Inferiores: Distribuciones para galaxias con anillos internos versus otros tipos de anillos (panel izquierdo) y galaxias anilladas con barra versus sin barra (panel derecho) (Fig. 3 de [Fernandez et al. \(2025\)](#)).

para las diferencias detectadas en la sSFR entre estos subgrupos. Las galaxias con anillos internos presentan una mediana de  $\log(\text{sSFR}) = -10.39$  (IC95 %  $[-10.45, -10.33]$ ), mientras que aquellas con otros tipos de anillos presentan una mediana de  $-10.31$  (IC95 %  $[-10.39, -10.23]$ ), sugiriendo valores ligeramente menores de sSFR para las galaxias con anillos internos. Por su parte, las galaxias anilladas con barra presentan una mediana de  $\log(\text{sSFR}) = -10.45$  (IC95 %  $[-10.50, -10.39]$ ), mientras que aquellas sin barra presentan una mediana de  $-10.25$  (IC95 %  $[-10.32, -10.17]$ ), confirmando una actividad de formación estelar sistemáticamente menor en presencia de barra.

En la Fig. 4.1.3 se muestra la media de  $\log(\text{sSFR})$  calculada en bins de masa estelar para las distintas submuestras analizadas. En cada bin, el valor central corresponde a la media de los datos originales, mientras que las barras de error fueron estimadas mediante remuestreo Bootstrap (muestreo con reemplazo dentro de cada bin), utilizando  $N_{\text{boot}} = 1000$  realizaciones. La desviación estándar de las medias bootstrap se adoptó como incertidumbre asociada proporcionando información adicional sobre la influencia de características estructurales, como anillos y barras, en la actividad de formación estelar. Como

se observa en el panel izquierdo, para masas estelares  $\log(M_*/M_\odot) < 10.5$  las galaxias con anillos internos presentan valores medios de sSFR más bajos en comparación con aquellas con otros tipos de anillos y con la población general de galaxias anilladas. Sin embargo, en los bins de mayor masa ( $\log(M_*/M_\odot) \geq 10.5$ ), las diferencias entre submuestras resultan estadísticamente indistinguibles dentro de las incertidumbres ( $1\sigma$ ). Si bien ciertas investigaciones indican que la SFR en anillos externos es baja (Kostiuk and Sil'chenko 2016; Katkov et al. 2022), observamos que esta característica es aún más pronunciada en anillos internos. Estudios previos, como los de Grouchy et al. (2010), informaron que si bien las barras podrían concentrar gas en regiones resonantes y promover teóricamente la formación estelar en anillos internos, no necesariamente incrementaban la SFR global.

Además, el panel derecho de la Fig. 4.1.3 muestra los valores medios y sus errores bootstrap asociados para galaxias anilladas con y sin barra. Se observa que las galaxias anilladas con barra tienden a exhibir valores de sSFR ligeramente inferiores a sus contrapartes sin barra, una tendencia que es más notable en el bin de masa de  $\log(M_*/M_\odot) \approx 10,0$ . Si bien en el resto de los bins de masa las medias resultan estadísticamente indistinguibles debido al solapamiento de las barras de error (dentro de  $3\sigma$ ), la disposición de los valores medios sugiere una sSFR menor en presencia de una barra. Este resultado es similar al que encontramos anteriormente para galaxias anilladas de SDSS (Fernandez et al. 2021) y además concuerda con los hallazgos de Spindler (2018), que ilustran cómo la supresión de la actividad estelar puede estar relacionada con factores morfológicos y de masa.

La fracción de gas,  $f_{\text{gas}}$ , en las galaxias se define como  $f_{\text{gas}} = \frac{M_{\text{gas}}}{M_{\text{gas}} + M_\star}$ , donde  $M_{\text{gas}}$  es la masa de gas y  $M_\star$  es la masa estelar. Este parámetro sirve para cuantificar el estado evolutivo de una galaxia. En el contexto de la simulación TNG50, analizar  $f_{\text{gas}}$  en distintos tipos de galaxias permite entender cómo estas convierten su gas en estrellas a lo largo del tiempo. Un  $f_{\text{gas}}$  bajo indica típicamente una galaxia más evolucionada, en la que una fracción significativa del gas ha sido transformada en contenido estelar. Por el contrario, un  $f_{\text{gas}}$  alto sugiere una galaxia más joven o menos evolucionada, con gas abundante disponible para alimentar la formación estelar futura.

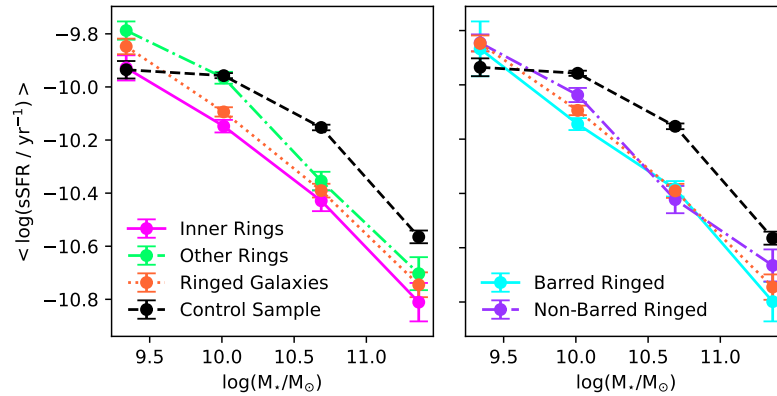
Examinar la relación entre  $f_{\text{gas}}$  y la sSFR en diferentes tipos de galaxias puede

proporcionar información sobre el rol que ciertas características estructurales desempeñan en la evolución galáctica. La Fig. 4.1.4 muestra cómo varían los valores medios de  $f_{\text{gas}}$  y del  $\log(\text{sSFR})$  entre galaxias con distintos tipos de anillos y a lo largo de distintas escalas de masa, ofreciendo información valiosa sobre los mecanismos que regulan la formación estelar en galaxias. El panel superior de la figura muestra que fracciones de gas más altas corresponden generalmente a sSFR más elevadas, subrayando el papel crucial de la disponibilidad de gas en la actividad de formación estelar. Cabe destacar que esta relación se mantiene similar tanto para la muestra de control como para las galaxias anilladas (independientemente del tipo de anillo o la presencia de barra), sin que se observen diferencias significativas en el comportamiento de esta correlación entre los distintos subgrupos. Por otro lado, el panel inferior de la Fig. 4.1.4 analiza la fracción de gas en función de la masa estelar. Se observa que las galaxias con anillos internos presentan una menor  $f_{\text{gas}}$  promedio comparadas con la muestra de control únicamente en el rango de masas intermedias ( $\sim 10^{10} M_{\odot}$ ). En los extremos de baja y alta masa, estas diferencias se diluyen o incluso se invierten. Un patrón similar ocurre al comparar galaxias con anillos internos frente a otros tipos de anillos, así como entre galaxias con y sin barra: las diferencias solo son apreciables en el rango de masa de  $10^{10} M_{\odot}$ , siendo prácticamente indistinguibles en el resto de la escala. Estos resultados sugieren que, si bien las estructuras como barras y anillos pueden influir en la redistribución del gas y afectar la evolución galáctica (Kormendy and Kennicutt 2004; Newnham et al. 2020), su impacto en la fracción de gas disponible parece estar acotado a rangos de masa específicos. Es importante destacar que las fracciones de gas notablemente más altas observadas en el extremo inferior de masa para las galaxias anilladas podrían estar influenciadas por el tamaño reducido de la muestra en dicho rango, por lo que estos valores deben interpretarse con cautela.

### 4.1.3. Colores

Utilizando las magnitudes estelares en las bandas U, B, V, K, g, r, i y z provistas por la simulación TNG50<sup>2</sup>, investigamos los colores de las galaxias con el fin

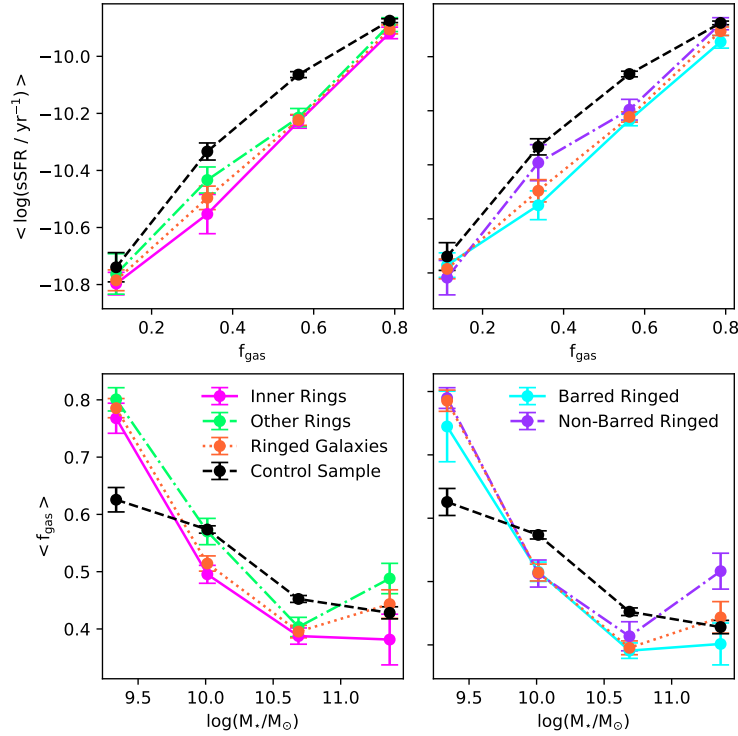
<sup>2</sup>Las magnitudes utilizadas corresponden a la propiedad SubhaloStellarPhotometrics de la base de datos TNG50, definidas como las luminosidades sumadas de todas las partículas estelares del subhalo en ocho bandas.



**Figura 4.1.3:** Media del  $\log(\text{sSFR})$ , con errores bootstrap, en función de la masa estelar. Panel Izquierdo: Valores medios correspondientes al conjunto total de galaxias anilladas, a las galaxias con anillo interno, a galaxias con otros tipos de anillos y a la muestra de control. Panel Derecho: Valores medios para galaxias anilladas con y sin barra (Fig. 4 de [Fernandez et al. \(2025\)](#)).

de comprender mejor su estado evolutivo y sus características estructurales ([Feldmann et al. 2017a](#); [Pandey and Sarkar 2020](#)). Las magnitudes en las bandas U, B y V están expresadas en magnitudes Vega y se describen en [Buser \(1978\)](#). Para la banda infrarroja K, se utilizaron los detectores IR del telescopio Palomar de 200 pulgadas, también basadas en magnitudes Vega, mientras que las magnitudes en las bandas g, r, i y z se calcularon utilizando las funciones de respuesta de la cámara del SDSS, con una masa de aire de 1.3 medida en junio de 2001, y están expresadas en magnitudes AB. Los detalles técnicos y la implementación de estos filtros pueden encontrarse en la Sección 3.2.1 de [Stoughton et al. \(2002\)](#).

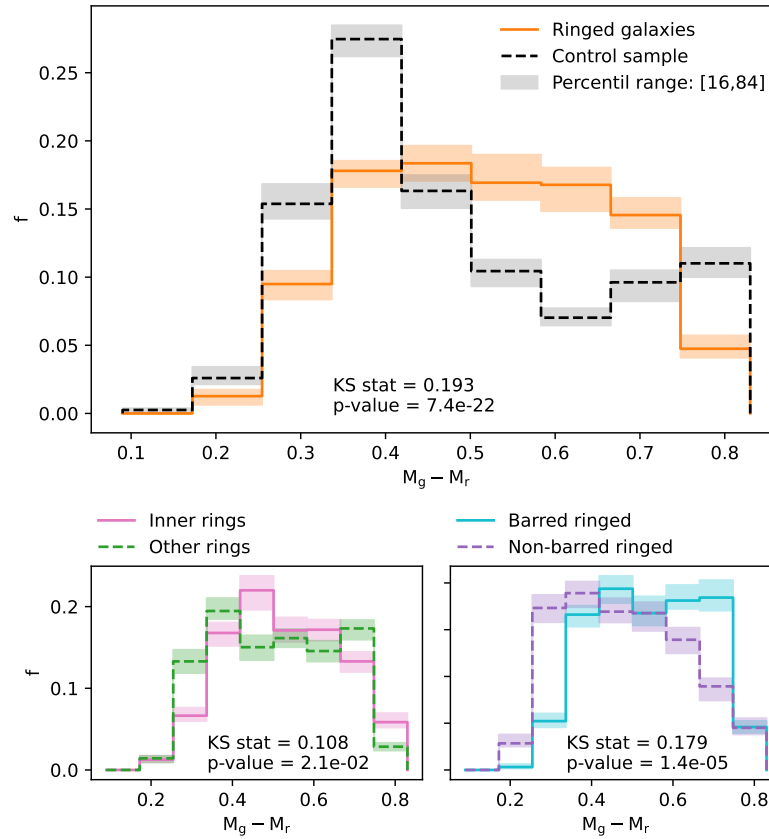
Examinamos las distribuciones de  $M_g - M_r$  entre galaxias anilladas y la muestra de control, como se ilustra en la Fig. 4.1.5. La distribución del color en las galaxias anilladas exhibe un desplazamiento hacia colores más rojos en comparación con la muestra de control. Las medias y sus respectivos intervalos de confianza al 95 % reflejan esta tendencia: las galaxias anilladas presentan un color medio de  $\langle M_g - M_r \rangle = 0,5216$  [IC 95 %: 0.5117, 0.5315], mientras que la muestra de control es más azul, con una media de 0,4836 [IC 95 %: 0.4785, 0.4888], lo cual sugiere una diferencia significativa en la edad estelar y la historia de formación estelar respecto a las galaxias de control. En este contexto, las galaxias anilladas presentan una población estelar más evolucionada y rojiza. Este resultado está respaldado por el valor de la prueba KS, la escasa superposición entre



**Figura 4.1.4:** Media del  $\log(\text{sSFR})$  en función de la  $f_{\text{gas}}$  (paneles superiores) y valores medios de  $f_{\text{gas}}$  en función de la masa estelar (paneles inferiores). Paneles Izquierdos: Valores medios para todas las galaxias anilladas, galaxias con anillo interno, galaxias con otros tipos de anillos y galaxias de la muestra de control. Paneles Derechos: Valores medios para galaxias anilladas con barra y sin barra. Se presentan los respectivos errores bootstrap (Fig. 5 de [Fernandez et al. \(2025\)](#)).

las bandas de error bootstrap de las distribuciones y su consistencia con los hallazgos observacionales obtenidos anteriormente, donde las galaxias anilladas presentaban una clara tendencia hacia colores más rojos en comparación con las galaxias sin anillos. Este patrón también se observó en galaxias con estructuras anilladas habitando entornos de alta densidad, como se demostró en el capítulo anterior ([Fernandez et al. 2021, 2024](#)).

El panel inferior izquierdo de la Fig. 4.1.5 muestra la distribución del color para galaxias con anillos internos frente a aquellas con otros tipos de anillos. Los datos revelan que, si bien todas las galaxias anilladas tienden en general a ser más rojas, aquellas con anillos internos presentan un índice de color ligeramente más rojo que las galaxias con otros tipos de anillos. El valor medio del color para las galaxias con anillos internos es  $\langle M_g - M_r \rangle = 0.5278$ , [IC 95 %: 0.5153, 0.5404], comparado con  $\langle M_g - M_r \rangle = 0.5126$ , [IC 95 %: 0.4967, 0.5285] para otros tipos de anillos. Esto podría implicar que las galaxias con anillos internos reducen



**Figura 4.1.5:** Panel Superior: Distribuciones de color,  $M_g - M_r$ , de las galaxias anilladas en comparación con la muestra de control. Paneles Inferiores: Distribuciones de color de las galaxias con anillo interno en comparación a otros tipos de anillos (izquierda) y de las galaxias anilladas con y sin barra (derecha) (Fig. 6 de [Fernandez et al. \(2025\)](#)).

el gas de forma más eficiente, lo que lleva a una transición más rápida hacia colores más rojos, especialmente en aquellas de mayor masa, como se observó en la sección anterior. Además, la comparación de los colores entre galaxias anilladas con y sin barra (panel inferior derecho) muestra que las galaxias anilladas con barra tienden a tener un índice de color más rojo que aquellas sin barra ( $\langle M_g - M_r \rangle = 0.5421$ , IC 95%: [0.5304, 0.5538] vs  $\langle M_g - M_r \rangle = 0.4848$ , IC 95%: [0.4678, 0.5019]).

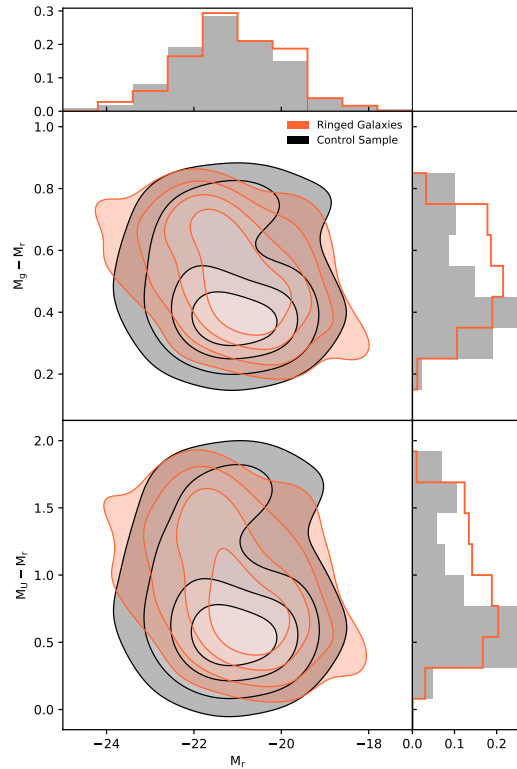
En el panel superior de la Fig. 4.1.6, se presenta el gráfico de contornos para  $M_g - M_r$  frente a  $M_r$ , donde puede observarse que las galaxias anilladas presentan una distribución más extendida en el índice de color  $M_g - M_r$  en relación con la muestra control. Los contornos indican que las galaxias anilladas cubren un rango más amplio de valores de color a magnitudes comparables. Por

el contrario, la muestra de control presenta una distribución más concentrada hacia colores relativamente más azules, lo cual también se aprecia en las distribuciones marginales de color. Este comportamiento sugiere que las galaxias anilladas pueden albergar poblaciones estelares con una mayor diversidad en sus propiedades fotométricas, posiblemente asociada a diferentes historias de formación y evolución estelar.

De manera similar, el gráfico de contornos presentado en el panel inferior de la Fig. 4.1.6 demuestra nuevamente que las galaxias anilladas presentan una distribución más amplia en el índice de color  $M_U - M_r$  en comparación con la muestra de control, particularmente en el rango de magnitudes más brillantes de  $M_r$ . Estos resultados sugieren que las galaxias anilladas presentan una mayor dispersión en sus propiedades fotométricas de color.

Los resultados obtenidos indican que las galaxias anilladas presentan, en promedio, colores ligeramente más rojos que la muestra de control, así como una mayor dispersión en sus índices de color en los diagramas color-magnitud. Esta tendencia se observa tanto en el análisis estadístico de las distribuciones de  $M_g - M_r$  como en los diagramas de contornos mostrados en la Fig. 4.1.6, donde las galaxias anilladas cubren un rango más amplio de valores de color, mientras que la muestra de control se concentra hacia colores relativamente más azules. Asimismo, dentro de la población de galaxias anilladas, aquellas que presentan anillos internos y aquellas que poseen barras muestran, en promedio, índices de color ligeramente más rojos que el resto de las galaxias anilladas. Este comportamiento sugiere que ciertos procesos dinámicos asociados a estas estructuras podrían estar relacionados con diferencias en la historia de formación estelar de estas galaxias.

En conjunto, estos resultados son consistentes con un escenario en el cual las galaxias anilladas tienden a albergar poblaciones estelares relativamente más evolucionadas o a presentar historias de formación estelar distintas respecto de galaxias sin anillos. La presencia de estructuras anilladas podría estar vinculada a procesos dinámicos internos (como resonancias inducidas por barras o redistribución del gas en el disco) que influyen en la evolución estelar y en las propiedades fotométricas globales de las galaxias.



**Figura 4.1.6:** Diagramas de color-magnitud. Panel Superior: Gráficos de contorno de  $M_g - M_r$  vs.  $M_r$  de galaxias anilladas en comparación con la muestra de control. Panel Inferior: Gráficos de contorno de  $M_U - M_r$  vs.  $M_r$  para las mismas muestras. Los contornos abarcan el 25 %, 50 %, 75 % y 90 % de los datos de cada muestra (Fig. 7 de [Fernandez et al. \(2025\)](#)).

#### 4.1.4. Metalicidad

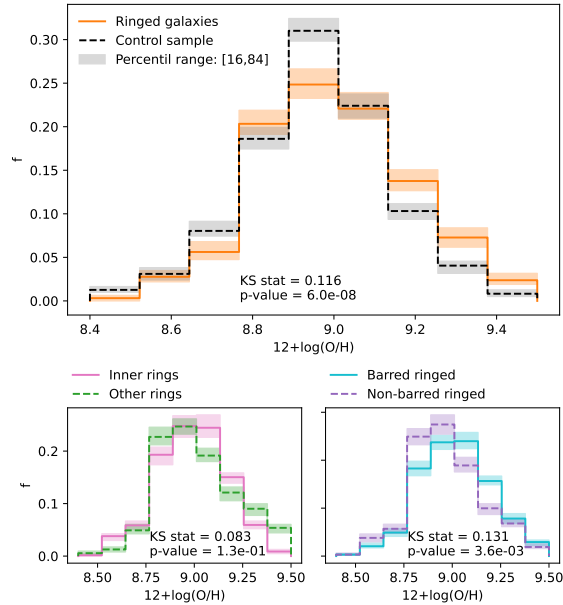
La metalicidad del gas es un indicador crucial del historial de enriquecimiento químico de las galaxias. En este trabajo, la metalicidad se estimó utilizando la razón de abundancia oxígeno-hidrógeno,  $12 + \log(\text{O}/\text{H})$ . Específicamente, utilizamos la abundancia atómica calculada a partir de la fracción de masa total de cada elemento en las celdas de gas formadoras de estrellas, ponderada por la tasa de formación estelar de cada celda<sup>3</sup>. Este enfoque nos permite rastrear los procesos de enriquecimiento asociados a la formación estelar y a la evolución dentro de las galaxias.

La Fig. 4.1.7 muestra la distribución de metalicidad para las galaxias anilladas en comparación con la muestra de control. Aunque el histograma permite

<sup>3</sup>La magnitud corresponde a `SubhaloGasMetalFractionsSfrWeighted` en la base de datos TNG50.

visualizar la forma general de ambas distribuciones, la diferencia entre ellas se cuantificó mediante estadísticas descriptivas y la prueba KS. Los resultados revelan que las galaxias anilladas son ligeramente más ricas en metales que aquellas en la muestra de control, con una metalicidad media de  $\langle 12 + \log(\text{O}/\text{H}) \rangle = 9.001$  ( $\text{IC}_{95\%} = [8.988, 9.014]$ ), mientras que la muestra de control presenta  $\langle 12 + \log(\text{O}/\text{H}) \rangle = 8.972$  ( $\text{IC}_{95\%} = [8.968, 8.977]$ ). Por otro lado, el resultado de la prueba KS, arroja un estadístico de 0.116 y un valor  $p$  de  $6.0 \times 10^{-8}$ , indicando que aunque ambas distribuciones son estadísticamente diferentes, sus rangos de metalicidad se superponen ampliamente. Además, las bandas percentiles ( $[16,84]$ ) mostradas en la figura indican que ambas poblaciones presentan un rango de dispersión similar en metalicidad, con una superposición considerable entre sus distribuciones. Esto sugiere que, si bien las galaxias anilladas tienden a presentar valores medios ligeramente mayores de metalicidad, ambas poblaciones ocupan esencialmente el mismo intervalo global de metalicidades.

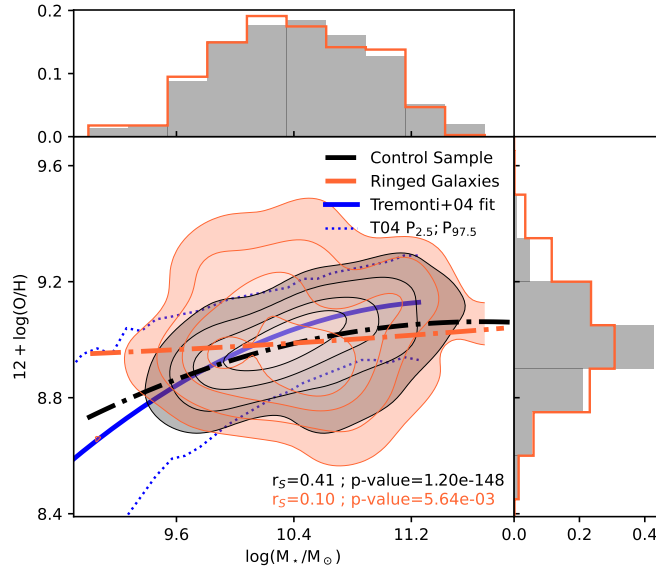
Ampliando el análisis, la Fig. 4.1.7 (panel inferior izquierdo) explora las diferencias en metalicidad entre galaxias con anillos internos y aquellas con otros tipos de anillos. Los resultados de los valores medios arrojan  $\langle 12 + \log(\text{O}/\text{H}) \rangle = 8.993$  ( $\text{IC}_{95\%} = [8.977, 9.009]$ ) para galaxias con anillos internos y  $\langle 12 + \log(\text{O}/\text{H}) \rangle = 9.012$  ( $\text{IC}_{95\%} = [8.990, 9.034]$ ) para galaxias con otros tipos de anillos. Además, la prueba KS arroja un estadístico de 0.083 y un valor  $p$  de 0.130, lo cual indica que, si bien existe una diferencia en la distribución de metalicidades entre estos dos grupos, esta no es estadísticamente significativa. El panel inferior derecho de la misma figura muestra la distribución de metalicidad entre galaxias anilladas con y sin barra. Las galaxias barradas presentan una metalicidad media de  $\langle 12 + \log(\text{O}/\text{H}) \rangle = 9.012$  ( $\text{IC}_{95\%} = [8.996, 9.029]$ ), mientras que las galaxias anilladas sin barra presentan  $\langle 12 + \log(\text{O}/\text{H}) \rangle = 8.980$  ( $\text{IC}_{95\%} = [8.958, 9.002]$ ). El resultado de la prueba KS indica una diferencia pronunciada, con un estadístico de 0.131 y un valor  $p$  de 0.004, lo que sugiere que las galaxias anilladas con barra tienen una distribución de metalicidad significativamente diferente y más elevada en comparación con las anilladas sin barra. Esto podría reflejar el rol de la barra en dirigir gas hacia las regiones centrales, promoviendo así una formación estelar inicial en el centro y un enriquecimiento metálico subsecuente. Asimismo, este resultado es consistente con los hallazgos obtenidos



**Figura 4.1.7:** Panel Superior: Distribuciones de  $12+\log(\text{O}/\text{H})$  de las galaxias anilladas en comparación con la muestra de control. Paneles Inferiores: Distribuciones de metalicidad de las galaxias con anillo interno frente a otros tipos de anillos (izquierda) y de las galaxias anilladas con y sin barra (derecha) (Fig. 8 de [Fernandez et al. \(2025\)](#)).

anteriormente utilizando datos observacionales de SDSS para galaxias anilladas con barra ([Fernandez et al. 2021](#)).

Finalmente, la Fig. 4.1.8 ilustra la relación **masa-metalicidad** (MZR, *Mass–Metallicity Relation*) para galaxias anilladas y la muestra de control. La figura revela que las galaxias anilladas presentan una mayor variabilidad en la metalicidad en comparación con las galaxias no anilladas para una misma  $M_\star$ . La mayoría de los miembros de la muestra de control ( $\sim 90\%$ ) están en buen acuerdo con la relación encontrada por [Tremonti et al. \(2004\)](#), representada por la línea azul continua, quienes utilizaron imágenes y espectroscopía del SDSS para estudiar la relación entre la masa estelar y la metalicidad del gas en  $\sim 53000$  galaxias formadoras de estrellas en  $z \sim 0.1$ , donde el 95% de los datos se encuentran contenidos entre las líneas azules punteadas. Sin embargo, esto no ocurre para las galaxias anilladas, que exhiben una débil correlación entre la metalicidad y  $M_\star$ , como lo muestra el coeficiente de Spearman calculado de  $r_s = 0.10$  (valor  $p = 5.64 \times 10^{-3}$ ). Para comparar las tendencias de ambas muestras, estimamos ajustes polinomiales de segundo grado utilizando una



**Figura 4.1.8:** Diagrama masa-metalicidad y distribuciones de masa y metalicidad para galaxias anilladas (naranja) y galaxias de muestra de control (negro). Los contornos encierran el 25 %, 50 %, 75 % y 90 % de los datos de cada muestra. Las líneas discontinuas son ajustes polinómicos de grado 2 calculados mediante una regresión de Theil-Sen. La línea azul continua muestra la relación obtenida por Tremonti et al. (2004) y las líneas discontinuas encierran el 95 % de los datos del SDSS utilizados en dicho trabajo (Fig. 9 de Fernandez et al. (2025)).

regresión Theil-Sen<sup>4</sup> (líneas a trazos y puntos). Observamos una fracción relevante de galaxias de alta masa con baja metalicidad en las galaxias de Illustris TNG50, que produce una MZR más suave en contraste con la observada. No obstante, a baja masa, las galaxias anilladas exhiben un sesgo considerable hacia mayores metalicidades, lo que da lugar a una relación masa-metalicidad notablemente aplanada.

Al analizar galaxias del relevamiento MaNGA y de la simulación *Evolution and Assembly of Galaxies and their Environments* (EAGLE, Schaye et al. (2015)), Jara-Ferreira et al. (2024) encontraron una dependencia adicional de la MZR en los gradientes de metalicidad ( $\nabla(O/H)$ ), con dos regímenes diferenciados para galaxias con masas menores o mayores que  $\log(M_*/M_\odot) \sim 9.75$ . Las galaxias de baja masa con un fuerte gradiente negativo  $\nabla(O/H)$  están consistentemente más enriquecidas que la MZR promedio y presentan alta actividad de formación estelar, independientemente de la densidad superficial estelar. Además, Tissera

<sup>4</sup>El estimador de Theil-Sen utiliza una generalización de la mediana en múltiples dimensiones, lo que lo hace robusto frente a valores atípicos multivariados en problemas de baja dimensión, ver apéndice A1

[et al. \(2016\)](#) observaron que la gran dispersión en los gradientes de metalicidad como función de  $M_\star$  podría atribuirse tanto a los efectos de procesos dinámicos como a aquellos que regulan la conversión de gas en estrellas. En este contexto, nuestros resultados podrían sugerir la existencia de procesos evolutivos diferenciados que afectan a galaxias anilladas y no anilladas.

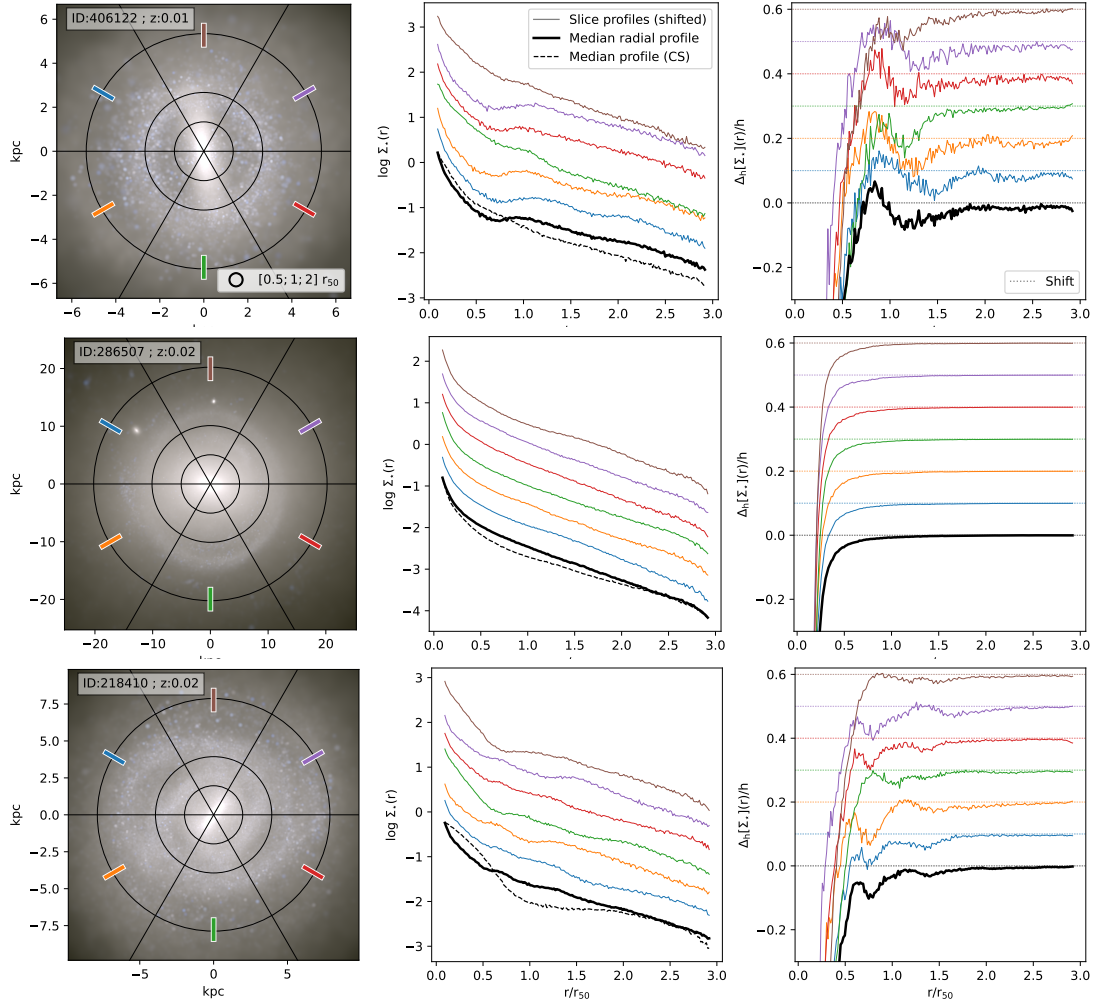
## 4.2. Análisis Estructural de las galaxias con anillos

### 4.2.1. Perfiles radiales

Luego de la identificación visual y clasificación de las galaxias anilladas en TNG50 y del estudio de sus propiedades globales en comparación con galaxias similares sin anillos, las muestras obtenidas nos permiten caracterizar cuantitativamente las características estructurales de las distintas clases de anillos. Con este objetivo, calculamos la densidad superficial de masa estelar proyectada en el plano galáctico como función de la distancia al baricentro,  $\Sigma_\star(r)$ . [Wang and Lilly \(2023\)](#) muestran que las galaxias de TNG50 que pertenecen a la secuencia principal de formación estelar (SFMS; con  $\text{sSFR} \gtrsim 10^{-12} \text{ yr}^{-1}$  and  $\log(M_\star/M_\odot h^{-1}) > 9.5$ ), exhiben perfiles radiales que describen adecuadamente discos exponenciales con un núcleo (o bulbo) de Sérsic en el centro galáctico. Esto parece concordar bien con observaciones sobre la distribución estelar en galaxias de disco ([Pohlen and Trujillo 2006](#); [Meert et al. 2013](#)).

La presencia de un anillo en el disco de la galaxia puede identificarse mediante un abultamiento en su perfil exponencial, el cual también puede presentar características distintivas correspondientes a los tres tipos generales definidos por [Pohlen and Trujillo \(2006\)](#) y [Erwin et al. \(2008\)](#), dependiendo del quiebre observado.

Para evitar que estructuras compactas y masivas presentes en el disco galáctico generen una señal en el perfil radial global que pueda confundirse con la existencia de un anillo, o que oculten dicha señal, dividimos la proyección frontal de la galaxia en seis secciones triangulares idénticas, adyacentes y no superpuestas, y calculamos el perfil de densidad superficial de masa en cada sección. Ejemplos del resultado de este procedimiento pueden observarse en la [Fig. 4.2.1](#), para una galaxia con anillo interno (fila superior), con anillo externo



**Figura 4.2.1:** Ejemplos de perfiles radiales de densidad de masa superficial de galaxias anilladas. Columna Izquierda: Proyección frontal de una galaxia con un anillo interior (fila superior), un anillo exterior (fila central) y anillos i+o (fila inferior), junto con la malla polar que define las secciones azimutales utilizadas para calcular los perfiles. Columna Central: Perfiles radiales correspondientes a cada sección, identificados con el color que denota sus secciones en la cuadrícula y desplazados a lo largo del eje  $y$ . Los perfiles globales de la galaxia anillada y su grupo de control se representan mediante líneas negras continuas y discontinuas. Columna Derecha: Derivadas de los perfiles (Fig. 10 de [Fernandez et al. 2025](#)).

(fila central) y con anillos i+o (fila inferior). En la primera columna se muestra la perspectiva frontal de cada tipo de galaxia, sobre la cual se visualiza la cuadrícula utilizada para calcular los perfiles de masa. Estos se presentan en la columna del medio, en unidades de  $r/r_{50}$  de la galaxia, y se identifican con los colores que denotan las diferentes secciones de la cuadrícula. Para facilitar su observación, cada perfil se ha desplazado ligeramente del resto en el eje de ordenadas. Los perfiles globales del sistema anillado y de sus galaxias correspondientes de la muestra de control están representados por líneas negras continua y discontinua, respectivamente.

Particularmente para galaxias con barra, observamos que los perfiles que mapean tales estructuras presentan una caída más suave en comparación con aquellos que no son atravesados por la barra. Al construir un perfil general mediante la mediana, a lo largo del radio, de las distintas contribuciones azimutales calculadas para cada galaxia, se puede atenuar el predominio de alguna de ellas debido a su concentración de masa.

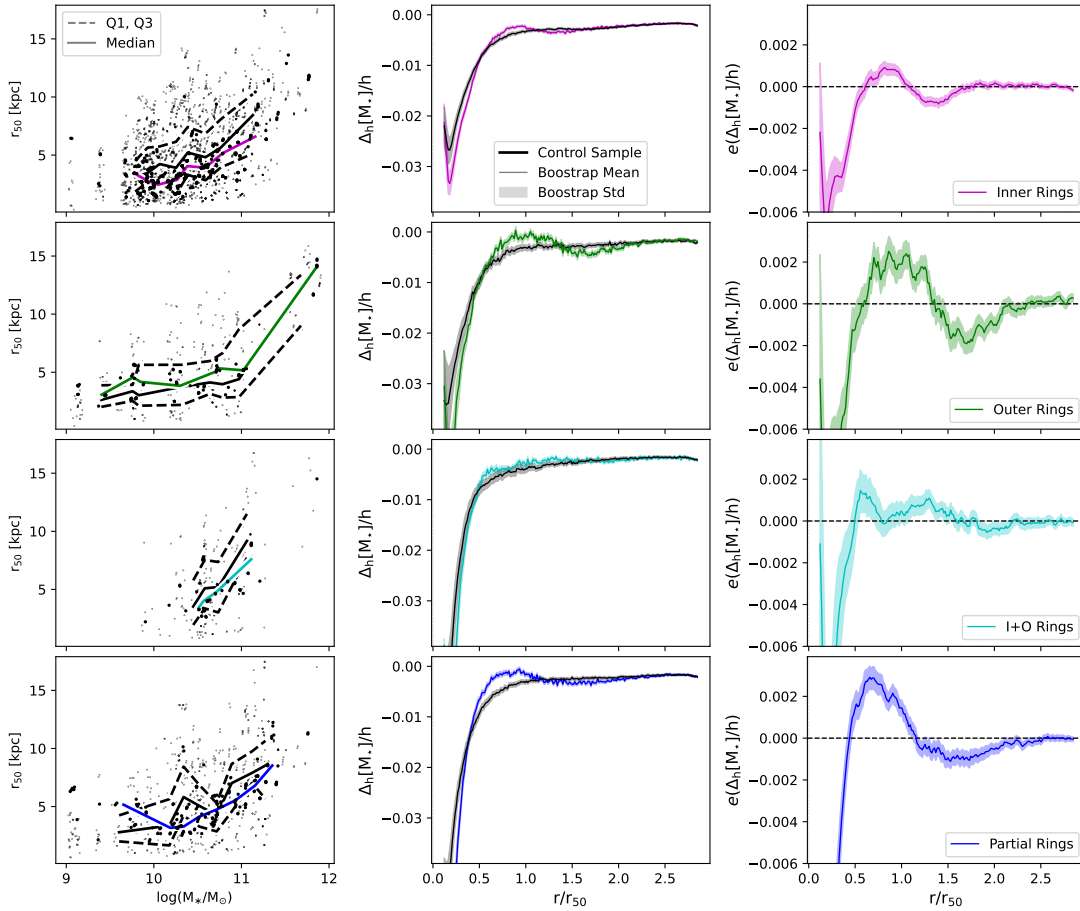
En estos ejemplos, especialmente en las galaxias con anillo interno más robusto, puede apreciarse cómo los perfiles exhiben una prominencia en el radio donde se visualizan estas estructuras. Tal alteración puede identificarse como un cambio marcado en la pendiente local del perfil en el entorno radial próximo al anillo. Luego, podemos aproximar esta derivada utilizando diferencias finitas hacia adelante<sup>5</sup>. Las curvas resultantes  $\Delta_h[\Sigma_\star](r)/h$ <sup>6</sup>, se muestran en la columna derecha de la Fig. 4.2.1 (también desplazadas ligeramente en valor según las líneas horizontales punteadas), y en ellas se observa cómo el conglomerado de estrellas que forma el anillo produce pendientes más planas o incluso positivas en los perfiles radiales.

### 4.2.2. Formatos de los anillos

Wang and Lilly (2023) usaron el  $r_{50}$  como un *proxy* del tamaño galáctico y encontraron que, para galaxias TNG50 en  $z \sim 0$ , la tendencia general de la relación masa-tamaño concuerda bien con la observada a lo largo de cuatro órdenes de magnitud en masa estelar, aunque con un exceso de aproximadamente 0.11 dex en el extremo de alta masa,  $M_\star > 10^{10} M_\odot h^{-1}$ . La

<sup>5</sup> $\Delta_h[f](x) = f(x + h) - f(x)$

<sup>6</sup> $\Delta_h[\Sigma_\star]/h = [\Sigma_\star(r + h) - \Sigma_\star(r)]/h$



**Figura 4.2.2:** Columna Izquierda: relación masa-tamaño para los diferentes tipos de galaxias anilladas (anillos internos, externos, i+o y parciales) con sus respectivas muestras de control. Las líneas sólidas muestran las tendencias medianas para cada muestra, construidas a partir de un binned en masas estelares, mientras que las líneas discontinuas encierran el rango intercuartílico de cada distribución de control. Columnas Central y Derecha: media bootstrap y desviación estándar del apilado, en función de  $r_{50}$ , de las pendientes del perfil de masa radial y residuales obtenidos al aproximar el perfil de pendientes de una galaxia anillada por la mediana de aquellas de su grupo de control (Fig. 11 de (Fernandez et al. 2025)).

columna izquierda de la Fig. 4.2.2 muestra la relación masa-tamaño para los diferentes tipos de galaxias anilladas con sus respectivas muestras de control. Observamos que, en general, la mediana de  $r_{50}$  de las galaxias con anillos externos es similar o ligeramente mayor que la de su grupo de control a la misma masa. Sin embargo, para galaxias con un anillo interno o parcial ocurre lo contrario, mientras que para sistemas con anillos i+o la comparación es difusa debido al bajo número de estas galaxias en la muestra.

Por lo tanto, expresar  $\Sigma_{\star}(r)$  en términos de  $r_{50}$  nos permite acoplar los perfiles y sus derivadas aproximadas para galaxias de diferentes masas. Este enfoque alinea aproximadamente las distintas regiones radiales con respecto al tamaño de cada galaxia, realzando la señal de las estructuras anulares bajo estudio. Como consecuencia, define una ondulación característica sobre la media bootstrap de la tasa de cambio radial de los perfiles de masa de galaxias anilladas,  $\Delta_h M_{\star}/h^7$ , que no está presente en las galaxias de control, como se muestra en la segunda columna de la Fig. 4.2.2. Para resaltar esa oscilación, la columna derecha visualiza la media bootstrap y la dispersión de los residuales,

$$e = [\Delta_h M_{\star, RG} - \text{Me}(\Delta_h M_{\star, CS})]/h \quad (4.2.1)$$

obtenidos al aproximar el  $\Delta_h M_{\star}/h$  de una galaxia anillada por la mediana del perfil de pendientes de su contraparte grupo de control.

El déficit central que muestran los residuos se debe a la región de baja densidad de masa presente antes de la estructura del anillo. Esta región genera una caída más abrupta en la pendiente del perfil radial, que luego tiende a estabilizarse y aumenta rápidamente a medida que se aproxima al anillo. Aquí observamos que los anillos internos están ubicados aproximadamente en  $r_{50}$  mientras que los anillos externos en  $1.5 r_{50}$ . La pequeña variación entre sus posiciones relativas refleja la contribución relevante de la masa del anillo al establecer el  $r_{50}$ . Ambas contribuciones tienden a compensarse en galaxias con anillos i+o, de lo cual se puede inferir que los anillos internos son más compactos y masivos que los anillos externos porque la onda generada por los primeros tiene una longitud menor y está más cerca de  $r_{50}$ .

Finalmente, las curvas obtenidas para galaxias con anillos parciales muestran

<sup>7</sup> $\Delta_h M_{\star}/h = [M_{\star}(\frac{r}{r_{50}} + h) - M_{\star}(\frac{r}{r_{50}})]/h$

perfiles de masa más profundos que los de su grupo de control, en la región central de la galaxia, donde las estructuras de arco o pseudo-anillos se encuentran más allá de  $r_{50}$ , extendiéndose tanto o más que los anillos externos.

Como primera comparación con observaciones, recurrimos al catálogo de anillos detectados en el S<sup>4</sup>G. Este catálogo contiene datos de 724 galaxias anilladas incluyendo tamaños de anillos relativos al tamaño de la galaxia, donde este último está representado por el diámetro al nivel  $\mu_{3.6\mu\text{m}} = 25.5 \text{ mag arcsec}^{-2}$  ( $D_{25} = 2 \times R_{25}$ ). [Leroy et al. \(2021\)](#), usando el catálogo *Physics at High Angular resolution in Nearby Galaxies* (PHANGS-ALMA), propusieron la relación  $r_{50} \approx 3.08R_{25}$  y encontraron que produce un  $r_{50}$  mediano aproximadamente 4 % mayor que el obtenido por [Muñoz-Mateos et al. \(2015, S<sup>4</sup>G data release\)](#), con una dispersión del 25 % ( $1\sigma$ ). Aplicando esta conversión obtuvimos que los anillos internos están ubicados en  $0.84 \pm 0.37 r_{50}$  mientras que los anillos externos en  $1.84 \pm 0.58 r_{50}$ . Estas ubicaciones muestran una buena concordancia con nuestros resultados obtenidos para las galaxias anilladas a partir de la simulación Illustris TNG50.

# Capítulo 5

## Clasificación automática

### 5.1. Clasificación automática de galaxias anilladas

A lo largo de la historia, la clasificación de galaxias ha sido realizada manualmente por astrónomos expertos o a través de ciencia ciudadana, como es el caso del proyecto Galaxy Zoo ([Lintott et al. 2008](#); [Willett et al. 2013](#); [Simmons et al. 2017](#)). Sin embargo, el crecimiento exponencial en la cantidad de datos astronómicos ha hecho inviable la inspección visual como estrategia principal de clasificación. En este contexto, la implementación de métodos de ML ha demostrado ser una solución eficaz para la clasificación automatizada de galaxias ([Shamir 2009](#); [Dieleman 2015](#)). Esto ha llevado al desarrollo de múltiples métodos computacionales, en particular las **redes neuronales convolucionales (CNNs)**<sup>1</sup> han logrado resultados sobresalientes en la clasificación morfológica de galaxias, permitiendo la detección de estructuras complejas con un alto grado de precisión ([Dieleman 2015](#); [Zhu et al. 2019](#); [Shimakawa et al. 2024](#)). Modelos pre-entrenados como **AlexNet**, **ResNet** e **Inception-ResNet-V2** han sido utilizados en la identificación automática de galaxias anilladas, facilitando la generación de catálogos a gran escala y reduciendo significativamente el tiempo requerido para el análisis de datos astronómicos ([Zhu et al. 2019](#)). Algunos enfoques automáticos existentes se basan exclusivamente en el análisis de imágenes mediante redes convolucionales (e.g., [Dieleman 2015](#)), mientras que otros utilizan características derivadas de catálogos fotométricos y estructurales

---

<sup>1</sup>CNN: Para una definición más detallada referirse al apéndice [A2](#)

(Huertas-Company 2011). Sin embargo, la clasificación automatizada que distingue entre los distintos tipos morfológicos de anillos galácticos como anillos interiores, exteriores o combinaciones vinculados a resonancias, ha sido escasamente explorada.

En este Capítulo se presenta un sistema avanzado de clasificación automática de galaxias anilladas resonantes, que usa imágenes mediante un enfoque de aprendizaje profundo multimodal. Nuestro modelo utiliza arquitecturas modernas como *Vision Transformers* (Dosovitskiy 2020) junto con mecanismos de fusión diseñados para integrar múltiples modalidades de datos. Además, implementamos técnicas específicas para mitigar el desbalance de clases y prevenir el sobreajuste, dos desafíos comunes en la clasificación de galaxias con estructuras poco frecuentes.

Este enfoque no solo busca mejorar la precisión de la clasificación morfológica, sino también sentar las bases para estudios más amplios sobre la estadística, formación y evolución de las estructuras resonantes en galaxias, abriendo nuevas posibilidades para la ciencia extragaláctica en la era de los grandes volúmenes de datos.

### 5.1.1. Datos

Este trabajo se basa en el catálogo de galaxias anilladas descrito en detalle en el Capítulo 2. La muestra inicial incluye 8529 galaxias espirales brillantes de tipo tardío, seleccionadas para facilitar la identificación visual de estructuras morfológicas, de las cuales 1868 presentan evidencias claras de anillos. Además, el catálogo incorpora una subclasificación que distingue entre anillos internos, externos, nucleares, parciales y combinaciones de anillos interno y externo (Fernandez et al. 2021). Debido al desbalance natural entre galaxias anilladas y no anilladas en la muestra inicial (1868 vs. 6661), se decidió complementar el conjunto de datos utilizando dos catálogos adicionales con clasificaciones visuales: el catálogo de Buta (2017), que contiene 3962 galaxias anilladas clasificadas según el sistema CVRHS extraídas del *Galaxy Zoo 2*, y el catálogo de Nair and Abraham (2010), que incluye 14034 galaxias del SDSS con una descripción morfológica detallada, donde 1426 galaxias demostraban ser anilladas. Buta (2017) no especifica cortes numéricos de ningún tipo, basándose únicamente en el hecho de que al menos un voluntario identificó la presencia de

un anillo en la morfología de la galaxia. El artículo no especifica ningún umbral en redshift, magnitud en banda  $r$ , ni relación de ejes (inclinación), lo que sugiere que se trata de una muestra heterogénea en cuanto a distancia, brillo e inclinación. Mientras que la muestra de [Nair and Abraham \(2010\)](#) se limita a galaxias del SDSS con  $z < 0.1$  y magnitud  $g < 16.0$ , seleccionadas por su buena resolución para permitir una clasificación morfológica visual detallada. Las diferencias en las restricciones de los catálogos utilizados no deberían afectar nuestro análisis, ya que la clasificación automática propuesta se realiza directamente a partir de las imágenes de los tres catálogos, sin depender de los criterios de selección originales.

Las imágenes correspondientes a esta muestra fueron descargadas empleando un *script* automatizado en Python, utilizando las coordenadas (RA, DEC) de cada galaxia provistas en un archivo CSV que incluye además su clasificación. Para cada objeto, se solicitó una imagen combinada en color (bandas  $g, r, i$ ) desde el servicio *ImgCutout* de SDSS, en resolución  $512 \times 512$  píxeles con una escala de 0.4 arcsec/pixel. Esta configuración se eligió para asegurar que la galaxia quedara completamente contenida en la imagen, preservando su estructura morfológica sin recortes indeseados.

Posteriormente, se prosiguió a descargar las imágenes de las galaxias en formato JPG, dado que este combina de forma eficiente la información de múltiples bandas fotométricas en una única imagen a color. Aunque el formato FITS permite análisis fotométricos más precisos, para tareas de clasificación morfológica mediante técnicas de visión artificial, el formato JPG proporciona una representación compacta, visualmente informativa y compatible con los métodos de aprendizaje profundo empleados en este estudio ([Dieleman et al. 2015](#)).

Las galaxias extraídas de estos catálogos fueron sometidas a una nueva inspección visual con el objetivo de verificar o redefinir su clasificación, aplicando el mismo criterio descrito en nuestro trabajo ([Fernandez et al. 2021](#)), para asegurar la coherencia del conjunto de datos ampliado. Además se decidió quitar de la muestra total aquellas imágenes de galaxias anilladas que presentaban anillos nucleares, ya que estos podrían ser los más difíciles de clasificar automáticamente debido a que pueden confundirse con pseudo-bulbos, núcleos brillantes o regiones HII. De esta forma se obtuvo finalmente

una muestra total de 12389 galaxias con y sin anillo (5789 vs. 6600).

#### 5.1.1.1. Desbalance de clases

En este capítulo se adopta una codificación numérica para los tipos de anillos utilizada en el conjunto de datos de entrenamiento. En particular, los códigos 0, 4, 8 y 12 corresponden respectivamente a galaxias sin anillos, con anillos internos, anillos externos y anillos combinados. Esta notación se utiliza únicamente con fines computacionales durante el proceso de clasificación automática. La Tabla 5.1.1 muestra la distribución de los distintos tipos de anillos presentes en el conjunto de datos. La mayoría de las galaxias no presentan estructuras anulares, mientras que el resto se reparte entre anillos interiores, exteriores, combinaciones de ambos y anillos parciales. Una fracción menor de imágenes fue excluida del análisis por problemas de calidad o ambigüedad en la clasificación.

**Tabla 5.1.1:** Distribución, números y porcentajes de galaxias con diferentes tipos de anillos, sin anillos y ambiguas.

Distribución de Galaxias	Número	Porcentaje
Sin anillos (Tipo 0)	6600	53 %
Anillos interiores (Tipo 4)	1849	15 %
Anillos exteriores (Tipo 8)	1991	16 %
Anillos interiores + exteriores (Tipo 12)	935	8 %
Anillos parciales (Tipo 16)	503	4 %
Excluidas/Ambiguas (Tipo 99)	511	4 %

Para los experimentos de clasificación binaria, que determinan la presencia o ausencia de estructuras anilladas en las galaxias, utilizamos el conjunto completo de datos de 11878 imágenes (6600 sin anillo + 5278 con anillo) tras excluir 511 imágenes dudosas (Tabla 5.1.2). Sin embargo, para los modelos de clasificación multiclase, se decidió trabajar únicamente con galaxias anilladas cuya morfología fue etiquetada de forma clara. Por consiguiente, se excluyeron tanto las galaxias no anilladas como aquellas con clasificación ambigua o de mala calidad (tipo 0 y 99), resultando en un subconjunto final de 5278 galaxias anilladas.

Este subconjunto, aunque más limpio y consistente, presenta un marcado desequilibrio de clases. Algunos tipos de anillos son significativamente más frecuentes que otros, y el tipo menos común (anillos parciales) representa apenas un 9.5% del total de galaxias anilladas. La Tabla 5.1.3 muestra esta distribución.

**Tabla 5.1.2:** Distribución, números y porcentajes de galaxias correspondientes a la clasificación binaria (galaxias con y sin anillos).

Distribución de galaxias	Número	Porcentaje
Sin anillos (Tipo 0)	6600	55.5 %
Con anillos (Tipos 4, 8, 12, 16)	5278	44.5 %
<b>Total</b>	<b>11878</b>	<b>100 %</b>

**Tabla 5.1.3:** Distribución, números y porcentajes de galaxias con diferentes tipos de anillos, utilizadas en la clasificación multiclase.

Tipo de anillo	Número	Porcentaje
Anillos interiores (Tipo 4)	1849	35.0 %
Anillos exteriores (Tipo 8)	1991	37.7 %
Anillos interiores + exteriores (Tipo 12)	935	17.7 %
Anillos parciales (Tipo 16)	503	9.5 %
<b>Total</b>	<b>5278</b>	<b>100 %</b>

El enfoque de clasificación binaria se beneficia de una distribución más equilibrada, sin embargo el mayor desafío se presenta con el conjunto de datos multiclase ya que algunas categorías tienen casi cuatro veces más ejemplos que otras. Es bien conocido que los modelos de aprendizaje profundo tienden a sesgar sus predicciones hacia las clases mayoritarias. Además del desequilibrio numérico, se suma una complejidad morfológica: las diferencias visuales entre los distintos tipos de anillos pueden ser sutiles, incluso para expertos en imágenes con bajo contraste, escasa resolución o proyecciones desfavorables.

En la literatura se han propuesto múltiples enfoques para mitigar estos problemas. Entre ellos se destacan las funciones de pérdida diseñadas específicamente para escenarios desbalanceados. Una de las más influyentes es la *Focal Loss* (Lin et al. 2017), que ajusta dinámicamente el peso de las muestras durante el entrenamiento para enfocarse en los ejemplos difíciles. También se ha utilizado la *Asymmetric Loss* (ASL), originalmente desarrollada para clasificación multietiqueta, pero efectiva en conjuntos de datos desbalanceados al reducir el impacto de los ejemplos negativos fáciles y priorizar los positivos difíciles sin aumentar la complejidad computacional. Otras propuestas incluyen la *LDAM Loss* (Cao et al. 2019), que incorpora márgenes de decisión más amplios para clases minoritarias, y el *Balanced Meta-Softmax* (Ren et al. 2020), que ajusta los logits del modelo en función de la frecuencia de cada clase. Además, han resurgido con fuerza estrategias de aprendizaje progresivo (*curriculum learning*

*renaissance*), que consisten en entrenar los modelos comenzando por ejemplos más simples y gradualmente incorporar los más complejos. En el caso de galaxias anilladas, esto podría implicar entrenar primero con anillos interiores bien definidos, luego exteriores, y finalmente combinaciones o anillos parciales. Este tipo de enfoque ha demostrado mejoras significativas en métricas como F1-score en tareas con fuerte desbalance entre clases.

También se utilizan técnicas clásicas como el muestreo balanceado por clase o la ponderación basada en la frecuencia inversa de cada categoría, fundamentadas en el concepto de número efectivo de muestras (Cui et al. 2019). Por otro lado, en contextos donde las clases minoritarias son escasas, el aumento de datos mediante métodos generativos como las *Redes Antagónicas Generativas* (GANs) o simulaciones físicas con herramientas como GalSim permite sintetizar ejemplos realistas que enriquecen el entrenamiento sin comprometer la validez morfológica.

En términos generales, estas metodologías conforman un conjunto robusto de herramientas para abordar el problema del desequilibrio de clases en clasificación morfológica astronómica, donde los fenómenos inusuales no solo son los más difíciles de modelar, sino también los más informativos desde el punto de vista físico.

## 5.2. Preprocesamiento de Datos

### 5.2.1. Preparación de las imágenes

Antes de entrenar los modelos de aprendizaje automático, fue necesario aplicar una serie de pasos de limpieza, alineación y normalización de las imágenes para garantizar que todas las entradas tuvieran una calidad y formato homogéneo (ver Fig. 5.2.1). A continuación se describen los procedimientos aplicados durante esta etapa del preprocesamiento:

- **Eliminación de estrellas:**

Las estrellas del primer plano pueden introducir artefactos visuales que afectan la detección de estructuras anulares. Para minimizar esta interferencia, se utilizó la herramienta StarNet++, que permite identificar y sustraer automáticamente estrellas presentes en las imágenes RGB

de galaxias. Este procedimiento se aplicó de forma sistemática a todo el conjunto de datos. Adicionalmente, se llevó a cabo una verificación visual sobre una muestra representativa para asegurar que el algoritmo no eliminara estructuras galácticas reales. En los pocos casos en que el algoritmo no lograba separar correctamente los objetos estelares, se estableció un protocolo de respaldo basado en inspección visual y selección manual.

- **Centrado automático de galaxias:**

Dado que la correcta ubicación de la galaxia en el recorte final es fundamental para el desempeño del modelo, se implementaron técnicas de visión por computadora para localizar automáticamente el centroide de cada galaxia. Cuando este procedimiento automático fallaba, se adoptaba por defecto el centro geométrico de la imagen original. Esta decisión fue respaldada por una revisión visual posterior, asegurando que el objeto principal estuviera centrado con precisión.

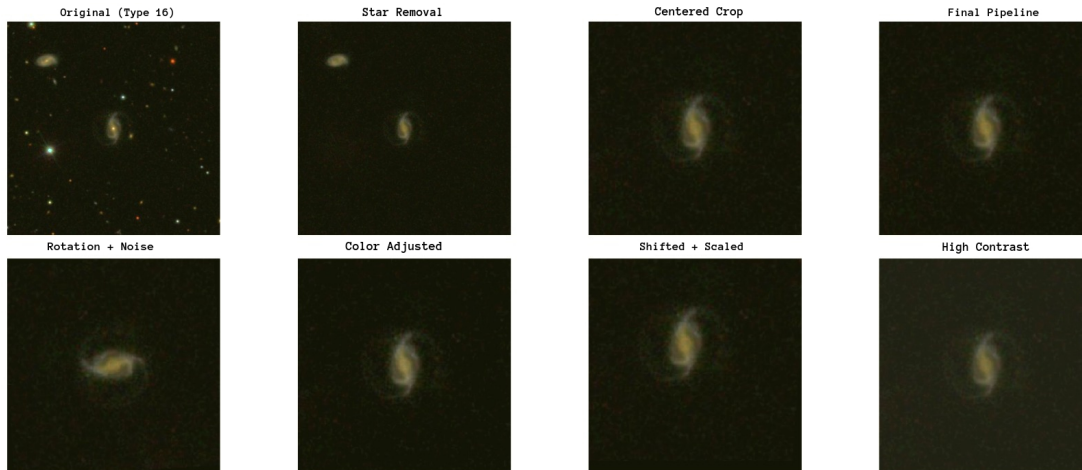
- **Estandarización de las imágenes:**

Una vez centradas, todas las imágenes fueron recortadas a un tamaño fijo de  $256 \times 256$  píxeles, con la galaxia ubicada en el centro del recorte. Esta resolución fue elegida como compromiso entre nivel de detalle morfológico y eficiencia computacional. Para asegurar que las diferencias en brillo no introdujeran sesgos, se normalizó la luminosidad de todas las imágenes a través de una transformación lineal del histograma de intensidad. También se aplicó un filtro automático para descartar imágenes con colores atípicos o características fotométricas inusuales que pudieran confundir al modelo durante el entrenamiento.

- **Aumento de datos con preservación astronómica:**

Para mejorar la capacidad de generalización del modelo, en especial en clases minoritarias, se implementaron técnicas de aumento de datos cuidadosamente diseñadas para preservar la validez física de las estructuras galácticas. Entre estas, se incluyeron rotaciones arbitrarias entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$ , desplazamientos aleatorios de hasta un  $\pm 15\%$  del tamaño de la imagen para simular errores de centrado, y variaciones fotométricas que emulan condiciones observacionales realistas. Además, se utilizó la técnica

de *Mixup*<sup>2</sup> con un parámetro  $\alpha = 0.3$ , que permite combinar imágenes de distintas clases para suavizar las fronteras de decisión del modelo, lo que ha demostrado ser efectivo en tareas con desbalance de clases. La especificación completa de los parámetros de aumento se detalla en el Apéndice A.



**Figura 5.2.1:** Ejemplo del *pipeline* de preprocesamiento aplicado a las imágenes. Paneles Superiores: Imagen original, la cual contiene múltiples objetos astronómicos (panel izquierdo). Aplicación de una serie de transformaciones: eliminación de estrellas, recorte, centrado, y ajustes sucesivos hasta obtener la versión final procesada (panel derecho). Paneles Inferiores: Variaciones adicionales utilizadas para aumentar la robustez de los modelos de clasificación: rotación, ajuste de color, traslación+escalado, y aumento de contraste.

## 5.3. Arquitectura de los modelos considerados

Para abordar la clasificación de galaxias anilladas, se evaluaron tres arquitecturas de aprendizaje profundo: redes convolucionales eficientes, modelos de atención visual y esquemas de combinación de predicciones. A continuación se describen en detalle las características y motivaciones detrás de cada arquitectura utilizada.

### 5.3.1. EfficientNet-B3

Como modelo base se seleccionó EfficientNet-B3 (Tan and Le 2019), una arquitectura convolucional que optimiza simultáneamente profundidad,

<sup>2</sup>*Mixup*: técnica de aumento de datos en la que dos imágenes y sus etiquetas se combinan linealmente. Esto suaviza las fronteras de decisión y mejora la generalización, especialmente en conjuntos con clases desbalanceadas.

resolución y ancho de red, logrando una excelente relación entre precisión y eficiencia computacional. La arquitectura de EfficientNet-B3 se construye a partir del modelo base EfficientNet-B0, escalado con un coeficiente  $\phi = 3$ . Este modelo está compuesto por nueve etapas secuenciales, cada una definida por un tipo de operador convolucional, una resolución espacial de entrada, un número de canales de salida y una cantidad de repeticiones o capas. La Tabla 5.3.1 resume estas características estructurales.

**Tabla 5.3.1:** Arquitectura base de EfficientNet-B3. Cada bloque detalla el tipo de operador, la resolución de entrada, el número de canales de salida y la cantidad de capas.

Etapa $i$	Operador $\hat{F}_i$	Resolución $\hat{H}_i \times \hat{W}_i$	Nº Canales $\hat{C}_i$	Nº Capas $\hat{L}_i$
1	Conv3×3	224 × 224	32	1
2	MBCConv1, k3×3	112 × 112	16	1
3	MBCConv6, k3×3	112 × 112	24	2
4	MBCConv6, k5×5	56 × 56	40	2
5	MBCConv6, k3×3	28 × 28	80	3
6	MBCConv6, k5×5	14 × 14	112	3
7	MBCConv6, k5×5	14 × 14	192	4
8	MBCConv6, k3×3	7 × 7	320	1
9	Conv1×1 + Pool + FC	7 × 7	1280	1

Como se observa en la Tabla 5.3.1, la arquitectura comienza con una convolución estándar 3×3, seguida de múltiples bloques *MBCConv* con factores de expansión de 1 o 6 y tamaños de *kernel* de 3 × 3 o 5 × 5, diseñados para mejorar la eficiencia sin perder capacidad representativa. La red finaliza con una convolución 1 × 1, un módulo de *pooling* global y una capa totalmente conectada.

Este diseño permite a EfficientNet-B3 alcanzar una precisión top-1<sup>3</sup> del 81.6% en ImageNet con solo 12 millones de parámetros y 1.8 billones de FLOPs<sup>4</sup>, superando modelos considerablemente más grandes en eficiencia computacional (Tan and Le 2019).

Para adaptar esta red a nuestra tarea, se implementó una cabeza de clasificación densa más profunda que reemplaza la capa final estándar por tres capas secuenciales de 1536, 1024 y 512 unidades, seguidas de la capa de salida

<sup>3</sup>**Top-1 accuracy:** Porcentaje de veces que el modelo acierta la clase correcta como su primera predicción.

<sup>4</sup>**FLOPs:** Operaciones de punto flotante necesarias para procesar una imagen; miden el costo computacional del modelo.

correspondiente al número de clases. Con el objetivo de mitigar el sobreajuste (especialmente en presencia de clases poco representadas) se incorporó un esquema de *dropout progresivo*, aplicando tasas de abandono decrecientes (0.4, 0.3 y 0.21) en las capas densas. Esta técnica permite regularizar el modelo de forma diferenciada a lo largo de su profundidad. Además, se utilizó *batch normalization* en las capas intermedias para estabilizar el aprendizaje y mejorar la generalización. Esta versión mejorada de EfficientNet fue particularmente útil como referencia de alto rendimiento en tareas de clasificación con estructuras morfológicas complejas.

### 5.3.2. FastMobileNetV2

El modelo **FastMobileNetV2** es una variante optimizada de la arquitectura MobileNetV2 (Sandler et al. 2018), diseñada originalmente para tareas de visión por computadora en dispositivos con recursos limitados. Su filosofía se basa en el uso de bloques residuales con convoluciones separables en profundidad (*depthwise separable convolutions*) y en la introducción de conexiones lineales estrechas, lo que permite reducir drásticamente el número de parámetros y las operaciones de cómputo sin comprometer en exceso la precisión.

La estructura central de MobileNetV2 se fundamenta en los llamados *inverted residuals*, donde cada bloque comienza con una expansión de canales mediante convoluciones  $1 \times 1$ , seguida de una convolución *depthwise*  $3 \times 3$  aplicada a cada canal de manera independiente y, finalmente, una proyección lineal de reducción de dimensionalidad. Esta configuración genera un cuello de botella que favorece la eficiencia, al tiempo que conserva la capacidad de representar características relevantes de la imagen. La variante **FastMobileNetV2** implementa mejoras adicionales en la regularización y en la estrategia de entrenamiento, orientadas a acelerar la convergencia y minimizar el consumo de memoria, lo que la hace especialmente adecuada para escenarios de clasificación rápida o en los que se busca reducir el costo computacional.

En el marco de esta investigación, FastMobileNetV2 se utilizó como modelo base en combinación con EfficientNet-B3 para construir un ensamble ligero que lograra un equilibrio entre rendimiento y velocidad de entrenamiento.

### 5.3.3. Transformers para visión por computadora

Además del enfoque basado en CNNs, se incorporaron arquitecturas de tipo Transformer, que han revolucionado el campo de la visión por computadora por su capacidad para modelar relaciones espaciales globales sin recurrir a convoluciones tradicionales. Se evaluaron dos variantes con características distintas:

- **Vision Transformer (ViT-B/16):** Los modelos *Transformer*, originalmente propuestos para tareas de procesamiento de lenguaje natural, se basan en mecanismos de atención que permiten modelar relaciones entre elementos de una secuencia, independientemente de su distancia. A diferencia de las redes recurrentes o convolucionales, los Transformers procesan todos los elementos en paralelo y capturan dependencias de largo alcance de manera eficiente mediante atención auto-regresiva. Esta arquitectura ha sido adaptada exitosamente al campo de la visión por computadora, dando origen a variantes como el *Vision Transformer* (ViT).

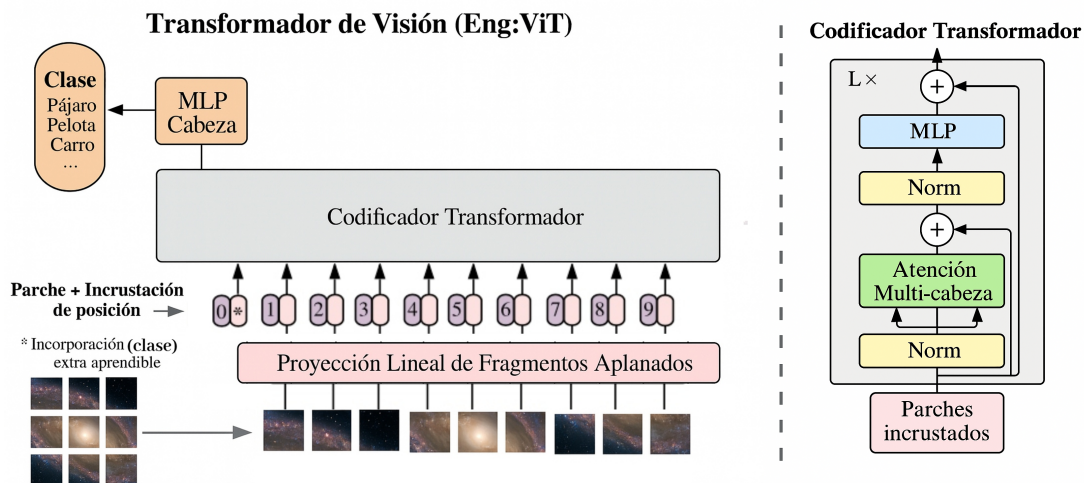
El modelo *ViT-B/16* aplica esta idea dividiendo cada imagen en una grilla de parches de  $16 \times 16$  píxeles, los cuales son aplanados y transformados en una secuencia de vectores mediante una proyección lineal compartida (ver Fig. 5.3.1). A esta secuencia se le antepone un token de clasificación ([CLS]) y se le suman *embeddings* posicionales aprendibles para conservar información espacial. Luego, la secuencia completa se procesa a través de una pila de bloques Transformer, cada uno compuesto por una capa de atención múltiple (*multi-head self-attention*) y una red feedforward, ambas normalizadas y conectadas de forma residual.

Gracias a este diseño, ViT puede modelar relaciones globales en la imagen desde etapas tempranas, sin necesidad de convoluciones ni estructuras jerárquicas. Al finalizar, la representación del token [CLS] es pasada por una capa densa que produce la predicción final. Aunque este modelo requiere grandes volúmenes de datos para entrenar con éxito, ha demostrado un rendimiento competitivo en clasificación de imágenes y ofrece ventajas particulares en tareas donde la relación espacial entre regiones distantes de la imagen es crítica (Dosovitskiy et al. 2021). Aunque esta arquitectura carece de inductivos espaciales locales, permite capturar

patrones distribuidos a gran escala, lo cual resulta relevante para anillos externos o estructuras extendidas. En este trabajo se utilizó una versión preentrenada en ImageNet para facilitar la transferencia de conocimiento.

- **Swin Transformer (Tiny):** Un modelo jerárquico basado en ventanas de atención desplazadas, que introduce inductivos espaciales similares a los de las CNNs, pero con la flexibilidad de los Transformers. Gracias a su diseño multiescala, es capaz de identificar detalles locales como anillos internos y, al mismo tiempo, capturar relaciones de mayor escala. Su estructura ligera lo hace eficiente en términos computacionales y competitivo en tareas con morfología variable.

Ambos modelos se preentrenaron en ImageNet y se ajustaron posteriormente para adaptarse a la tarea de clasificación binaria y multiclase de galaxias anilladas.



**Figura 5.3.1:** Esquema general adaptado del modelo *Vision Transformer* (ViT). Panel Izquierdo: La imagen de entrada se divide en parches de tamaño fijo, los cuales son aplanados y transformados en vectores mediante una proyección lineal. A esta secuencia se le agregan codificaciones posicionales y un token de clasificación aprendible. La secuencia completa se introduce en un codificador Transformer estándar, cuya representación final del token de clasificación se utiliza para predecir la clase. Panel Derecho: El diagrama del codificador Transformer está basado en el trabajo de Vaswani et al. (2017), adaptado por Dosovitskiy et al. (2021).

#### 5.3.4. ConvNeXt-Base

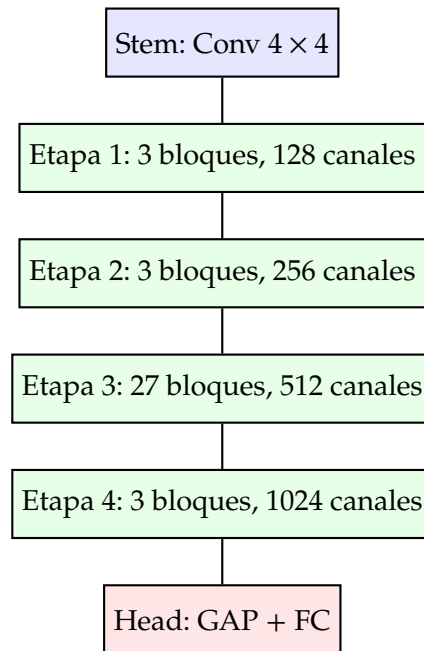
La arquitectura **ConvNeXt-Base**, propuesta por Liu et al. (2022), constituye una modernización de las redes convolucionales tradicionales (e.g., ResNet) inspirada en principios de los *Vision Transformers* (ViT). ConvNeXt conserva la naturaleza convolucional, pero introduce un rediseño profundo que la sitúa al nivel de los transformadores en tareas de visión por computadora, manteniendo una mayor eficiencia en entrenamiento e inferencia.

La variante *Base*, utilizada en este estudio, posee aproximadamente 88 millones de parámetros y una estructura jerárquica organizada en cuatro etapas (ver Fig. 5.3.2), con configuraciones [3, 3, 27, 3] bloques por etapa y dimensiones de canales de [128, 256, 512, 1024]. Cada etapa reduce progresivamente la resolución espacial mientras aumenta la dimensionalidad de las representaciones, siguiendo un esquema piramidal similar al de ResNet.

Los bloques ConvNeXt difieren sustancialmente de los bloques residuales clásicos al incorporar: (i) convoluciones *depthwise* de gran tamaño ( $7 \times 7$ ), que amplían el campo receptivo y permiten capturar patrones morfológicos extendidos; (ii) normalización *LayerNorm* en lugar de *BatchNorm*, lo que favorece la estabilidad; (iii) convoluciones *pointwise* ( $1 \times 1$ ) para mezclar canales; (iv) activaciones GELU en lugar de ReLU; y (v) regularización mediante *DropPath*. Además, el bloque invierte el orden clásico de operaciones, aplicando normalización y transformaciones antes de la suma residual.

El diseño global de ConvNeXt adopta estrategias de entrenamiento propias de los ViT, tales como el optimizador AdamW con decaimiento de pesos, esquemas de tasa de aprendizaje con *cosine annealing* y fases de *warmup*. En benchmarks como ImageNet-1K, ConvNeXt-Base alcanza una precisión superior al 83 % en Top-1, comparable con ViT-Base.

En el ámbito de clasificación astronómica, estas características resultan ventajosas: los *kernels* de gran tamaño capturan estructuras anulares extendidas, mientras que la normalización y las funciones de activación modernas permiten robustez frente al desbalance de clases. En consecuencia, ConvNeXt-Base se presenta como una arquitectura idónea para la detección y caracterización automática de galaxias anilladas.

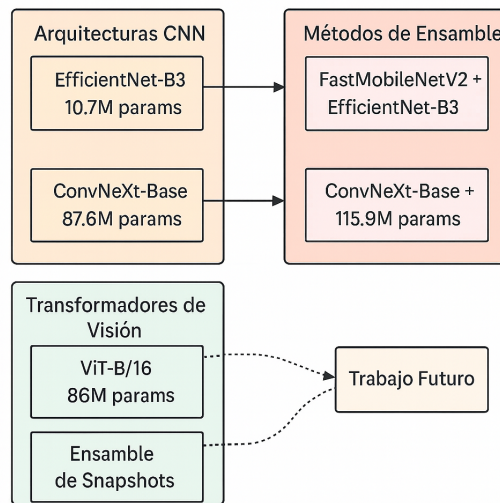


**Figura 5.3.2:** Esquema simplificado de la arquitectura ConvNeXt-Base con cuatro etapas jerárquicas.

### 5.3.5. Estrategia de ensamblado de modelos

Dado que cada arquitectura tiene inductivos y sesgos distintos, se implementó una estrategia de ensamblado de modelos para combinar las predicciones de las tres variantes evaluadas. Esta técnica busca reducir la varianza de las predicciones individuales, aumentar la robustez frente a ejemplos ambiguos y mejorar el desempeño general en todas las clases, en especial en aquellas menos representadas.

El ensamblado se llevó a cabo mediante un promedio ponderado de las probabilidades de salida de cada modelo, aunque en versiones posteriores se consideran estrategias más avanzadas como votación jerárquica o aprendizaje de combinación. La Fig. 5.3.3 muestra una comparación conceptual entre las arquitecturas, mientras que la Fig. 5.3.4 ilustra el flujo completo del entrenamiento, desde el preprocesamiento hasta la inferencia por ensamble.



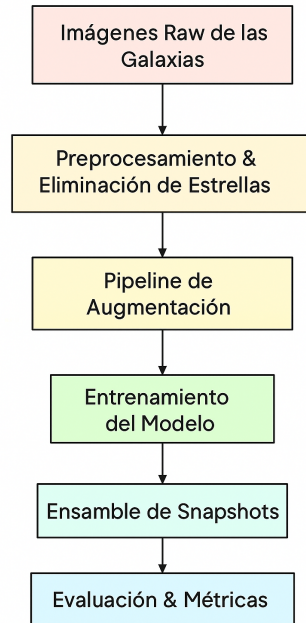
**Figura 5.3.3:** Vista general de las arquitecturas de modelos exploradas en este estudio. Se agrupan en tres categorías: arquitecturas CNN (por ejemplo, EfficientNet-B3, ConvNeXt-Base), transformadores de visión (por ejemplo, ViT-B/16, Swin-T) y métodos en conjunto que combinan distintos *backbones*. Las flechas punteadas indican posibles direcciones para trabajos futuros.

### 5.3.6. Funciones de pérdida para escenarios multiclase desbalanceados

En el contexto del aprendizaje profundo, la función de pérdida cumple un rol fundamental como guía durante el proceso de optimización. Su propósito es cuantificar la discrepancia entre las predicciones del modelo y las etiquetas verdaderas. En tareas de clasificación, especialmente en escenarios con múltiples clases y fuerte desbalance entre ellas, como es común en dominios astronómicos, la elección adecuada de la función de pérdida puede marcar una diferencia sustancial en el rendimiento final del modelo.

#### 5.3.6.1. Cross-Entropy Loss

La función de pérdida de entropía cruzada (*Cross-Entropy*) es el estándar en tareas de clasificación multiclase. Mide la distancia entre la distribución predicha por el modelo y la distribución verdadera (una delta de Kronecker en el caso de clasificación dura). Para una muestra con etiqueta verdadera  $y$ , y predicción de probabilidad  $p_y$ , la pérdida se define como:



**Figura 5.3.4:** Esquema del flujo de trabajo de entrenamiento de extremo a extremo. El proceso comienza con imágenes de galaxias en bruto, seguido del preprocesamiento y eliminación de estrellas. Luego se aplican técnicas de aumento antes de entrenar el modelo, el cual se mejora mediante un conjunto de instantáneas (snapshot ensemble). Finalmente, se evalúa el rendimiento del modelo utilizando métricas seleccionadas.

$$\mathcal{L}_{CE} = -\log(p_y) \quad (5.3.1)$$

Aunque efectiva en conjuntos balanceados, esta función tiende a verse dominada por las clases mayoritarias, lo que deteriora la capacidad del modelo para reconocer clases minoritarias.

### 5.3.6.2. Focal Loss

La *Focal Loss*, introducida por [Lin et al. \(2017\)](#), modifica la entropía cruzada con un factor que reduce el impacto de los ejemplos correctamente clasificados (fáciles) y pone mayor énfasis en aquellos difíciles. Su formulación es:

$$\mathcal{L}_{\text{focal}} = (1 - p_y)^\gamma \cdot \mathcal{L}_{CE} \quad (5.3.2)$$

donde  $p_y$  es la probabilidad asignada a la clase correcta, y  $\gamma$  es un parámetro

de enfoque. A mayor  $\gamma$ , mayor atención se da a los errores graves del modelo. Esta pérdida resulta especialmente útil en conjuntos con clases desequilibradas, ya que favorece el aprendizaje de patrones en clases subrepresentadas.

### 5.3.6.3. Asymmetric Loss (ASL)

La *Asymmetric Loss*, propuesta por [Ben-Baruch et al. \(2020\)](#), fue diseñada inicialmente para clasificación multietiqueta, aunque ha sido extendida a contextos multiclase. Su principal característica es penalizar de forma diferenciada los errores según si corresponden a clases positivas o negativas, desestimando ejemplos negativos fáciles. Esto evita que el modelo se sobreentrene para predecir la clase dominante. Sin embargo, en escenarios con desbalance extremo y combinaciones de tasa de aprendizaje elevadas, puede presentar inestabilidades durante el entrenamiento, como se evidenció en nuestras pruebas iniciales.

### 5.3.6.4. LDAM Loss

La función *Label-Distribution-Aware Margin (LDAM) Loss*, introducida por [Cao et al. \(2019\)](#), propone modificar la entropía cruzada mediante la incorporación de un margen dependiente de la frecuencia de cada clase. Específicamente, se asignan márgenes mayores a las clases menos frecuentes, forzando al modelo a crear fronteras de decisión más amplias para ellas. Si bien este enfoque puede mejorar el rendimiento en clases minoritarias, su desempeño es altamente sensible a la forma en que se ajustan los márgenes, especialmente cuando la distribución de clases es extremadamente desigual.

## 5.4. Diseño del entrenamiento

### 5.4.0.1. Pérdida focal mejorada

Considerando la naturaleza del problema abordado (clasificación morfológica de estructuras anilladas en imágenes astronómicas) y el grado de desbalance entre clases, seleccionamos una variante mejorada de *Focal Loss* como función de pérdida principal. Esta elección se basó en su robustez comprobada frente a desequilibrios, su compatibilidad con técnicas de aumento específicas como *mixup*, y la interpretación directa de sus hiperparámetros. Las funciones ASL

y LDAM, si bien prometedoras en ciertos dominios, presentaron dificultades prácticas en nuestras pruebas preliminares, motivando su evaluación futura bajo condiciones más controladas. A continuación se muestra una versión mejorada de *Focal Loss* diseñada para manejar clases desbalanceadas:

```

1 class FocalLoss(nn.Module):
2     def __init__(self, alpha=None, gamma=2, class_weights=None
3         ):
4         self.alpha = alpha
5         self.gamma = gamma
6         self.class_weights = class_weights
7
8     def forward(self, inputs, targets):
9         ce_loss = F.cross_entropy(inputs, targets, reduction='
10             none')
11         pt = torch.exp(-ce_loss)
12         focal_loss = (1 - pt) ** self.gamma * ce_loss
13         if self.class_weights is not None:
14             class_weights_t = self.class_weights.gather(0,
15                 targets)
16             focal_loss = class_weights_t * focal_loss
17         return focal_loss.mean()

```

Usamos  $\gamma = 3,0$  y pesos de clase calculados por frecuencia inversa con suavizado exponencial. Esta pérdida se integró con técnicas de mezcla como *Mixup*.

#### 5.4.0.2. Ponderación dinámica de clases

Para mitigar el impacto del desbalance, se calcularon pesos dinámicos por clase como:

$$w_c = \left( \frac{N}{K \cdot n_c + \epsilon} \right)^{0,75} \quad (5.4.1)$$

donde  $N$  es el total de muestras,  $K$  el número de clases,  $n_c$  la cantidad de ejemplos de la clase  $c$ , y  $\epsilon$  una constante pequeña para evitar divisiones por cero. A continuación se muestra el código correspondiente:

```

1 class_counts = np.bincount(train_labels)

```

```
2 total_samples = len(train_labels)
3 class_weights = total_samples / (num_classes * class_counts +
  1e-8)
4 class_weights = np.power(class_weights, 0.75)
```

Los pesos resultantes fueron: tipo 4 = 0.777, tipo 8 = 0.734, tipo 12 = 1.297, tipo 16 = 2.056.

### 5.4.0.3. Ensemble de instantáneas

Se empleó la técnica de *Snapshot Ensemble* para capturar múltiples puntos de convergencia durante el entrenamiento. A intervalos regulares, se guardaron los pesos del modelo y, al momento de la inferencia, se promediaron las predicciones generadas por cada instantánea. Este enfoque mejoró la robustez del modelo sin requerir múltiples entrenamientos independientes. A continuación se muestra un ejemplo de la implementación del procedimiento descrito:

```
1 class SnapshotEnsemble:
2     def __init__(self, model, num_snapshots=3, cycle_epochs
  =50):
3         self.snapshots = []
4         self.save_intervals = cycle_epochs
5
6     def save_snapshot(self, model_state, epoch):
7         if epoch % self.save_intervals == (self.save_intervals
  - 1):
8             self.snapshots.append(model_state.copy())
9
10    def predict_ensemble(self, data_loader):
11        all_predictions = []
12        for snapshot in self.snapshots:
13            model.load_state_dict(snapshot)
14            predictions = predict_single_model(model,
  data_loader)
15            all_predictions.append(predictions)
16        return np.mean(all_predictions, axis=0)
```

#### 5.4.0.4. Aprendizaje curricular

El *Curriculum Learning* es una estrategia de entrenamiento que imita el proceso de aprendizaje humano, en el que los conocimientos se adquieren de manera progresiva, comenzando por los conceptos más simples y avanzando hacia los más complejos. Esta técnica fue introducida formalmente por [Bengio et al. \(2009\)](#), quien demostró que presentar ejemplos organizados por dificultad puede mejorar la eficiencia y estabilidad del entrenamiento de redes neuronales profundas.

En el contexto del aprendizaje automático, esto se implementa organizando el conjunto de entrenamiento de forma tal que las muestras más representativas o fáciles de aprender se presenten primero, permitiendo que el modelo construya una base sólida. Con el avance de las épocas, se incorporan gradualmente ejemplos más complejos, ambiguos o ruidosos. Esta aproximación no solo acelera la convergencia del modelo, sino que también puede mejorar su rendimiento general en tareas con alta variabilidad o fuerte desbalance entre clases.

En este trabajo, se diseñó un esquema de aprendizaje curricular específico para la clasificación de galaxias anilladas, donde las clases se introducen progresivamente en función de su dificultad visual y frecuencia en el conjunto de datos. La secuencia curricular implementada fue la siguiente:

- **Etapa 1 (épocas 1–25):** el modelo se entrena exclusivamente con anillos claros y bien definidos (tipos 4 y 8).
- **Etapa 2 (épocas 26–50):** se incorporan anillos combinados (tipo 12), que requieren identificar múltiples componentes morfológicos.
- **Etapa 3 (épocas 51+):** se incluyen anillos incompletos (tipo 16), que representan los casos más desafiantes tanto en términos de complejidad visual como de desbalance de clase.

Este enfoque permitió al modelo desarrollar representaciones robustas de las estructuras más frecuentes antes de enfrentarse a las clases menos comunes y más difíciles de distinguir, mitigando así el problema de aprendizaje en presencia de ejemplos extremos o escasos. El siguiente fragmento de código ilustra la implementación del planificador curricular:

```
1 class RingCurriculumScheduler:
```

```

2     def __init__(self, stages=['type8', 'type4', 'type12', '
      type16']):
3         self.stages = stages
4         self.current_stage = 0
5
6     def get_active_classes(self, epoch):
7         if epoch < 25: return ['type8', 'type4']
8         elif epoch < 50: return ['type8', 'type4', 'type12']
9         else: return self.stages

```

#### 5.4.0.5. Programación de la tasa de aprendizaje

Durante el entrenamiento, se empleó una estrategia de programación de la tasa de aprendizaje basada en *cosine annealing* con reinicios cálidos (*warm restarts*) para favorecer una convergencia más estable y eficiente. Esta técnica consiste en reducir gradualmente la tasa de aprendizaje siguiendo una curva cosenoidal, lo que permite al modelo transitar de una fase de exploración (con tasas altas) hacia una fase de refinamiento (con tasas bajas) de manera continua y suave.

La evolución de la tasa de aprendizaje en cada ciclo se describe mediante:

$$\eta_t = \eta_{\text{mín}} + \frac{1}{2}(\eta_{\text{máx}} - \eta_{\text{mín}}) \left( 1 + \cos \left( \frac{T_{\text{cur}}}{T_i} \pi \right) \right), \quad (5.4.2)$$

donde  $\eta_t$  es la tasa de aprendizaje en la época  $t$ ,  $\eta_{\text{máx}}$  y  $\eta_{\text{mín}}$  representan los valores máximo y mínimo respectivamente,  $T_{\text{cur}}$  es el número de épocas transcurridas en el ciclo actual, y  $T_i$  la duración del ciclo. Al alcanzar el valor mínimo, la tasa de aprendizaje se reinicia a su valor máximo, permitiendo escapar de posibles mínimos locales.

En este trabajo, se estableció un ciclo base de  $T_0 = 50$  épocas con una tasa de aprendizaje máxima de  $10^{-3}$ . Además, se incorporó una fase de *warmup* de 10 épocas al inicio del entrenamiento, en la que la tasa de aprendizaje se incrementó progresivamente desde un valor cercano a cero hasta alcanzar el valor máximo. Este *warmup* inicial busca prevenir inestabilidades comunes al comenzar con tasas elevadas desde la primera época, especialmente en arquitecturas profundas o en presencia de funciones de pérdida sensibles. El siguiente fragmento de

código muestra la estructura de la clase `CosineAnnealingWarmupRestarts` utilizada en este trabajo:

```

1 class CosineAnnealingWarmupRestarts(lr_scheduler._LRScheduler)
  :
2     def __init__(self, optimizer, T_0=50, T_mult=1, eta_max=1e
      -3, T_up=10):
3         pass

```

Esta combinación de *warmup*, decaimiento cosenoidal y reinicios periódicos proporciona un mecanismo flexible y robusto para ajustar dinámicamente la tasa de aprendizaje, favoreciendo tanto la exploración del espacio de parámetros como la convergencia fina en etapas posteriores del entrenamiento.

#### 5.4.0.6. Integración comunitaria y herramientas

Se empleó la biblioteca Zoobot ([Walmsley et al. 2022](#)) para inicializar la arquitectura *EfficientNet-B3* con pesos preentrenados en datos de Galaxy Zoo. Estos pesos provienen de modelos entrenados sobre millones de clasificaciones morfológicas realizadas por voluntarios, lo que proporciona representaciones ricas en características estructurales astronómicas. Esta transferencia de aprendizaje resultó particularmente valiosa dada la escala moderada de nuestro conjunto de datos. La inicialización se realizó de la siguiente manera:

```

1 from zoobot import load_model
2 backbone = load_model('efficientnet_b3_zoobot').backbone
3 model = RingClassifier(backbone=backbone, num_classes=4)

```

El marco de trabajo incluye soporte para convoluciones equitativas bajo el grupo de simetría  $E(2)$  mediante la librería E2CNN ([Weiler and Cesa 2019](#)). Estas arquitecturas preservan la equivarianza rotacional, lo cual resulta ventajoso para tareas de clasificación morfológica en imágenes astronómicas, donde la orientación de las estructuras puede variar significativamente. Este diseño sigue la línea de trabajo de [Pandya et al. \(2023\)](#), quienes demostraron un aumento notable en precisión en conjuntos como Galaxy10 al incorporar simetrías geométricas de forma explícita. El siguiente fragmento de código ejemplifica el uso de la librería E2CNN para definir convoluciones equitativas bajo el grupo de simetría  $E(2)$ :

```
1 from e2cnn import gspaces, nn
2 r2_act = gspaces.Rot2d0nR2(N=8)
3 conv_eq = nn.R2Conv(in_type, out_type, kernel_size=3)
```

**Reproducibilidad:** El *pipeline* es compatible con formatos estándar astronómicos (FITS, HDF5) y permite la exportación de modelos a plataformas como HuggingFace. Se proporcionan registros de entrenamiento, *scripts* de evaluación y configuraciones de hiperparámetros para asegurar la reproducibilidad total del experimento (Apéndice A3).

## 5.5. Evaluación de los Modelos

### 5.5.1. Métricas de evaluación

La evaluación del desempeño de los modelos se realizó bajo dos enfoques complementarios: clasificación binaria (galaxias con y sin anillos) y clasificación multiclase (identificación de tipos específicos de anillos). En ambos casos, dada la distribución desbalanceada entre clases, se adoptaron métricas estándar que permiten analizar el rendimiento más allá de la proporción total de aciertos (ver Apéndice A3). A continuación se listan las principales métricas usadas en este estudio:

- **Accuracy:** mide la fracción de predicciones correctas sobre el total de muestras:

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}, \quad (5.5.1)$$

donde  $TP$  representa los verdaderos positivos,  $TN$  los verdaderos negativos,  $FP$  los falsos positivos y  $FN$  los falsos negativos. Aunque es una métrica global sencilla de interpretar, en escenarios con fuerte desbalance puede resultar poco representativa, ya que un modelo que favorezca sistemáticamente la clase mayoritaria podría obtener una alta exactitud sin clasificar correctamente los casos minoritarios.

Para abordar esta limitación, se emplearon métricas adicionales más adecuadas para este tipo de problemas:

- **Precisión (Precision):** proporción de verdaderos positivos entre todas las predicciones positivas:

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (5.5.2)$$

- **Sensibilidad o Exhaustividad (Recall):** proporción de verdaderos positivos entre todos los casos reales positivos:

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (5.5.3)$$

- **F1-score por clase:** media armónica entre precisión y recall calculada individualmente para cada clase:

$$\text{F1-score} = 2 \cdot \frac{\text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (5.5.4)$$

- **F1-score macro:** promedio no ponderado del F1-score entre todas las clases, lo que otorga igual importancia a clases frecuentes y minoritarias:

$$\text{F1-score}_{\text{macro}} = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^C \text{F1-score}_i \quad (5.5.5)$$

donde  $C$  es el número total de clases.

Además, se incorporó un análisis mediante **matrices de confusión**, herramienta que permite visualizar y cuantificar los errores de clasificación entre pares de clases. Esta visualización fue fundamental para identificar patrones sistemáticos de error, por ejemplo, confusiones frecuentes entre anillos combinados e incompletos, así como para monitorear el progreso del modelo durante el entrenamiento.

### 5.5.2. Protocolo general de entrenamiento

Antes de presentar los resultados cuantitativos de los experimentos, es importante contextualizar el protocolo experimental aplicado y las configuraciones específicas del conjunto de datos utilizadas en cada etapa del estudio.

### Definición de experimento

A lo largo de este trabajo, el término *experimento* hace referencia a una instancia completa y controlada del proceso de entrenamiento y evaluación de un modelo bajo una configuración específica. Cada experimento se define por una combinación particular de arquitectura utilizada, configuración del conjunto de datos, tipo de tarea (binaria o multiclase), técnicas de preprocesamiento y aumentos aplicados, función de pérdida empleada, y valores de hiperparámetros clave.

Esta nomenclatura permite establecer comparaciones consistentes y reproducibles entre distintas variantes del modelo, facilitando el análisis sistemático del impacto de cada decisión metodológica sobre el rendimiento obtenido.

Todos los modelos fueron entrenados bajo un esquema homogéneo de preparación y evaluación, siguiendo los pasos que se detallan a continuación:

- **Preprocesamiento:** aplicación de una canalización unificada de transformación sobre todas las imágenes, incluyendo redimensionamiento, normalización y conversiones de color cuando fue necesario.
- **División estratificada:** partición del conjunto de datos en subconjuntos de entrenamiento, validación y prueba, garantizando una representación proporcional de cada clase en cada división.
- **Inicialización del entrenamiento:** uso de pesos preentrenados (e.g., Zoobot) para inicializar la red base, complementados con capas personalizadas inicializadas desde cero.
- **Entrenamiento progresivo:** ajuste dinámico de hiperparámetros según la estabilidad observada durante el entrenamiento, en combinación con técnicas de aprendizaje curricular y ajuste de la tasa de aprendizaje.
- **Monitoreo de validación:** evaluación continua del desempeño mediante múltiples métricas, aplicando detención temprana (*early stopping*) para evitar sobreajuste.
- **Ensamblado por instantáneas:** almacenamiento periódico del estado del modelo durante el entrenamiento para construir un ensamblado posterior

mediante promedio de predicciones.

- **Evaluación final:** selección del mejor modelo según el  $F1\text{-score}_{\text{macro}}$  en validación y evaluación sobre el conjunto de prueba mantenido sin exponer.

### 5.5.3. Selección del modelo final

La elección final del modelo se basó en el  $F1\text{-score}_{\text{macro}}$  sobre el conjunto de validación, dado que esta métrica proporciona una evaluación equilibrada del desempeño en un contexto de clases desbalanceadas.

Se llevaron a cabo múltiples experimentos (EXP022–EXP027), evaluando arquitecturas convolucionales (EfficientNet-B3, ConvNeXt-Base), modelos ligeros (FastMobileNetV2), arquitecturas basadas en atención (ViT, Swin Transformer) y combinaciones mediante ensambles.

Los resultados muestran que **ConvNeXt-Base** alcanzó el mejor desempeño global, particularmente en la tarea de clasificación binaria, con un  $F1\text{-score}$  de 0.913 y una exactitud del 91.3 %, superando consistentemente a las demás arquitecturas evaluadas. En el caso de clasificación multiclase, también presentó el mejor compromiso entre rendimiento y estabilidad, con un  $F1\text{-score}$  de 0.68.

Si bien los modelos en ensamble (por ejemplo, ConvNeXt-Base + EfficientNet-B5) mostraron mejoras marginales en ciertos experimentos, estos implicaron un costo computacional significativamente mayor, tanto en entrenamiento como en inferencia. Por otro lado, arquitecturas más livianas como FastMobileNetV2 presentaron tiempos de entrenamiento reducidos, pero con una pérdida notable en precisión, especialmente en clases minoritarias.

En cuanto a los modelos basados en Transformers (ViT y Swin), si bien mostraron capacidad para capturar relaciones espaciales globales, su desempeño fue más inestable, probablemente debido al tamaño moderado del conjunto de datos y al fuerte desbalance entre clases.

ConvNeXt-Base se seleccionó como modelo final debido a su capacidad de capturar estructuras morfológicas complejas mediante kernels de gran tamaño, su estabilidad durante el entrenamiento y su excelente desempeño empírico en todas las configuraciones evaluadas.

#### 5.5.4. Selección de la función de pérdida

Se evaluaron distintas funciones de pérdida diseñadas para escenarios desbalanceados, incluyendo Cross-Entropy, Focal Loss, Asymmetric Loss (ASL) y LDAM Loss.

Durante las pruebas preliminares, se observó que la Cross-Entropy tendía a favorecer las clases mayoritarias, reduciendo significativamente el recall en las clases menos representadas. Por su parte, la Asymmetric Loss mostró inestabilidades durante el entrenamiento, particularmente al combinarse con tasas de aprendizaje elevadas y técnicas de aumento de datos como Mixup, lo que derivó en fluctuaciones en la función de pérdida y dificultades en la convergencia. En el caso de LDAM Loss, si bien permitió mejorar marginalmente el rendimiento en clases minoritarias, su desempeño resultó altamente sensible a la selección de hiperparámetros, dificultando su aplicación robusta en este contexto. En contraste, la Focal Loss demostró un comportamiento más estable y consistente, permitiendo mejorar el balance entre precisión y recall en clases minoritarias sin introducir inestabilidades en el entrenamiento. En particular, el uso de  $\gamma = 3,0$  junto con ponderación dinámica de clases permitió obtener mejoras sostenidas en el F1-score macro. Por estas razones, se adoptó una variante mejorada de Focal Loss como función de pérdida principal en este trabajo.

#### 5.5.5. Configuración del conjunto de datos

Durante la ejecución del experimento seleccionado se utilizaron dos configuraciones principales del conjunto de galaxias anilladas, según el objetivo de cada fase:

- **EXP026-B1 y EXP026-M1:** Se empleó un subconjunto de 3 clases de galaxias anilladas (tipos 4, 8 y 12), excluyendo las galaxias con anillos parciales (tipo 16), con el fin de estudiar el efecto de remover la clase más escasa y compleja.
- **EXP026-B2 y EXP026-M2:** Se utilizó el conjunto completo de 4 clases de galaxias anilladas (tipos 4, 8, 12 y 16) en configuraciones tanto binarias como multiclase, permitiendo evaluar el rendimiento del modelo en condiciones más cercanas al entorno real de clasificación morfológica.

Este enfoque progresivo permitió explorar la influencia del desequilibrio entre clases, la dificultad morfológica y el diseño del modelo sobre el desempeño final, estableciendo un marco de análisis comparativo robusto.

## 5.6. Resultados y análisis

En esta sección se presentan y discuten los resultados obtenidos tanto para la clasificación binaria como para la multiclase. Los análisis muestran de manera consistente que la primera, la cual distingue entre galaxias con y sin anillos, alcanza un rendimiento significativamente superior frente a la clasificación basada en tipos específicos de anillos. La Tabla 5.6.1 muestra en detalle estos resultados. Este comportamiento se refleja tanto en la métrica de  $F1\text{-score}_{\text{macro}}$  como en la exactitud.

**Tabla 5.6.1:** Resultados de los experimentos de clasificación de galaxias anilladas y no anilladas.

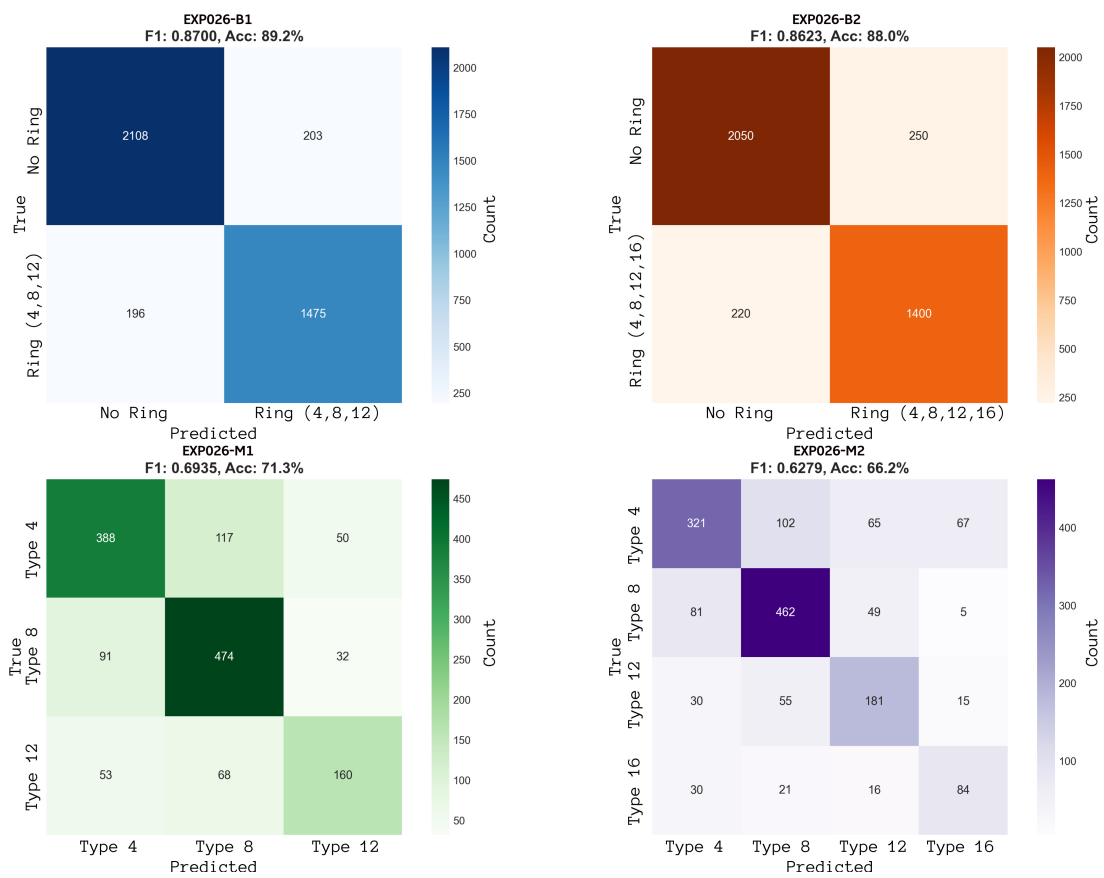
Experimento	Enfoque	Clases	Modelos	F1 Score	Exactitud	Tiempo de entrenamiento
EXP026-B1	Anillo vs No Anillo	AA+TNA	ConvNeXt-Base	0.8700 ✓	89.2% ✓	12.7 min
EXP026-B2	Anillo vs No Anillo	TA+TNA	ConvNeXt-Base	0.8623 ✓	88.0% ✓	26.0 min
EXP026-M1	3 Clases	4,8,12	ConvNeXt-Base	0.6935	71.3%	14.4 min
EXP026-M2	4 Clases	4,8,12,16	ConvNeXt-Base	0.6279	66.2%	17.1 min

**TA:** Todas las anilladas. **TNA:** Todas las no anilladas. **AA:** Todas las anilladas menos las de clase 16.

Estos resultados indican que la formulación binaria que considera 3 clases (anillos interiores, exteriores y la combinación de ambos, i+o) no solo alcanza mejores niveles de precisión, sino que también converge en menos épocas de entrenamiento, siendo por tanto más eficiente y robusta para aplicaciones de producción.

El análisis de las matrices de confusión asociadas a los experimentos más representativos (Fig. 5.6.1) permite complementar la interpretación de las métricas globales.

En el caso binario, los experimentos EXP026-B1 y EXP026-B2 muestran un equilibrio notable entre verdaderos positivos y verdaderos negativos, con un número reducido de falsos positivos y falsos negativos. Este comportamiento confirma que el modelo es capaz de identificar de manera consistente la presencia de estructuras anulares, incluso cuando se comparan variantes de entrenamiento con o sin la clase 16. La ligera diferencia en el desempeño ( $F1 =$



**Figura 5.6.1:** Matrices de confusión correspondientes a los experimentos EXP026-B1, EXP026-B2 (binarios) y EXP026-M1, EXP026-M2 (multiclase).

0.8700 frente a 0.8623) refleja que la exclusión de las galaxias con anillos parciales contribuye marginalmente a mejorar la precisión, dado que estas representan los casos más ambiguos.

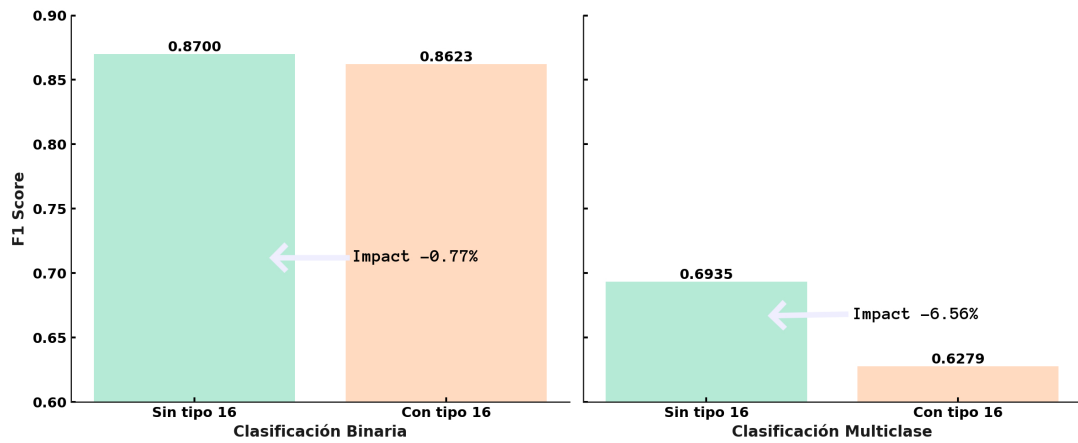
Para la formulación multiclase, los experimentos EXP026-M1 y EXP026-M2 evidencian con claridad las dificultades del modelo al enfrentarse a la clasificación por tipos específicos. En EXP026-M1 (tres clases: 4, 8, 12) se observa un rendimiento relativamente estable en las clases 4 y 8 (anillos internos y externos), mientras que la clase 12 (anillos i+o) presenta una mayor confusión con las anteriores. En EXP026-M2, al incorporar la clase 16 (pseudo-anillos), la caída en desempeño global ( $F1 = 0.6279$ ,  $Acc = 66.2\%$ ) se explica por la alta tasa de errores en esta categoría, que es la más escasa y morfológicamente difusa. A pesar de ello, el modelo logra recuperar parcialmente patrones en las demás clases, destacándose la clase 8 (anillos externos) como la de mejor identificación debido a sus rasgos morfológicos más definidos.

En conjunto, las matrices de confusión confirman que la clasificación binaria resulta más fiable y eficiente, mientras que la clasificación multiclase, aunque metodológicamente más desafiante, ofrece información adicional sobre la complejidad de las morfologías anulares y resalta la necesidad de estrategias específicas para las clases minoritarias.

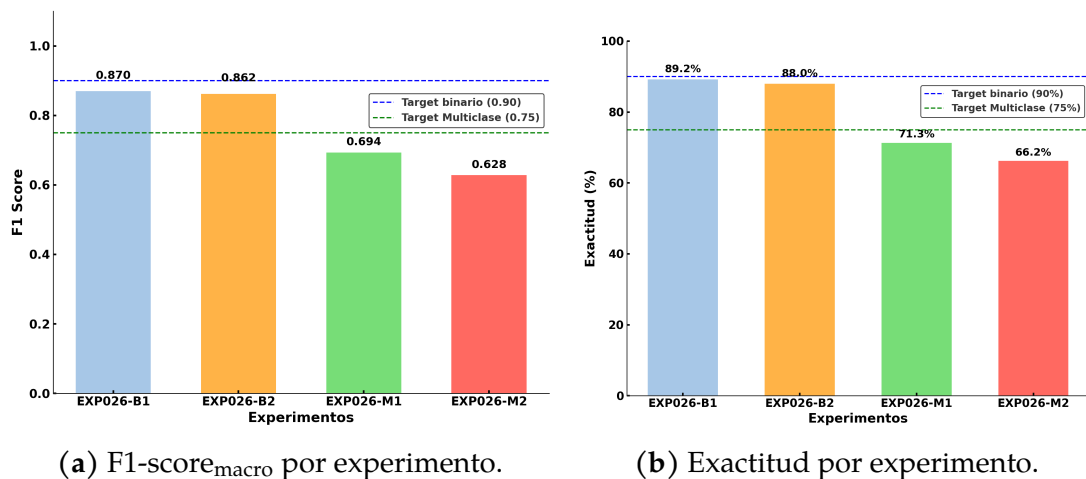
La Fig. 5.6.2 sintetiza de manera visual el efecto de la inclusión de los anillos parciales o pseudo-anillos (clase 16) en ambas formulaciones. En el escenario binario, la caída en desempeño es marginal ( $-0.77$  puntos porcentuales en  $F1$ ), lo que refuerza la robustez del modelo para distinguir entre galaxias con y sin anillos aun en presencia de casos ambiguos. En contraste, en la clasificación multiclase la incorporación de esta clase provoca una degradación mucho más pronunciada ( $-6.56$  puntos porcentuales), confirmando que los anillos parciales constituyen la categoría más desafiante y la principal responsable de la reducción global del rendimiento.

La evaluación comparativa de las métricas globales se complementa con los diagramas de barras resumidos en las Fig. 5.6.3a y 5.6.3b. Estas permiten visualizar de manera directa las diferencias entre los enfoques binarios y multiclase.

Finalmente, la Fig. 5.6.4 desglosa los resultados de  $F1$  por tipo de anillo en



**Figura 5.6.2:** Representación del impacto de la inclusión de la clase 16 (anillos parciales) en las métricas de F1. En la clasificación binaria la degradación es mínima (-0.77%), mientras que en la multiclase resulta considerable (-6.56%).



(a) F1-score<sub>macro</sub> por experimento.

(b) Exactitud por experimento.

**Figura 5.6.3:** Representación comparativa de desempeño entre formulación binaria y multiclase en los experimentos EXP026-B1, EXP026-B2, EXP026-M1 y EXP026-M2. Panel Izquierdo (a): F1-score<sub>macro</sub>. Panel Derecho (b): Exactitud.

los escenarios multiclase. En este caso, la clase 8 (anillos externos) es la más robusta en su identificación, alcanzando valores cercanos al 0.75. En contraste, la clase 16 (anillos parciales) se confirma como la de mayor dificultad, con un desempeño por debajo de 0.55. Este análisis refuerza la idea de que, aunque la clasificación multiclase aporta información más detallada sobre la diversidad morfológica de las galaxias anilladas, también exige estrategias de entrenamiento más sofisticadas para manejar el desbalance y la ambigüedad morfológica.

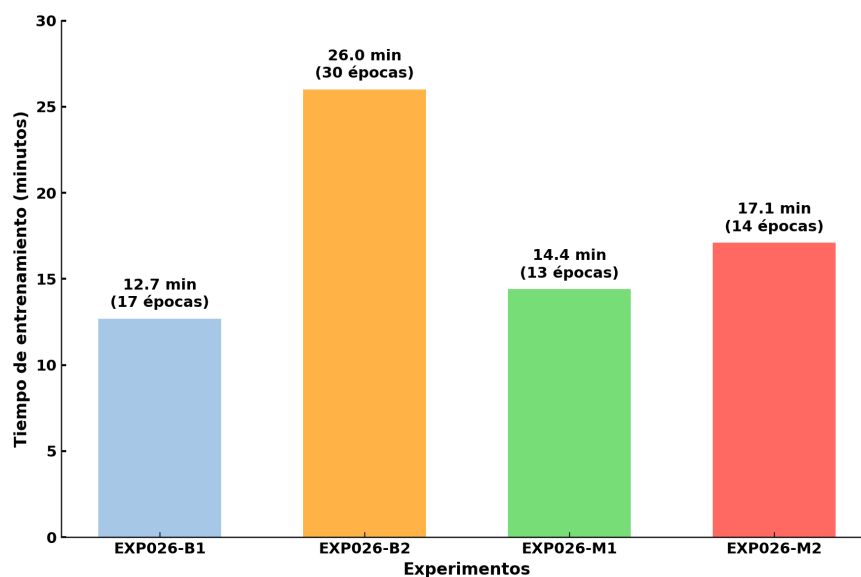


**Figura 5.6.4:** F1-score para los diferentes tipos de anillo (interno, externo, i+o, parcial) en los experimentos multiclase.

### 5.6.1. Eficiencia y progreso del entrenamiento

Además del análisis en términos de métricas de desempeño, resulta fundamental evaluar la eficiencia computacional de los modelos. La Fig. 5.6.5 muestra los tiempos de entrenamiento y las épocas necesarias para alcanzar la convergencia en cada experimento. Se observa que la clasificación binaria (EXP026-B1 y EXP026-B2) requiere entre 12 y 26 minutos, mientras que los experimentos multiclase (EXP026-M1 y EXP026-M2) convergen en tiempos similares (14–17 minutos), aunque con menor rendimiento final en F1. Esto refuerza que, aunque el costo temporal no difiere de manera sustancial, la formulación binaria logra un mejor balance entre eficiencia y desempeño.

La Fig. 5.6.6 combina el F1-score alcanzado frente al tiempo de entrenamiento. Se incorporan líneas de referencia que indican las metas de eficiencia (tiempo  $\leq 20$  minutos) y rendimiento (F1  $\geq 0.85$ ). El único experimento que satisface ambas

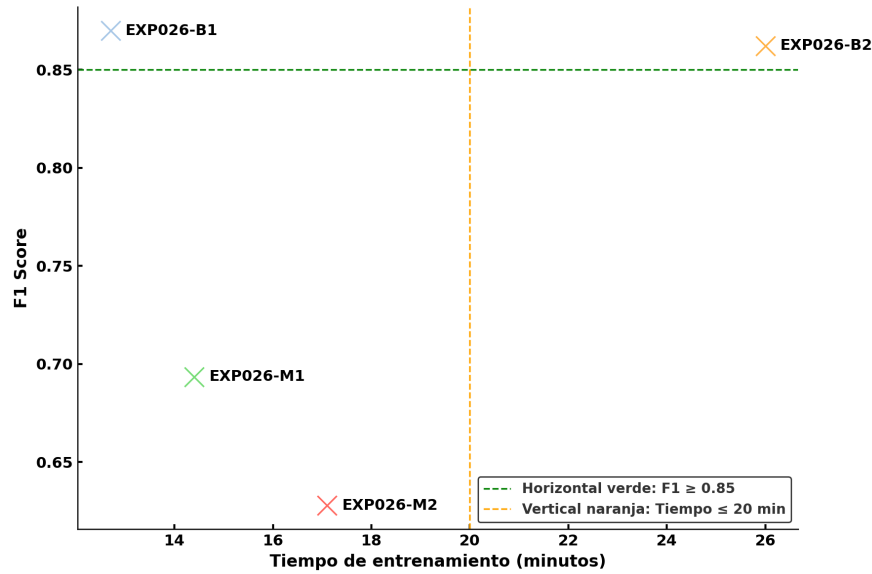


**Figura 5.6.5:** Tiempo de entrenamiento y número de épocas requeridas para la convergencia en los experimentos EXP026.

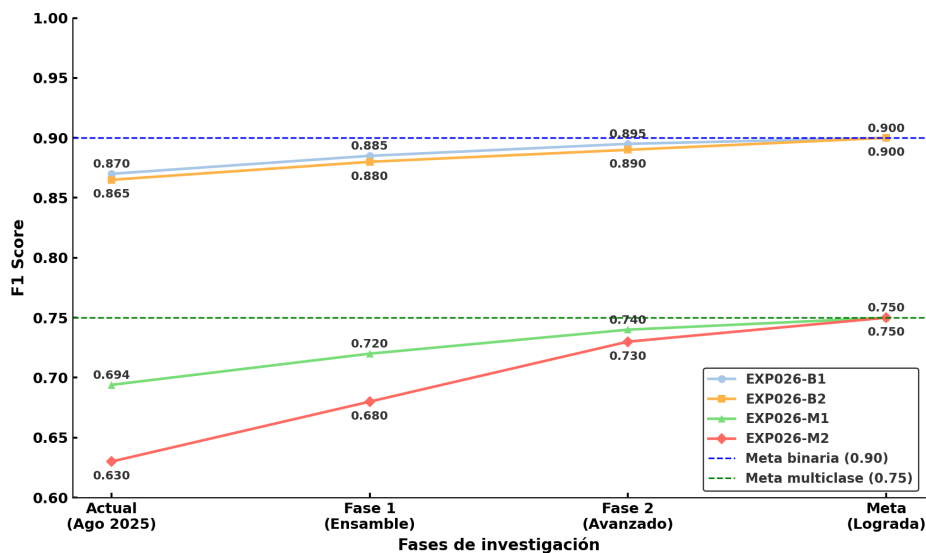
condiciones es EXP026-B1, lo que lo posiciona como el mejor entre precisión y costo computacional. EXP026-B2 alcanza un F1 similar, pero a costa de un tiempo mayor, mientras que los modelos multiclase se ubican consistentemente por debajo de los umbrales de desempeño.

La Fig. 5.6.7 muestra el progreso de los distintos experimentos realizados durante el desarrollo del modelo de clasificación. Los valores de F1-score correspondientes al estado actual provienen de los experimentos EXP026-B1, EXP026-B2, EXP026-M1 y EXP026-M2. Las fases posteriores representan mejoras metodológicas proyectadas, tales como el uso de ensembles de modelos y técnicas avanzadas de aumento de datos, estimadas a partir de los resultados obtenidos en los experimentos preliminares. Los resultados actuales muestran que la clasificación binaria se encuentra muy próxima a la meta de 0.90 en F1, mientras que la multiclase requiere avances metodológicos adicionales para alcanzar el umbral de 0.75. Estrategias como el ensamble de modelos y la incorporación de técnicas avanzadas de aumento de datos podrían cerrar esta brecha en fases posteriores.

En conjunto, estos análisis evidencian que la clasificación binaria no solo proporciona un mayor rendimiento en métricas globales, sino que también se mantiene dentro de márgenes de eficiencia computacional adecuados, lo que



**Figura 5.6.6:** Relación entre el F1-score y el tiempo de entrenamiento. La línea horizontal indica la meta de  $F1 \geq 0.85$ . La línea vertical marca un tiempo de entrenamiento máximo (20 minutos).



**Figura 5.6.7:** Progreso de la investigación hacia las metas de desempeño. Se presentan las fases actuales y proyectadas en términos de F1-score para los distintos experimentos.

la convierte en una alternativa más viable para aplicaciones a gran escala.

### 5.6.2. Comparación con trabajos previos

En la literatura, los estudios previos se han centrado principalmente en esquemas de clasificación binaria (galaxias con y sin anillos) o en la identificación preliminar de candidatos. En contraste, el presente trabajo amplía dicho enfoque mediante una evaluación sistemática que abarca tanto clasificaciones binarias como multiclase, incluyendo explícitamente el impacto de la clase 16 (anillos parciales). Esto último representa un aporte novedoso, dado que dicho subtipo es morfológicamente difuso y escasamente tratado en la bibliografía. Asimismo, el análisis comparativo con investigaciones recientes revela diferencias sustanciales tanto en los objetivos como en el diseño metodológico (ver Tablas 5.6.2 y 5.6.3).

En particular, [Shimakawa et al. \(2024\)](#) construyeron un catálogo morfológico a gran escala con más de 59k galaxias brillantes y 628k objetos adicionales del programa HSC-SSP, entrenando clasificadores profundos para separar estructuras espirales y anulares. Su principal logro fue disponibilizar un muestreo masivo y público de galaxias con morfología anular, aunque con limitaciones asociadas a la resolución angular. De forma complementaria, [Abraham et al. \(2024\)](#) aplicaron técnicas de *deep learning* al SDSS DR18, entrenando sus redes con el catálogo de [Buta \(2017\)](#) y generando un conjunto de 29.4k galaxias, de las cuales casi 5k presentaban anillos con alta confianza. En su análisis, además, correlacionaron la presencia de anillos con barras, aportando pistas sobre la dinámica interna de las galaxias.

Por otro lado, [Shamir \(2020\)](#) se enfocó en un barrido masivo de más de 2.6 millones de objetos del SDSS DR14, aplicando detección automática para proponer 443 candidatos a galaxias anilladas. Si bien no reportaron métricas cuantitativas de desempeño, su aporte radica en la generación de un catálogo inicial de referencia para seguimientos posteriores. En la misma línea, [Krishnakumar and Kalmbach \(2024\)](#) entrenaron redes convolucionales sobre 100k galaxias simuladas y luego aplicaron transferencia a datos reales, complementando su estrategia con aumentación sintética basadas en GANs. Con este *pipeline* lograron identificar 1967 galaxias anilladas, aunque con una tasa alta de falsos positivos (41 %), lo que limita su aplicabilidad a gran escala.

Finalmente, [Chen et al. \(2025\)](#) introdujeron un enfoque semisupervisado con arquitecturas híbridas (*Swin Transformer + ResNet-18*), entrenado con muestras expertamente etiquetadas y extendido con datos no anotados de los surveys DESI (*Dark Energy Spectroscopic Instrument*). Esto les permitió compilar el catálogo más grande hasta la fecha (62.962 anillos confirmados) y alcanzar métricas de precisión y *recall* superiores al 93 %.

En términos de desempeño, los experimentos binarios EXP026-B1 y EXP026-B2 alcanzaron valores de  $F1 = 0.8700$  y  $F1 = 0.8623$ , con exactitudes cercanas al 90 %. Estos resultados sitúan al modelo ConvNeXt-Base en un nivel competitivo respecto a arquitecturas recientes empleadas en estudios como los de [Chen et al. \(2025\)](#), quienes reportan valores superiores al 93 % en precisión y *recall* sobre conjuntos de datos masivos. La diferencia principal radica en que nuestro trabajo se basa en un conjunto de datos curado y balanceado, lo cual garantiza mayor validez científica de las etiquetas, a diferencia de aproximaciones de gran escala que priorizan volumen y velocidad de procesamiento sobre la caracterización morfológica detallada.

**Tabla 5.6.2:** Resumen de estudios recientes: tamaño y tipo de imágenes utilizadas.

Estudio	Tarea	Tamaño del dataset	Tipo de imágenes
Shimakawa et al. (2024)	Anillo vs. No anillo	59.9k + 628k	HSC-SSP multibanda
Abraham et al. (2024)	Anillo vs. No anillo	29.4k (4.85k anillos)	SDSS DR18 (color)
Shamir (2020)	Candidatos a anillos	2.6M	SDSS DR14 (JPG)
Krishnakumar et al. (2024)	Anillo vs. No anillo	100k sim. + 960k aplicadas	Simulaciones + SDSS/Pan-STARRS
Chen et al. (2025)	Anillo vs. No anillo	750k	DESI Legacy Survey
<b>Este trabajo</b>	<b>Anillo vs. No anillo</b>	<b>12439</b>	<b>SDSS DR14 (gri combinado)</b>

Por otro lado, los experimentos multiclase EXP026-M1 y EXP026-M2 ponen de manifiesto los retos asociados a distinguir entre subtipos de anillos. Aunque los valores de  $F1$  (0.6935 y 0.6279, respectivamente) se mantienen por debajo de los alcanzados en clasificación binaria, la comparación directa entre los escenarios con y sin la clase 16 permite cuantificar su efecto negativo sobre el rendimiento

global (degradación de  $-6.56$  puntos porcentuales en  $F1$ ). Ninguno de los estudios previos había documentado de forma explícita esta dificultad, lo que refuerza la relevancia metodológica del presente análisis.

En conjunto, la evidencia obtenida demuestra que nuestro enfoque logra un equilibrio diferencial: por un lado, iguala en solidez a los métodos binarios más modernos reportados en la literatura; por otro, incorpora un análisis multiclase pionero que resalta los desafíos propios de la morfología anular y abre el camino para el desarrollo de estrategias específicas (como funciones de pérdida adaptativas o técnicas avanzadas de aumento de datos) orientadas a clases minoritarias. Este doble aporte consolida el valor científico del trabajo y lo posiciona como una contribución significativa a la investigación sobre clasificación automática de galaxias anilladas.

**Tabla 5.6.3:** Resumen de arquitecturas y métricas de desempeño reportadas en la literatura.

Estudio	Arquitectura	Desempeño
Shimakawa et al. (2024)	CNN personalizada	AU-PRC: 0.93
Abraham et al. (2024)	CNN personalizada	Buen accuracy y recall, sin valores numéricos
Shamir (2020)	Clasificación automatizada	443 candidatos detectados, sin métricas
Krishnakumar et al. (2024)	ResNet-50 + DenseNet	1.967 anillos; FPR elevado
Chen et al. (2025)	Swin Transformer + ResNet-18	Acc: 97 %, Prec: 94 %, Rec: 93 %
<b>Este trabajo</b>	<b>ConvNeXt-Base</b>	<b>F1: 87.00 %, Acc: 89.2 %</b>

# Capítulo 6

## Conclusiones

En esta tesis se abordó el estudio de galaxias con estructuras anilladas desde tres perspectivas complementarias: el análisis de su ocurrencia en entornos grupales, la exploración de catálogos de simulaciones hidrodinámicas de alta resolución y el desarrollo de técnicas de clasificación automática mediante aprendizaje profundo. La integración de estos enfoques permite ofrecer una visión amplia y coherente acerca del papel que desempeñan los anillos en la evolución galáctica. A continuación se presentan los resultados obtenidos a partir de estas tres aproximaciones.

### 6.1. Resultados

En primer lugar, analizamos las propiedades de galaxias con estructuras anilladas en entornos densos correspondientes a grupos de galaxias pobres y ricos. Identificamos galaxias con anillos considerando anillos internos, externos, nucleares, internos+externos y parciales en ambientes de densidad grupal mediante la correlación cruzada de nuestro catálogo de galaxias anilladas (Fernandez et al. 2021) con el catálogo de grupos de galaxias de Tempel et al. (2017), obteniendo una muestra de 637 galaxias anilladas que residen en grupos. Este valor representa una fracción del 34.1 % respecto de la muestra total de 1868 galaxias con anillos. Dividimos la muestra resultante en dos submuestras basadas en la riqueza del grupo: galaxias con anillos en grupos pobres ( $3 \leq N_{rich} \leq 10$ ) y galaxias con anillos en grupos ricos ( $11 \leq N_{rich} \leq 50$ ). Nuestro análisis reveló que del total de 637 galaxias con anillos que habitan

entornos grupales, aproximadamente el 76 % se encuentran en grupos pobres, mientras que solo un 24 % se localizan en sistemas ricos. Observamos que las galaxias con anillos internos son las más abundantes en ambos tipos de grupos, constituyendo aproximadamente el 47 % de la muestra. Por el contrario, las galaxias con anillos nucleares resultaron ser las menos frecuentes en ambos casos.

Otra observación relevante es que, si bien se detectan diferencias en las fracciones de anillos externos y parciales entre galaxias que residen en grupos ricos y pobres, dichas variaciones no resultan estadísticamente significativas al considerar los intervalos de confianza asociados. No obstante, las tendencias observadas podrían ser compatibles con escenarios en los que los anillos parciales se formen mayoritariamente a través de procesos internos, mientras que la evolución posterior de estas estructuras podría verse modulada por el entorno grupal y la acción de fuerzas de marea. La confirmación de este comportamiento requerirá análisis futuros basados en muestras más amplias y en un estudio más detallado de la historia dinámica de las galaxias involucradas.

Para investigar la correlación entre el entorno denso y las características de las galaxias con anillos, construimos muestras de control adecuadas de galaxias sin estructuras anilladas, emparejando simultáneamente el redshift, la magnitud absoluta en la banda  $r$ , la morfología, las masas de grupo y la densidad ambiental con las galaxias anilladas. Estas muestras de control fueron utilizadas para estimar de forma confiable las diferencias entre galaxias con y sin anillos, ayudando así a esclarecer el papel del entorno grupal en las propiedades de las galaxias anilladas. En cuanto a las galaxias sin anillos de las muestras de control, el 81 % se hallaron en grupos pobres, y el 19 % en grupos ricos. Nuestros resultados también revelaron una propensión de las galaxias anilladas a encontrarse en grupos pobres. Si bien debemos ser cautelosos al realizar afirmaciones definitivas (se obtiene una distribución comparable dentro de los intervalos de confianza estadísticos considerados), esta observación sugiere que el entorno podría ejercer una influencia mínima en la ocurrencia de anillos, y que los procesos seculares internos podrían tener mayor responsabilidad en la formación y presencia de estas estructuras.

También examinamos la ocurrencia de galaxias anillos con y sin barras dentro de grupos pobres y ricos. La incidencia de galaxias barradas mostró una notable

similitud independientemente de la riqueza del grupo. Estos hallazgos sugieren que la presencia de barras en galaxias con anillos parece ser independiente del entorno circundante. Además, según la distribución de la distancia al centro del grupo, encontramos que las galaxias con anillos no muestran diferencias en su distribución dentro de los grupos ricos/pobres en comparación con las muestras de control correspondientes.

Por otra parte, exploramos el impacto de las estructuras anilladas sobre las propiedades de las galaxias anfitrionas que residen en ambientes grupales. Nuestro análisis reveló que las galaxias con estructuras anilladas presentan niveles más bajos de actividad de formación estelar y poblaciones estelares más envejecidas en comparación con sus contrapartes sin anillos. Esta tendencia es más pronunciada en las galaxias con anillos dentro de grupos ricos, en comparación con aquellas en grupos pobres. En cambio, las galaxias sin estructuras anilladas en las muestras de control exhiben una actividad de formación estelar más eficiente y poblaciones estelares más jóvenes. Aunque en general las galaxias con anillos presentan una menor tasa de formación estelar respecto de sus contrapartes sin anillos, nuestro estudio revela que las galaxias con distintos tipos de anillos responden de manera diferente al entorno. Las galaxias con anillos nucleares parecen atravesar procesos internos que promueven el flujo de gas hacia el núcleo, favoreciendo la formación estelar. En cambio, aquellas con anillos externos y parciales probablemente experimentan mecanismos de agotamiento de gas, lo que conduce a tasas reducidas de formación estelar.

El análisis de los diagramas de color revela que las galaxias con anillos pueblan predominantemente el **valle verde** y la **secuencia roja**, mostrando un excedente de galaxias en la **secuencia roja**, especialmente dentro de grupos ricos. Por otro lado, las galaxias de las muestras control tienden a residir en la región del **valle verde** y en la **nube azul** de los diagramas. También encontramos que la fracción de galaxias con colores más rojos aumenta con masas de grupo más altas, y que en todo el rango de masas de grupo las galaxias con anillos consistentemente exhiben colores más rojos en comparación con las galaxias sin anillos de sus respectivas muestras de control. Cabe señalar, sin embargo, que los colores utilizados en este análisis han sido corregidos por extinción galáctica y por efecto  $k$ , pero no incluyen correcciones por extinción interna debida al

polvo de las propias galaxias. En este sentido, no puede descartarse que parte del enrojecimiento observado en las galaxias con anillos esté influenciado por un mayor contenido de polvo. Esto resulta plausible si se considera que las estructuras anulares suelen estar asociadas a regiones con acumulación de gas y formación estelar, donde la presencia de polvo puede ser significativa.

En cuanto al parámetro de actividad estelar, se utiliza  $\log(\text{SFR}/M_*)$  derivado de estimaciones espectroscópicas siguiendo a [Brinchmann et al. \(2004\)](#) y [Kauffmann et al. \(2003\)](#). Estas estimaciones incluyen correcciones por extinción interna, particularmente para galaxias con formación estelar, mediante el uso del decremento de Balmer. No obstante, dichas correcciones dependen de supuestos sobre la geometría del polvo y las propiedades del medio interestelar, por lo que no puede descartarse la presencia de efectos residuales, especialmente si existen diferencias sistemáticas en el contenido o distribución de polvo entre galaxias con y sin anillos. Por otro lado, el índice  $D_n4000$ , aunque es más robusto frente a la extinción que los colores de banda ancha, no es completamente insensible al polvo, por lo que variaciones en el contenido de polvo podrían introducir sesgos en su interpretación, aunque en menor medida.

En conjunto, si bien las tendencias observadas en colores,  $\log(\text{SFR}/M_*)$  y  $D_n4000$  sugieren diferencias en las poblaciones estelares y en la actividad de formación estelar entre galaxias con y sin anillos, no puede descartarse que parte de estas diferencias esté modulada por efectos de extinción interna. Sin embargo, dado que las estimaciones espectroscópicas de SFR incorporan correcciones por polvo y que el índice  $D_n4000$  es relativamente robusto frente a la extinción, y considerando además que las diferencias encontradas en estos parámetros entre galaxias anilladas y no anilladas son estadísticamente significativas, es poco probable que el polvo sea el principal responsable de las tendencias observadas. Esto sugiere que las diferencias identificadas reflejan mayormente propiedades físicas intrínsecas de las galaxias con anillos, con una contribución secundaria de efectos de extinción.

Nuestros estudios también indican que las galaxias con anillos, independientemente de su ubicación dentro del grupo, presentan niveles más bajos de actividad de formación estelar, poblaciones estelares más envejecidas y colores más rojos que las galaxias sin anillos de las muestras de control. A partir de la correlación entre las propiedades de las galaxias con anillos y el

parámetro de densidad ambiental, los resultados muestran que, a medida que aumenta la densidad, las galaxias presentan una menor actividad de formación estelar, lo cual también se refleja en poblaciones estelares más antiguas y colores más rojos. Esta tendencia es particularmente notable en galaxias con anillos en grupos tanto pobres como ricos.

El estudio de galaxias con anillos en entornos densos, incluyendo tanto grupos ricos como pobres, indica que un anillo podría formar parte de un proceso que conduce al agotamiento de gas en el disco. Esto, a su vez, provoca una disminución en la actividad de formación estelar y contribuye al envejecimiento y enrojecimiento de la población estelar de la galaxia anfitriona. Además, mecanismos típicos observados en entornos densos, como la presión por arrastre, la evaporación y las interacciones de marea que eliminan material de los discos, pueden acelerar el proceso de consumo de gas en galaxias con anillos que residen en grupos, lo que resulta en una evolución galáctica acelerada y una disminución más rápida de la formación estelar.

A continuación, con el fin de ampliar la perspectiva obtenida a partir de los datos observacionales, se llevó a cabo un análisis de galaxias anilladas en la simulación Illustris TNG50. Nos enfocamos en galaxias dentro del rango de corrimiento al rojo ( $0.01 < z < 0.1$ ), comparable al catálogo de galaxias anilladas de SDSS-DR14 (Fernandez et al. 2021). Las galaxias de TNG50 también se seleccionaron con  $M_{\star} > 10^9 M_{\odot}$ ,  $\log(\text{sSFR}/\text{yr}^{-1}) > -13$  y  $r_{50} > 1$  kpc, de acuerdo con las restricciones definidas en nuestro trabajo previo. Realizamos una clasificación visual mediante el análisis de imágenes sintéticas libres de polvo de galaxias vistas de frente, donde el parámetro principal considerado fue la presencia de estructuras anulares. Estas estructuras se clasificaron en anillos internos, anillos externos, anillos internos + externos (i+o), y pseudo-anillos. Encontramos que 807 galaxias dentro de la simulación cumplían con estos criterios y fueron clasificadas como galaxias anilladas. Aproximadamente el 59 % de estas galaxias poseen un anillo interno, 22 % un anillo parcial, 12 % un anillo externo y 7 % anillos i+o.

El análisis de la distribución de tipos de anillos a lo largo de distintos valores de redshift reveló que a valores bajos ( $z \sim 0.01$ ), las galaxias con anillos internos son predominantes (74 %), mientras que esta fracción disminuye ligeramente a medida que el redshift aumenta hasta  $z \sim 0.1$  (54 %). Los anillos externos y los

anillos i+o mantienen una distribución estable a lo largo de  $z$ , lo que indica una evolución menos dependiente del tiempo. En contraste, las galaxias con anillos parciales aumentan en frecuencia del 3 % en  $z \sim 0.01$  al 25 % en  $z \sim 0.1$ , lo que sugiere que estos anillos son estructuras temporales sensibles a los procesos dinámicos galácticos. Esta tendencia también sugiere que los anillos parciales son más comunes en las etapas evolutivas tempranas de las galaxias y pueden transformarse en anillos externos más estables con el tiempo, reflejando un proceso de maduración estructural en las galaxias. También identificamos que el 64 % de nuestras galaxias anilladas tienen barras. Observamos un aumento en el número y porcentaje de galaxias con anillos y barras a medida que  $z$  aumenta, lo que indica que las barras pueden estar más consolidadas en etapas tempranas del desarrollo galáctico, en concordancia con lo encontrado por [Rosas-Guevara et al. \(2022\)](#). En contraste, las galaxias anilladas sin barra no muestran un incremento tan pronunciado.

Comparamos nuestros resultados porcentuales con la muestra observacional generada previamente ([Fernandez et al. 2021](#)) y encontramos que las galaxias simuladas muestran una mayor prevalencia de anillos internos (59 % en TNG50 vs. 49 % en SDSS). Sin embargo, los anillos i+o son menos comunes en la simulación (7 % en TNG50 vs. 21 % en SDSS). Los anillos parciales presentan una ligera variación, apareciendo con mayor frecuencia en TNG50 con un 22 % frente al 19 % en SDSS. En contraste, los anillos externos muestran porcentajes similares en ambos catálogos. Además, la fracción de galaxias anilladas que presentan barras es consistente entre la muestra observacional del SDSS y la simulación TNG50, con un valor cercano al 64 % en ambos casos. Cabe señalar que, dado que la muestra del SDSS se concentra mayormente hacia  $z \sim 0,1$  y que en TNG50 se observa una leve evolución de las fracciones en el rango  $0,01 \leq z \leq 0,1$ , parte de las diferencias cuantitativas podría estar influenciada por este efecto reciente. No obstante, al considerar el snapshot de la simulación más cercano a  $z = 0,1$ , las tendencias cualitativas se mantienen dentro de las incertidumbres estadísticas.

También construimos una muestra de control de galaxias no anilladas con distribuciones similares de  $z$ ,  $M_{\star}$  y densidad ambiental a las de las galaxias anilladas, con el fin de estudiar las propiedades de las galaxias con anillos en la simulación. Adicionalmente, para este análisis, dividimos la muestra de

galaxias anilladas en cuatro grupos: (i) galaxias anilladas con un anillo interno, (ii) galaxias anilladas con otros tipos de anillos, incluyendo anillos dobles (i+o), anillos externos y anillos parciales, (iii) galaxias anilladas con barra, y (iv) galaxias anilladas sin barra. A partir del estudio de estas propiedades, encontramos que:

- Las galaxias anilladas tienden a tener menor SFR en comparación con la muestra de control, siendo aquellas con anillos internos y barras las que presentan las tasas más bajas. Además, las galaxias anilladas con barra muestran consistentemente menores sSFR en la mayoría de los rangos de masa, lo que resalta la influencia de las características morfológicas en la dinámica de formación estelar. La  $f_{\text{gas}}$  proporciona información adicional, con fracciones más bajas que indican galaxias más evolucionadas. El análisis de  $f_{\text{gas}}$  y  $\text{Log}(\text{sSFR})$  en distintos tipos de galaxias revela que fracciones de gas más altas corresponden a mayores SFR, sin embargo, los anillos internos y las barras aún conducen a tasas menores, lo que sugiere que las galaxias con este tipo de estructuras podrían ejercer cierta influencia en la regulación de la formación estelar y la evolución general.
- El análisis de los índices de color de las galaxias revela información sobre la formación estelar, evolución galáctica e influencias ambientales. Usando las magnitudes estelares de TNG50 en varias bandas, investigamos los colores de las galaxias para entender su estado evolutivo y características estructurales. Encontramos que las galaxias anilladas presentan un desplazamiento hacia colores más rojos en comparación con la muestra de control, lo que indica poblaciones estelares más viejas y evolucionadas. Específicamente, las galaxias con anillos internos son ligeramente más rojas que aquellas con otros tipos de anillos, lo que sugiere una reducción de gas más eficiente, particularmente en las de mayor masa. Las galaxias anilladas con barra también exhiben índices de color más rojos que las que no tienen barra. Los diagramas color–magnitud ( $M_g - M_r$  y  $M_U - M_r$  versus  $M_r$ ), construidos a partir de mapas de contorno, muestran que las galaxias anilladas cubren un rango más amplio de valores de color en comparación con la muestra de control, mientras que esta última se concentra hacia colores relativamente más azules. Esta distribución es consistente con los resultados estadísticos obtenidos para los índices de

color y sugiere que las galaxias anilladas presentan una mayor diversidad en sus propiedades fotométricas, posiblemente asociada a diferencias en sus historias de formación y evolución estelar.

- El análisis de la metalicidad revela que las galaxias anilladas son ligeramente más metálicas en comparación con las que no presentan anillos, lo que sugiere que estas galaxias han atravesado diversas etapas evolutivas y procesos de enriquecimiento. Además, se encontró que las galaxias anilladas con barra tienen una mayor metalicidad en comparación con aquellas sin barra. Este hallazgo podría reflejar el rol de la barra en dirigir gas hacia las regiones centrales, promoviendo así una formación estelar inicial y el enriquecimiento metálico posterior. Adicionalmente, con respecto a la MZR, las galaxias anilladas muestran mayor variabilidad en la metalicidad para una dada  $M_{\star}$  en comparación con la muestra de control. Las galaxias anilladas presentan una correlación débil entre la metalicidad y  $M_{\star}$ , con una tendencia hacia mayor metalicidad en masas más bajas, lo que sugiere procesos evolutivos distintos en comparación con las galaxias sin anillos.

Es importante destacar que muchos de estos hallazgos son consistentes con los resultados observacionales obtenidos previamente a partir del estudio de galaxias anilladas de SDSS ([Fernandez et al. 2021](#)).

Además, estudiamos las características de las galaxias anilladas a través de perfiles radiales de densidad superficial de masa estelar proyectada,  $\Sigma_{\star}(r)$ . Encontramos que los perfiles resultantes revelan prominencias en los radios donde se localizan los anillos, particularmente en galaxias con anillos internos robustos, y muestran cómo estos conglomerados estelares afectan la pendiente local del perfil.

Del estudio del tamaño galáctico, medido por  $r_{50}$ , encontramos que las galaxias con anillos externos tienen valores de  $r_{50}$  similares o ligeramente mayores que su grupo de control, mientras que aquellas con anillos internos o parciales presentan tamaños menores. Expresar  $\Sigma_{\star}(r)$  en términos de  $r_{50}$  permite alinear las regiones radiales y realzar la señal de las estructuras anulares. Los residuales en los perfiles muestran un déficit central antes del anillo, con los anillos internos y externos ubicados aproximadamente en  $r_{50}$  y  $1.5 r_{50}$ , respectivamente. Las

galaxias con anillos i+o indican que los anillos internos son más compactos y masivos. Las galaxias con anillos parciales presentan perfiles de masa más profundos en la región central en comparación con su grupo de control, con pseudo-anillos que se extienden más allá de  $r_{50}$ .

Nuestro análisis exhaustivo de la simulación TNG50 ha proporcionado información valiosa sobre la estructura y evolución de las galaxias anilladas. Al examinar sus propiedades, perfiles de densidad superficial de masa estelar y comparar sus tamaños, hemos resaltado el rol de las estructuras anulares como reflejo de los procesos subyacentes que influyen en la dinámica galáctica. Nuestros hallazgos concuerdan bien con los datos observacionales, reforzando la idea de que la interacción entre características estructurales, como anillos y barras, y los procesos que impulsan la formación y evolución galáctica es compleja. Comprender estas relaciones resulta clave para profundizar en nuestro conocimiento de la dinámica galáctica y de los factores que regulan sus propiedades a lo largo del tiempo.

En la última etapa de la tesis se desarrolló un sistema de clasificación automática de galaxias anilladas, basado en aprendizaje profundo. Se construyó un conjunto de datos de más de 12.000 galaxias con y sin anillos, cuidadosamente depurado y equilibrado mediante técnicas de aumento de datos astronómicamente válidas (rotaciones arbitrarias, traslaciones, variaciones fotométricas y *Mixup*). El *pipeline* incluyó la eliminación sistemática de estrellas de primer plano, el centrado automático de galaxias y la normalización de brillo y color, garantizando la homogeneidad de las entradas.

En el entrenamiento se exploraron arquitecturas de última generación, desde redes convolucionales eficientes (EfficientNet-B3, FastMobileNetV2) hasta modelos modernizados como ConvNeXt-Base y transformadores de visión (ViT, Swin). Para mitigar el desbalance entre clases, se emplearon funciones de pérdida especializadas (*Focal Loss* mejorada, *LDAM*, *ASL*) y esquemas de ponderación dinámica. Asimismo, se aplicaron técnicas de *snapshot ensembling*, *curriculum learning* y programación cosenoidal de la tasa de aprendizaje, que contribuyeron a estabilizar el proceso y mejorar la capacidad de generalización.

La integración de estas metodologías permitió no solo obtener métricas de desempeño competitivas (con valores de *F1-score* macro superiores a 0.87 en

escenarios binarios), sino también sentar las bases para la aplicación futura de redes profundas en la clasificación sistemática de estructuras galácticas poco frecuentes.

El desarrollo realizado de modelos de clasificación automática permitió evaluar la capacidad de las redes neuronales profundas para identificar galaxias anilladas en imágenes del SDSS. Los experimentos evidenciaron que el enfoque binario (anillo vs. no anillo) resulta más eficaz y robusto que la clasificación multiclase, alcanzando valores de F1 y exactitudes superiores al 88 %. En particular, el experimento **EXP026-B1**, basado en la arquitectura ConvNeXt-Base, logró un  $F1\text{-score}_{\text{macro}}$  de 0.8700 y una exactitud del 89.2 %, mientras que los escenarios multiclase mostraron un desempeño claramente inferior, limitado por la dificultad de discriminar anillos parciales. El análisis exhaustivo de 28 configuraciones confirmó la robustez del enfoque binario, así como su mayor eficiencia computacional, al requerir menos tiempo y recursos de entrenamiento. Estos resultados posicionan al esquema binario como la estrategia más viable para aplicaciones en relevamientos masivos. De este modo, la tesis no solo aporta resultados astrofísicos sobre galaxias anilladas, sino también una estrategia reproducible y extensible de clasificación automática para los grandes relevamientos de la próxima década.

En conjunto, los resultados de esta tesis permiten concluir que las estructuras anilladas constituyen trazadores valiosos de la evolución galáctica. Tanto en observaciones como en simulaciones, estas galaxias evidencian procesos de regulación de gas, envejecimiento estelar y enriquecimiento químico, modulados en parte por el entorno. A la vez, las herramientas de clasificación automática ofrecen un marco sólido para aprovechar los grandes relevamientos que estarán disponibles en los próximos años.

De cara al futuro, resulta de particular interés extender la identificación de galaxias anilladas al relevamiento MaNGA, cuyo mapeo espectroscópico resuelto espacialmente permitirá estudiar en detalle la cinemática y las propiedades estelares y gaseosas de estas galaxias. La incorporación de esta información enriquecerá de manera significativa nuestro enfoque al posibilitar una conexión más directa entre la morfología, la dinámica interna y los procesos de formación estelar, complementando los resultados presentados en esta tesis. Asimismo, se proponen estrategias específicas para abordar la clasificación de anillos

parciales, junto con la exploración de arquitecturas más avanzadas, como Vision Transformers y E(2)-CNN, y la integración de los modelos en flujos de datos de próxima generación como el *Legacy Survey of Space and Time* (LSST).

# Apéndice A

## A1. Regresión de Theil–Sen

La regresión de Theil–Sen es un método estadístico robusto para estimar una relación lineal entre dos variables. A diferencia de la regresión por mínimos cuadrados ordinarios (OLS, por sus siglas en inglés), este enfoque no se basa en promedios, sino en medianas, lo que lo hace menos sensible a la presencia de valores atípicos o distribuciones con colas pesadas.

El procedimiento se desarrolla en dos pasos principales. Primero, se calculan todas las pendientes posibles entre pares de observaciones  $(x_i, y_i)$  y  $(x_j, y_j)$  con  $i < j$ . La pendiente estimada se define como la mediana de esas pendientes:

$$m = \text{mediana} \left( \frac{y_j - y_i}{x_j - x_i} \right), \quad (\text{A1.1})$$

Posteriormente, el intercepto se determina como la mediana de las diferencias  $y_i - mx_i$ :

$$b = \text{mediana} (y_i - mx_i), \quad (\text{A1.2})$$

De esta forma, la recta ajustada toma la forma:

$$\hat{y} = mx + b, \quad (\text{A1.3})$$

La regresión de Theil–Sen se caracteriza por su robustez, ya que al basarse en medianas en lugar de medias es mucho menos sensible a la influencia de

valores atípicos que suelen sesgar de manera notable a los métodos tradicionales de mínimos cuadrados. Se trata además de un procedimiento no paramétrico, lo que significa que no requiere suposiciones estrictas sobre la distribución de los errores y puede aplicarse en contextos donde los datos presentan ruido heterogéneo. Bajo condiciones generales, este estimador es consistente y converge al valor real de la pendiente, lo que lo convierte en una herramienta confiable para el análisis de relaciones lineales. Entre sus ventajas destaca la estabilidad de las estimaciones incluso cuando una parte significativa de los datos está contaminada por errores de medición, aunque su principal limitación es el costo computacional, ya que la necesidad de calcular todas las combinaciones de pares de puntos implica un orden de complejidad cuadrático. Por esta razón, en conjuntos de datos muy grandes suelen utilizarse algoritmos optimizados o aproximaciones. En cuanto a sus aplicaciones, la regresión de Theil-Sen ha encontrado un uso amplio en diferentes campos de las ciencias aplicadas, como la climatología, la hidrología y las ciencias sociales, en los que la calidad de los datos no siempre es uniforme y la presencia de valores extremos es frecuente, lo que hace de este método una alternativa robusta y confiable frente a los enfoques convencionales.

## A2. Redes Neuronales Convolucionales

Las redes neuronales convolucionales (CNN, por sus siglas en inglés) son un tipo especializado de red neuronal artificial diseñada para el procesamiento de datos con una estructura de tipo rejilla, como las imágenes. A diferencia de las redes densamente conectadas, las CNN explotan las propiedades espaciales locales de los datos para reducir el número de parámetros y facilitar la extracción automática de características relevantes.

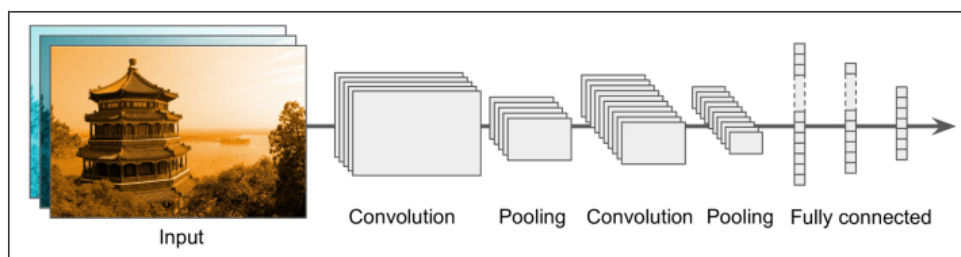
Una CNN típica está compuesta por una secuencia de capas, entre las que se destacan:

- **Capas convolucionales:** Aplican filtros (o kernels) que recorren la imagen realizando operaciones de convolución. Estos filtros aprenden automáticamente a detectar características como bordes, texturas y formas.
- **Capas de activación:** Utilizan funciones no lineales, como la ReLU (Rectified Linear Unit), que permiten a la red aprender relaciones no

lineales complejas.

- **Capas de agrupamiento (pooling):** Reducen la dimensión espacial de los mapas de activación, manteniendo la información más relevante y disminuyendo el riesgo de sobreajuste.
- **Capas completamente conectadas:** Se ubican al final de la red y permiten la toma de decisiones finales basadas en las características extraídas.

Gracias a su capacidad para aprender jerarquías de características desde los datos en crudo, las CNN han logrado un rendimiento sobresaliente en tareas de visión por computadora, como clasificación, detección de objetos y segmentación semántica (Géron 2019; LeCun et al. 2015).



**Figura A2.1:** Esquema conceptual de una red neuronal convolucional típica. La imagen de entrada atraviesa varias capas convolucionales y de agrupamiento antes de ser procesada por capas densas para generar una predicción. Fuente adaptada de Géron (2019).

## A3. Detalles de configuración experimental y reproducibilidad

Este apéndice documenta de manera exhaustiva los aspectos técnicos y procedimentales del entrenamiento, evaluación y configuración del entorno utilizados en este estudio. La inclusión de estos detalles busca facilitar la reproducción de los resultados obtenidos, en concordancia con las buenas prácticas actuales en aprendizaje automático aplicado a la astronomía.

### A3.1. Configuración de entrenamiento

El modelo fue entrenado utilizando el optimizador AdamW con los siguientes hiperparámetros:

- **Tasa de aprendizaje inicial:** [ $5^{-6}$ ,  $10^{-4}$ .]
- **Weight decay:** 0.01,0.015,0.05.
- **Tamaño de lote:** 8-64.
- **Clipping de gradiente:** 0.5.

Se empleó programación de tasa de aprendizaje mediante *cosine annealing* con reinicios cálidos, con ciclos de 50 épocas y una fase de *warmup* de 10 épocas. Además, se aplicaron las siguientes técnicas de regularización:

- Entrenamiento en precisión mixta (FP16) con escalado automático.
- *Early stopping* con paciencia de 35 épocas y mejora mínima (*min\_delta*) de 0.001.
- Almacenamiento de puntos de control (checkpoints) con el mejor F1-score de validación.
- División estratificada del conjunto de datos: 70 % entrenamiento, 15 % validación, 15 % prueba.

nal]Entorno computacio

nal

El entorno de hardware y software utilizado fue el siguiente:

#### Hardware:

- GPU: NVIDIA RTX 3080 (10.0 GB VRAM)
- CPU: Intel Core i9-12900KF
- RAM: 32 GB DDR5.
- Almacenamiento: Disco 1:SSD NVMe de 233 GB, Disco2:SSD Sata de 894 GB.

#### Software:

- Python 3.10.11
- PyTorch 2.1.2 con CUDA 12.9

- Bibliotecas auxiliares: `scikit-learn` 1.3.2, `pandas` 2.1.3, `numpy` 1.26.2.

### A3.2. Métricas de evaluación

Dada la naturaleza multiclase y el desbalance presente en las etiquetas, se utilizaron métricas variadas para evaluar el desempeño:

#### Métricas principales:

- F1-score macro: media no ponderada entre clases (métrica principal).
- F1-score ponderado: media ponderada por cantidad de muestras por clase.
- Precisión balanceada.

#### Métricas secundarias:

- Precisión, recall y F1-score por clase.
- Coeficiente de correlación de Matthews (MCC).
- Kappa de Cohen.
- Área bajo la curva ROC (ROC-AUC).

#### Análisis avanzados:

- Calibración de confianza.
- Matrices de confusión.
- Confianza media por clase.
- Acuerdo entre miembros del ensamblado.

### A3.3. Protocolo de entrenamiento y validación

- Preprocesamiento uniforme aplicado a todas las imágenes (redimensionado, normalización).
- División estratificada para mantener proporciones de clases en los conjuntos.
- Inicialización con pesos preentrenados de Zoobot.

- Entrenamiento progresivo con introducción gradual de clases (curriculum learning).
- Validación continua con múltiples métricas.
- Evaluación final en el conjunto de prueba con el modelo de mejor validación.

#### A3.4. Estudios de ablación

Se llevaron a cabo estudios de ablación sistemáticos para evaluar la contribución de cada componente del sistema:

- **Modelo base:** EfficientNet-B3 con entropía cruzada.
- + **Focal Loss:** sustitución por Focal Loss con  $\gamma = 3,0$ .
- + **Pesos de clase:** incorporación de ponderación dinámica.
- + **Arquitectura mejorada:** capas de clasificación ampliadas.
- + **Aumentos avanzados:** técnicas específicas del dominio astronómico.
- + **Mixup:** mezcla de imágenes en el espacio de entrada.
- + **Ensamblado:** inclusión del Snapshot Ensemble.

## Bibliografía

- Bela Abolfathi, D. S. Aguado, Gabriela Aguilar, Carlos Allende Prieto, et al. The Fourteenth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey: First Spectroscopic Data from the Extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey and from the Second Phase of the Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment. , 235(2):42, April 2018. doi: 10.3847/1538-4365/aa9e8a.
- Linn Abraham, Sheelu Abraham, Ajit K. Kembhavi, N. S. Philip, A. K. Aniyan, Sudhanshu Barway, and Harish Kumar. Automated detection of galactic rings from sdss images, 2024. Submitted to ApJ; SDSS DR18.
- Roberto G. Abraham, Francisco Valdes, H. K. C. Yee, and Sidney van den Bergh. The Morphologies of Distant Galaxies. I. an Automated Classification System. , 432:75, September 1994. doi: 10.1086/174550.
- J. A. L. Aguerri, J. Méndez-Abreu, and E. M. Corsini. The population of barred galaxies in the local universe. I. Detection and characterisation of bars. , 495 (2):491–504, February 2009. doi: 10.1051/0004-6361:200810931.
- Jeremy R. Allington-Smith, Richard Ellis, Esther L. Zirbel, and Jr. Oemler, Augustus. The Evolution of Galaxies in Radio-selected Groups. , 404:521, February 1993. doi: 10.1086/172305.
- M. Alonso, Diego G. Lambas, Patricia Tissera, and Georgina Coldwell. Effects of galaxy interactions in different environments. , 367(3):1029–1038, April 2006. doi: 10.1111/j.1365-2966.2006.10020.x.
- M. Sol Alonso, Patricia B. Tissera, Georgina Coldwell, and Diego G. Lambas. Galaxy pairs in the 2dF survey - II. Effects of interactions on star formation in groups and clusters. , 352(3):1081–1088, August 2004. doi: 10.1111/j.1365-2966.2004.08002.x.
- S. Alonso, V. Mesa, N. Padilla, and D. G. Lambas. Galaxy interactions. II. High density environments. , 539:A46, March 2012. doi: 10.1051/0004-6361/201117901.
- Sol Alonso, Georgina Coldwell, and Diego G. Lambas. AGN spiral galaxies in groups: effects of bars. , 572:A86, December 2014. doi: 10.1051/0004-6361/201424523.
- E. Athanassoula, M. Romero-Gómez, A. Bosma, and J. J. Masdemont. Rings and

- spirals in barred galaxies - III. Further comparisons and links to observations. , 407(3):1433–1448, September 2010. doi: 10.1111/j.1365-2966.2010.17010.x.
- Micaela Bagley, Ivan Minchev, and Alice C. Quillen. The Morphology of Collisionless Galactic Rings Exterior to Evolving Bars. *arXiv e-prints*, art. arXiv:0808.1841, August 2008. doi: 10.48550/arXiv.0808.1841.
- I. K. Baldry, M. L. Balogh, R. Bower, K. Glazebrook, and R. C. Nichol. Color bimodality: Implications for galaxy evolution. In Roland E. Allen, Dimitri V. Nanopoulos, and Christopher N. Pope, editors, *The New Cosmology: Conference on Strings and Cosmology*, volume 743 of *American Institute of Physics Conference Series*, pages 106–119, December 2004. doi: 10.1063/1.1848322.
- I. K. Baldry, M. L. Balogh, R. G. Bower, K. Glazebrook, R. C. Nichol, S. P. Bamford, and T. Budavari. Galaxy bimodality versus stellar mass and environment. , 373(2):469–483, December 2006. doi: 10.1111/j.1365-2966.2006.11081.x.
- Michael L. Balogh, Simon L. Morris, H. K. C. Yee, R. G. Carlberg, and Erica Ellingson. Differential Galaxy Evolution in Cluster and Field Galaxies at  $z \sim 0.3$ . , 527(1):54–79, December 1999. doi: 10.1086/308056.
- Michael L. Balogh, Ivan K. Baldry, Robert Nichol, Chris Miller, Richard Bower, and Karl Glazebrook. The Bimodal Galaxy Color Distribution: Dependence on Luminosity and Environment. , 615(2):L101–L104, November 2004. doi: 10.1086/426079.
- J. D. Barrow, S. P. Bhavsar, and D. H. Sonoda. A bootstrap resampling analysis of galaxy clustering. , 210:19, September 1984. doi: 10.1093/mnras/210.1.19P.
- Emanuel Ben-Baruch, Tal Ridnik, Nadav Zamir, Asaf Noy, Itamar Friedman, Matan Protter, and Lihi Zelnik-Manor. Asymmetric Loss For Multi-Label Classification. *arXiv e-prints*, art. arXiv:2009.14119, September 2020. doi: 10.48550/arXiv.2009.14119.
- Yoshua Bengio, Jérôme Louradour, Ronan Collobert, and Jason Weston. Curriculum learning. In *Proceedings of the 26th Annual International Conference on Machine Learning, ICML '09*, page 41–48, New York, NY, USA, 2009. Association for Computing Machinery. ISBN 9781605585161. doi: 10.1145/1553374.1553380. URL <https://doi.org/10.1145/1553374.1553380>.
- Michael R. Blanton and John Moustakas. Physical Properties and Environments of Nearby Galaxies. , 47(1):159–210, September 2009. doi: 10.1146/annurev-astro-082708-101734.
- Michael R. Blanton and Sam Roweis. K-Corrections and Filter Transformations in the Ultraviolet, Optical, and Near-Infrared. , 133(2):734–754, February 2007. doi: 10.1086/510127.
- Michael R. Blanton, Daniel Eisenstein, David W. Hogg, David J. Schlegel, and J. Brinkmann. Relationship between Environment and the Broadband Optical

- Properties of Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. , 629(1):143–157, August 2005. doi: 10.1086/422897.
- M. N. Bremer, S. Phillipps, L. S. Kelvin, R. De Propris, Rebecca Kennedy, Amanda J. Moffett, S. Bamford, L. J. M. Davies, S. P. Driver, B.ßler@, B. Holwerda, A. Hopkins, P. A. James, J. Liske, S. Percival, and E. N. Taylor. Galaxy and Mass Assembly (GAMA): Morphological transformation of galaxies across the green valley. , 476(1):12–26, May 2018. doi: 10.1093/mnras/sty124.
- J. Brinchmann, S. Charlot, S. D. M. White, C. Tremonti, G. Kauffmann, T. Heckman, and J. Brinkmann. The physical properties of star-forming galaxies in the low-redshift Universe. , 351(4):1151–1179, July 2004. doi: 10.1111/j.1365-2966.2004.07881.x.
- Kevin Bundy, Matthew A. Bershad, David R. Law, Renbin Yan, Niv Drory, Nicholas MacDonald, David A. Wake, et al. Overview of the SDSS-IV MaNGA Survey: Mapping nearby Galaxies at Apache Point Observatory. , 798(1):7, January 2015. doi: 10.1088/0004-637X/798/1/7.
- R. Buser. A systematic investigation of multicolor photometric systems. I. The UB<sub>V</sub>, RG<sub>U</sub> and uvby systems. , 62:411–424, January 1978.
- R. Buta. The Catalog of Southern Ringed Galaxies. , 96:39, January 1995. doi: 10.1086/192113.
- R. Buta and F. Combes. Galactic rings. *Fundamentals of Cosmic Physics*, 17:95–281, 1996.
- R. Buta and X. Zhang. Pattern speeds and galaxy morphology, 2008. URL <https://arxiv.org/abs/0812.2959>.
- Ronald J. Buta. *Galaxy Morphology*, volume 6, page 1. 2013. doi: 10.1007/978-94-007-5609-0\_1.
- Ronald J. Buta. Galactic rings revisited - I. CVRHS classifications of 3962 ringed galaxies from the Galaxy Zoo 2 Database. , 471(4):4027–4046, November 2017. doi: 10.1093/mnras/stx1829.
- Ronald J. Buta, Gene G. Byrd, and Tarsh Freeman. The Ringed Spiral Galaxy NGC 4622. I. Photometry, Kinematics, and the Case for Two Strong Leading Outer Spiral Arms. , 125(2):634–666, February 2003. doi: 10.1086/345821.
- Ronald J. Buta, Kartik Sheth, E. Athanassoula, A. Bosma, Johan H. Knapen, Eija Laurikainen, Heikki Salo, Debra Elmegreen, Luis C. Ho, Dennis Zaritsky, Helene Courtois, Joannah L. Hinz, Juan-Carlos Muñoz-Mateos, Taehyun Kim, Michael W. Regan, Dimitri A. Gadotti, Armando Gil de Paz, Jarkko Laine, Karín Menéndez-Delmestre, Sébastien Comerón, Santiago Erroz Ferrer, Mark Seibert, Trisha Mizusawa, Benne Holwerda, and Barry F. Madore. A Classical Morphological Analysis of Galaxies in the Spitzer Survey of Stellar Structure in Galaxies (S4G). , 217(2):32, April 2015. doi: 10.1088/0067-0049/217/2/32.

- Ronald J. Buta, Lourdes Verdes-Montenegro, Ancor Damas-Segovia, Michael Jones, Javier Blasco, Mirian Fernández-Lorenzo, Susana Sanchez, Julian Garrido, Pablo Ramirez-Moreta, and Jack W. Sulentic. A comprehensive examination of the optical morphologies of 719 isolated galaxies in the AMIGA sample. , 488(2):2175–2189, September 2019. doi: 10.1093/mnras/stz1780.
- G. Byrd, P. Rautiainen, H. Salo, R. Buta, and D. A. Crocher. Pattern Speed Domains in Ringed Disk Galaxies From Observational and Simulational Databases. , 108:476, August 1994. doi: 10.1086/117085.
- Kaidi Cao, Colin Wei, Adrien Gaidon, Nikos Arechiga, and Tengyu Ma. Learning Imbalanced Datasets with Label-Distribution-Aware Margin Loss. *arXiv e-prints*, art. arXiv:1906.07413, June 2019. doi: 10.48550/arXiv.1906.07413.
- Stéphane Charlot and Marcella Longhetti. Nebular emission from star-forming galaxies. , 323(4):887–903, May 2001. doi: 10.1046/j.1365-8711.2001.04260.x.
- Jianzhen Chen, Zhijian Luo, Cheng Cheng, Jun Hou, Shaohua Zhang, and Chenggang Shu. Detecting galactic rings in the desi legacy imaging surveys with semi-supervised deep learning, 2025. Draft version July 11, 2025; DESI-LS; GC-SWGAN.
- F. Combes and M. Gerin. Spiral structure of molecular clouds in response to bar forcing: a particle simulation. , 150:327–338, September 1985.
- S. Comerón, J. H. Knapen, J. E. Beckman, E. Laurikainen, H. Salo, I. Martínez-Valpuesta, and R. J. Buta. AINUR: Atlas of Images of NUClear Rings. , 402(4): 2462–2490, March 2010. doi: 10.1111/j.1365-2966.2009.16057.x.
- S. Comerón, H. Salo, E. Laurikainen, J. H. Knapen, R. J. Buta, M. Herrera-Endoqui, J. Laine, B. W. Holwerda, K. Sheth, M. W. Regan, J. L. Hinz, J. C. Muñoz-Mateos, A. Gil de Paz, K. Menéndez-Delmestre, M. Seibert, T. Mizusawa, T. Kim, S. Erroz-Ferrer, D. A. Gadotti, E. Athanassoula, A. Bosma, and L. C. Ho. ARRAKIS: atlas of resonance rings as known in the S<sup>4</sup>G. , 562: A121, February 2014. doi: 10.1051/0004-6361/201321633.
- Christopher J. Conselice. The Evolution of Galaxy Structure Over Cosmic Time. , 52:291–337, August 2014. doi: 10.1146/annurev-astro-081913-040037.
- E. M. Corsini, J. Méndez-Abreu, R. Sánchez-Janssen, J. A. L. Aguerri, and S. Zarattini. The relation between bar formation, galaxy luminosity, and environment. *Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplementi*, 25:74, January 2013.
- Yin Cui, Menglin Jia, Tsung-Yi Lin, Yang Song, and Serge Belongie. Class-Balanced Loss Based on Effective Number of Samples. *arXiv e-prints*, art. arXiv:1901.05555, January 2019. doi: 10.48550/arXiv.1901.05555.
- Gerard de Vaucouleurs. Classification and Morphology of External Galaxies. *Handbuch der Physik*, 53:275, January 1959. doi: 10.1007/978-3-642-45932-0\_7.

- Xin-Fa Deng. A tool for the morphological classification of galaxies: the concentration index. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 13(6):651-661, June 2013. doi: 10.1088/1674-4527/13/6/004.
- S. et al. Dieleman. Rotation-invariant convolutional neural networks for galaxy morphology prediction. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 450(2):1441–1459, 2015.
- Sander Dieleman, Kyle W. Willett, and Joni Dambre. Rotation-invariant convolutional neural networks for galaxy morphology prediction. , 450(2): 1441–1459, June 2015. doi: 10.1093/mnras/stv632.
- A. et al. Dosovitskiy. An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale. *arXiv preprint arXiv:2010.11929*, 2020.
- Alexey Dosovitskiy, Lucas Beyer, Alexander Kolesnikov, Dirk Weissenborn, Xiaohua Zhai, Thomas Unterthiner, Mostafa Dehghani, Matthias Minderer, Georg Heigold, Sylvain Gelly, Jakob Uszkoreit, and Neil Houlsby. An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale. *International Conference on Learning Representations (ICLR)*, 2021. URL <https://arxiv.org/abs/2010.11929>.
- A. Dressler. Galaxy morphology in rich clusters: implications for the formation and evolution of galaxies. , 236:351–365, March 1980. doi: 10.1086/157753.
- Maret Einasto and Jaan Einasto. Structure and formation of superclusters - VI. Morphology-density-luminosity relation of isolated and grouped galaxies. , 226:543–562, June 1987. doi: 10.1093/mnras/226.3.543.
- Sara L. Ellison, David R. Patton, Luc Simard, Alan W. McConnachie, Ivan K. Baldry, and J. Trevor Mendel. Galaxy pairs in the Sloan Digital Sky Survey - II. The effect of environment on interactions. , 407(3):1514–1528, September 2010. doi: 10.1111/j.1365-2966.2010.17076.x.
- D. M. Elmegreen, B. G. Elmegreen, F. Combes, and A. D. Bellin. The influence of environment on outer rings and pseudo-rings in galaxies. , 257:17–23, April 1992.
- Peter Erwin, Michael Pohlen, and John E. Beckman. The Outer Disks of Early-Type Galaxies. I. Surface-Brightness Profiles of Barred Galaxies. , 135(1):20–54, January 2008. doi: 10.1088/0004-6256/135/1/20.
- Robert Feldmann, Eliot Quataert, Philip F. Hopkins, Claude-André Faucher-Giguère, and Dušan Kereš. Colours, star formation rates and environments of star-forming and quiescent galaxies at the cosmic noon. , 470(1):1050–1072, September 2017a. doi: 10.1093/mnras/stx1120.
- Robert Feldmann, Eliot Quataert, Philip F. Hopkins, Claude-André Faucher-Giguère, and Dušan Kereš. Colours, star formation rates and environments of star-forming and quiescent galaxies at the cosmic noon. , 470(1):1050–1072, September 2017b. doi: 10.1093/mnras/stx1120.

- Julia Fernandez, Sol Alonso, Valeria Mesa, Fernanda Duplancic, and Georgina Coldwell. Properties of galaxies with ring structures. , 653:A71, September 2021. doi: 10.1051/0004-6361/202141208.
- Julia Fernandez, Sol Alonso, Valeria Mesa, and Fernanda Duplancic. Revealing ringed galaxies in group environments. , 683:A32, March 2024. doi: 10.1051/0004-6361/202245215.
- Julia Fernandez, Emanuel Sillero, Sol Alonso, and Patricia Tissera. A catalog of ringed galaxies in the TNG50 simulation: Analysis of their properties and structure. , 693:A52, January 2025. doi: 10.1051/0004-6361/202452104.
- Anna Gallazzi, Stéphane Charlot, Jarle Brinchmann, Simon D. M. White, and Christy A. Tremonti. The ages and metallicities of galaxies in the local universe. , 362(1):41–58, September 2005. doi: 10.1111/j.1365-2966.2005.09321.x.
- Luis Gil, Isabel Pérez, and Tomás Ruíz-Lara. Unveiling the origin of the outer ring in NGC 1291. In *Galactic Bars: Driving and Decoding Galaxy Evolution*, page 11, July 2023. doi: 10.5281/zenodo.8123730.
- R. D. Grouchy, R. Buta, H. Salo, E. Laurikainen, and T. Speltinckx. Counter-Winding Spiral Structure in ESO 297-27. , 136(3):980–993, September 2008. doi: 10.1088/0004-6256/136/3/980.
- R. D. Grouchy, R. J. Buta, H. Salo, and E. Laurikainen. Ring Star Formation Rates in Barred and Nonbarred Galaxies. , 139(6):2465–2493, June 2010. doi: 10.1088/0004-6256/139/6/2465.
- A. S. Gusev and M. G. Park. Structure and stellar population of ringed barred galaxy NGC 2336. , 410:117–129, October 2003. doi: 10.1051/0004-6361:20031215.
- Aurélien Géron. *Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow: Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems*. O’Reilly Media, 2019.
- Yasuhiro Hashimoto, Jr. Oemler, Augustus, Huan Lin, and Douglas L. Tucker. The Influence of Environment on the Star Formation Rates of Galaxies. , 499(2):589–599, May 1998. doi: 10.1086/305657.
- Paul W. Hodge. *The physics and astronomy of galaxies and cosmology*. 1966.
- Benne W. Holwerda, Dominic Smith, Lori Porter, Chris Henry, Ren Porter-Temple, Kyle Cook, Kevin A. Pimbblet, Andrew M. Hopkins, Maciej Bilicki, Sebastian Turner, Viviana Acquaviva, Lingyu Wang, Angus H. Wright, Lee S. Kelvin, and Meiert W. Grootes. Galaxy and mass assembly (GAMA): Self-Organizing Map application on nearby galaxies. , 513(2):1972–1984, June 2022. doi: 10.1093/mnras/stac889.
- E. P. Hubble. Extragalactic nebulae. , 64:321–369, December 1926. doi: 10.1086/143018.

- M. et al. Huertas-Company. A catalog of visual-like morphologies in the sloan digital sky survey dr7. *Astronomy & Astrophysics*, 525:A157, 2011.
- F. Jara-Ferreira, P. B. Tissera, E. Sillero, Y. Rosas-Guevara, S. E. Pedrosa, M. E. De Rossi, T. Theuns, and L. Bignone. The metallicity gradients of star-forming regions store information of the assembly history of galaxies. , 530(2):1369–1385, May 2024. doi: 10.1093/mnras/stae708.
- Ivan Yu. Katkov, Alexei Yu. Kniazev, Olga K. Sil'chenko, and Damir Gasymov. Star formation in outer rings of S0 galaxies. IV. NGC 254: A double-ringed S0 with gas counter-rotation. , 658:A154, February 2022. doi: 10.1051/0004-6361/202141934.
- Guinevere Kauffmann, Timothy M. Heckman, Simon D. M. White, Stéphane Charlot, Christy Tremonti, Jarle Brinchmann, Gustavo Bruzual, Eric W. Peng, Mark Seibert, Mariangela Bernardi, Michael Blanton, Jon Brinkmann, Francisco Castander, Istvan Csábai, Masataka Fukugita, Zeljko Ivezić, Jeffrey A. Munn, Robert C. Nichol, Nikhil Padmanabhan, Aniruddha R. Thakar, David H. Weinberg, and Donald York. Stellar masses and star formation histories for  $10^5$  galaxies from the Sloan Digital Sky Survey. , 341(1):33–53, May 2003. doi: 10.1046/j.1365-8711.2003.06291.x.
- Guinevere Kauffmann, Simon D. M. White, Timothy M. Heckman, Brice Ménard, Jarle Brinchmann, Stéphane Charlot, Christy Tremonti, and Jon Brinkmann. The environmental dependence of the relations between stellar mass, structure, star formation and nuclear activity in galaxies. , 353(3):713–731, September 2004. doi: 10.1111/j.1365-2966.2004.08117.x.
- Lee S. Kelvin, Malcolm N. Bremer, Steven Phillipps, Philip A. James, Luke J. M. Davies, Roberto De Propriis, Amanda J. Moffett, Susan M. Percival, Ivan K. Baldry, Chris A. Collins, Mehmet Alpaslan, Joss Bland-Hawthorn, Sarah Brough, Michelle Cluver, Simon P. Driver, Abdolhosein Hashemizadeh, Benne W. Holwerda, Jarkko Laine, Maritza A. Lara-Lopez, Jochen Liske, Witold Maciejewski, Nicola R. Napolitano, Samantha J. Penny, Cristina C. Popescu, Anne E. Sansom, Will Sutherland, Edward N. Taylor, Eelco van Kampen, and Lingyu Wang. Galaxy and Mass Assembly (GAMA): variation in galaxy structure across the green valley. , 477(3):4116–4130, July 2018. doi: 10.1093/mnras/sty933.
- Robert C. Kennicutt Jr. The global schmidt law in star-forming galaxies. *The Astrophysical Journal*, 498(2):541, 1998.
- J. H. Knapen. Structure and star formation in disk galaxies. III. Nuclear and circumnuclear  $H\alpha$  emission. , 429:141–151, January 2005. doi: 10.1051/0004-6361:20041909.
- John Kormendy and Jr. Kennicutt, Robert C. Secular Evolution and the Formation of Pseudobulges in Disk Galaxies. , 42(1):603–683, September 2004. doi: 10.1146/annurev.astro.42.053102.134024.

- I. P. Kostiuk and O. K. Sil'chenko. Outer rings in early-type disk galaxies: star formation rate. *Baltic Astronomy*, 25:331–337, January 2016. doi: 10.1515/astro-2017-0139.
- Harish Krishnakumar and J. Bryce Kalmbach. Analysis of Ring Galaxies Detected Using Deep Learning with Real and Simulated Data. , 168(5):191, November 2024. doi: 10.3847/1538-3881/ad7132.
- Diego G. Lambas, Patricia B. Tissera, M. Sol Alonso, and Georgina Coldwell. Galaxy pairs in the 2dF survey - I. Effects of interactions on star formation in the field. , 346(4):1189–1196, Dec 2003. doi: 10.1111/j.1365-2966.2003.07179.x.
- Yann LeCun, Yoshua Bengio, and Geoffrey Hinton. Deep learning. *Nature*, 521(7553):436–444, 2015.
- Gwang-Ho Lee, Changbom Park, Myung Gyoon Lee, and Yun-Young Choi. Dependence of Barred Galaxy Fraction on Galaxy Properties and Environment. , 745(2):125, February 2012. doi: 10.1088/0004-637X/745/2/125.
- Adam K. Leroy, Annie Hughes, Daizhong Liu, Jérôme Pety, Erik Rosolowsky, Toshiki Saito, et al. PHANGS-ALMA Data Processing and Pipeline. , 255(1): 19, July 2021. doi: 10.3847/1538-4365/abec80.
- Cheng Li, Dimitri A. Gadotti, Shude Mao, and Guinevere Kauffmann. The clustering of barred galaxies in the local Universe. , 397(2):726–732, August 2009. doi: 10.1111/j.1365-2966.2009.15028.x.
- Feng Li, Yi-Zhou Gu, Qi-Rong Yuan, Min Bao, Zhi-Cheng He, and Wei-Hao Bian. Effect of richness on AGN and star formation activities in SDSS galaxy groups. , 484(3):3806–3817, April 2019. doi: 10.1093/mnras/stz267.
- H. Lietzen, E. Tempel, P. Heinämäki, P. Nurmi, M. Einasto, and E. Saar. Environments of galaxies in groups within the supercluster-void network. , 545:A104, September 2012. doi: 10.1051/0004-6361/201219353.
- C.C. Lin and Frank H. Shu. On the spiral structure of disk galaxies. *The Astrophysical Journal*, 140:646, 1964.
- Tsung-Yi Lin, Priya Goyal, Ross Girshick, Kaiming He, and Piotr Dollár. Focal Loss for Dense Object Detection. *arXiv e-prints*, art. arXiv:1708.02002, August 2017. doi: 10.48550/arXiv.1708.02002.
- Chris J. Lintott, Kevin Schawinski, Anže Slosar, Kate Land, Steven Bamford, Daniel Thomas, M. Jordan Raddick, Robert C. Nichol, Alex Szalay, Dan Andreescu, Phil Murray, and Jan Vandenberg. Galaxy Zoo: morphologies derived from visual inspection of galaxies from the Sloan Digital Sky Survey. , 389(3):1179–1189, September 2008. doi: 10.1111/j.1365-2966.2008.13689.x.
- Zhuang Liu, Hanzi Mao, Chao-Yuan Wu, Christoph Feichtenhofer, Trevor Darrell, and Saining Xie. A convnet for the 2020s. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pages 11976–

- 11986, 2022. doi: 10.1109/CVPR52688.2022.01170. URL <https://arxiv.org/abs/2201.03545>.
- Chao Ma, Richard de Grijs, and Luis C. Ho. Connections between Star Cluster Populations and Their Host Galaxy Nuclear Rings. , 857(2):116, April 2018. doi: 10.3847/1538-4357/aab6b4.
- B. F. Madore. Companions to nearby spirals. , 85:507–512, May 1980. doi: 10.1086/112704.
- P. Martin and J.-R. Roy. The abundance gradients in barred spiral galaxies. *The Astrophysical Journal*, 424:599–613, 1994. doi: 10.1086/173916.
- Lisa M. Mazzuca, Johan H. Knapen, Sylvain Veilleux, and Michael W. Regan. A Connection between Star Formation in Nuclear Rings and Their Host Galaxies. , 174(2):337–365, February 2008. doi: 10.1086/522338.
- Alan Meert, Vinu Vikram, and Mariangela Bernardi. Simulations of single- and two-component galaxy decompositions for spectroscopically selected galaxies from the Sloan Digital Sky Survey. , 433(2):1344–1361, August 2013. doi: 10.1093/mnras/stt822.
- A. Mercurio, P. Rosati, A. Biviano, M. Annunziatella, M. Girardi, B. Sartoris, M. Nonino, M. Brescia, G. Riccio, C. Grillo, I. Balestra, G. B. Caminha, G. De Lucia, R. Gobat, S. Seitz, P. Tozzi, M. Scodeggio, E. Vanzella, G. Angora, P. Bergamini, S. Borgani, R. Demarco, M. Meneghetti, V. Strazzullo, L. Tortorelli, K. Umetsu, A. Fritz, D. Gruen, D. Kelson, M. Lombardi, C. Maier, M. Postman, G. Rodighiero, and B. Ziegler. CLASH-VLT: Abell S1063. Cluster assembly history and spectroscopic catalogue. , 656:A147, December 2021. doi: 10.1051/0004-6361/202142168.
- Valeria Mesa, Fernanda Duplancic, Sol Alonso, Georgina Coldwell, and Diego G. Lambas. Interacting galaxies: corotating and counter-rotating systems with tidal tails. , 438(2):1784–1793, February 2014. doi: 10.1093/mnras/stt2317.
- Juan Carlos Muñoz-Mateos, Kartik Sheth, Michael Regan, Taehyun Kim, Jarkko Laine, Santiago Erroz-Ferrer, Armando Gil de Paz, Sebastien Comeron, Joannah Hinz, Eija Laurikainen, Heikki Salo, E. Athanassoula, Albert Bosma, Alexandre Y. K. Bouquin, Eva Schinnerer, Luis Ho, Dennis Zaritsky, Dimitri A. Gadotti, Barry Madore, Benne Holwerda, Karín Menéndez-Delmestre, Johan H. Knapen, Sharon Meidt, Miguel Querejeta, Trisha Mizusawa, Mark Seibert, Seppo Laine, and Helene Courtois. The Spitzer Survey of Stellar Structure in Galaxies (S<sup>4</sup>G): Stellar Masses, Sizes, and Radial Profiles for 2352 Nearby Galaxies. , 219(1):3, July 2015. doi: 10.1088/0067-0049/219/1/3.
- Preethi B. Nair and Roberto G. Abraham. A Catalog of Detailed Visual Morphological Classifications for 14,034 Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. , 186(2):427–456, February 2010. doi: 10.1088/0067-0049/186/2/427.
- Dylan Nelson, Annalisa Pillepich, Volker Springel, Rüdiger Pakmor, Rainer

- Weinberger, Shy Genel, Paul Torrey, Mark Vogelsberger, Federico Marinacci, and Lars Hernquist. First results from the TNG50 simulation: galactic outflows driven by supernovae and black hole feedback. , 490(3):3234–3261, December 2019a. doi: 10.1093/mnras/stz2306.
- Dylan Nelson, Volker Springel, Annalisa Pillepich, Vicente Rodriguez-Gomez, Paul Torrey, Shy Genel, Mark Vogelsberger, Ruediger Pakmor, Federico Marinacci, Rainer Weinberger, Luke Kelley, Mark Lovell, Benedikt Diemer, and Lars Hernquist. The IllustrisTNG simulations: public data release. *Computational Astrophysics and Cosmology*, 6(1):2, May 2019b. doi: 10.1186/s40668-019-0028-x.
- L. Newnham, Kelley M. Hess, Karen L. Masters, Sandor Kruk, Samantha J. Penny, Tim Lingard, and R. J. Smethurst. The H I morphology and stellar properties of strongly barred galaxies: support for bar quenching in massive spirals. , 492(4):4697–4715, March 2020. doi: 10.1093/mnras/staa064.
- Jr. Oemler, Augustus. The Systematic Properties of Clusters of Galaxies. Photometry of 15 Clusters. , 194:1–20, November 1974. doi: 10.1086/153216.
- J. P. Ostriker and P. J. E. Peebles. A Numerical Study of the Stability of Flattened Galaxies: or, can Cold Galaxies Survive? , 186:467–480, December 1973. doi: 10.1086/152513.
- Biswajit Pandey and Suman Sarkar. Exploring galaxy colour in different environments of the cosmic web with SDSS. , 498(4):6069–6082, November 2020. doi: 10.1093/mnras/staa2772.
- Sneh Pandya, Purvik Patel, Franc O, and Jonathan Blazek. E(2) Equivariant Neural Networks for Robust Galaxy Morphology Classification. *arXiv e-prints*, art. arXiv:2311.01500, November 2023. doi: 10.48550/arXiv.2311.01500.
- Josefa Perez, Patricia Tissera, and Jeremy Blaizot. Building a control sample for galaxy pairs. , 397(2):748–756, August 2009. doi: 10.1111/j.1365-2966.2009.15033.x.
- Annalisa Pillepich, Volker Springel, Dylan Nelson, Shy Genel, Jill Naiman, Rüdiger Pakmor, Lars Hernquist, Paul Torrey, Mark Vogelsberger, Rainer Weinberger, and Federico Marinacci. Simulating galaxy formation with the IllustrisTNG model. , 473(3):4077–4106, January 2018. doi: 10.1093/mnras/stx2656.
- Annalisa Pillepich, Dylan Nelson, Volker Springel, Rüdiger Pakmor, Paul Torrey, Rainer Weinberger, Mark Vogelsberger, Federico Marinacci, Shy Genel, Arjen van der Wel, and Lars Hernquist. First results from the TNG50 simulation: the evolution of stellar and gaseous discs across cosmic time. , 490(3):3196–3233, December 2019. doi: 10.1093/mnras/stz2338.
- M. Pohlen and I. Trujillo. The structure of galactic disks. Studying late-type spiral

- galaxies using SDSS. , 454(3):759–772, August 2006. doi: 10.1051/0004-6361:20064883.
- P. Rautiainen, H. Salo, and R. Buta. Dynamical modelling of the remarkable four-armed barred spiral galaxy ESO 566-24. , 349(3):933–944, April 2004. doi: 10.1111/j.1365-2966.2004.07561.x.
- Jiawei Ren, Cunjun Yu, Shunan Sheng, Xiao Ma, Haiyu Zhao, Shuai Yi, and Hongsheng Li. Balanced Meta-Softmax for Long-Tailed Visual Recognition. *arXiv e-prints*, art. arXiv:2007.10740, July 2020. doi: 10.48550/arXiv.2007.10740.
- Aaron Robotham, Steven Phillipps, and Roberto de Propris. The variation of the galaxy luminosity function with group properties. , 403(4):1812–1828, April 2010. doi: 10.1111/j.1365-2966.2010.16252.x.
- J. E. Rodríguez-Martín, R. M. González Delgado, G. Martínez-Solaesche, L. A. Díaz-García, A. de Amorim, R. García-Benito, E. Pérez, R. Cid Fernandes, E. R. Carrasco, M. Maturi, A. Finoguenov, P. A. A. Lopes, A. Cortesi, G. Lucatelli, J. M. Diego, A. L. Chies-Santos, R. A. Dupke, Y. Jiménez-Teja, J. M. Vílchez, L. R. Abramo, J. Alcaniz, N. Benítez, S. Bonoli, A. J. Cenarro, D. Cristóbal-Hornillos, A. Ederoclite, A. Hernán-Caballero, C. López-Sanjuan, A. Marín-Franch, C. Mendes de Oliveira, M. Moles, L. Sodré, K. Taylor, J. Varela, H. Vázquez Ramió, and I. Márquez. The miniJPAS survey. Galaxy populations in the most massive cluster in miniJPAS: mJPC2470-1771. , 666:A160, October 2022. doi: 10.1051/0004-6361/202243245.
- M. Romero-Gómez, E. Athanassoula, J. J. Masdemont, and C. García-Gómez. The formation of spiral arms and rings in barred galaxies. , 472(1):63–75, September 2007. doi: 10.1051/0004-6361:20077504.
- Yetli Rosas-Guevara, Silvia Bonoli, Massimo Dotti, David Izquierdo-Villalba, Alessandro Lupi, Tommaso Zana, Matteo Bonetti, Dylan Nelson, Volker Springel, Lars Hernquist, and Mark Vogelsberger. The evolution of the barred galaxy population in the TNG50 simulation. , 512(4):5339–5357, June 2022. doi: 10.1093/mnras/stac816.
- V. C. Rubin, W. K. Ford, Jr., and N. Thonnard. Rotational properties of 21 SC galaxies with a large range of luminosities and radii, from NGC 4605 ( $R=4\text{kpc}$ ) to UGC 2885 ( $R=122\text{kpc}$ ). , 238:471–487, June 1980. doi: 10.1086/158003.
- Mark Sandler, Andrew Howard, Menglong Zhu, Andrey Zhmoginov, and Liang-Chieh Chen. Mobilenetv2: Inverted residuals and linear bottlenecks. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pages 4510–4520, 2018. doi: 10.1109/CVPR.2018.00474.
- Suman Sarkar, Biswajit Pandey, and Snehasish Bhattacharjee. Do galactic bars depend on environment?: an information theoretic analysis of Galaxy Zoo 2. , 501(1):994–1001, February 2021. doi: 10.1093/mnras/staa3665.
- Joop Schaye, Robert A. Crain, Richard G. Bower, Michelle Furlong, Matthieu

- Schaller, Tom Theuns, Claudio Dalla Vecchia, Carlos S. Frenk, I. G. McCarthy, John C. Helly, Adrian Jenkins, Y. M. Rosas-Guevara, Simon D. M. White, Maarten Baes, C. M. Booth, Peter Camps, Julio F. Navarro, Yan Qu, Alireza Rahmati, Till Sawala, Peter A. Thomas, and James Trayford. The EAGLE project: simulating the evolution and assembly of galaxies and their environments. , 446(1):521–554, January 2015. doi: 10.1093/mnras/stu2058.
- M. P. Schwarz. The response of gas in a galactic disk to bar forcing. , 247:77–88, July 1981. doi: 10.1086/159011.
- M. P. Schwarz. How bar strength and pattern speed affect galactic spiral structure. , 209:93–109, July 1984a. doi: 10.1093/mnras/209.1.93.
- M. P. Schwarz. The intrinsic shape of rings in disk galaxies. , 133(1):222–224, April 1984b.
- J. A. Sellwood. Multiple Patterns in Spiral and Barred Galaxies. , 105:648, June 1993. doi: 10.1086/133211.
- Woo-Young Seo and Woong-Tae Kim. Star Formation in Nuclear Rings of Barred Galaxies. , 769(2):100, June 2013. doi: 10.1088/0004-637X/769/2/100.
- Woo-Young Seo, Woong-Tae Kim, SungWon Kwak, Pei-Ying Hsieh, Cheongho Han, and Phil F. Hopkins. Effects of Gas on Formation and Evolution of Stellar Bars and Nuclear Rings in Disk Galaxies. , 872(1):5, February 2019. doi: 10.3847/1538-4357/aafc5f.
- Lior Shamir. Automatic morphological classification of galaxy images. , 399(3): 1367–1372, November 2009. doi: 10.1111/j.1365-2966.2009.15366.x.
- Lior Shamir. Automatic detection of full ring galaxy candidates in sdss. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 491(3):3767–3777, 2020. doi: 10.1093/mnras/stz3297.
- Rhythm Shimakawa, Masayuki Tanaka, Kei Ito, and Makoto Ando. GALAXY CRUISE: Spiral and ring classifications for bright galaxies at  $z = 0.01-0.3$ . , 76(2):191–204, April 2024. doi: 10.1093/pasj/psae002.
- O. Sil’chenko, I. Kostiuk, A. Burenkov, and H. Parul. Star formation in outer rings of S0 galaxies. I. NGC 6534 and MCG 11-22-015. , 620:L7, December 2018. doi: 10.1051/0004-6361/201834392.
- B. D. Simmons, Chris Lintott, Kyle W. Willett, Karen L. Masters, Jeyhan S. Kartaltepe, Boris Häußler, Sugata Kaviraj, Coleman Krawczyk, S. J. Kruk, Daniel H. McIntosh, R. J. Smethurst, Robert C. Nichol, Claudia Scarlata, Kevin Schawinski, Christopher J. Conselice, Omar Almaini, Henry C. Ferguson, Lucy Fortson, William Hartley, Dale Kocevski, Anton M. Koekemoer, Alice Mortlock, Jeffrey A. Newman, Steven P. Bamford, N. A. Grogin, Ray A. Lucas, Nimish P. Hathi, Elizabeth McGrath, Michael Peth, Janine Pforr, Zachary Rizer, Stijn Wuyts, Guillermo Barro, Eric F. Bell, Marco Castellano, Tomas Dahlen, Avishai Dekel, Jamie Ownsworth, Sandra M. Faber, Steven L.

- Finkelstein, Adriano Fontana, Audrey Galametz, Ruth Grützbauch, David Koo, Jennifer Lotz, Bahram Mobasher, Mark Mozena, Mara Salvato, and Tommy Wiklind. Galaxy Zoo: quantitative visual morphological classifications for 48 000 galaxies from CANDELS. , 464(4):4420–4447, February 2017. doi: 10.1093/mnras/stw2587.
- Ramin A. Skibba and Ravi K. Sheth. A halo model of galaxy colours and clustering in the Sloan Digital Sky Survey. , 392(3):1080–1091, January 2009. doi: 10.1111/j.1365-2966.2008.14007.x.
- Ramin A. Skibba, Karen L. Masters, Robert C. Nichol, Idit Zehavi, Ben Hoyle, Edward M. Edmondson, Steven P. Bamford, Carolin N. Cardamone, William C. Keel, Chris Lintott, and Kevin Schawinski. Galaxy Zoo: the environmental dependence of bars and bulges in disc galaxies. , 423(2):1485–1502, June 2012. doi: 10.1111/j.1365-2966.2012.20972.x.
- Ashley Spindler. *Investigating the Environmental Properties of Galaxies in the SDSS-MaNGA Survey*. PhD thesis, Open University Milton Keynes, UK, May 2018.
- Volker Springel. E pur si muove: Galilean-invariant cosmological hydrodynamical simulations on a moving mesh. , 401(2):791–851, January 2010. doi: 10.1111/j.1365-2966.2009.15715.x.
- Chris Stoughton, Robert H. Lupton, Mariangela Bernardi, Michael R. Blanton, et al. Sloan Digital Sky Survey: Early Data Release. , 123(1):485–548, January 2002. doi: 10.1086/324741.
- Iskra Strateva, Željko Ivezić, Gillian R. Knapp, Vijay K. Narayanan, Michael A. Strauss, et al. Color Separation of Galaxy Types in the Sloan Digital Sky Survey Imaging Data. , 122(4):1861–1874, October 2001. doi: 10.1086/323301.
- F. S. Tabatabaei, P. Minguez, M. A. Prieto, and J. A. Fernández-Ontiveros. Discovery of massive star formation quenching by non-thermal effects in the centre of NGC 1097. *Nature Astronomy*, 2:83–89, November 2018. doi: 10.1038/s41550-017-0298-7.
- Mingxing Tan and Quoc V. Le. EfficientNet: Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks. *arXiv e-prints*, art. arXiv:1905.11946, May 2019. doi: 10.48550/arXiv.1905.11946.
- E. Tempel, E. Tago, and L. J. Liivamägi. Groups and clusters of galaxies in the SDSS DR8. Value-added catalogues. , 540:A106, April 2012. doi: 10.1051/0004-6361/201118687.
- E. Tempel, T. Tuvikene, R. Kipper, and N. I. Libeskind. Merging groups and clusters of galaxies from the SDSS data. The catalogue of groups and potentially merging systems. , 602:A100, June 2017. doi: 10.1051/0004-6361/201730499.
- Patricia B. Tissera, Rubens E. G. Machado, Patricia Sanchez-Blazquez, Susana E. Pedrosa, Sebastián F. Sánchez, Owain Snaith, and Jose Vilchez. The stellar

- metallicity gradients in galaxy discs in a cosmological scenario. , 592:A93, August 2016. doi: 10.1051/0004-6361/201628188.
- Christy A. Tremonti, Timothy M. Heckman, Guinevere Kauffmann, Jarle Brinchmann, Stéphane Charlot, Simon D. M. White, Mark Seibert, Eric W. Peng, David J. Schlegel, Alan Uomoto, Masataka Fukugita, and Jon Brinkmann. The Origin of the Mass-Metallicity Relation: Insights from 53,000 Star-forming Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. , 613(2):898–913, October 2004. doi: 10.1086/423264.
- P. Treuhardt, H. Salo, P. Rautiainen, and R. Buta. The Bar Pattern Speed of NGC 1433 Estimated via Sticky-Particle Simulations. , 136(1):300–311, July 2008. doi: 10.1088/0004-6256/136/1/300.
- P. Treuhardt, H. Salo, and R. Buta. Dynamical Simulations of NGC 2523 and NGC 4245. , 137(1):19–33, January 2009. doi: 10.1088/0004-6256/137/1/19.
- Mark Vogelsberger, Dylan Nelson, Annalisa Pillepich, Xuejian Shen, Federico Marinacci, Volker Springel, Rüdiger Pakmor, Sandro Tacchella, Rainer Weinberger, Paul Torrey, and Lars Hernquist. High-redshift JWST predictions from IllustrisTNG: dust modelling and galaxy luminosity functions. , 492(4): 5167–5201, March 2020. doi: 10.1093/mnras/staa137.
- Mike Walmsley, Chris Lintott, Tobias Géron, Sandor Kruk, Coleman Krawczyk, Kyle W. Willett, Steven Bamford, Lee S. Kelvin, Lucy Fortson, Yarin Gal, William Keel, Karen L. Masters, Vihang Mehta, Brooke D. Simmons, Rebecca Smethurst, Lewis Smith, Elisabeth M. Baeten, and Christine Macmillan. Zoobot: Deep learning galaxy morphology classifier. Astrophysics Source Code Library, record ascl:2203.027, March 2022.
- Enci Wang and Simon J. Lilly. The Formation of Star-forming Disks in the TNG50 Simulation. , 955(1):55, September 2023. doi: 10.3847/1538-4357/acecfd.
- Maurice Weiler and Gabriele Cesa. General  $E(2)$ -Equivariant Steerable CNNs. *arXiv e-prints*, art. arXiv:1911.08251, November 2019. doi: 10.48550/arXiv.1911.08251.
- Rainer Weinberger, Volker Springel, Lars Hernquist, Annalisa Pillepich, Federico Marinacci, Rüdiger Pakmor, Dylan Nelson, Shy Genel, Mark Vogelsberger, Jill Naiman, and Paul Torrey. Simulating galaxy formation with black hole driven thermal and kinetic feedback. , 465(3):3291–3308, March 2017. doi: 10.1093/mnras/stw2944.
- Kyle W. Willett, Chris J. Lintott, Steven P. Bamford, Karen L. Masters, Brooke D. Simmons, Kevin R. V. Casteels, Edward M. Edmondson, Lucy F. Fortson, Sugata Kaviraj, William C. Keel, Thomas Melvin, Robert C. Nichol, M. Jordan Raddick, Kevin Schawinski, Robert J. Simpson, Ramin A. Skibba, Arfon M. Smith, and Daniel Thomas. Galaxy Zoo 2: detailed morphological classifications for 304 122 galaxies from the Sloan Digital Sky Survey. , 435(4): 2835–2860, November 2013. doi: 10.1093/mnras/stt1458.

- David J. Wilman and Peter Erwin. The Relation between Galaxy Morphology and Environment in the Local Universe: An RC3-SDSS Picture. , 746(2):160, February 2012. doi: 10.1088/0004-637X/746/2/160.
- Chisato Yamauchi, Shin-ichi Ichikawa, Mamoru Doi, Naoki Yasuda, Masafumi Yagi, Masataka Fukugita, Sadanori Okamura, Osamu Nakamura, Maki Sekiguchi, and Tomotsugu Goto. Morphological Classification of Galaxies Using Photometric Parameters: The Concentration Index versus the Coarseness Parameter. , 130(4):1545–1557, October 2005. doi: 10.1086/444416.
- Yang Yang, Judith Irwin, Jiangtao Li, Theresa Wiegert, Q. Daniel Wang, Wei Sun, A. Damas-Segovia, Zhiyuan Li, Zhiqiang Shen, René A. M. Walterbos, and Carlos J. Vargas. CHANG-ES. XXIV. First Detection of a Radio Nuclear Ring and Potential LLAGN in NGC 5792. , 927(1):4, March 2022. doi: 10.3847/1538-4357/ac4ae7.
- Donald G. York, J. Adelman, Jr. Anderson, John E., Scott F. Anderson, James Annis, Neta A. Bahcall, et al. The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary. , 120(3):1579–1587, September 2000. doi: 10.1086/301513.
- Tommaso Zana, Alessandro Lupi, Matteo Bonetti, Massimo Dotti, Yetli Rosas-Guevara, David Izquierdo-Villalba, Silvia Bonoli, Lars Hernquist, and Dylan Nelson. Morphological decomposition of TNG50 galaxies: methodology and catalogue. , 515(1):1524–1543, September 2022. doi: 10.1093/mnras/stac1708.
- Xiao-Pan Zhu, Jia-Ming Dai, Chun-Jiang Bian, Yu Chen, Shi Chen, and Chen Hu. Galaxy morphology classification with deep convolutional neural networks. , 364(4):55, April 2019. doi: 10.1007/s10509-019-3540-1.