

Search for evidence in favor of the density wave theory from the study of resolved stellar populations in galaxies M83, M101 and M33

Ximena Cano Gómez

Asesor: Profesor Esteban Silva Villa

ximena.cano@udea.edu.co

Instituto de Física

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Universidad de Antioquia



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**



**Grupo de
Física y Astrofísica
Computacional**

Instituto de Física - Universidad de Antioquia

Objetivo

Buscar evidencias a favor o en contra de la teoría de ondas de densidad en galaxias cercanas a partir del estudio de las poblaciones estelares en los brazos espirales.

- Trazar los brazos de las galaxias
- Encontrar el ancho de los brazos
- Estudiar las poblaciones estelares en los brazos

¿Qué es un brazo espiral?

**¿Cómo se cuantifican los brazos
espirales en una galaxia?**

**¿Cuáles son los límites de los
brazos?**



Créditos de la imagen: NASA/Hubble

Galaxia M101



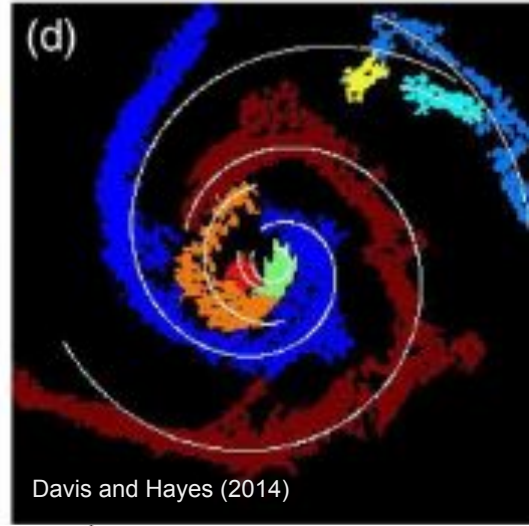
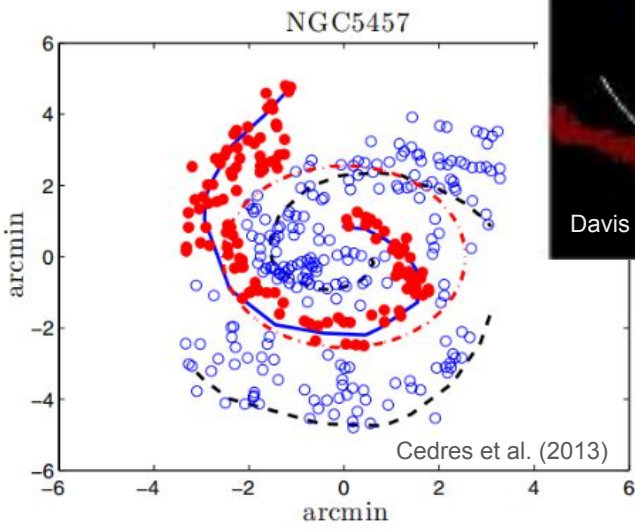
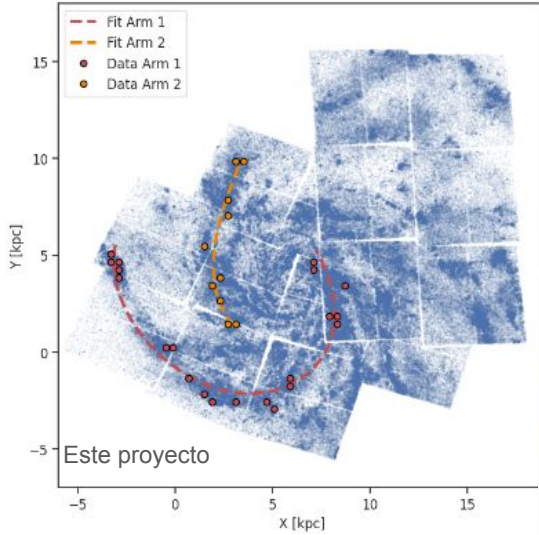
Galaxia M101

1 Brazos???

2 Brazos???

3 Brazos???

Credits: ESA/Hubble



¿Qué es un brazo espiral?

**¿Cómo se cuantifican los brazos
espirales en una galaxia?**

¿Cuáles son los límites de los brazos?

**No existe una definición precisa
que respondan estas preguntas**



Créditos de la imagen: NASA/Hubble

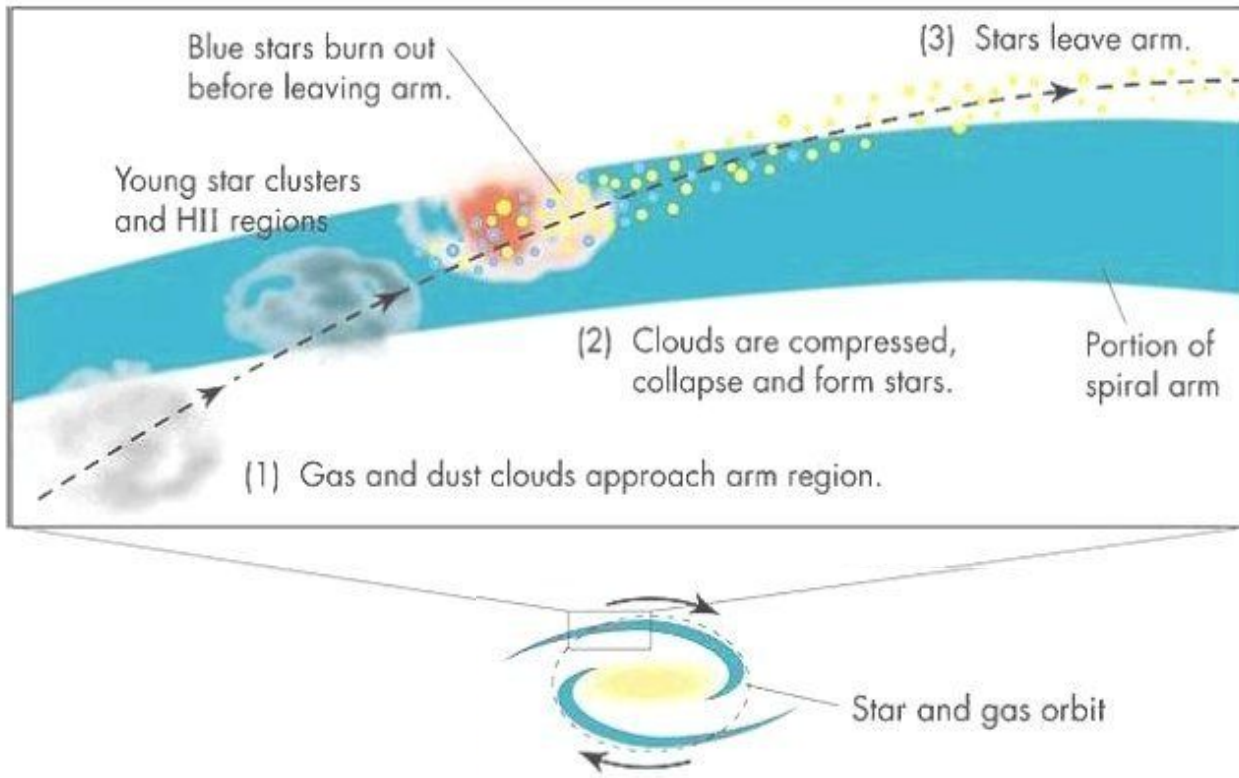


Imagen tomada de Review of the Universe

La teoría de ondas de densidad busca explicar la formación de los brazos de las galaxia por medio de las **perturbaciones gravitacionales** en el disco de la galaxias.

Color gradients across the spiral arms

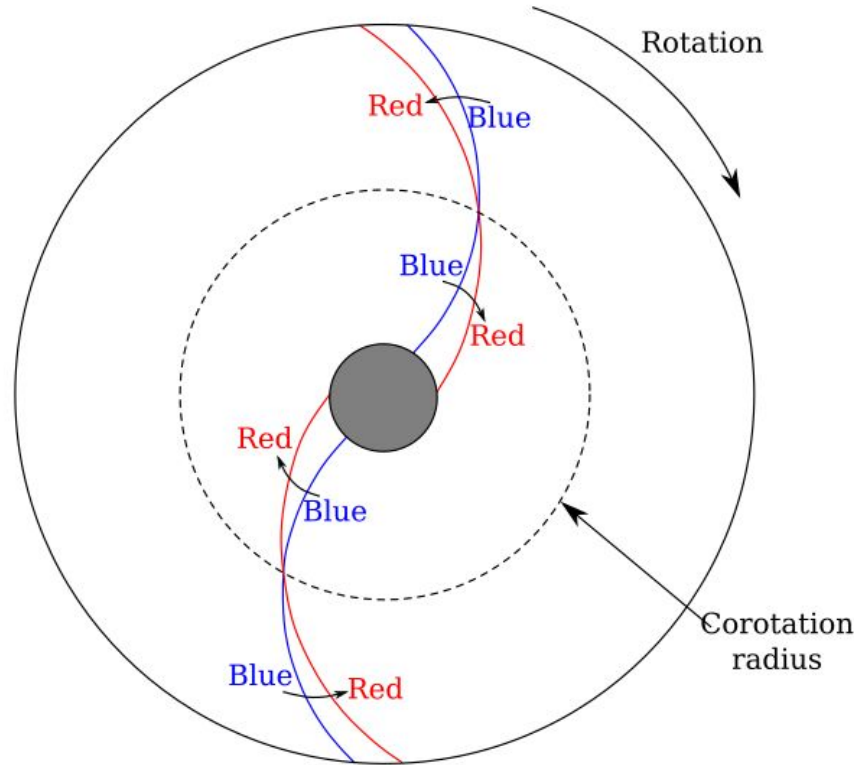


Imagen tomada de Martínez-García et al. (2009)

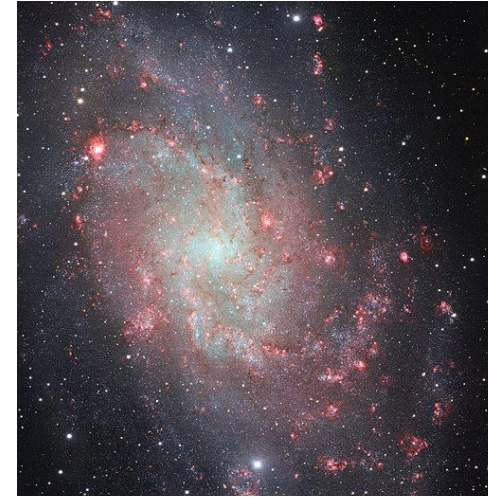
Los **gradientes de edad (color)** se dan gracias al aumento de la tasa de formación estelar en el frente de la onda de densidad y a la diferencia en las frecuencias angulares dentro y fuera del radio de **corrotación**.



M83 (NGC 5236) galaxia de gran diseño, ubicada a **4.5 Mpc**. Su inclinación es de $i = 25^\circ$.



M101 (NGC 5457) galaxia espiral, ubicada a **5.34 Mpc** de distancia. Su inclinación es de $i = 16^\circ$.



M33 (NGC 598) galaxia espiral, ubicada a **0.8 Mpc** de distancia, pertenece al grupo local de galaxias. Su inclinación es de $i = 56^\circ$

Créditos de las imágenes: ESA/Hubble

Estrellas de secuencia principal superior

Diagrama color magnitud de las estrellas de la galaxia M83 usado para encontrar las estrellas de **secuencia principal superior**

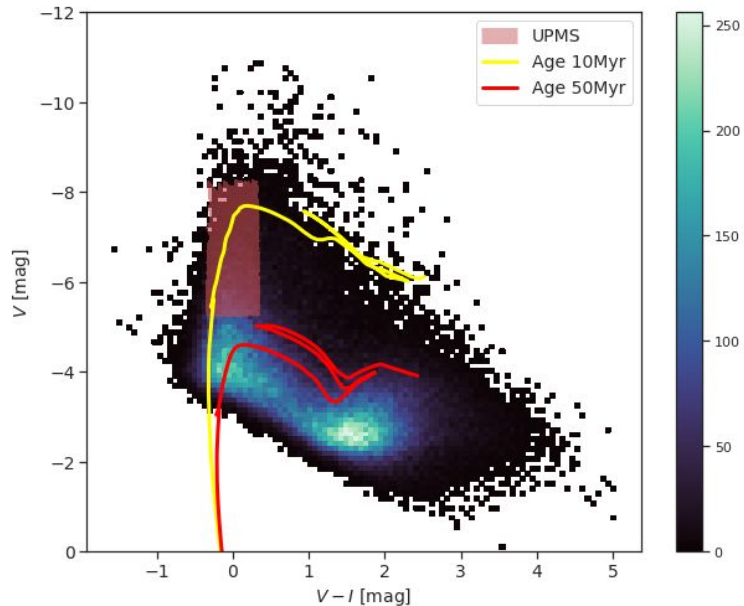


Imagen tomada de Silva-Villa y Cano-Gómez (2022)

Regiones de **sobredensidad** de estrellas de secuencia principal superior

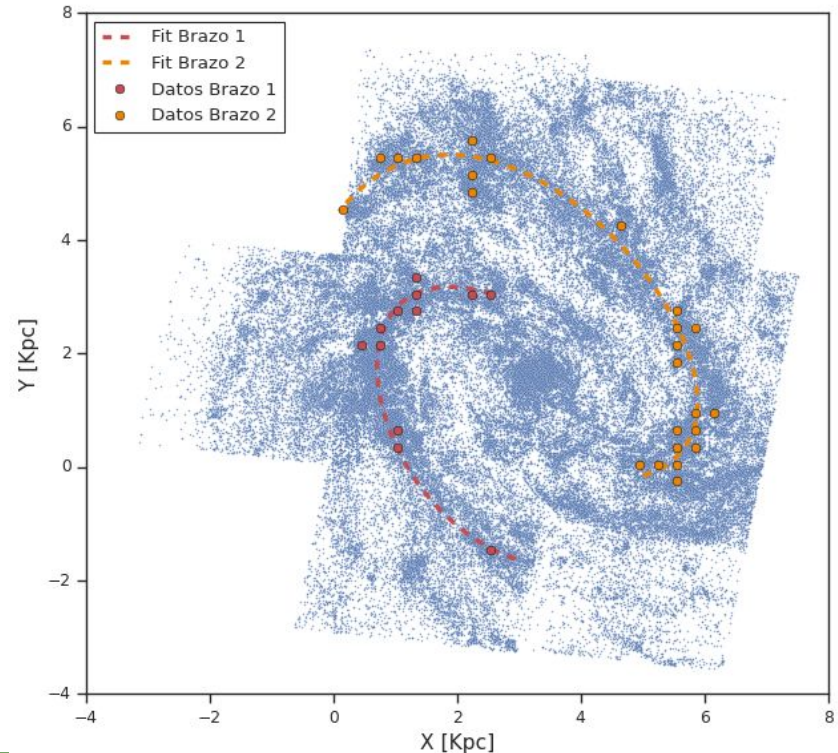
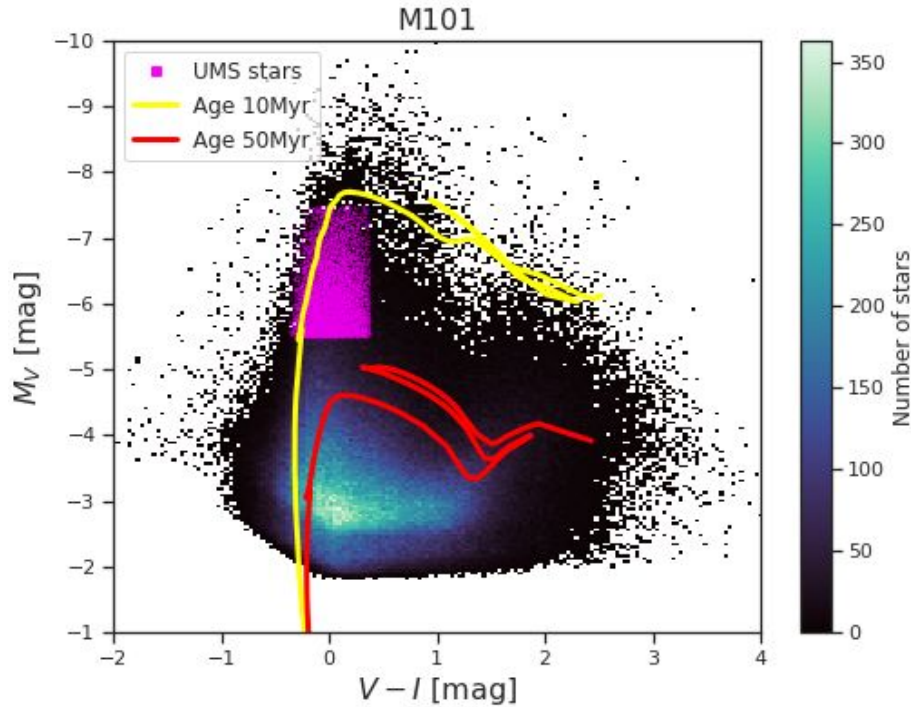


Diagrama color magnitud de las estrellas de la galaxia M101 usado para encontrar las estrellas de **secuencia principal superior**



Regiones de **sobredensidad** de estrellas de secuencia principal superior

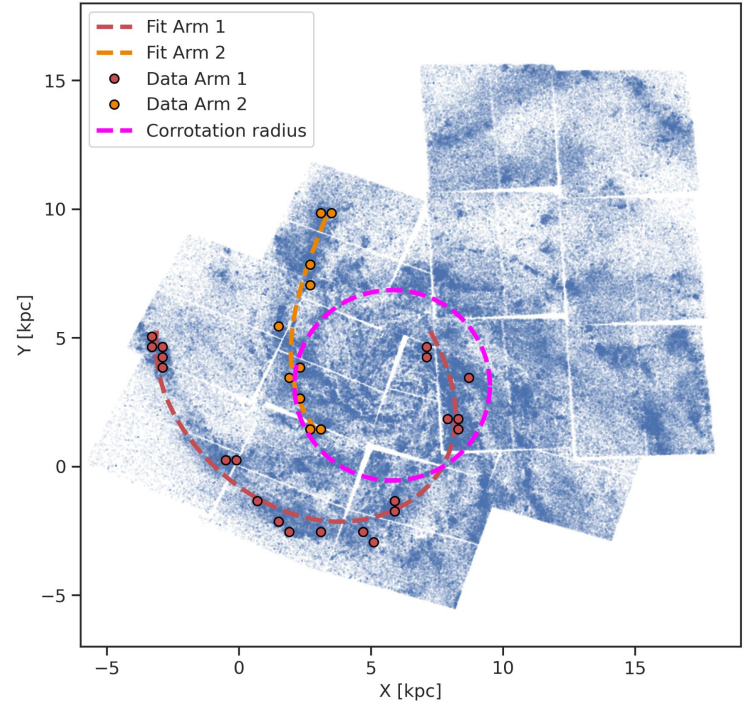
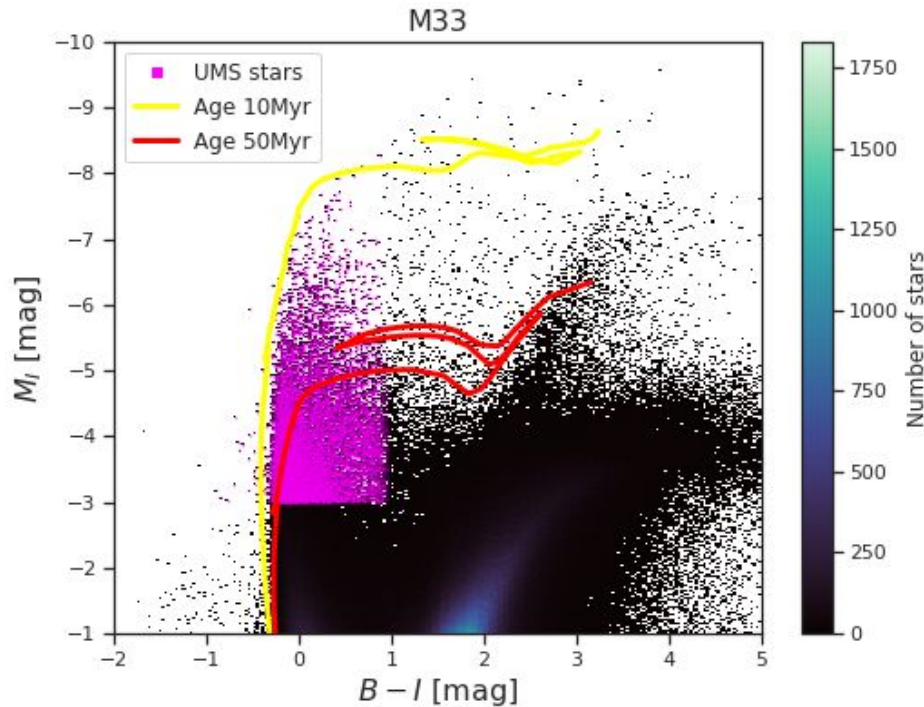
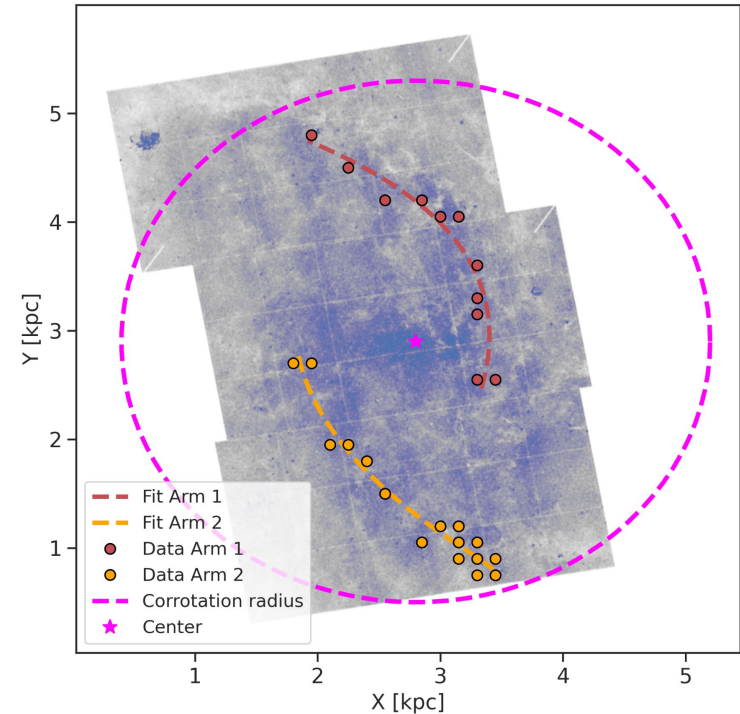


Diagrama color magnitud de las estrellas de la galaxia M33 usado para encontrar las estrellas de **secuencia principal superior**



Regiones de **sobredensidad** de estrellas de secuencia principal superior



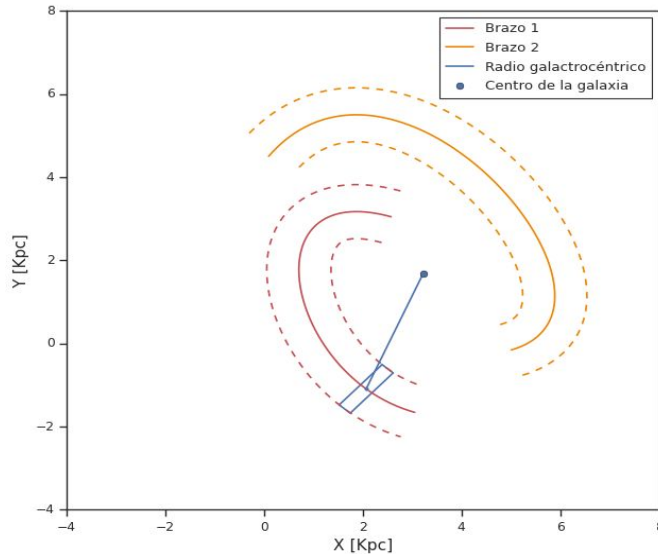
Objetivo

Buscar evidencias a favor o en contra de la teoría de ondas de densidad en galaxias cercanas a partir del estudio de las poblaciones estelares en los brazos espirales.

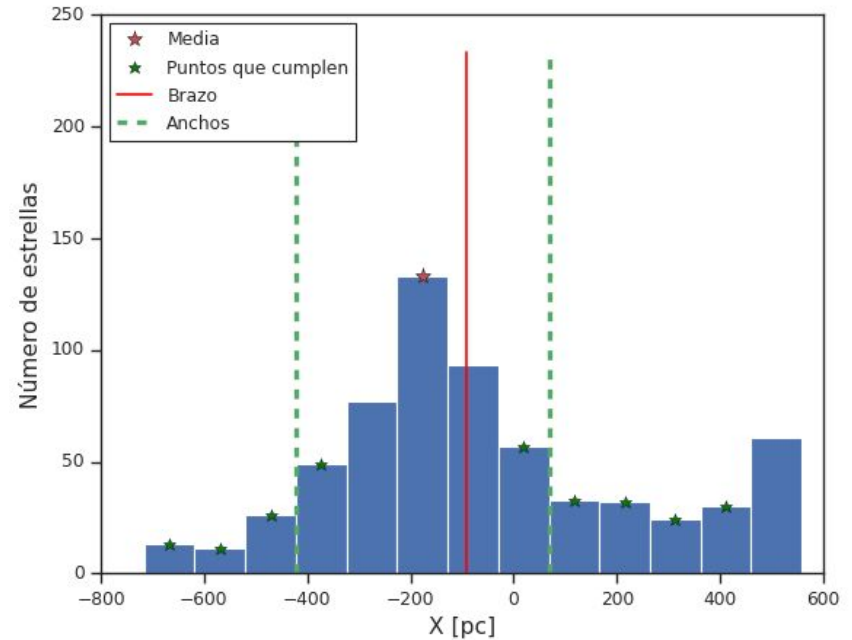
- ~~→ Trazar los brazos de las galaxias~~
- Encontrar el ancho de los brazos
- Estudiar las poblaciones estelares en los brazos

Con las estrellas pertenecientes a cada rectángulo se obtiene:

- 1σ de la distribución
- **Densidad estelar**



Ejemplo de uno de los rectángulos usados para encontrar el ancho de los brazos

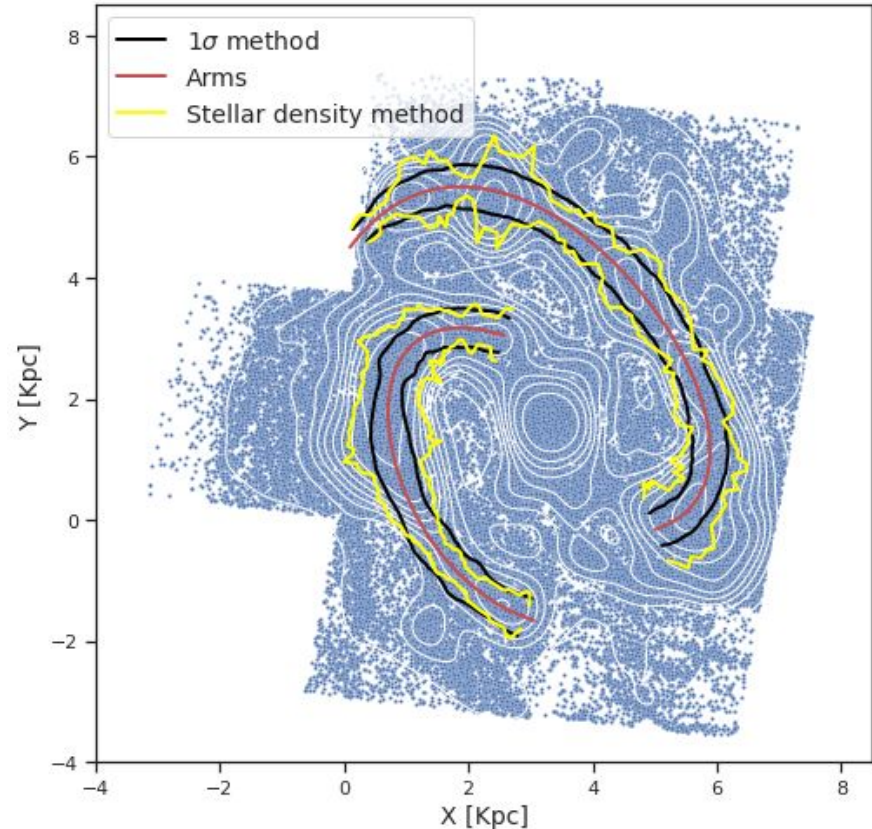


Ejemplo del histograma de la distribución estelar usado para encontrar el ancho de los brazos

Utilizamos dos métodos distintos para medir el ancho de los brazos de la galaxia:

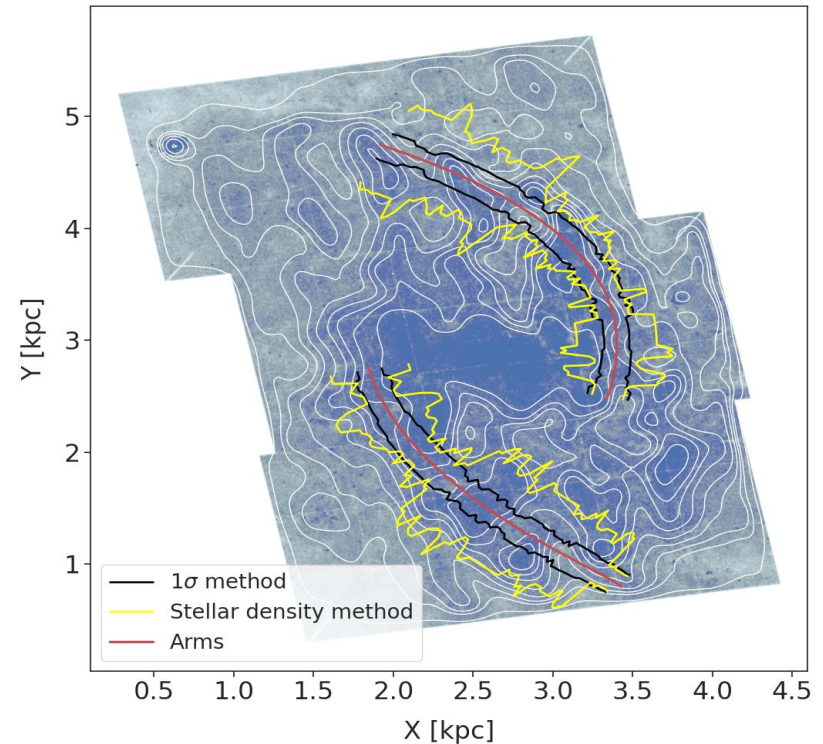
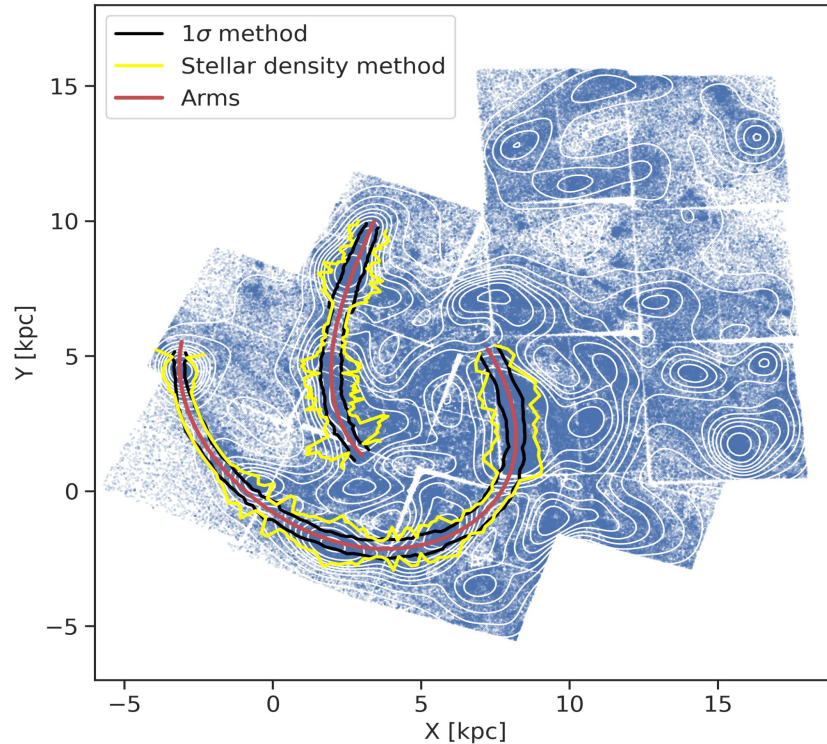
- **Método de 1σ :** Representado por las líneas negras.
- **Método de la Densidad Estelar:** Representado por las líneas amarillas.

Contornos de los brazos encontrados para la galaxia M83



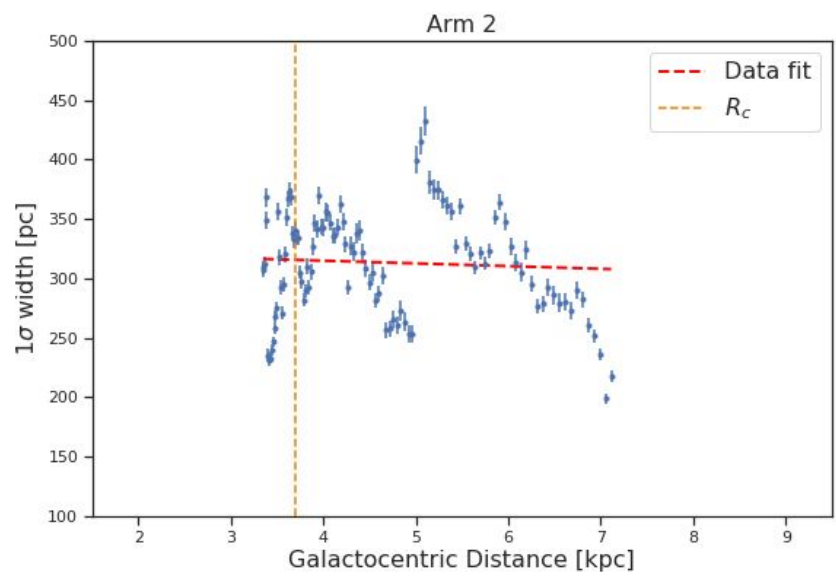
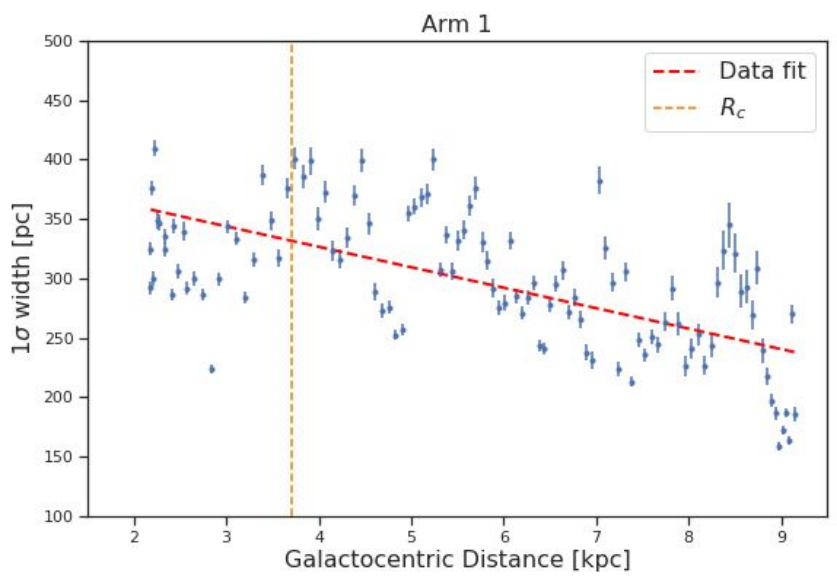
Contornos de los brazos encontrados con los métodos

- ➔ **1 σ** de la distribución (líneas negras)
- ➔ **Densidad estelar** (líneas amarillas)



El comportamiento del ancho de los brazos con el método de 1σ como función de la **distancia galactocéntrica** es **decreciente** para los dos brazos de la galaxia **M101**

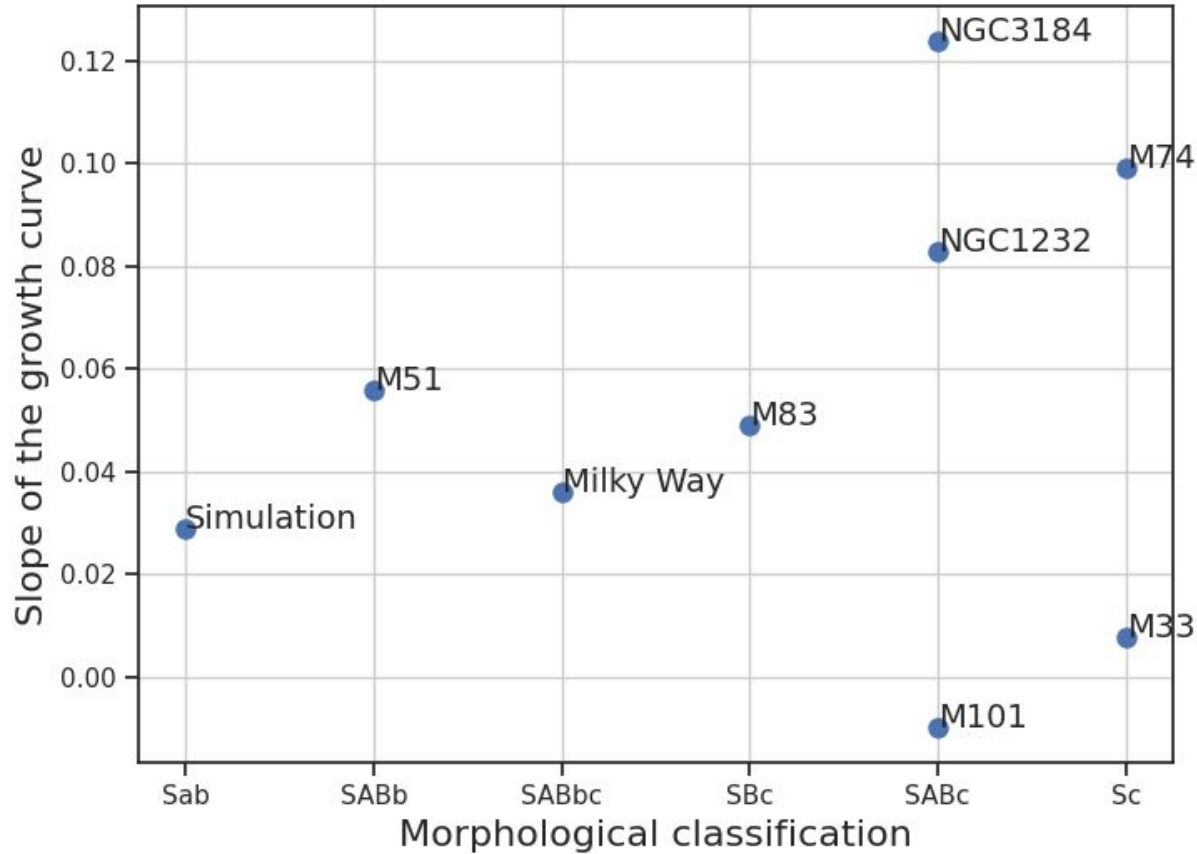
M101



Galaxy	Arm	Method	Slope (GD)	Slope (Angle)
M83	Arm1	1σ	0.0017	0.019
		Stellar density	-0.11	-1.31
	Arm2	1σ	0.0016	0.016
		Stellar density	-0.10	-1.09
M101	Arm1	1σ	-0.017	-0.48
		Stellar density	-0.020	-0.57
	Arm2	1σ	-0.002	-0.08
		Stellar density	-0.038	-1.41
M33	Arm1	1σ	0.012	0.11
		Stellar density	0.097	0.96
	Arm2	1σ	-0.0002	-0.003
		Stellar density	0.072	0.95

Resumen de los resultados para la pendiente de ajuste del ancho de los brazos como función de la distancia galáctica (GD) y el ángulo subiendo

Relación entre la morfología y el ancho



Relación entre la morfología de las galaxias y la pendiente de crecimiento del ancho de los brazos

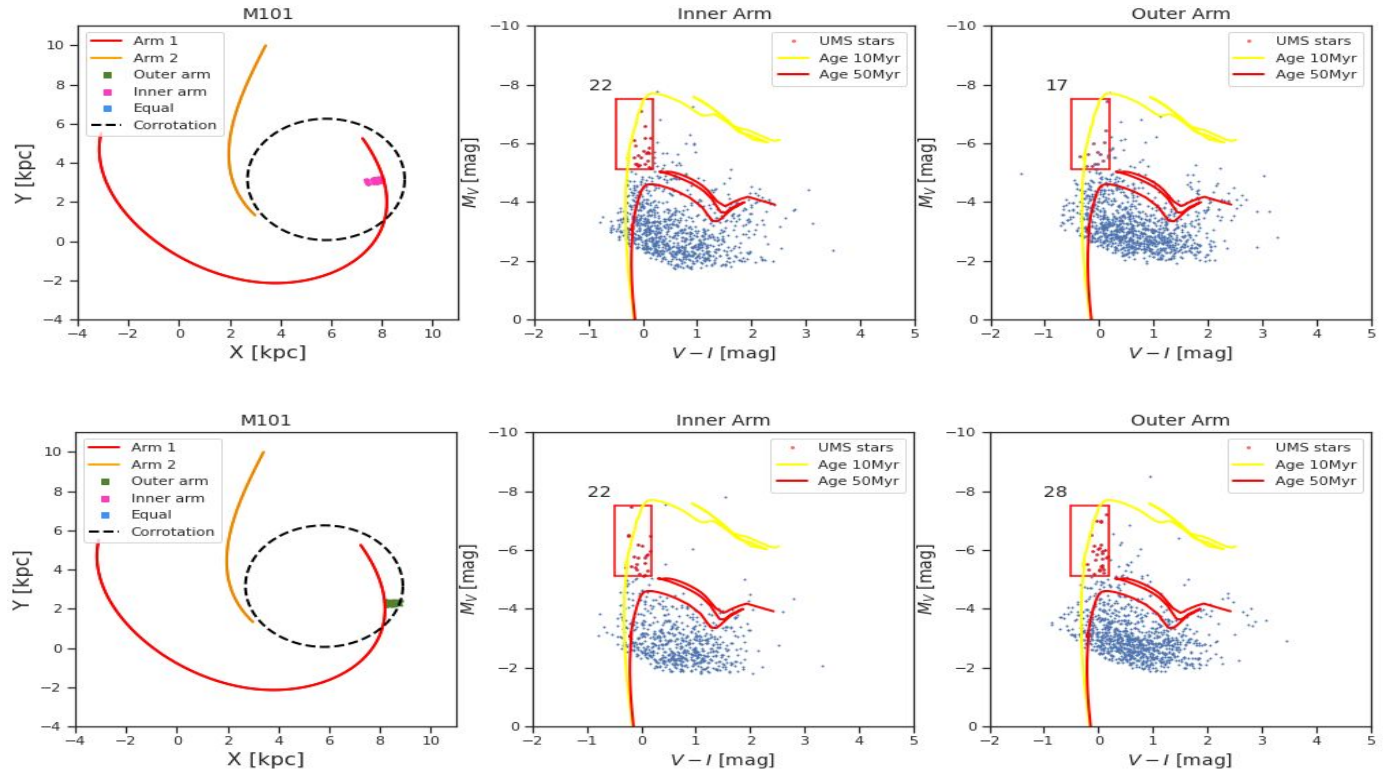
Objetivo

Buscar evidencias a favor o en contra de la teoría de ondas de densidad en galaxias cercanas a partir del estudio de las poblaciones estelares en los brazos espirales.

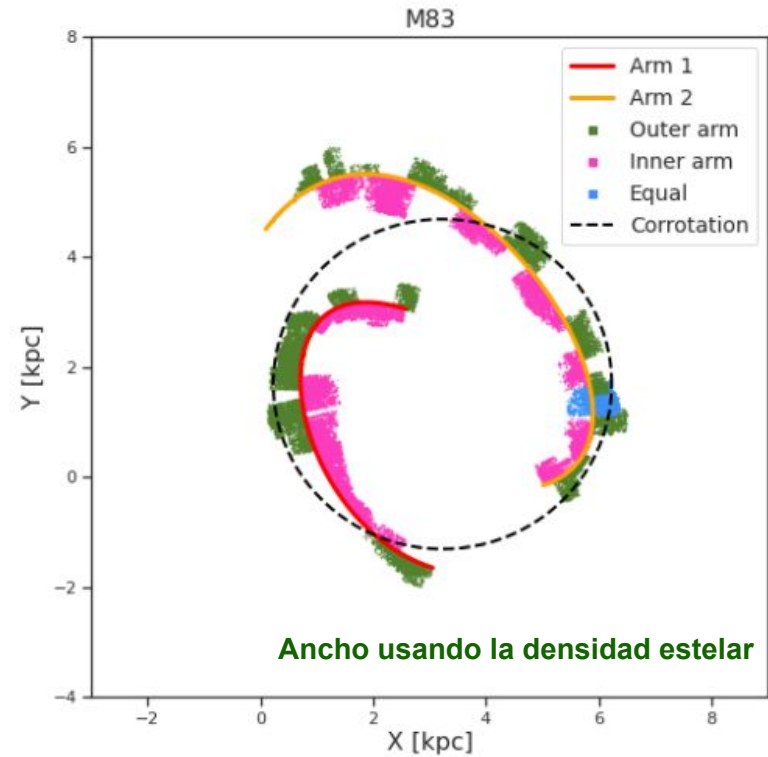
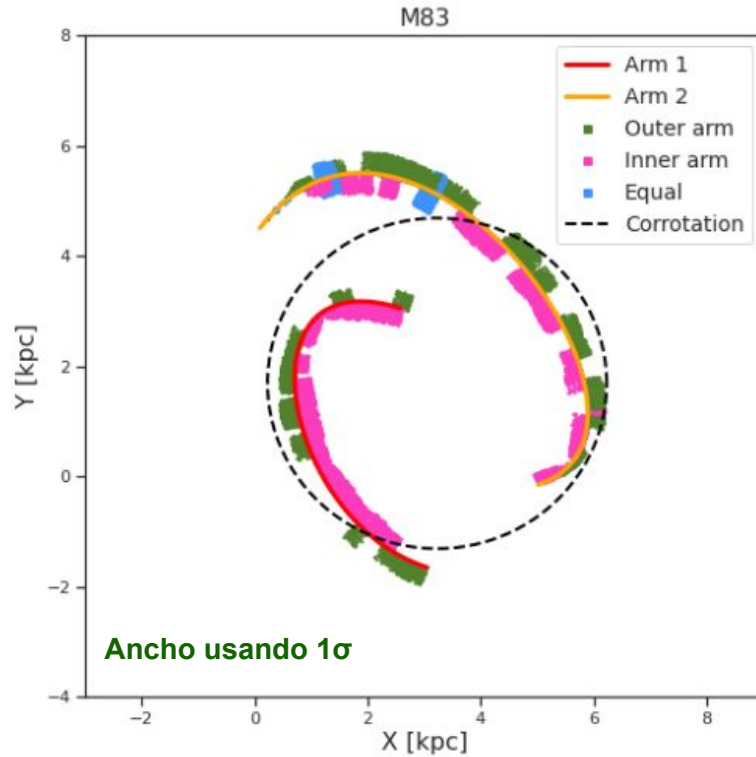
- ~~→ Trazar los brazos de las galaxias~~
- ~~→ Encontrar el ancho de los brazos~~
- Estudiar las poblaciones estelares en los brazos

Ancho de los brazos

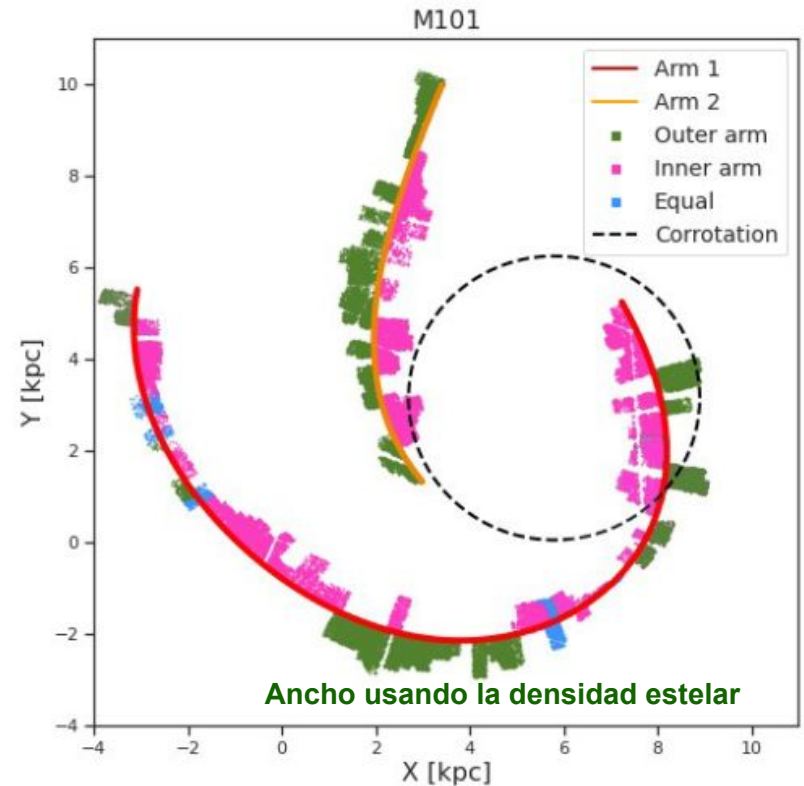
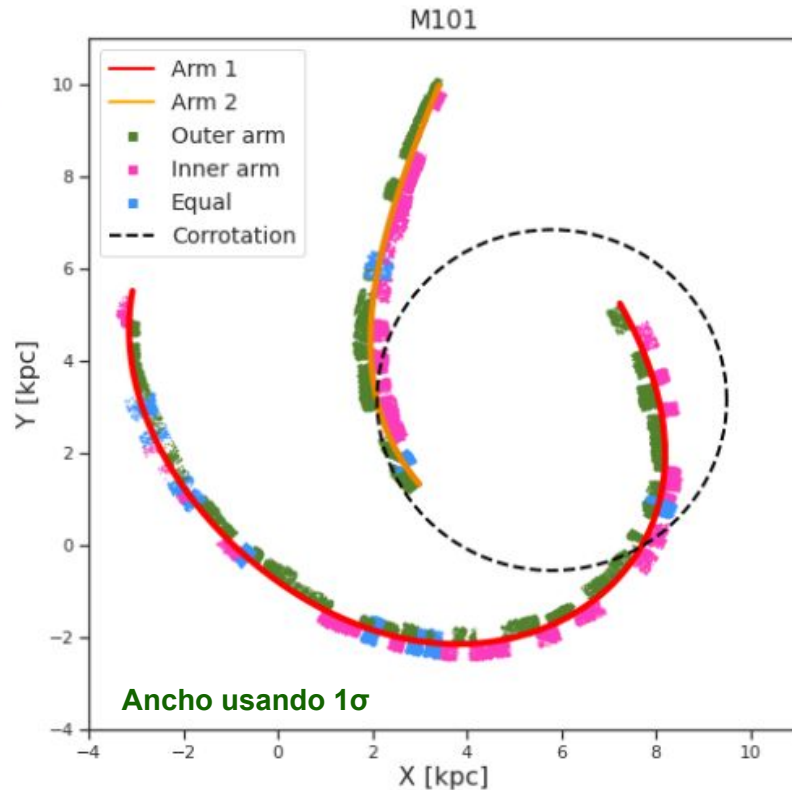
En cada rectángulo se cuentan el número de estrellas de secuencia principal superior en la parte interna y externa del brazo.
Se selecciona el lado que tenga el **mayor conteo estelar**.



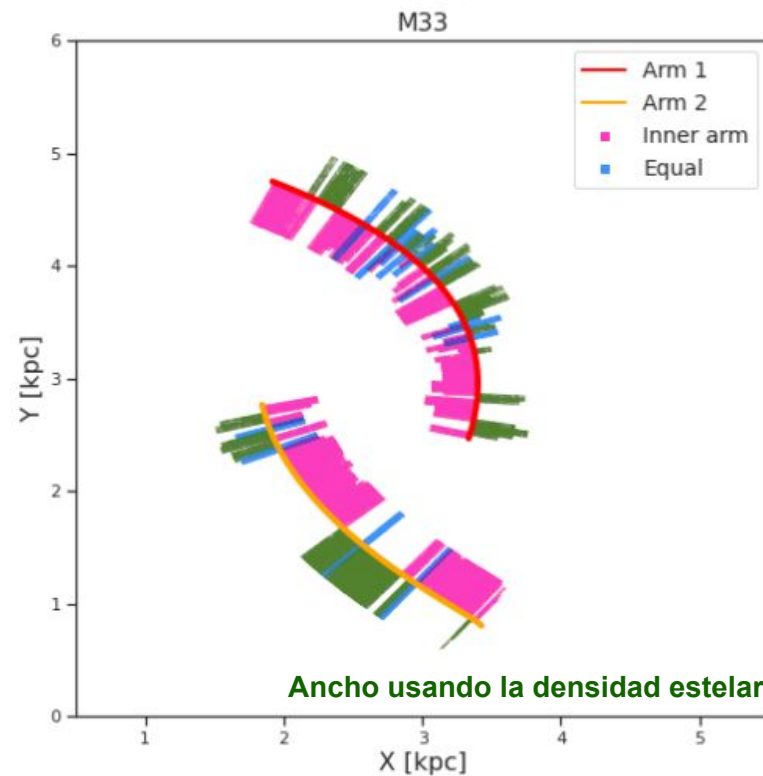
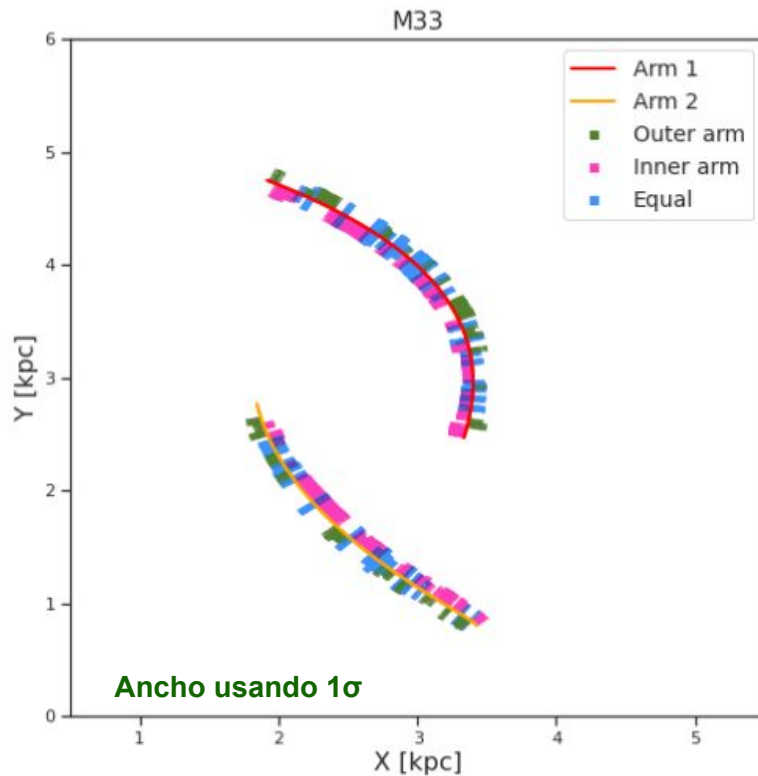
Distribución de las zonas de mayor conteo estelar en los brazos de la galaxia M83



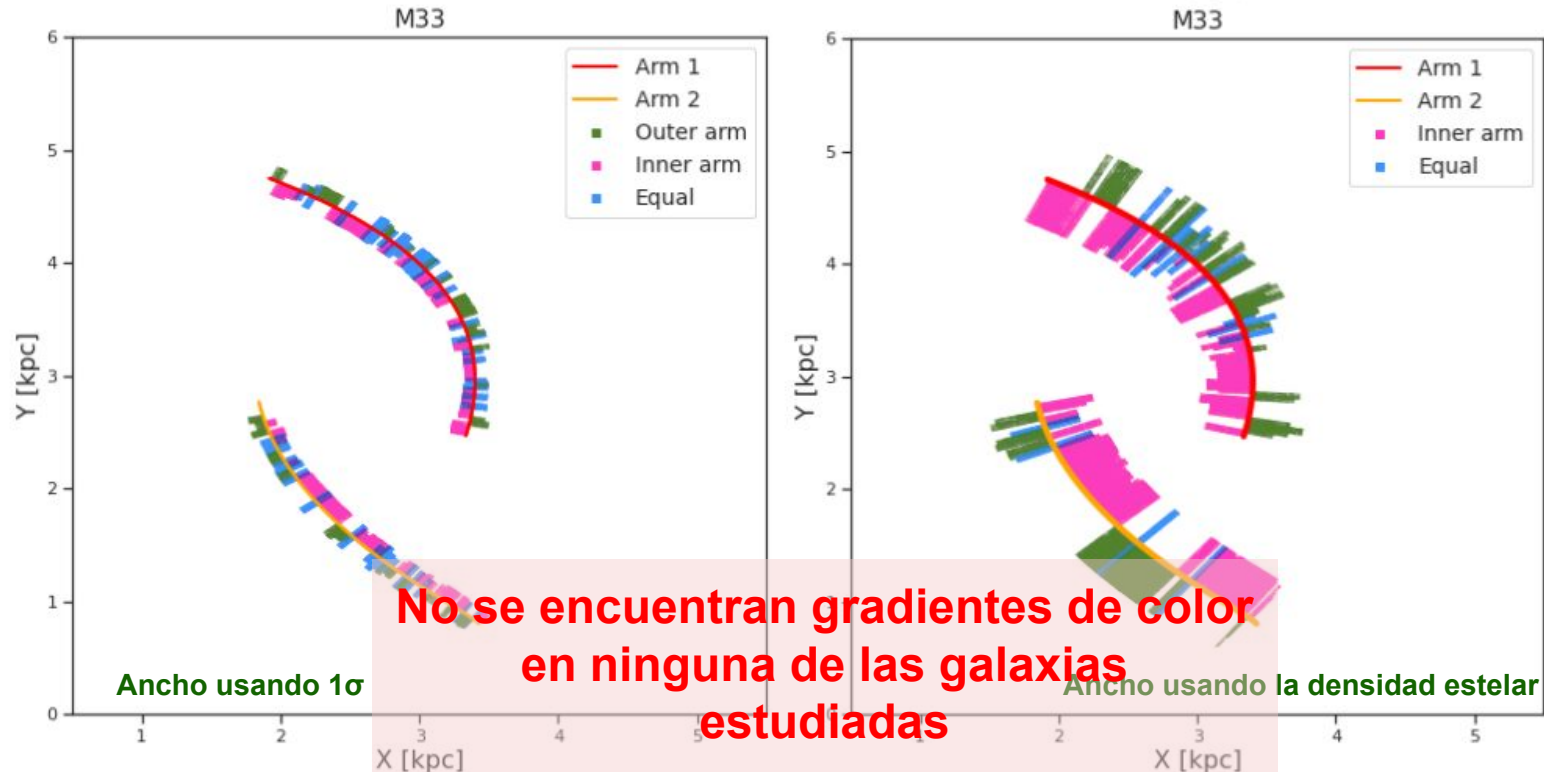
Distribución de las zonas de mayor conteo estelar en los brazos de la galaxia M101



Distribución de las zonas de mayor conteo estelar en los brazos de la galaxia M33



Distribución de las zonas de mayor conteo estelar en los brazos de la galaxia M33



Nuestra muestra de galaxias **no exhibe evidencias a favor de la teoría de ondas de densidad** utilizando la metodología propuesta.

- Los procesos de formación de brazos en las galaxias en este estudio pueden **no estar relacionados con las ondas de densidad**, sino con otros procesos de formación de brazos espirales.
- Un estudio de la **historia de formación estelar** para medir desplazamientos de edad azimutales podría ayudar a buscar gradientes de color.
- Autores como Kaleida & Scowen (2010), Schinnerer et al. (2017) y Shabani et al. (2018) **no encontraron evidencias a favor de la teoría de ondas de densidad** en varias galaxias espirales.

1. Trazar la estructura espiral de galaxias no es una tarea fácil, especialmente cuando la estructura no está claramente definida, como en M101, que presenta una estructura **floculenta**. La medición del ancho de los brazos espirales también se dificulta en galaxias con una **estructura espiral difusa**, como M33.

Conclusiones

1. Trazar la estructura espiral de galaxias no es una tarea fácil, especialmente cuando la estructura no está claramente definida, como en M101, que presenta una estructura **floculenta**. La medición del ancho de los brazos espirales también se dificulta en galaxias con una **estructura espiral difusa**, como M33.
2. Para **M101**, ambos brazos muestran una tendencia **decreciente** en el ancho con respecto a la distancia galactocéntrica. Para **M33**, el ancho de los brazos muestra una tendencia **creciente** en función de la distancia galactocéntrica. Este comportamiento se mantiene al estudiarse como función del ángulo subtendido. **Lo anterior está acorde a estudios realizados por otros autores.**

Conclusiones

1. Trazar la estructura espiral de galaxias no es una tarea fácil, especialmente cuando la estructura no está claramente definida, como en M101, que presenta una estructura **floculenta**. La medición del ancho de los brazos espirales también se dificulta en galaxias con una **estructura espiral difusa**, como M33.
2. Para **M101**, ambos brazos muestran una tendencia **decreciente** en el ancho con respecto a la distancia galactocéntrica. Para **M33**, el ancho de los brazos muestra una tendencia **creciente** en función de la distancia galactocéntrica. Este comportamiento se mantiene al estudiarse como función del ángulo subtendido. **Lo anterior está acorde a estudios realizados por otros autores.**
3. **No se encontró una tendencia clara** en la relación entre la morfología y la pendiente del ancho de los brazos en función de la distancia galactocéntrica cuando se usa el ancho encontrado con el método 1σ . Incluir más galaxias en la muestra podría ayudar a verificar dicho comportamiento.

Conclusiones

1. Trazar la estructura espiral de galaxias no es una tarea fácil, especialmente cuando la estructura no está claramente definida, como en M101, que presenta una estructura **floculenta**. La medición del ancho de los brazos espirales también se dificulta en galaxias con una **estructura espiral difusa**, como M33.
2. Para **M101**, ambos brazos muestran una tendencia **decreciente** en el ancho con respecto a la distancia galactocéntrica. Para **M33**, el ancho de los brazos muestra una tendencia **creciente** en función de la distancia galactocéntrica. Este comportamiento se mantiene al estudiarse como función del ángulo subtendido. **Lo anterior está acorde a estudios realizados por otros autores.**
3. **No se encontró una tendencia clara** en la relación entre la morfología y la pendiente del ancho de los brazos en función de la distancia galactocéntrica cuando se usa el ancho encontrado con el método 1σ . Incluir más galaxias en la muestra podría ayudar a verificar dicho comportamiento.
4. Se estudió la población de **estrellas de la secuencia principal superior** en los brazos de las galaxias en **búsqueda de gradientes de color**. **Ninguna de las galaxias exhibió gradientes de color**, por lo cual en este trabajo no se encuentran evidencias que respalden la teoría de ondas de densidad.

¡Gracias!

Conclusiones

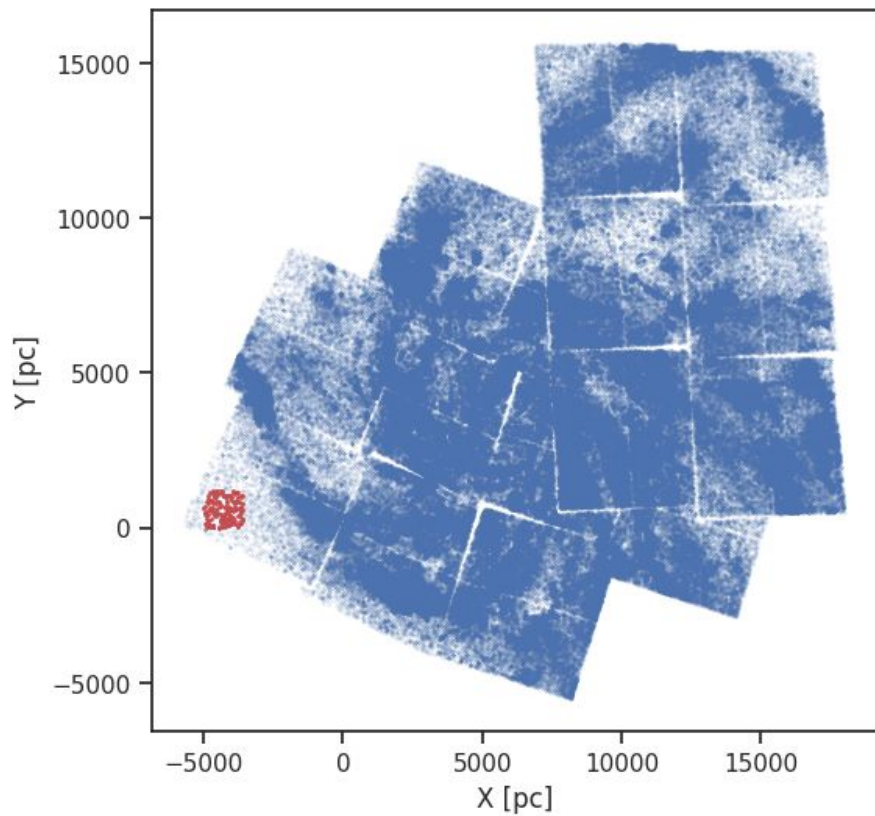
1. Trazar la estructura espiral de galaxias no es una tarea fácil, especialmente cuando la estructura no está claramente definida, como en M101, que presenta una estructura **floculenta**. La medición del ancho de los brazos espirales también se dificulta en galaxias con una **estructura espiral difusa**, como M33.
2. Para **M101**, ambos brazos muestran una tendencia **decreciente** en el ancho con respecto a la distancia galactocéntrica. Para **M33**, el ancho de los brazos muestra una tendencia **creciente** en función de la distancia galactocéntrica. Este comportamiento se mantiene al estudiarse como función del ángulo subtendido. **Lo anterior está acorde a estudios realizados por otros autores.**
3. **No se encontró una tendencia clara** en la relación entre la morfología y la pendiente del ancho de los brazos en función de la distancia galactocéntrica cuando se usa el ancho encontrado con el método 1σ . Incluir más galaxias en la muestra podría ayudar a verificar dicho comportamiento.
4. Se estudió la población de **estrellas de la secuencia principal superior** en los brazos de las galaxias en **búsqueda de gradientes de color**. **Ninguna de las galaxias exhibió gradientes de color**, por lo cual en este trabajo no se encuentran evidencias que respalden la teoría de ondas de densidad.

¿Por qué nos enfocamos en el estudio del ancho de los brazos?

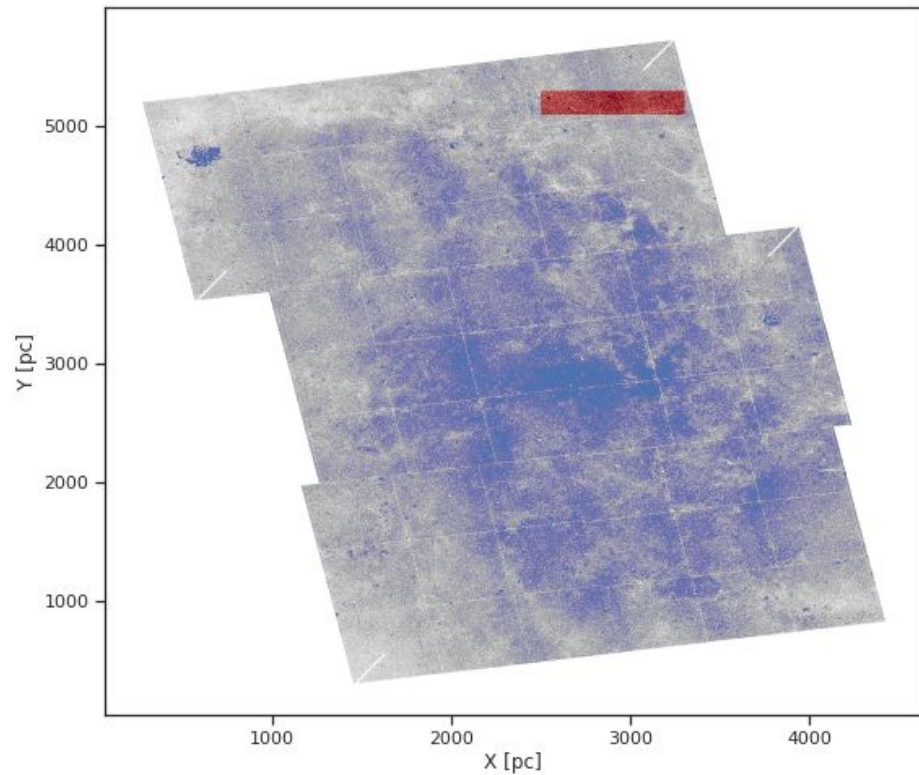
- Estudiar el ancho de los brazos nos ayuda a entender las características del patrón espiral.
- El ancho de los brazos espirales está directamente relacionado con las condiciones de formación estelar.
- Variaciones en el ancho de los brazos entre galaxias pueden ofrecer pistas sobre la dinámica subyacente y la validez de la teoría en diferentes entornos galácticos.

Anexo

M101

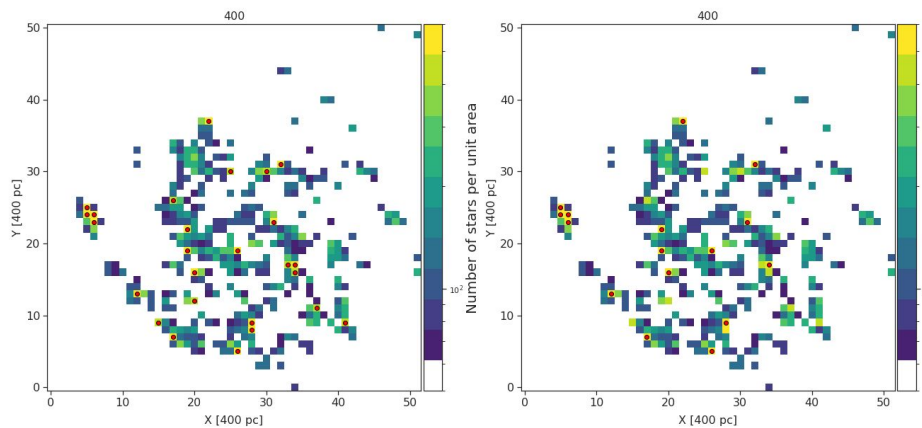
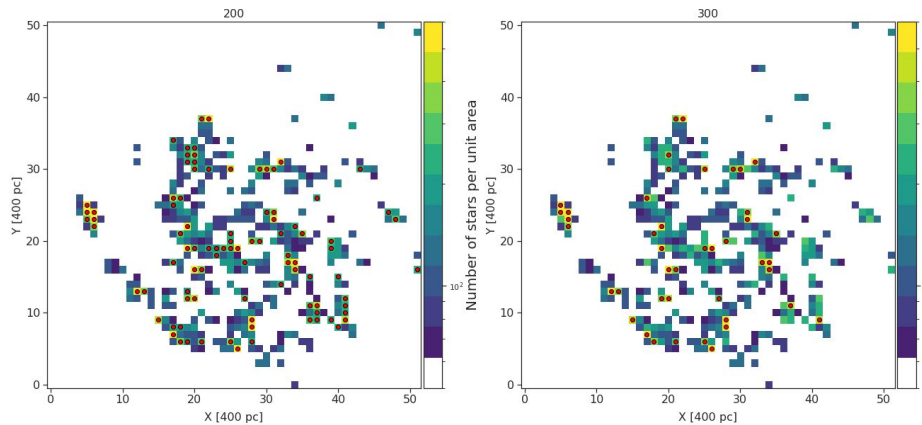


M33

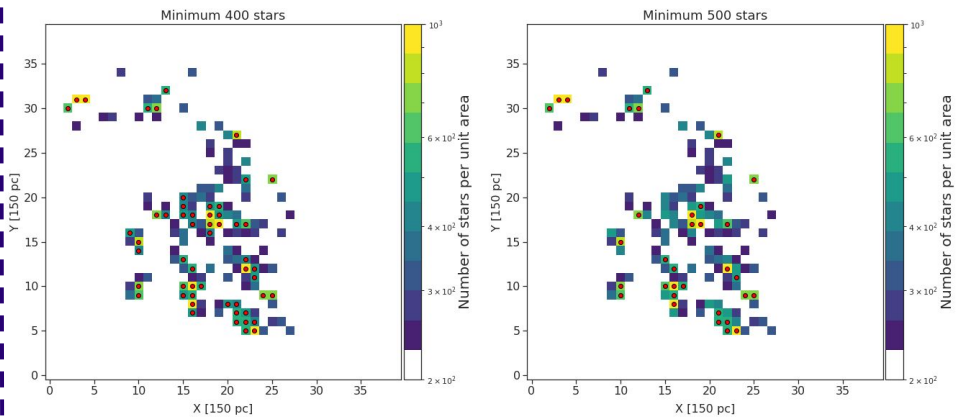
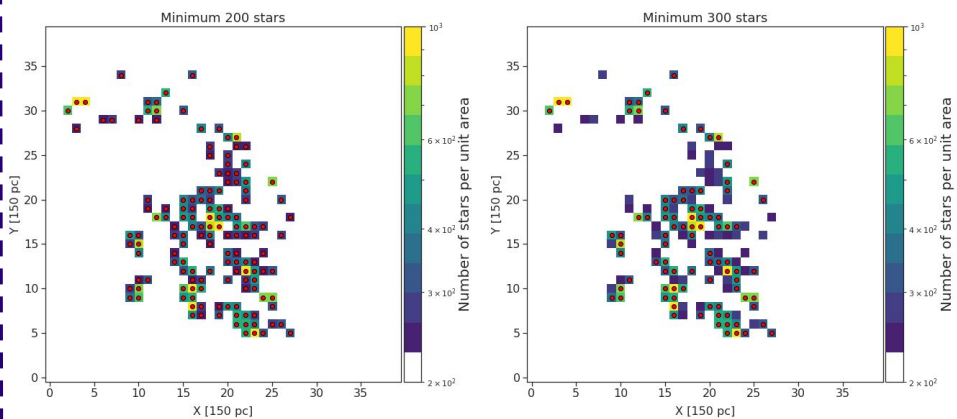


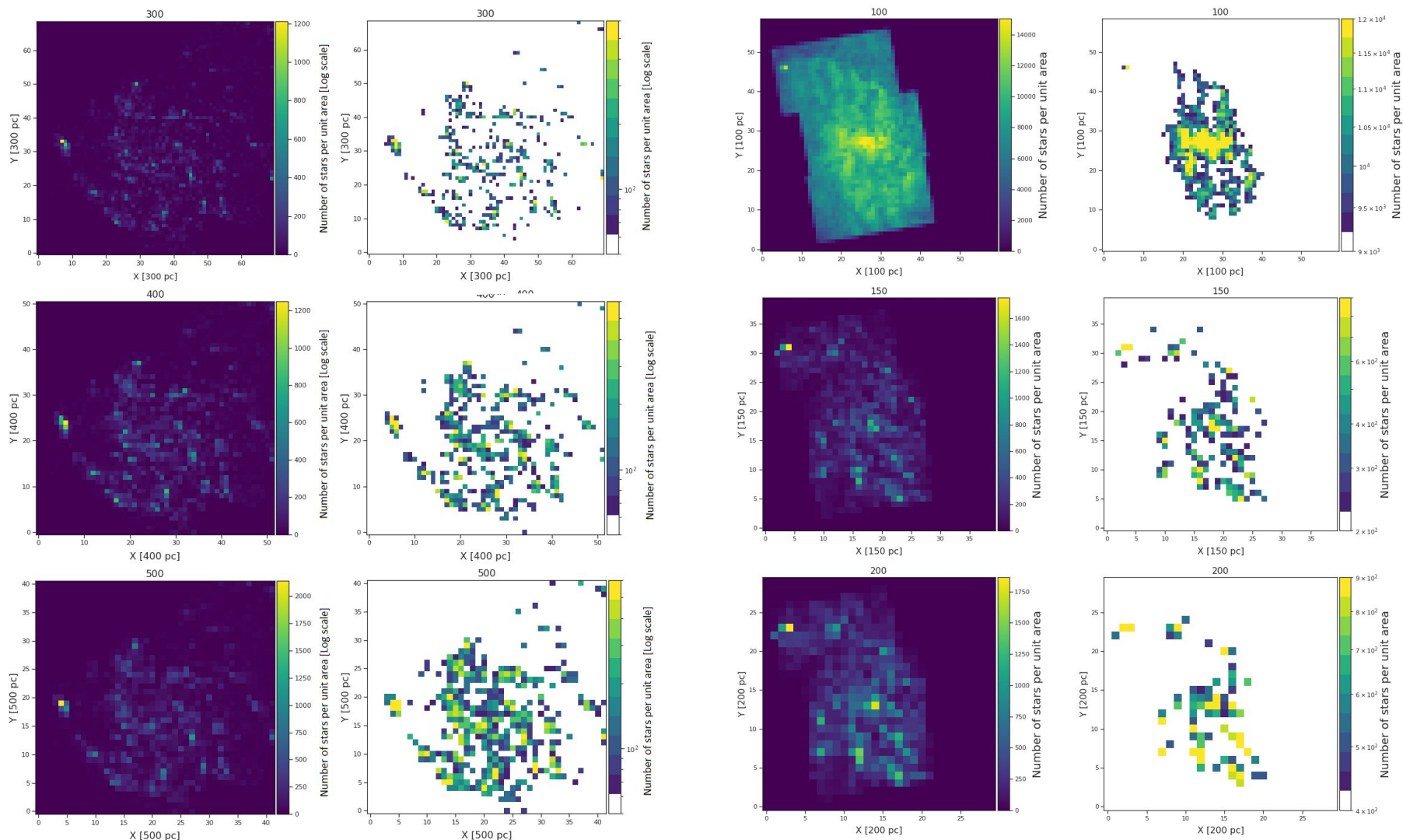
Anexo

M101

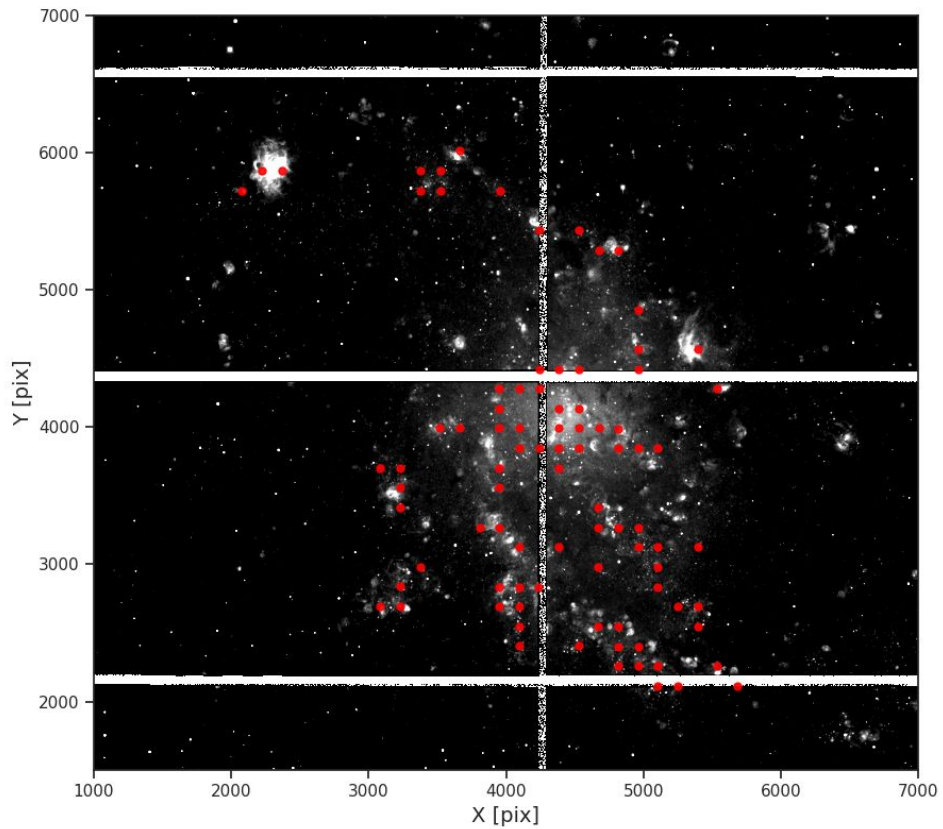
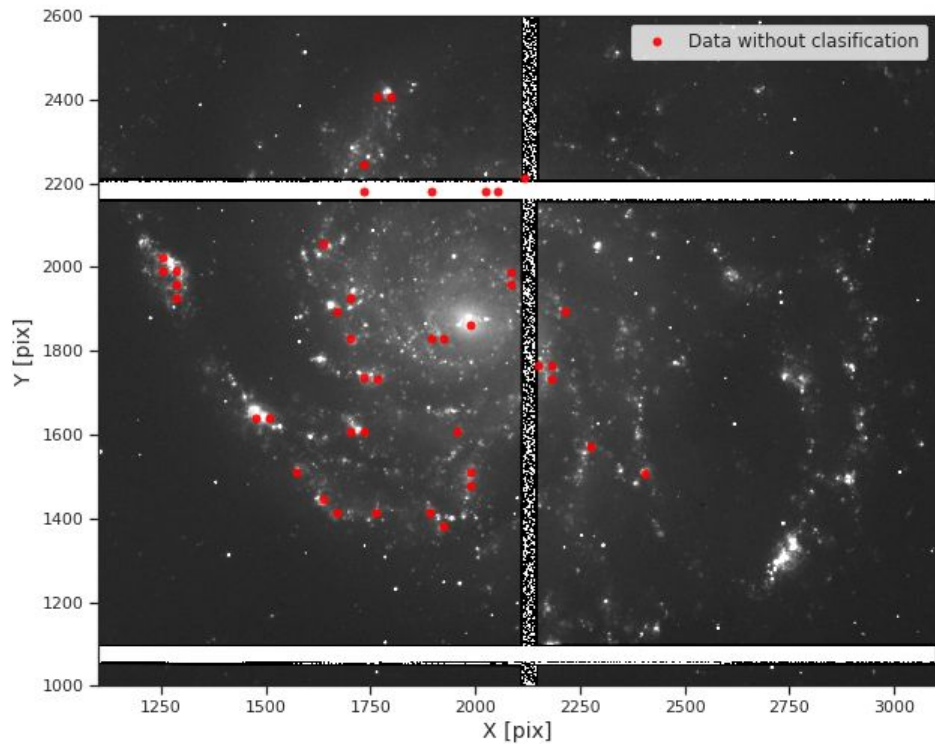


M33

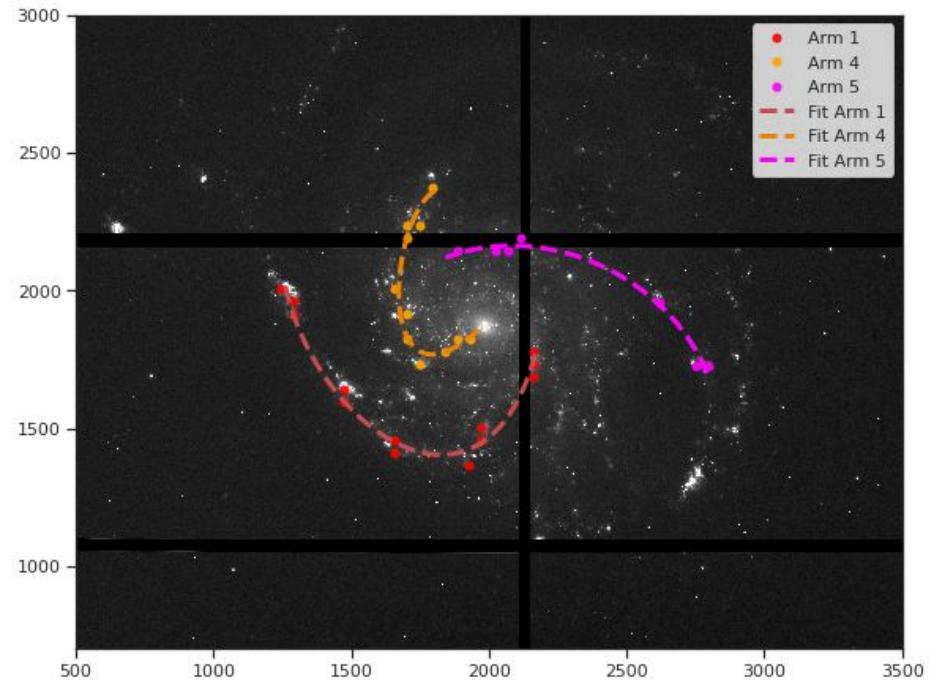
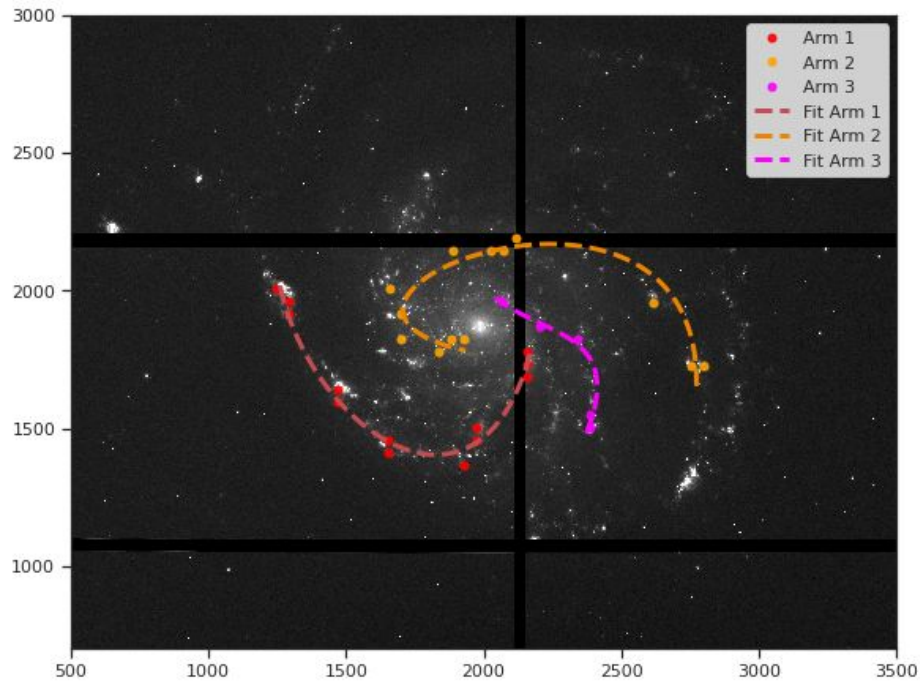




Anexo

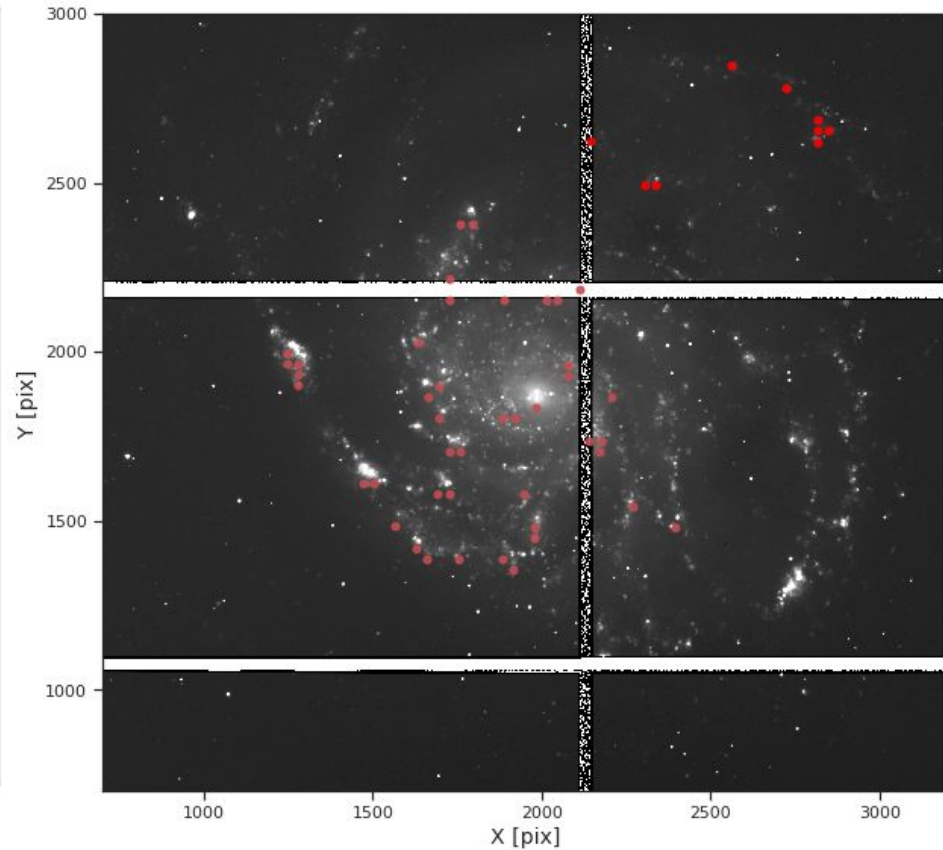
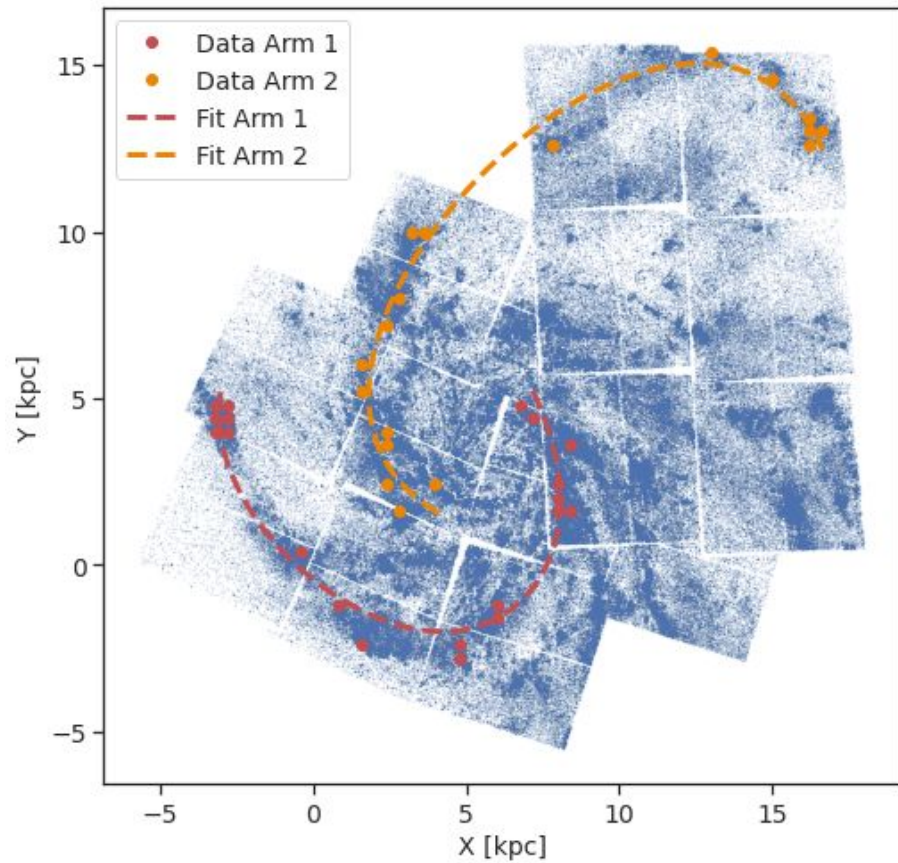


Anexo

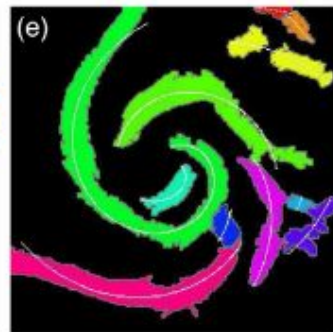
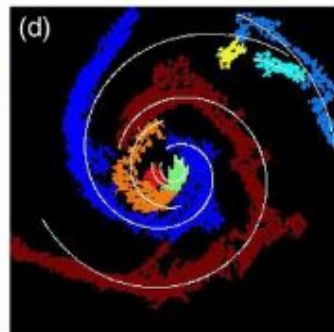
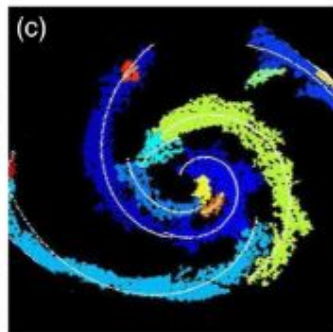
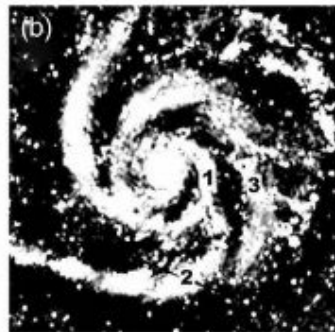
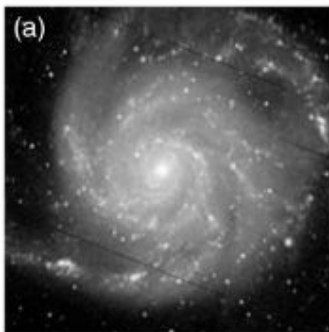
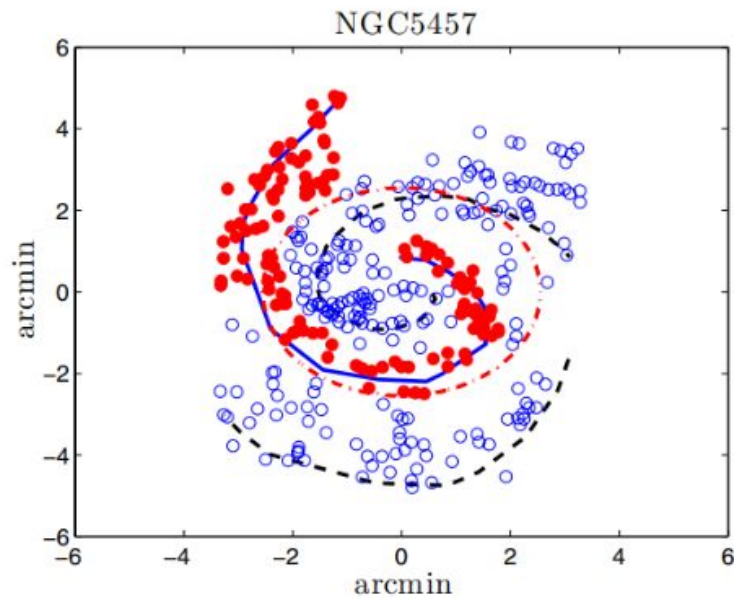
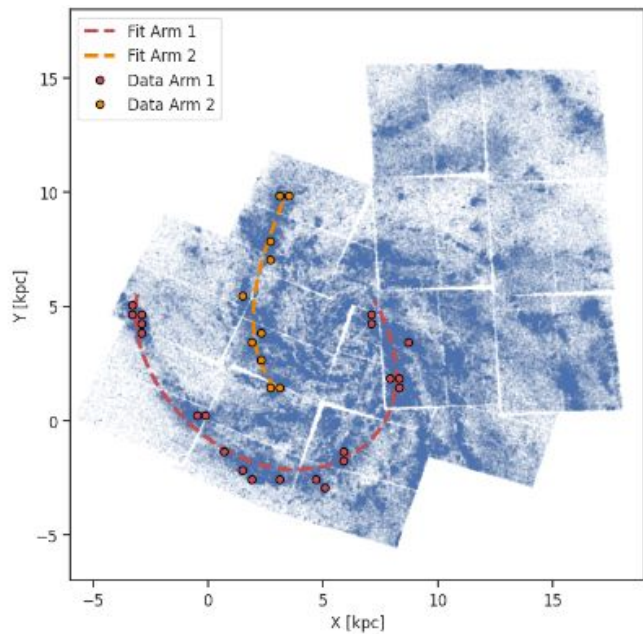


Los puntos dispersos lejos del centro galáctico pueden no representar verdaderos brazos espirales, sino más bien agrupaciones aleatorias de estrellas no asociadas dinámicamente como partes de un patrón espiral (Elmegreen y Elmegreen, 1983).

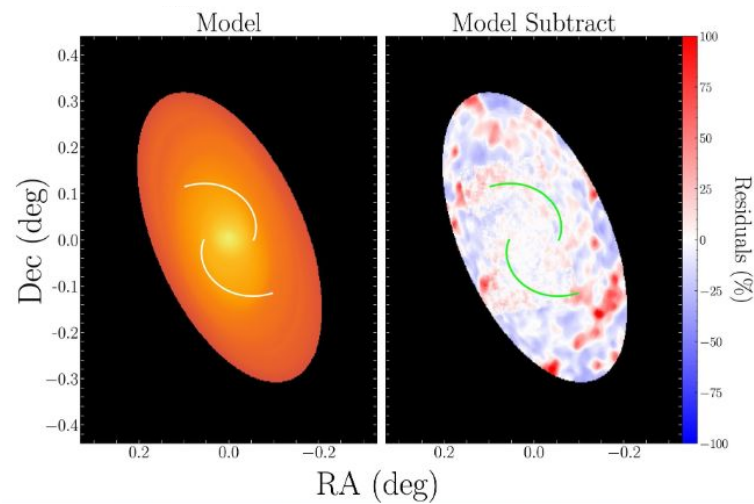
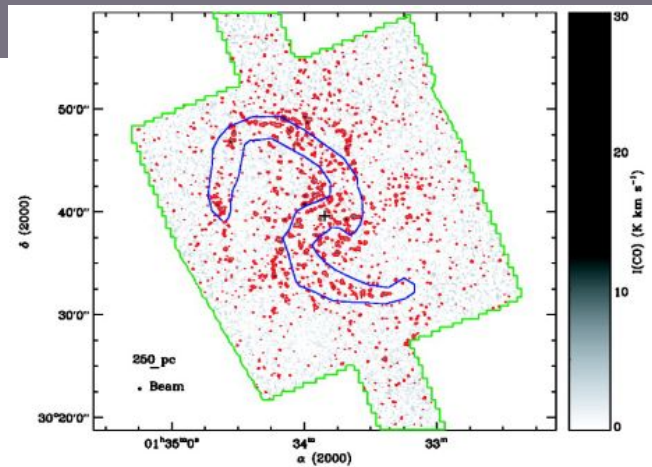
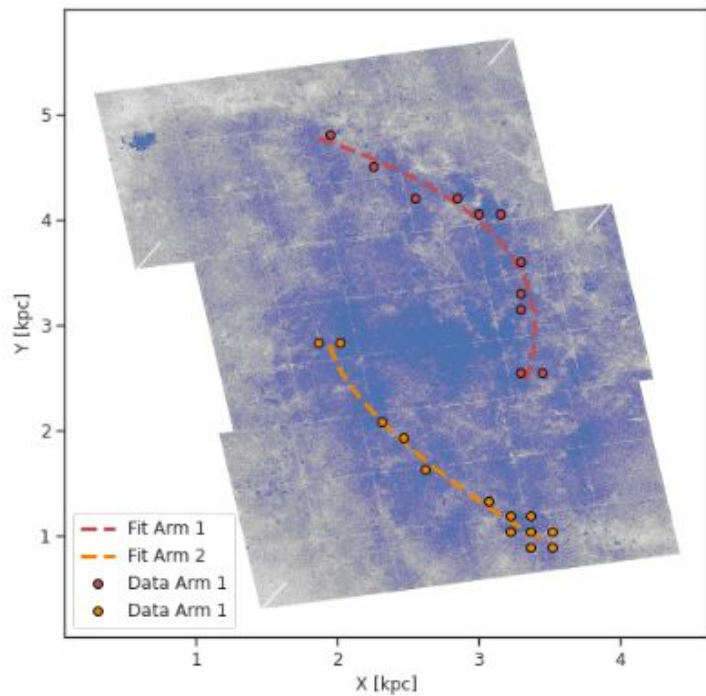
Anexo



Anexo



Anexo



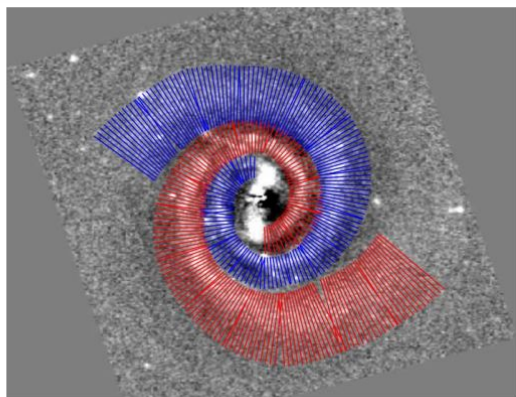


Fig. 1 A set of slices made perpendicular to the arm structure of PGC 2182. Different colors signify slices corresponding to different arms.

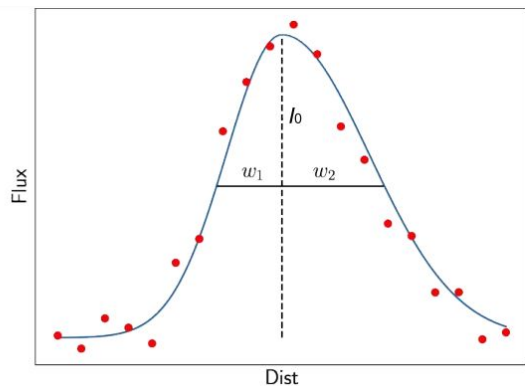


Fig. 2 A schematic view for a single photometric cut and its fit by an asymmetric Gaussian function. The *red dots* are data points and the *solid line* is the best fit.

Métodos usado por Mosenkov et al. para encontrar el ancho de los brazos de las 155 galaxias

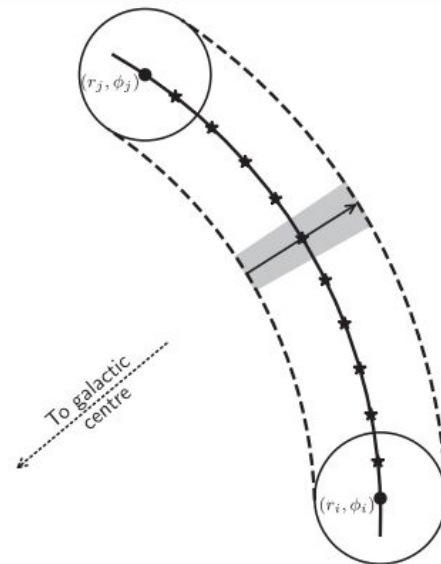
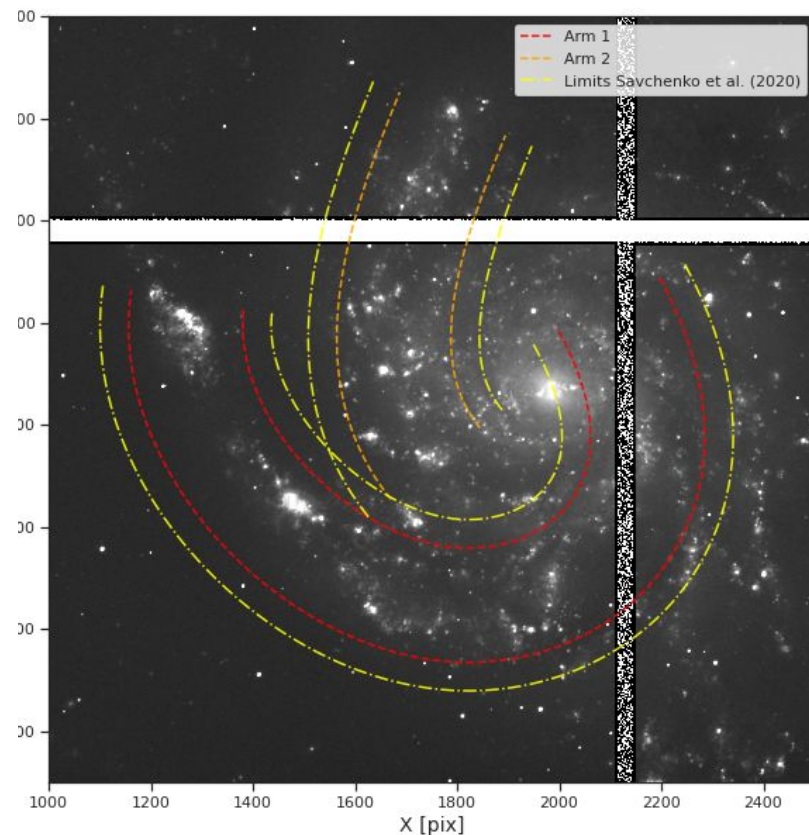
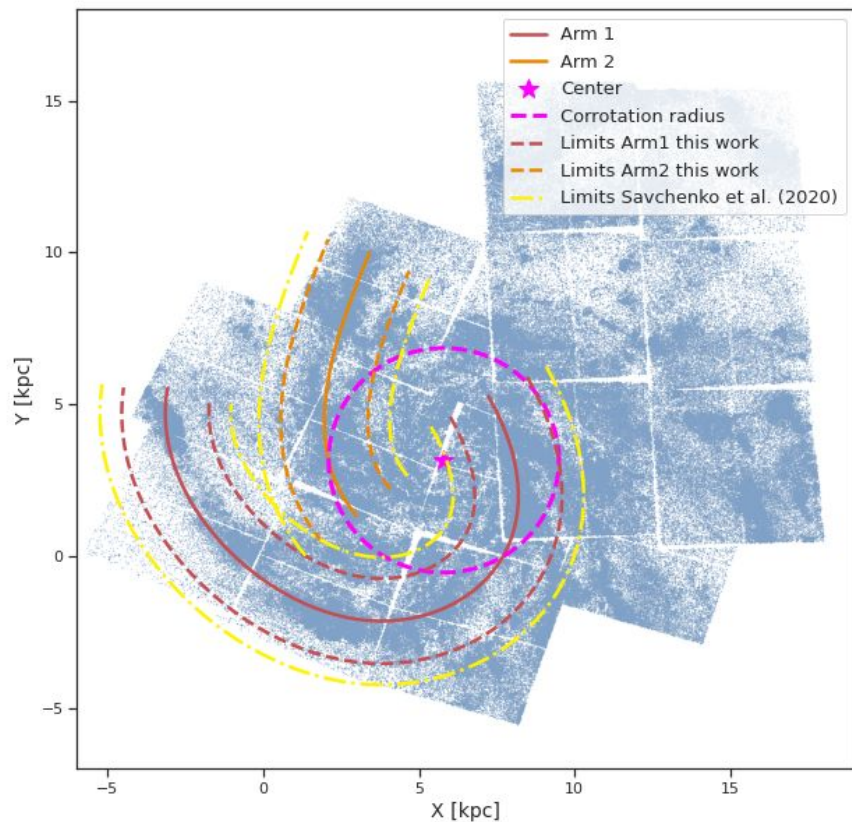


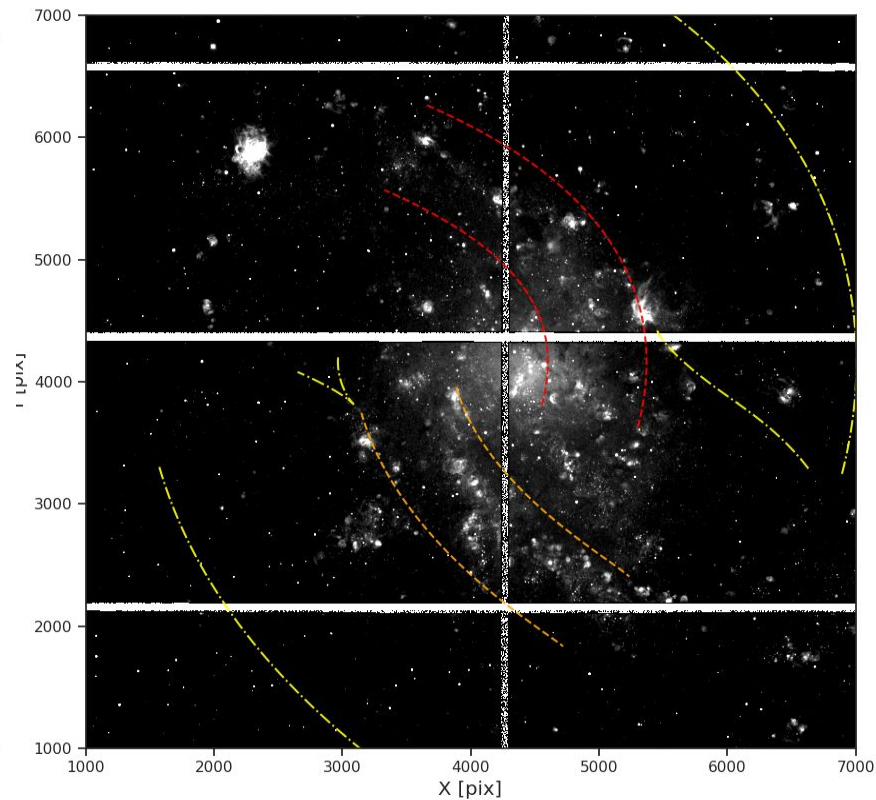
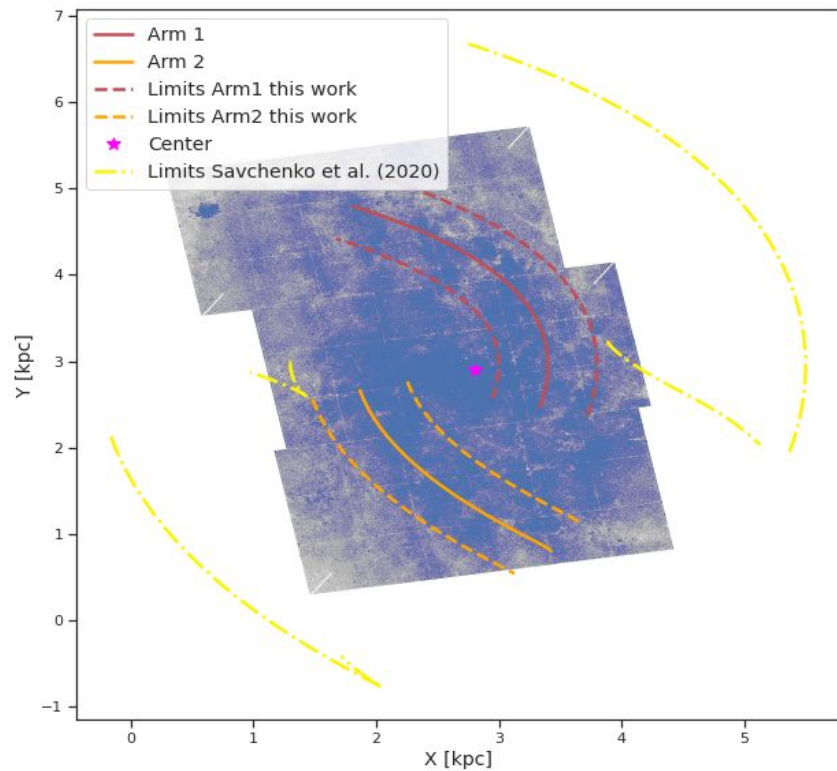
Figure 4. A scheme of an orthogonal cut construction. The curved solid line depicts a spiral arm, with two circles to be user-specified points i and j (see the text). The stars show locations of the interpolated points at which the cuts are made. One of the cuts is shown as a solid line with an arrow with a shaded region to be the cut width. The dashed lines show the limits of the cuts.

Anexo



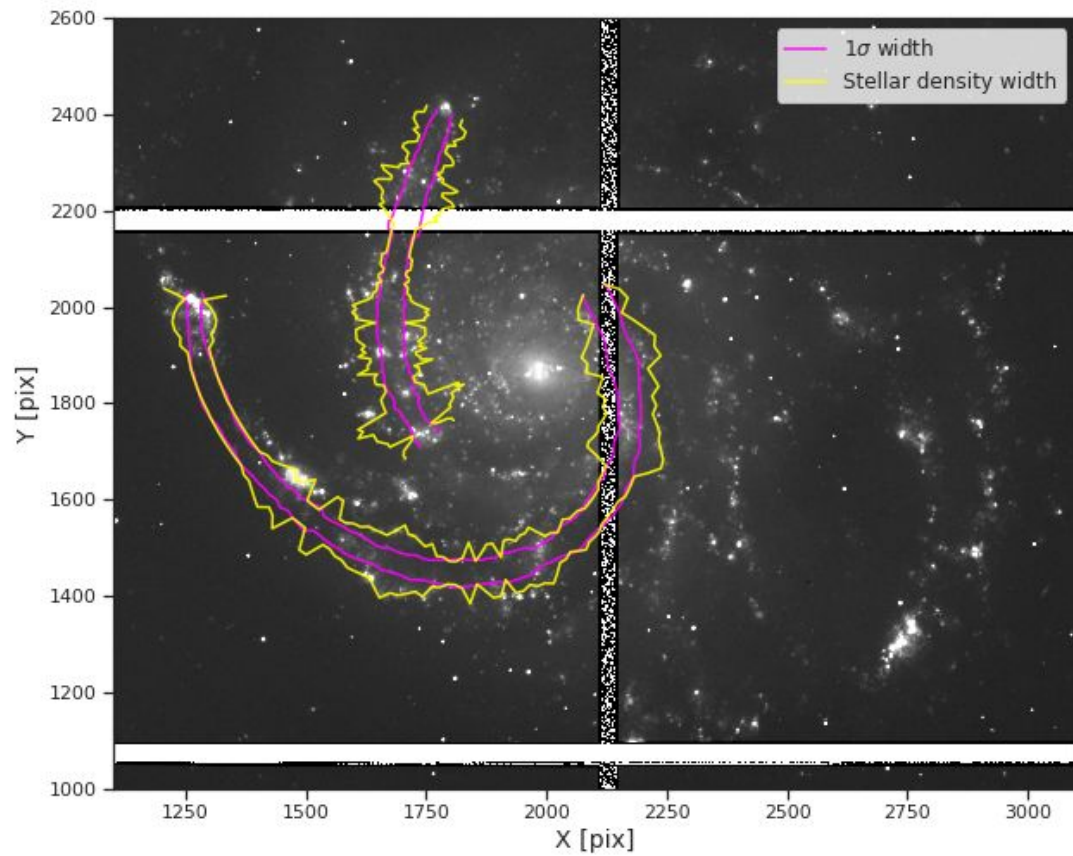
Este trabajo: 1.4 kpc
Savchenko et al. (2020): 2.1kpc

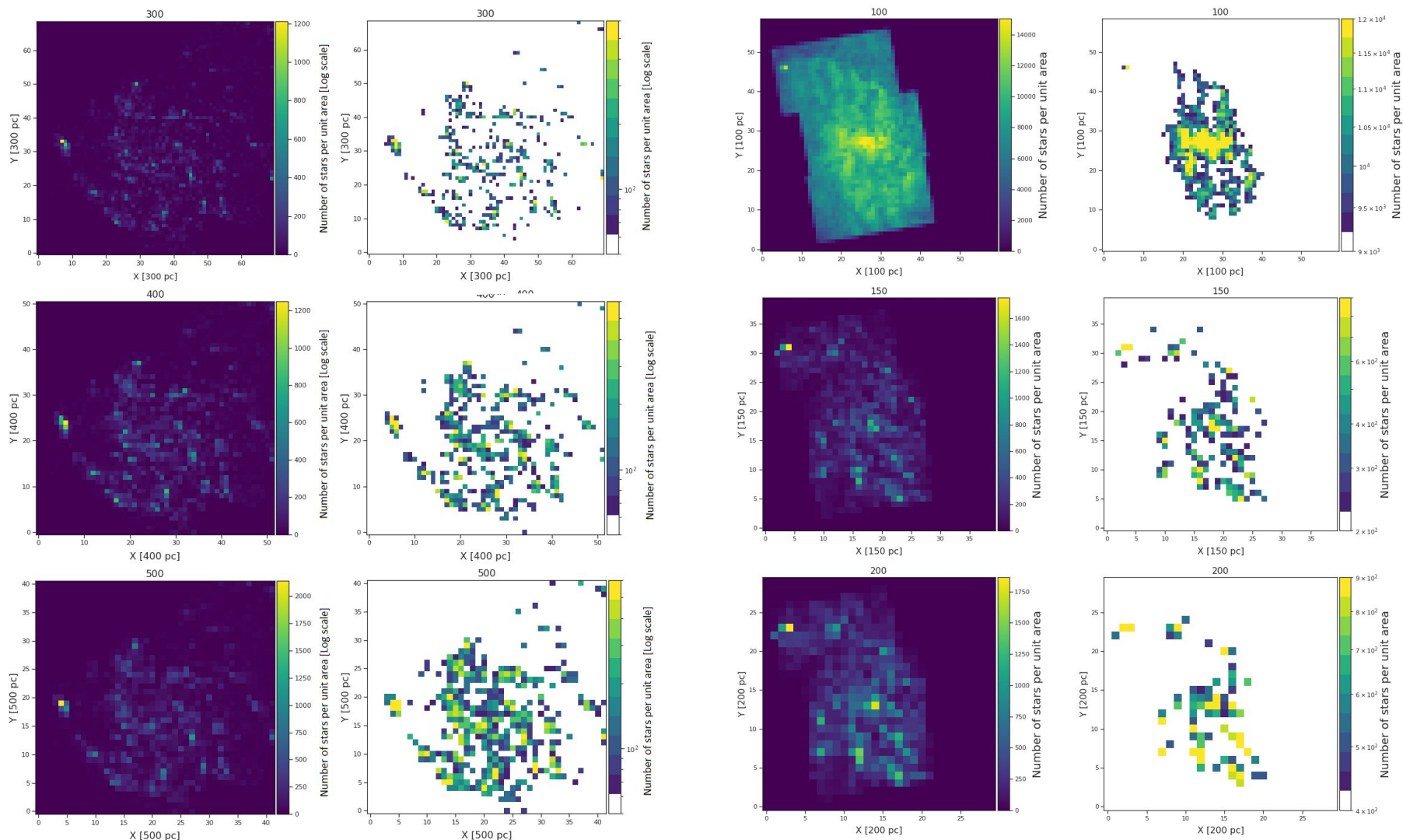
Anexo

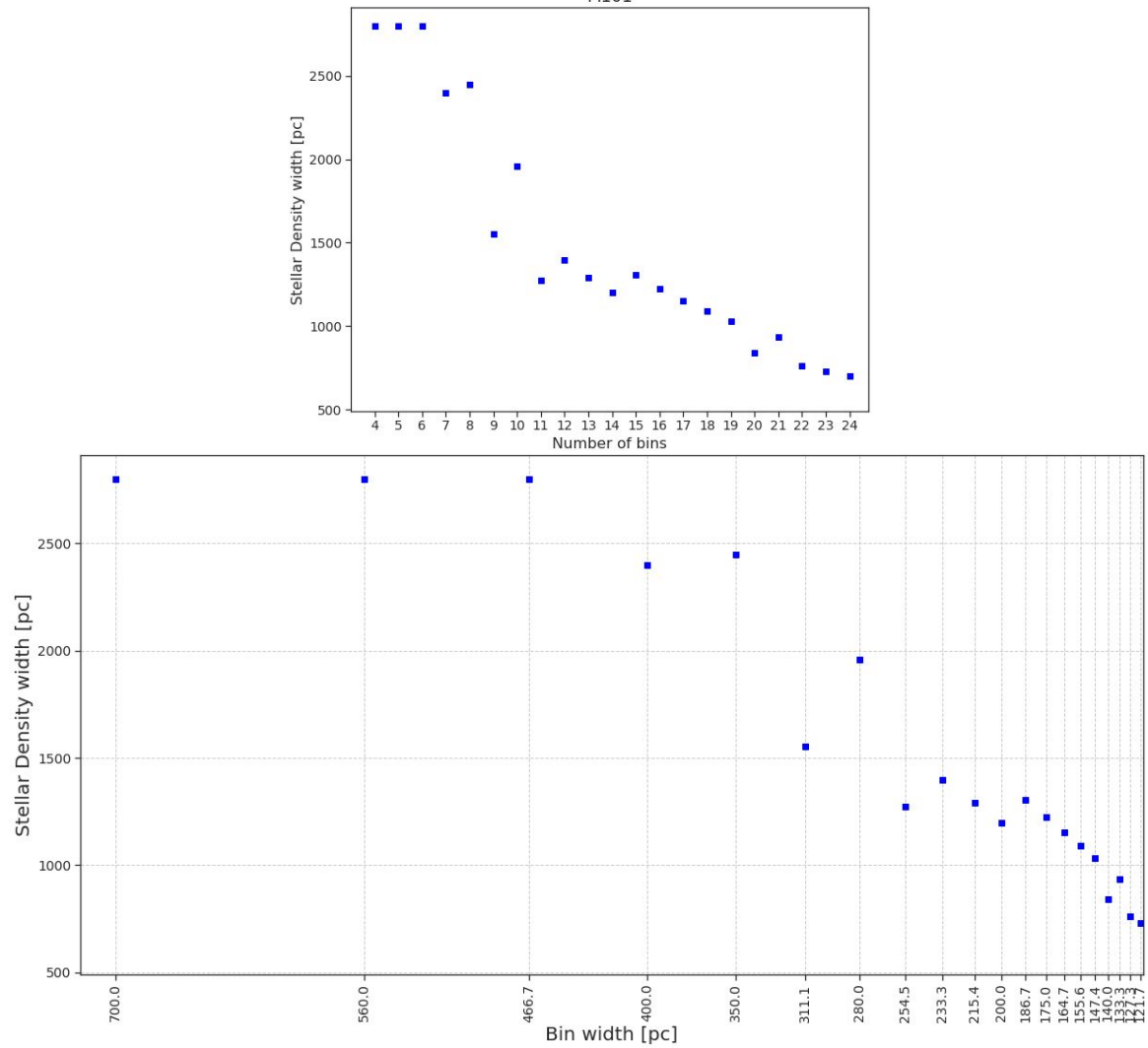


Este trabajo: 800 kpc
Savchenko et al. (2020): 2.1kpc

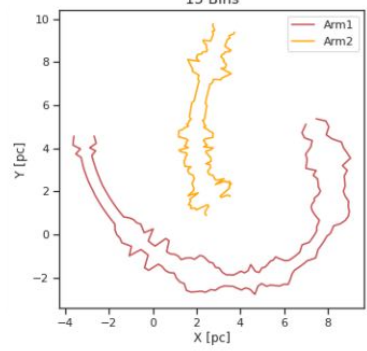
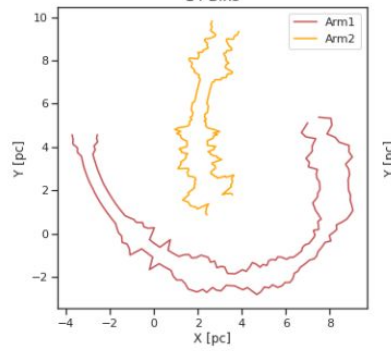
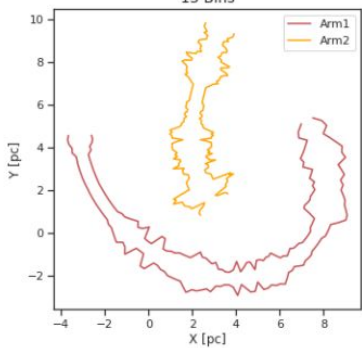
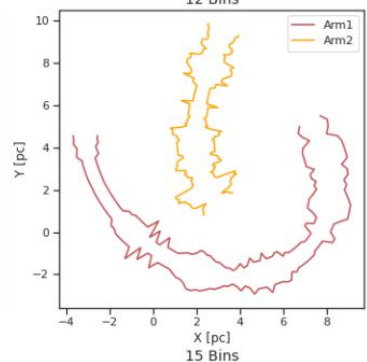
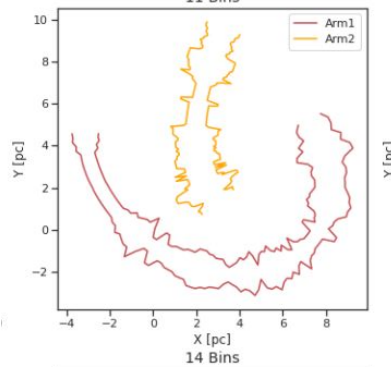
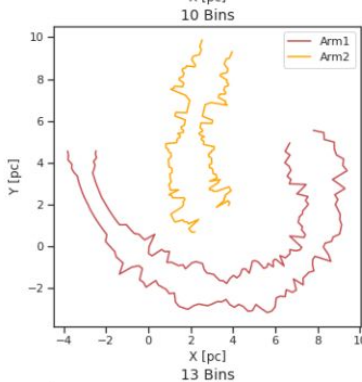
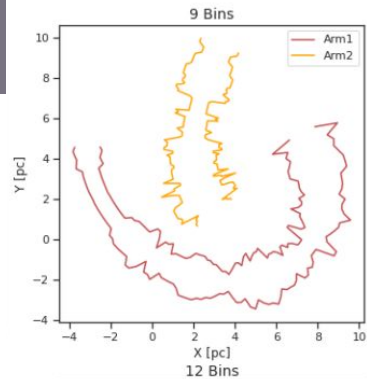
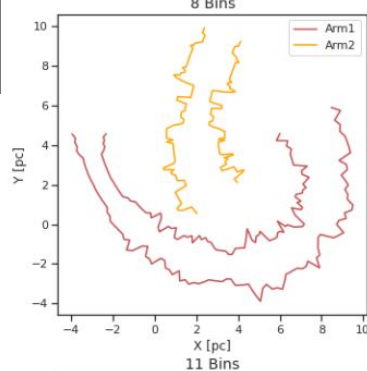
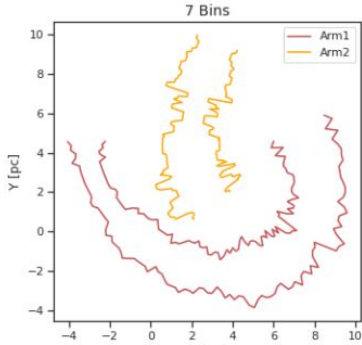
Anexo

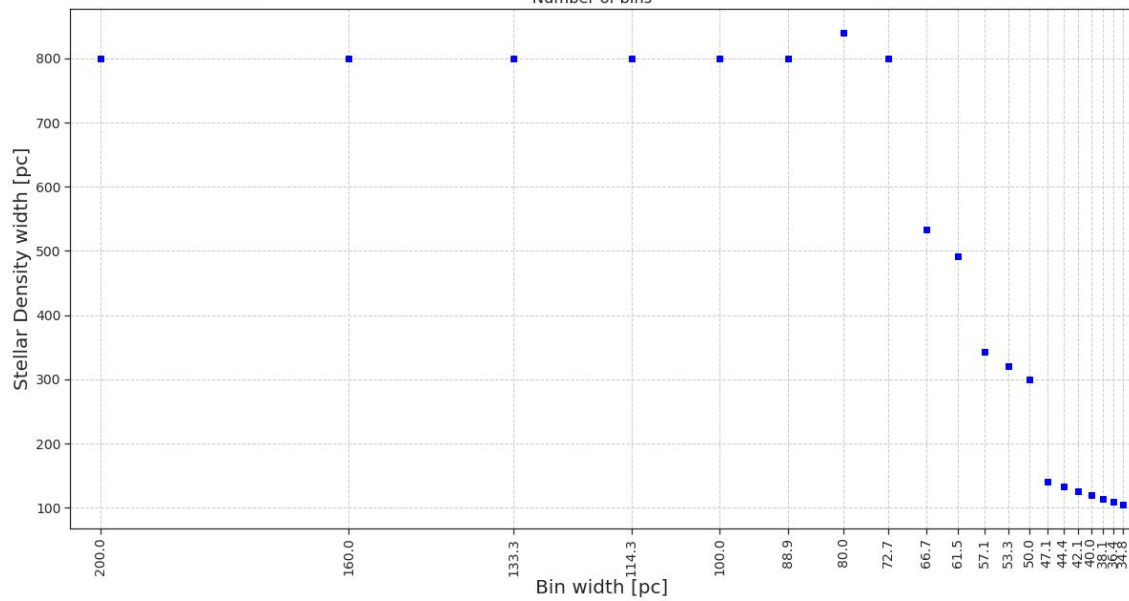
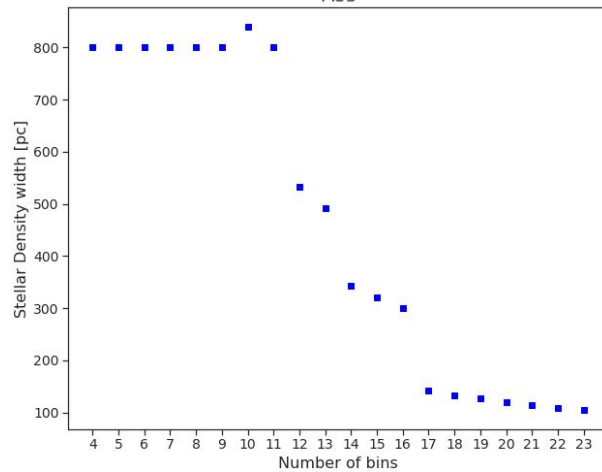




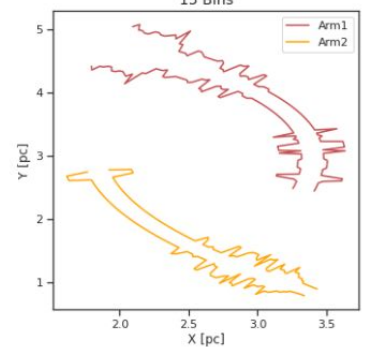
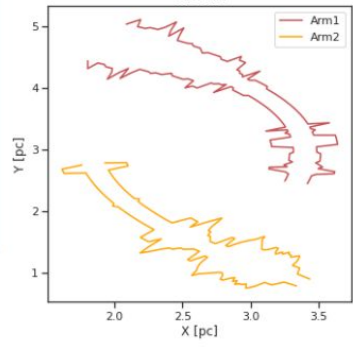
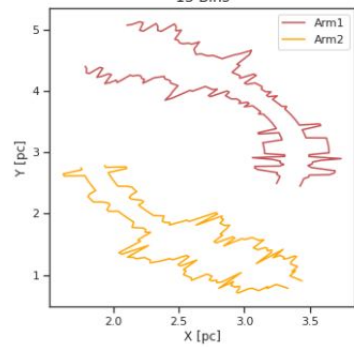
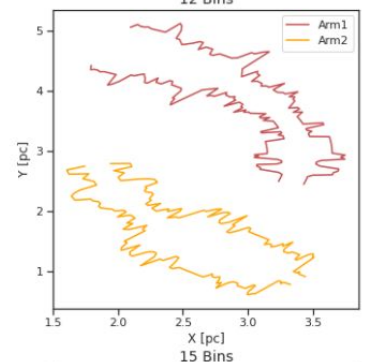
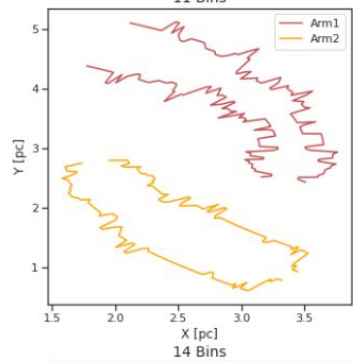
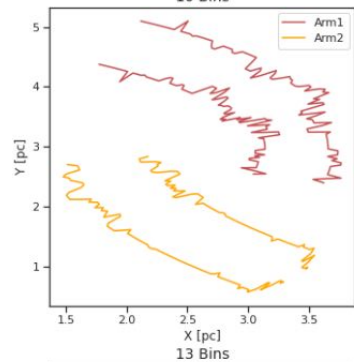
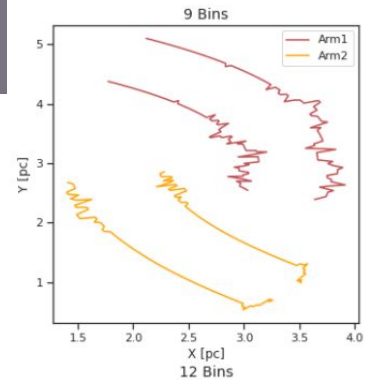
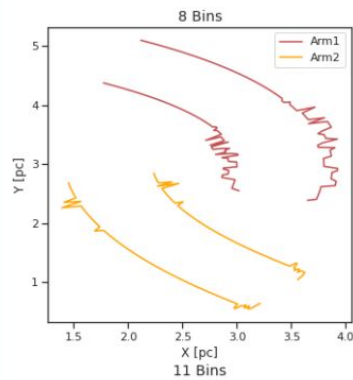
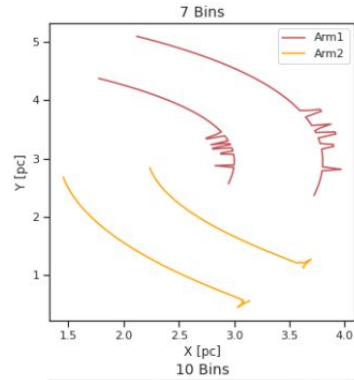


Anexo



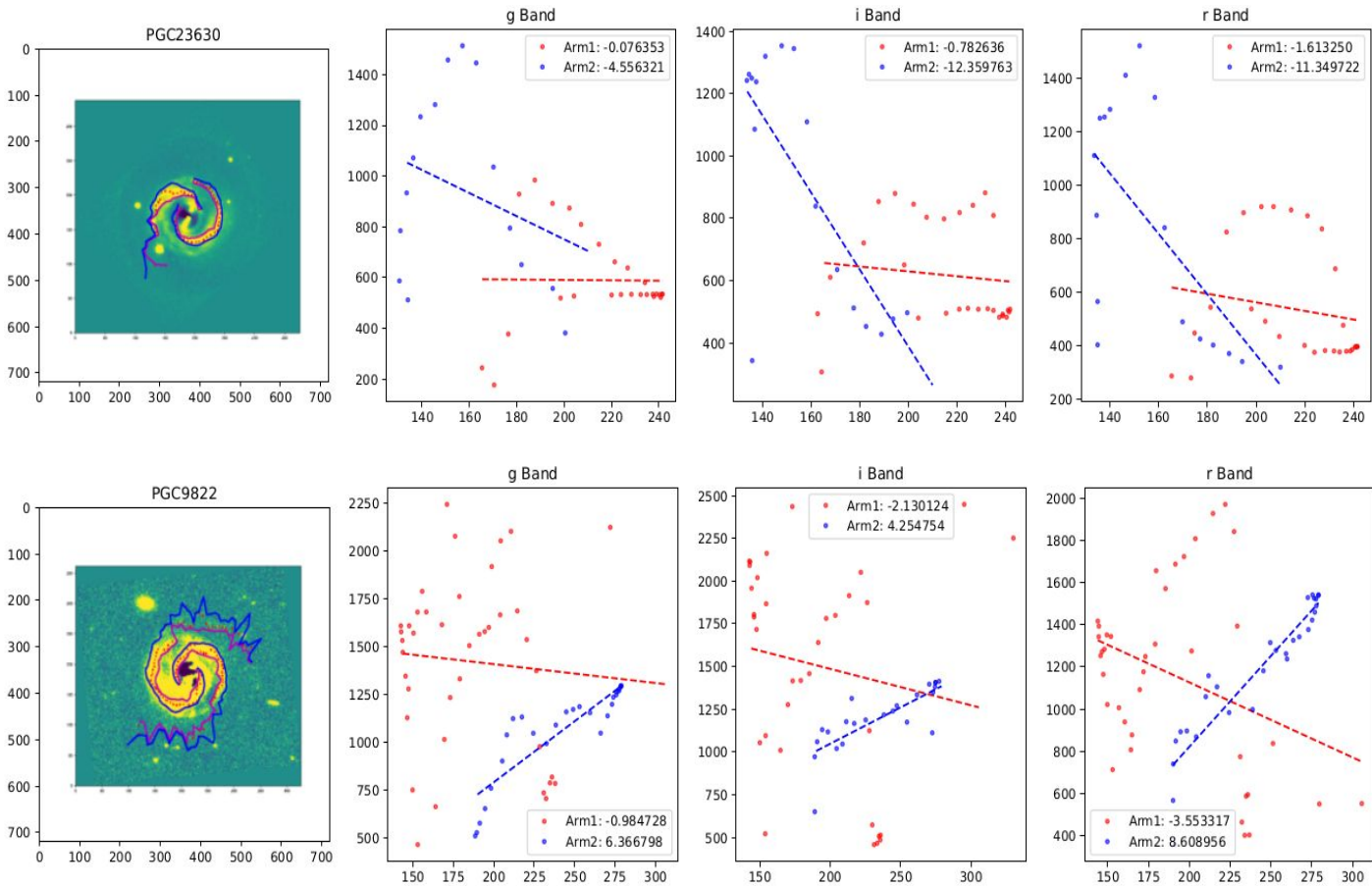


Anexo



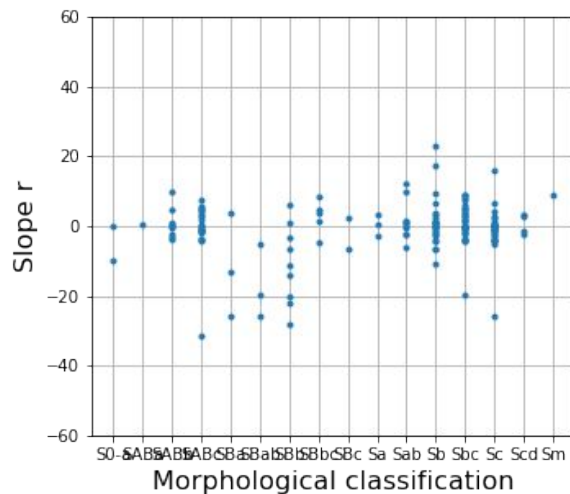
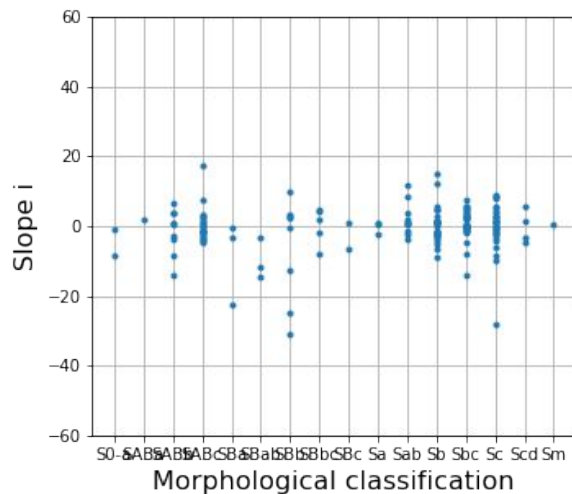
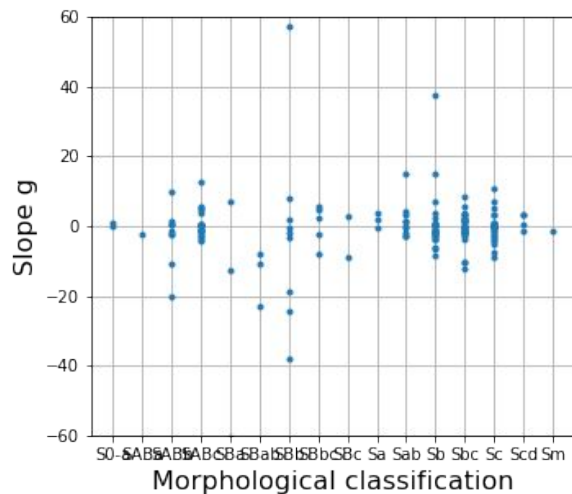
Anexo

Savchenko et al. (2020)



Anexo

Savchenko et al. (2020)



Increasing slopes g: 73
Decreasing slopes g: 82

Increasing slopes i: 80
Decreasing slopes i: 75

Increasing slopes r: 74
Decreasing slopes r: 81

Mosenkov et al 2020

3 DATA ANALYSIS

We provide details on our data analysis in Savchenko et al. (2020). For each galaxy, we marked at least one spiral arm, which can be traced in the de-projected residual image we created in Section 2. We trace the arm from the ends of a bar or beyond a bulge, if these components are present in the galaxy, to the galaxy outskirts at the outermost galaxy isophotes. Each spiral arm was traced using ‘circle’ regions from the ds9 program¹: these regions were placed manually along the central line of the arm, estimated approximately by eye, with a circle radius extending till the middle of the inter-arm space on either side of the arm inwards and outwards. Then a special algorithm was employed to make a set of slices perpendicular to the arm in a number of points with the length of each slice being equal to the diameter of the circle regions (see Fig. 1). Then we fit each slice with an asymmetric Gaussian function of

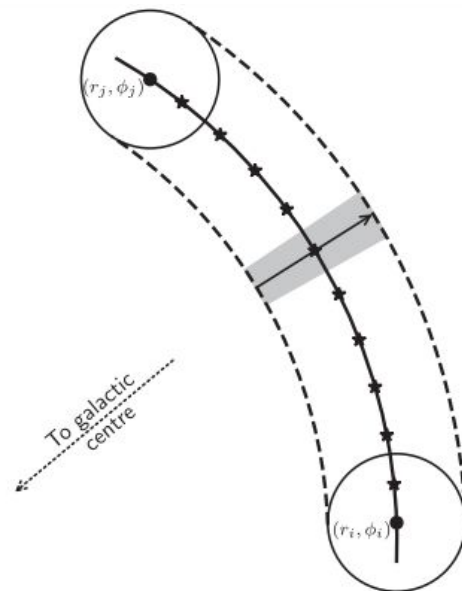


Figure 4. A scheme of an orthogonal cut construction. The curved solid line depicts a spiral arm, with two circles to be user-specified points i and j (see the text). The stars show locations of the interpolated points at which the cuts are made. One of the cuts is shown as a solid line with an arrow with a shaded region to be the cut width. The dashed lines show the limits of the cuts.

Savchenko et al. (2020)

0.25 AND Arm_Curvature \geq 0.5 AND diam > 50" AND ax_ratio < 1.3. This added another 376 objects to our preliminary sample. The joined sample was examined **by eye** 3 times to remove highly inclined galaxies, galaxies contaminated by foreground stars, overlapping galaxies, or strongly interacting galaxies. Also, in our final sample we selected only those galaxies for which at least one spiral arm can be traced (i.e. the spiral pattern is not too flocculent, not wound up in a ring and not too weak to be

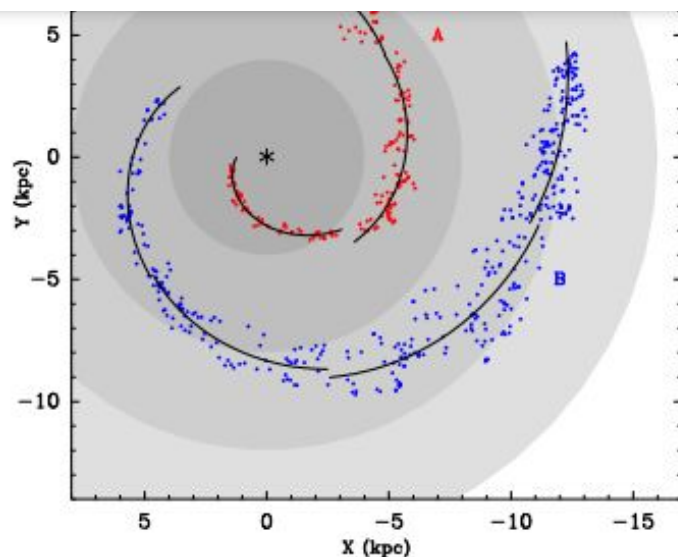


Figure 2. Locations of measured H II regions for NGC 628 (M74) indicating the segments of each arm fitted with a spiral. Gray shaded annulae are spaced by 4 kpc and provide constant radius references. (The data used to create this figure are available.)

spiral form of Equation (1) to all H II region positions gives a global pitch angle of $-15^{\circ}.4 \pm 0^{\circ}.5$, although it is clear that a single pitch angle is not a good fit over the entire arm. In the second arm, labeled “B,” we located 427 H II regions between distances of about 4 to 13 kpc and find a global pitch angle of $-14^{\circ}.3 \pm 0^{\circ}.2$. This global fit is better than for arm A, but still shows some small systematic deviations from a constant pitch angle form.

We divided arm A into three segments and arm B into four segments, as indicated in Table 2. Spiral fits revealed significant changes in pitch angle among the segments in arm A, but only small changes among segments in arm B. For both arms, the

A	−45 → 55	3.33 ± 0.04	-9.9 ± 1.5	0.16 ± 0.03
...	45 → 150	5.01 ± 0.08	-8.9 ± 2.3	0.52 ± 0.06
...	150 → 230	5.98 ± 0.08	-14.3 ± 2.1	0.51 ± 0.06
B	50 → 165	2.63 ± 0.03	-11.8 ± 0.9	0.10 ± 0.02
...	165 → 250	3.49 ± 0.04	-10.8 ± 1.6	0.24 ± 0.03
...	250 → 315	5.46 ± 0.06	-26.6 ± 2.3	0.33 ± 0.04
...	312 → 380	7.64 ± 0.07	-30.0 ± 1.5	0.46 ± 0.04
C	−80 → −20	4.38 ± 0.03	-14.7 ± 1.3	0.12 ± 0.02
...	−20 → +35	5.82 ± 0.05	-20.9 ± 1.2	0.27 ± 0.03
D	155 → 195	9.87 ± 0.04	-10.9 ± 0.9	0.16 ± 0.03
E	−85 → −65	11.38 ± 0.05	-11.6 ± 2.9	0.24 ± 0.04
...	−65 → −40	12.83 ± 0.03	-22.0 ± 1.0	0.14 ± 0.02
F	95 → 130	16.23 ± 0.10	-10.8 ± 1.9	0.65 ± 0.07

Notes. Arm segments are labeled with letters A through F and are defined by the indicated azimuth range. Azimuth is measured east of north (counter clockwise from vertical in Figures 3 and 4.

estimated arm widths increase with increasing radius, with the exception of the last segment of arm B, where some narrowing occurs. These characteristics are evident from an **inspection** of Figure 2 where individual arm segment fits are displayed.

4.2. NGC 1232

The left panel of Figure 3 shows the image of NGC 1232, which displays several spiral arms starting from near the galactic center and winding counterclockwise with increasing radial distance. Some of these arms branch and/or connect with arm segments at large distances. We traced 105, 165, and 73 H II regions in arms labeled “A” through “C,” respectively, and 25, 50, and 48 H II regions in arm segments “D” through “F,” as labeled in the figure and in Table 3. Arm segments E and F may connect to spiral arms A and C, although other possibilities exist. Fitting a spiral form to all H II regions in each arm