

# Práctico 2: Morfología y Propiedades de las Galaxias

Agustina del Valle Colazo

27 de Septiembre, 2023

## Abstract

Se realiza un estudio estadístico de una muestra de 13240 galaxias obtenida del catálogo del Sloan Digital Sky Survey con el objetivo de analizar distintas propiedades de las mismas tales como su índice de color ( $u - r$ ), luminosidad, índice de concentración  $C$ , parámetro  $fracDeV$  y su tamaño. Se desea estudiar la correlación que existe entre varios de estos parámetros, y verificar algunos resultados clásicos obtenidos anteriormente por otros autores. Por ejemplo, la distribución bimodal del color de las galaxias, la corrección entre el índice de concentración  $C$  y el tipo morfológico, y la relación entre el tamaño y la luminosidad.

## 1 Introducción

### 1.1 Tipos Morfológicos

Históricamente, las galaxias fueron clasificadas según su apariencia morfológica en elípticas (E), lenticulares (S0), espirales (S) o irregulares (Irr). Ésta es la llamada Secuencia de Hubble (Hubble 1926), la cual fue desarrollada a partir de las primeras imágenes de estos sistemas obtenidas en el rango óptico del espectro. Esta clasificación es importante porque brinda información sobre la morfología de las galaxias y también porque cada tipo morfológico correlaciona con ciertas propiedades intrínsecas de las galaxias como su color, distribución de brillo superficial, luminosidad, etc.

Las galaxias elípticas son aquellas que se pueden representar bastante bien por un elipsoide de 3 ejes sin presentar subestructuras significativas, es

decir que al observar su proyección sobre el plano del cielo se obtiene una galaxia con forma de elipse de semiejes mayor y menor  $a$  y  $b$  respectivamente. Su elipticidad se define como  $e = 1 - \frac{b}{a}$ , incluyendo el caso en que  $a = b$ . A partir de la elipticidad se definen las subclases  $E0, E1, \dots, E7$ , donde las  $E0$  tienen  $e = 0$  y las  $E7$  son las galaxias más excéntricas detectadas con  $e = 0.7$ . Las isofotas, i.e curvas de intensidad constante, de estas galaxias también tienen forma de elipse (Schneider 2015).

Además, las galaxias elípticas están compuestas principalmente de gas caliente ( $10^7 K$ ), i.e predomina el hidrógeno ionizado, y muy poco gas frío ( $< 100K$ ) y polvo. Con lo cual tienen poca formación estelar, y un índice de color fotométrico rojo debido a la preponderancia de las poblaciones estelares viejas (Mo & White 2010). Su distribución de brillo superficial en general sigue un perfil de Vaucouleurs (1) en función de  $r$ , es decir el semieje mayor de la isofota, donde  $I_0$  es el brillo superficial central y  $r_e$  es el radio efectivo que contiene la mitad del flujo total del objeto (de Vaucouleurs 1953).

$$I(r) = I_0 \exp\left\{-\beta\left(\frac{r}{r_e}\right)^{1/4}\right\} \quad (1)$$

Aquellas galaxias denominadas lenticulares son una clase intermedia entre las elípticas y las espirales. Tienen una distribución de brillo suave parecida a las elípticas y no tienen brazos espirales. No obstante, también poseen un bulbo y un disco delgado similar a las espirales, aunque la componente del bulbo suele ser la dominante (Mo & White 2010).

Por otro lado, las galaxias espirales presentan una estructura bastante aplanada formando un disco delgado con brazos espirales, y un bulbo en su región central (Schneider 2015). En algunos casos, puede incluso observarse en el bulbo una estructura en forma de barra, con lo cual se las suele separar en subclases según sean espirales normales ( $S$ ) o espirales barradas ( $SB$ ). Por último, existe un halo estelar esférico que envuelve toda la galaxia y puede extenderse sin un borde bien definido.

Otra característica importante de las espirales es que para un dado valor de luminosidad, suelen ser más azules que las elípticas. Esto se debe a que las espirales tienen todavía importantes procesos de formación estelar, por lo tanto predomina el brillo proveniente de aquellas estrellas de poblaciones jóvenes y azules. Esto se debe a que el contenido gaseoso de estas galaxias está compuesto mayoritariamente por hidrógeno neutro y molecular. Es decir que predomina el gas frío y denso generando las condiciones necesarias para la formación estelar (Mo & White 2010).

Con respecto a la distribucion del brillo superficial, dada la importancia de la componente del disco en las espirales, su brillo superficial se puede modelar bastante bien mediante un perfil exponencial (2), i.e un perfil de Sérsic con  $n = 1$  (Sérsic 1963).

$$I(r) = I_0 \exp\left\{-\alpha \frac{r}{r_e}\right\} \quad (2)$$

Por último, las irregulares son galaxias amorfas que prácticamente no presentan estructuras regulares, o bien éstas son muy débiles (Schneider 2015). A lo largo de este trabajo se utilizará la conocida nomenclatura 'galaxias de tipo temprano', haciendo referencia a las galaxias elípticas y lenticulares, y 'galaxias de tipo tardío' para las espirales e irregulares. No se tendrán en cuenta galaxias peculiares tales como las AGN's, Starburst, etc ya que éstas no están contempladas en la secuencia de Hubble.

## 1.2 Relevamiento del Sloan Digital Sky Survey

El Sloan Digital Sky Survey (SDSS) (York et al. 2000), es el primer gran relevamiento astronómico que logró mapear en detalle una gran área del cielo, obteniendo información fotométrica y espectroscópica de alrededor de un millón de galaxias, ampliando enormemente los catálogos que se tenían hasta ese momento. El relevamiento del SDSS marcó un hito en la historia de la astronomía extragaláctica ya que permitió obtener muestras de galaxias lo suficientemente grandes como para hacer importantes estudios estadísticos.

El SDSS utiliza un telescopio de 2.5 m ubicado en Apache Point Observatory, New Mexico, y tiene una cámara con 30 CCD's dispuestos en una configuración de 6 columnas y 5 filas. Cada fila de CCD's toma imágenes en uno de los cinco filtros  $u$ ,  $g$ ,  $r$ ,  $i$  y  $z$ . Estos filtros fueron diseñados con longitudes de onda efectivas de 3550 Å, 4770 Å, 6230 Å, 7620 Å, y 9130 Å respectivamente. Para realizar un estudio fotométrico de la muestra se utilizaron las magnitudes model y petrosianas del SDSS en sus cinco bandas. Para medir el flujo total proveniente de una galaxia y obtener su magnitud, es necesario definir de manera precisa su borde ya que se trata de un objeto extendido. A su vez, esta definición está relacionada con el perfil de luminosidad de la galaxia y dependiendo de lo que se desee calcular, puede ser más adecuado trabajar con uno u otro tipo de magnitudes.

Para obtener las magnitudes model, los códigos utilizados por el SDSS ajustan a la galaxia un perfil de luminosidad puro de de Vaucouleurs (3) y un

perfil puramente exponencial (4) en la banda  $r$ . Luego, adoptan el modelo que mejor ajusta el perfil del objeto y utilizando aperturas equivalentes, se obtienen las magnitudes en las demás bandas<sup>1</sup>.

$$I(r) = I_0 \exp\left\{-7.67\left(\frac{r}{r_e}\right)^{1/4}\right\} \quad (3)$$

$$I(r) = I_0 \exp\left\{-1.68\frac{r}{r_e}\right\} \quad (4)$$

Tal como se mencionó anteriormente, un perfil de de Vaucouleurs modela bien la distribución de brillo superficial que tienen las galaxias elípticas y también el bulbo de las galaxias espirales. En cambio, el brillo superficial del disco de las galaxias espirales y lenticulares, sigue más bien un perfil exponencial. Con lo cual, las magnitudes model no son óptimas para calcular el flujo total de aquellas galaxias que tengan una componente de bulbo y de disco igualmente importantes, ya que ninguno de los dos modelos representa el verdadero perfil de este tipo de galaxias. Sin embargo, son muy útiles para calcular índices de color ya que se utilizan aperturas equivalentes en todas las bandas.

Por otro lado, las magnitudes petrosianas se calculan de la siguiente manera: Se define el radio petrosiano para la galaxia en la banda  $r$ , y se integra el flujo contenido dentro de dos radios petrosianos. De esta forma se minimizan posibles pérdidas de luz del objeto. Luego, se utiliza este mismo radio para obtener las magnitudes en las demás bandas<sup>2</sup>. La desventaja de este tipo de magnitudes, es que se define el radio de apertura en la banda  $r$  pero en realidad, este no necesariamente será el radio mas óptimo para las demás bandas. Con lo cual, este tipo de magnitudes no son adecuadas para calcular los colores de las galaxias. No obstante, a partir de la magnitud petrosiana en la banda  $r$  se puede calcular la magnitud absoluta de una galaxia con mayor presición que con las magnitudes model.

## 2 Datos

Para realizar este trabajo se extrajo una muestra de datos de 20000 galaxias del catálogo del SDSS con valores de redshift entre  $0.02 \leq z \leq 0.05$ , y tal que su magnitud petrosiana en la banda  $r$  corregida por extinción,  $r_0$ , tenga valores entre  $14 \leq r_0 \leq 18$ .

---

<sup>1</sup>[https://live-sdss4org-dr12.pantheonsite.io/algorithms/magnitudes/#mag\\_model](https://live-sdss4org-dr12.pantheonsite.io/algorithms/magnitudes/#mag_model)

<sup>2</sup>[https://live-sdss4org-dr12.pantheonsite.io/algorithms/magnitudes/#mag\\_petro](https://live-sdss4org-dr12.pantheonsite.io/algorithms/magnitudes/#mag_petro)

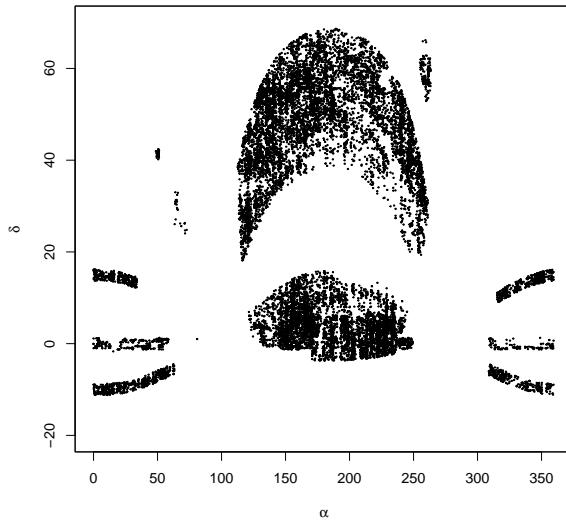


Figure 1: Distribución espacial en coordenadas ecuatoriales absolutas  $(\alpha, \delta)$  de la muestra de 20000 galaxias del SDSS.

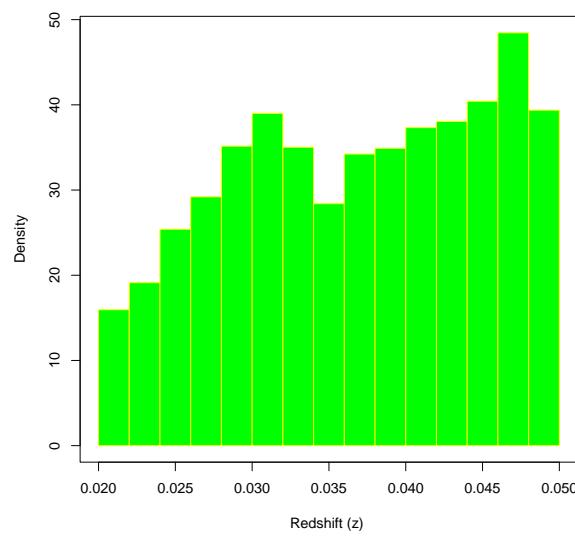


Figure 2: Distribución normalizada de redshift de la muestra de 20000 galaxias del SDSS.

Se puede ver en la Fig.1 la distribución espacial de las galaxias de la muestra  $(\alpha, \delta)$ , y en la Fig.2 su distribución en redshift. Tal como es esperado, el número de galaxias aumenta con el redshift  $z$  ya que el catálogo del SDSS se caracteriza por alcanzar un máximo número de galaxias detectadas a  $z = 0.1$ .

En resumen, los datos extraídos del SDSS son los siguientes: coordenadas ecuatoriales absolutas  $(\alpha, \delta)$ , redshift ( $z$ ), magnitudes petrosianas y model en las cinco bandas del SDSS, los valores de extinción en las cinco bandas. También se obtuvo para la muestra el parámetro  $fracDeV$  en la banda  $r$ , este toma valores entre  $0 \leq fracDeV \leq 1$ . Al ajustar un perfil de de Vaucouleurs y un perfil exponencial a la distribución de brillo superficial de la galaxia, se cuantifica mediante el parámetro  $fracDeV$  la fracción del brillo total que se modela mejor con un perfil de de Vaucouleurs. Por lo tanto, si  $fracDeV = 0$  esto indica que el brillo de la galaxia sigue un perfil exponencial puro, es decir que la estructura de la galaxia es principalmente discoidal como en las espirales. En cambio si  $fracDeV = 1$  el brillo sigue un perfil de de Vaucouleurs puro, con lo cual indica que la estructura es como la de una galaxia elíptica o tipo bulbo. Si se obtiene un valor intermedio, esto indica que la galaxia tiene tanto un bulbo como una estructura de disco, y ambas componentes contribuyen significativamente al brillo total. De esta forma, se puede decir que el parámetro  $fracDeV$  es similar a la relación  $Bulbo/Disco = \frac{L_{bulbo}}{L_{disco}}$  que se define como la razón entre la luminosidad del bulbo y del disco. Por último, se obtuvieron los radios petrosianos  $r_{50}$  que contiene el 50% del flujo petrosiano y  $r_{90}$  que contiene el 90%, ambos en la banda  $r$ .

A continuación, se muestra en la Fig.3 la magnitud petrosiana  $r$  corregida por extinción,  $r_0$ , en función del redshift  $z$ . Se seleccionó una submuestra, compuesta por aquellos objetos con  $14.5 \leq r_0 \leq 17.77$ , donde 17.77 es el límite en magnitud aparente del relevamiento espectroscópico del SDSS. Por otro lado, se realizó un corte en 14.5 para evitar el efecto de colisión de fibras y descartar las galaxias más cercanas, estas tienen un tamaño angular grande que puede llegar a sobrepasar el diámetro de la fibra óptica del espectrógrafo, resultando en datos poco precisos.

Por último, se restringió la muestra seleccionando aquellas galaxias cuyo radio petrosiano  $r_{50}$  en la banda  $r$  cumple con la condición  $r_{50} > 1.5''$ . Esto también es de suma importancia ya que el relevamiento del SDSS presenta datos fotométricos obtenidos de imágenes que tengan un seeing menor o igual a  $1.5''$  (York et al. 2000). Por lo tanto, no son confiables los datos de aquellos objetos que tengan un tamaño menor que la presición con que fue hecha la

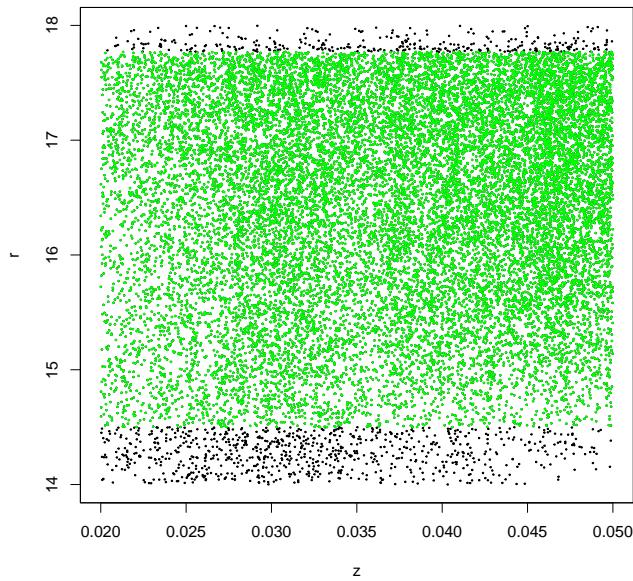


Figure 3: Gráfico de la magnitud aparente petrosiana en la banda r corregida por extinción  $r_0$ , en función del redshift. En color negro se tiene la muestra entera y en color verde la muestra restringida con la condición  $14.5 \leq r_0 \leq 17.77$

observación, estos deben ser descartados.

La muestra final quedó compuesta por 17989 galaxias; a éstas se les calculó su distancia de luminosidad  $d_L$  y su distancia de tamaño angular  $d_A$  a partir del redshift mediante la ec.(5) y ec. (6) respectivamente, asumiendo la siguiente cosmología  $H_0 = 70 \frac{km}{s Mpc}$ ,  $\omega_{m,0} = 0.3$ ,  $\omega_{\Lambda,0} = 0.7$ ,  $\omega_{r,0} = 0$  y  $\omega_{k,0} = 0$ .

$$d_L = (1+z) \frac{c}{H_0} \int_0^z \frac{dz'}{\sqrt{\omega_{m,0}(1+z')^3 + \omega_{\Lambda,0}}} \quad (5)$$

$$d_A = \frac{c}{H_0(1+z)} \int_0^z \frac{dz'}{\sqrt{\omega_{m,0}(1+z')^3 + \omega_{\Lambda,0}}} \quad (6)$$

Con las distancias se calcularon las magnitudes absolutas petrosianas en todas las bandas en el sistema AB a partir de la ec.(7), donde el subíndice  $k$  representa algún filtro del SDSS (i.e  $k = u, g, r, i, z$ ),  $m_{0,k}$  es la magnitud aparente desenrojecida, y  $c_{AB,k}$  es una constante que se suma para obtener las magnitudes en el sistema AB. También se calcularon los radios petrosianos a partir de los tamaños angulares correspondientes a  $r_{50}$  en la banda  $r$ . Para esto se utilizó la ec.(8)

$$M_k = m_{0,k} - 5 \log_{10}(d_L) - 25 + c_{AB,k} \quad (7)$$

$$r_{50}[kpc] = \frac{r_{50} * \pi * d_a * 1000}{180 * 3600} \quad (8)$$

Además, se calcularon los índices de color  $(u - r)$  y  $(g - r)$  con las magnitudes model, y el parámetro de concentración  $C$  ec.(9). De esta forma se obtuvieron las distintas propiedades que luego se utilizaron para hacer un estudio fotométrico de la muestra.

$$C = \frac{r_{90}}{r_{50}} \quad (9)$$

### 3 Resultados

En primer lugar se graficó la magnitud absoluta petrosiana en la banda  $r$  en función del redshift, ver Fig.4. Se observa que aquellas galaxias con magnitudes absolutas mayores a  $-18.9$  son detectadas mayoritariamente a bajo redshift pues son muy débiles. Por lo tanto, para trabajar con una muestra

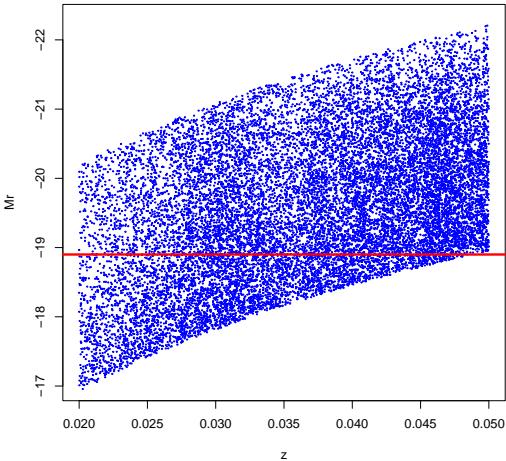


Figure 4: Gráfico de la magnitud absoluta petrosiana  $M_r$  en la banda  $r$ , en función del redshift  $z$ . En rojo se observa el corte realizado para obtener una muestra completa por volumen.

que sea completa por volumen en el rango de redshift de interés se descartaron las galaxias cuya magnitud absoulta fuera mayor a  $-18.9$ , quedando una muestra total de 13240 galaxias.

### 3.1 Propiedades Fotométricas

A continuación, se estudiaron las distribuciones de los colores  $(u-r)$  y  $(g-r)$ . En ambos histogramas de la Fig.5 se observan dos máximos separados por un mínimo bien definido tal como ha sido reportado previamente por otros autores (Strateva et al. 2001). Se realizó un ajuste bimodal a los mismos (Baldry et al. 2004a), asumiendo que tanto las galaxias rojas como las azules seguían una distribución normal, dicho ajuste se puede ver para el caso del índice  $(u-r)$  en la Fig.6. Se obtuvieron resultados análogos para el índice de color  $(g-r)$ .

A partir de los histogramas se destaca que hay un mayor número de galaxias rojas que azules en la muestra total, siendo ésta diferencia más marcada en el índice de color  $(g-r)$  que en el  $(u-r)$ . A su vez, la distribución de galaxias azules presenta una mayor dispersión que la roja en ambos índices

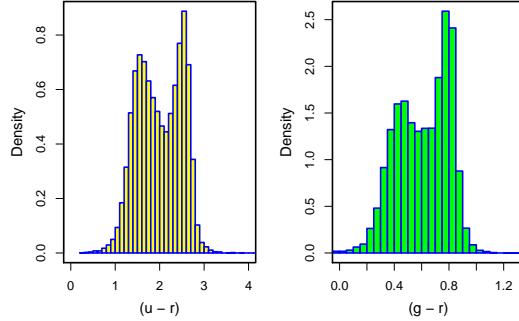


Figure 5: Histogramas normalizados de los índices de color  $(u - r)$  (panel izquierdo) y  $(g - r)$  (panel derecho).

de color, por esta razón se suele denominar a estas dos poblaciones 'secuencia roja' y 'nube azul'. En el caso del índice  $(g - r)$  la dispersión de la muestra azul es incluso mayor aun que en la muestra azul obtenida con el índice  $(u - r)$ .

En la Fig.6 se observa que para un valor de  $(u - r) = 2.2$  se intersecan la gaussiana azul y roja, entonces se adopta este valor para separar a la muestra en galaxias azules (aquellas que tienen un color  $(u - r) < 2.2$ ) y rojas (aquellas que tienen un color  $(u - r) > 2.2$ ), al menos en una primera aproximación. Este valor concuerda bien con lo establecido en la literatura en donde se utiliza un valor de corte  $(u - r) = 2.22$  (Strateva et al. 2001).

Luego, se grficó la distribución normalizada del índice de concentración  $C$  y el parámetro  $fracDeV$ , ver Fig.7. El parámetro de concentración es un indicador de cuan temprano o tardío es el tipo morfológico de la galaxia. En este trabajo se adopta un valor de corte igual a  $C = 2.5$  basado en el criterio utilizado por (Strateva et al. 2001) en donde se toma un valor límite igual a  $C = 2.55$ . De esta manera si  $C > 2.5$  la galaxia es de tipo temprano, y si  $C < 2.5$  se clasifica a la galaxia como de tipo tardío. El parámetro  $fracDeV$  también está realcionado con el tipo morfológico ya que como se mencionó anteriormente, valores de  $fracDeV$  cercanos a uno se corresponden

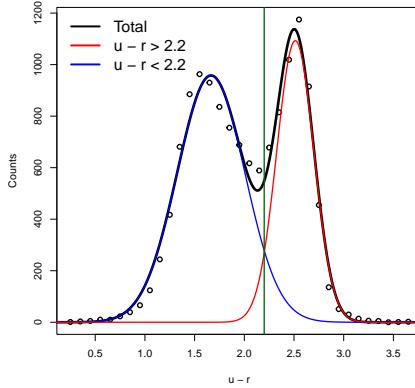


Figure 6: En negro se grafica el ajuste bimodal de la distribución del índice de color ( $u-r$ ). La línea verde muestra el corte que se realizó en  $(u-r) = 2.2$  para separar entre galaxias azules y rojas. En azul se muestra la gaussiana correspondiente a la distribución de galaxias azules con un valor medio de  $\mu_1 = 1.7$  y  $\sigma_1 = 0.3$ , y en rojo la distribución de las galaxias rojas con parámetros  $\mu_2 = 2.5$  y  $\sigma_2 = 0.2$ .

a galaxias con un bulbo predominante (elípticas), y valores cercanos a cero se corresponden a estructuras de disco predominantes (espirales). Por lo tanto, es de esperar que los parámetros  $C$  y  $fracDeV$  tengan alguna relación entre sí.

En la Fig.8 se graficó  $C$  en función de  $fracDeV$  y se realizó un ajuste lineal con pendiente y ordenada al origen dados por  $a = 0.853$  y  $b = 2.167$  respectivamente. Que la pendiente sea positiva indica que aquellas galaxias con valores de  $fracDeV$  cercanos a uno, suelen ser también las más concentradas, i.e de tipo temprano como las elípticas. Mientras que las galaxias con valores de  $fracDeV$  cercanos a cero suelen ser menos concentradas, i.e de tipo tardío como las espirales.

Dada la conocida relación entre el tipo morfológico y el color de las galaxias, se graficó el parámetro de concentración  $C$  en función del índice de color ( $u-r$ ). En rojo se marcaron los valores límites adoptados en este trabajo,  $C = 2.5$  y  $(u-r) = 2.2$ , para distinguir entre las galaxias más y menos concentradas, y las galaxias rojas de las azules. Se puede observar en la Fig.9 que existe cierta correlación entre cuán concentrada es una galaxia y su color tal como se esperaba. Si bien no se trata de una relación uno a uno entre

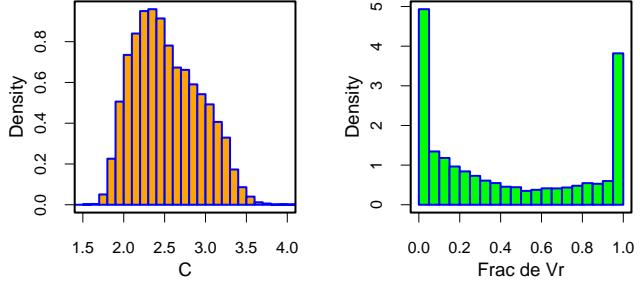


Figure 7: En el panel izquierdo (amarillo) se tiene la distribución normalizada del parámetro de concentración  $C$ . En el panel derecho (verde) se observa la distribución normalizada del parámetro  $fracDeV$ .

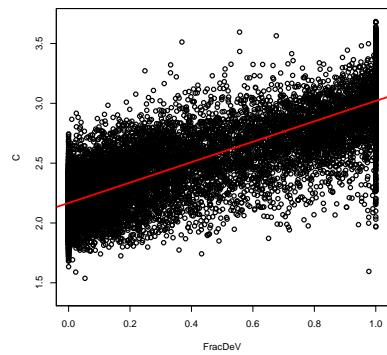


Figure 8: Gráfico del parámetro de concentración  $C$  en función del parámetro  $FracDeV$  en la banda  $r$ . En rojo se observa el ajuste lineal.

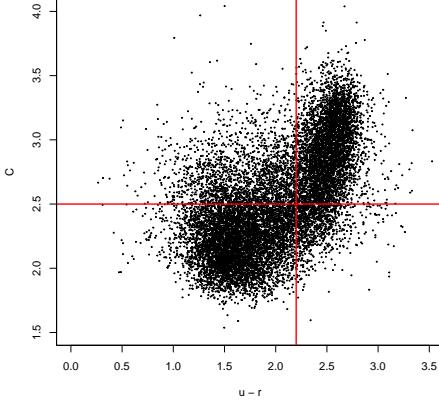


Figure 9: Gráfico del parámetro de concentración  $C$  en función del índice de color  $(u - r)$ . En rojo se observan los valores de  $(u - r) = 2.2$  (recta vertical) y  $C = 2.5$  (recta horizontal) que se utilizan para clasificar la muestra de galaxias por color y por índice de concentración, respectivamente.

estos indicadores, se puede decir que si una galaxia es más roja es probable que tenga un índice de concentración más alto, mientras que si es azul es probable que sea menos concentrada. Recordando lo visto anteriormente sobre la relación entre  $C$  y  $fracDeV$  vemos que este resultado es lógico ya que las galaxias concentradas suelen ser de tipo temprano como las elípticas, y éstas suelen tener poblaciones estelares más viejas y rojas. Por otra parte, las menos concentradas y de tipo tardío suelen tener poblaciones estelares más jóvenes y azules como las espirales.

### 3.2 Diagrama Color-Magnitud

En las Fig.10 y Fig.11, se graficó un diagrama color-magnitud separando la muestra por color y por índice de concentración, respectivamente. En primer lugar, se puede destacar una tendencia en la muestra total en donde se observa que las galaxias brillantes tienden a ser más rojas y las débiles más azules, es decir que a mayor luminosidad mayor es el índice de color  $(u - r)$ , tal como fue establecido ya por (Balogh et al. 2004). A su vez, al separar las galaxias por color se nota nuevamente que dentro del conjunto de las galaxias brillantes, i.e con magnitudes absolutas  $M_r \leq -20.5$ , hay una

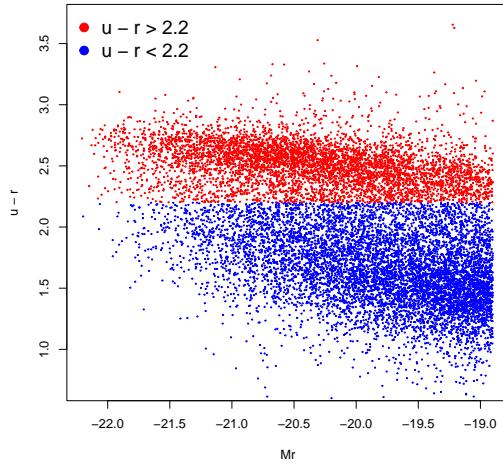


Figure 10: Diagrama color-magnitud, en rojo se observan aquellas galaxias con índice de color  $(u - r) \geq 2.2$ , y en azul aquellas que tienen un índice de color  $(u - r) < 2.2$ .

mayor cantidad de galaxias rojas que azules. Mientras que aquellas galaxias más débiles, i.e  $M_r \geq -20.5$  tienen una mayor proporción de galaxias azules. Esto concuerda con los resultados de literatura (Baldry et al. 2004b). Por otro lado, al separar la muestra por índice de concentración, nuevamente se obtiene que las galaxias más brillantes y con alta concentración tienden a ser más rojas y las de baja concentración tienden a ser más azules y débiles. No obstante, esta relación no es uno a uno porque también se observan muchas galaxias azules que tienen un índice de concentración alto, y viceversa.

Para determinar con mayor presición la secuencia roja y la nube azul en el diagrama color magnitud, se dividió la muestra en 4 bins de magnitud, cada uno con 3310 galaxias. Luego, se realizó un ajuste bimodal para cada bin y se graficaron los valores medios y dispersiones de las gaussianas que componen cada ajuste. Nuevamente se observa la tendencia general, ya que tanto para la secuencia roja como para la nube azul, el valor medio de las gaussianas para los bins más brillantes se corresponden a colores más rojos, y para los bins más débiles a colores más azules.

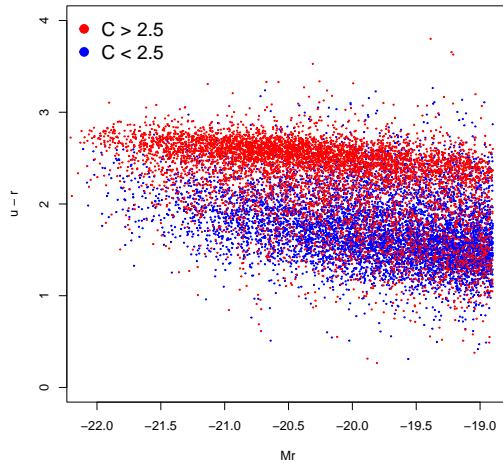


Figure 11: Diagrama color-magnitud, en rojo se observan aquellas galaxias con alto índice concentración  $C \geq 2.5$ , y en azul aquellas que tienen bajo índice de concentración  $C < 2.5$ .

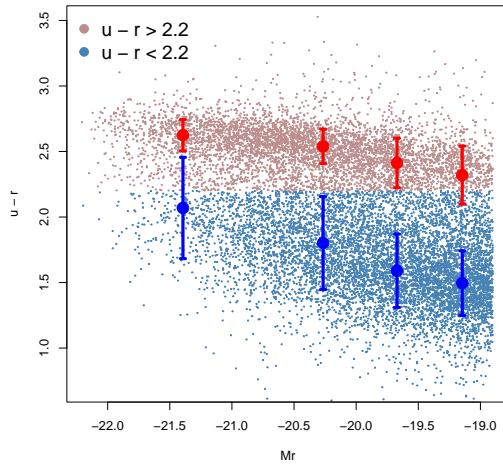


Figure 12: Diagrama color-magnitud, en rosa claro se observa la secuencia roja y en celeste la nube azul. Se realizó un ajuste bimodal en 4 bines de magnitud; siendo los puntos rojos y azules los valores medios, junto con sus dispersiones, de las gaussianas que componen cada ajuste bimodal.

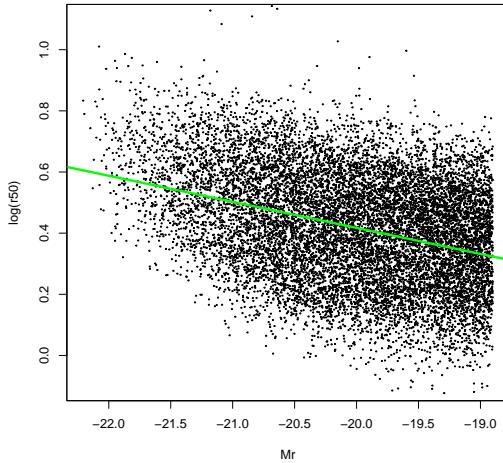


Figure 13: Gráfico del logaritmo del radio petrosiano  $r_{50}[\text{kpc}]$ , en función de la magnitud absoluta en el filtro  $r$  para toda la muestra de galaxias. En verde se observa el ajuste lineal.

### 3.3 Relación Tamaño - Luminosidad

A continuación, se investigó la relación entre el tamaño de las galaxias y su luminosidad y también cómo se vincula con la morfología.

En primer lugar, se graficó el logaritmo del radio petrosiano  $r_{50}$ , en función de la magnitud absoluta en la banda  $r$  para la muestra total de galaxias (ver Fig.13). Se puede ver que existe cierta correlación entre el tamaño y la luminosidad de las galaxias ya que las galaxias más brillantes tienden a ser más grandes en tamaño. Esto se manifiesta también en el ajuste lineal realizado, el cual tiene una pendiente  $a = -0.085$  y una ordenada al origen  $b = -1.29$ . Esto concuerda con lo esperado ya que una galaxia de mayor tamaño es probable que tenga más estrellas y por lo tanto mayor luminosidad.

En la Fig.14 se graficó la relación tamaño - luminosidad diferenciando las galaxias azules de las rojas. Al realizar los ajustes lineales, se obtuvo para la muestra roja un valor para la pendiente y ordenada al origen  $a_{red} = -0.133$ ,  $b_{red} = -2.33$ , y para la muestra azul se obtuvo  $a_{blue} = -0.110$ ,  $b_{blue} = -1.72$ . Si bien las pendientes tienen valores muy similares, la ordenada al origen de la muestra azul es mayor que la de la muestra roja, indicando que para  $M_r = 0$  las galaxias azules son más grandes que las rojas. De hecho,

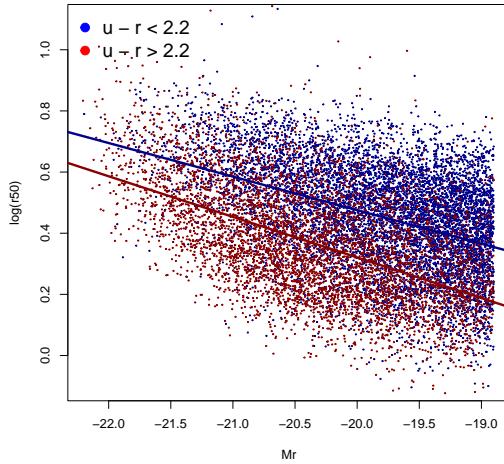


Figure 14: Gráfico del logaritmo del radio petrosiano  $r_{50}[kpc]$  en función de la magnitud absoluta en el filtro  $r$ , para la muestra de galaxias rojas y azules por separado, con sus respectivos ajustes lineales.

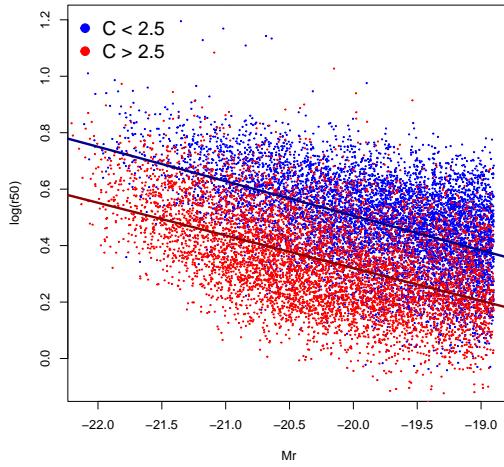


Figure 15: Gráfico del logaritmo del radio petrosiano  $r_{50}[kpc]$ , en función de la magnitud absoluta en el filtro  $r$ . En azul se encuentra la muestra de galaxias con  $C < 2.5$  y en rojo aquellas que tienen  $C > 2.5$ , con sus respectivos ajustes lineales.

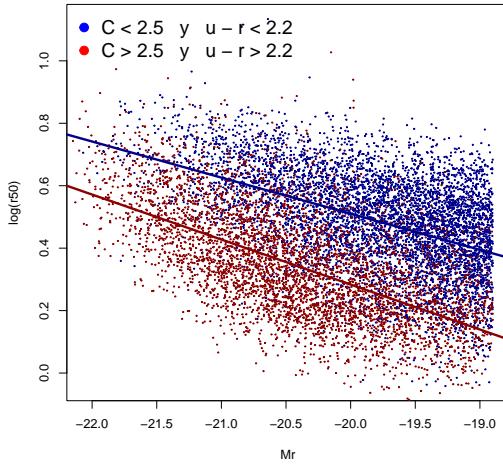


Figure 16: Gráfico del logaritmo del radio petrosiano  $r_{50}[kpc]$  en función de la magnitud absoluta en el filtro  $r$ . En azul se encuentra la muestra de galaxias con  $C < 2.5$  y en rojo aquellas que tienen  $C > 2.5$ , también con sus respectivos ajustes lineales.

se observa que para cualquier valor fijo de magnitud absoluta las galaxias azules son sistemáticamente más grandes que las rojas, siendo esta diferencia menor para las galaxias más brillantes, lo cual concuerda con los resultados de la literatura (Shen et al. 2003).

Análogamente, al analizar este gráfico pero clasificando la muestra por índice de concentración, Fig.15, se obtienen resultados similares. Los valores de la pendiente y ordenada al origen para la muestra con  $C < 2.5$  son respectivamente,  $a_{lC} = -0.122$ ,  $b_{lC} = -1.94$  y para la muestra con  $C > 2.5$ , se tiene que  $a_{hC} = -0.116$ ,  $b_{hC} = -2.00$ . Esto concuerda con el análisis anterior, para un valor fijo de magnitud absoluta las galaxias menos concentradas, que suelen ser las galaxias azules y tardías, tienen en general un mayor tamaño que las galaxias más concentradas, tempranas y rojas.

Por último, se graficó la relación tamaño - luminosidad segregando la muestra entre aquellas galaxias que son rojas y tardías, y aquellas que son azules y tempranas (ver Fig.16). En este caso los valores de la pendiente y ordenada al origen para la submuestra con  $C < 2.5$  y  $(u - r) < 2.2$  son respectivamente,  $a_{blC} = -0.116$ ,  $b_{blC} = -1.80$  y para la submuestra con  $C >$

2.5 y  $(u - r) > 2.2$ , se tiene que  $a_{rhC} = -0.144$ ,  $b_{rhC} = -2.60$ . Nuevamente se observa esta correlación entre el tipo morfológico y el color de las galaxias, con lo cual se puede concluir que para un valor fijo de magnitud absoluta, las galaxias tempranas y rojas son sistemáticamente menores en tamaño que las galaxias tardías y azules.

## 4 Conclusiones

En este trabajo se realizó un estudio fotométrico de una muestra final de 13240 galaxias obtenida del catálogo del Sloan Digital Sky Survey para analizar estadísticamente cómo se relacionan las distintas propiedades de las galaxias entre sí y con su morfología.

Al analizar el color  $(u - r)$  de la muestra, se encontró que las galaxias se dividen claramente en dos conjuntos, uno azul, es decir con índice  $(u - r) < 2.2$  y uno rojo, es decir con  $(u - r) > 2.2$ . Además se verificó la relación que existe entre el color y la morfología de las galaxias, i.e que las galaxias rojas suelen ser de tipo temprano y las azules de tipo tardío. Estos resultados concuerdan con los hallados en la literatura.

Otra conclusión a la que se llegó es que el índice de concentración  $C$ , está relacionado con el parámetro  $fracDeV$ , el cual brinda información sobre la estructura y morfología de la galaxia. De esta forma, se puede decir que si  $C$  es bajo, es más probable que la galaxia presente una morfología discoidal principalmente sin mucho bulbo, como por ejemplo una espiral. Mientras que si tiene un valor alto de  $C$  su estructura es más probablemente tipo bulbo, como una elíptica. Por lo tanto, el parámetro de concentración permite clasificar a las galaxias en tempranas  $C < 2.5$  y tardías  $C > 2.5$ .

Del análisis del diagrama color-magnitud, se puede concluir que las galaxias brillantes tienden a ser más rojas y las débiles más azules, lo cual concuerda con los resultados de la literatura. A su vez, al separar la muestra por color y por índice de concentración se obtiene que las más brillantes y con alta concentración tienden a ser más rojas, mientras que las más débiles y de baja concentración tienden a ser más azules. Con lo cual, el parámetro de concentración  $C$  correlaciona con el color  $(u - r)$  de las galaxias. Aunque éstos indicadores no brindan la misma información, se puede decir que si una galaxia es roja es probable que tenga un índice de concentración alto, mientras que si es azul es más probable que sea menos concentrada.

Por último, a partir de la relación tamaño - luminosidad se pudo confirmar

que efectivamente una galaxia de mayor tamaño es más luminosa. Además, al analizar dicha relación separando la muestra por color y por concentración se encontró que para un valor dado de magnitud absoluta  $M_r$ , las galaxias azules y menos concentradas suelen tener un mayor tamaño y por lo tanto ser más luminosas que las galaxias más rojas y menos concentradas.

## References

- Baldry, I. K., Balogh, M. L., Bower, R., Glazebrook, K., & Nichol, R. C. 2004a, in American Institute of Physics Conference Series, Vol. 743, The New Cosmology: Conference on Strings and Cosmology, ed. R. E. Allen, D. V. Nanopoulos, & C. N. Pope, 106–119
- Baldry, I. K., Glazebrook, K., Brinkmann, J., et al. 2004b, ApJ, 600, 681
- Balogh, M. L., Baldry, I. K., Nichol, R., et al. 2004, ApJL, 615, L101
- de Vaucouleurs, G. 1953, MNRAS, 113, 134
- Hubble, E. P. 1926, ApJ, 64, 321
- Mo, H. van den Bosch, F. & White, S. 2010, Galaxy Formation and Evolution (Cambridge University Press)
- Schneider, P. 2015, Extragalactic Astronomy and Cosmology (Springer Berlin, Heidelberg)
- Sérsic, J. L. 1963, Boletin de la Asociacion Argentina de Astronomia La Plata Argentina, 6, 41
- Shen, S., Mo, H. J., White, S. D. M., et al. 2003, MNRAS, 343, 978
- Strateva, I., Ivezić, Ž., Knapp, G. R., et al. 2001, AJ, 122, 1861
- York, D. G., Adelman, J., Anderson, John E., J., et al. 2000, AJ, 120, 1579