

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE CIENCIAS

**PROPIEDADES OBSERVACIONALES DE LA VECINDAD
GALÁCTICA DE LAS GALAXIAS ANFITRIONAS DE GRBS
LARGOS Y CORTOS**

TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE FÍSICO

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

JOSÉ LUIS VELA MORALES
joselvelam@gmail.com

Director: NICOLÁS ALEJANDRO VÁSQUEZ PAZMIÑO
nicolas.vasquez@epn.edu.ec

QUITO, SEPTIEMBRE 2022

DECLARACIÓN

Yo JOSÉ LUIS VELA MORALES, declaro bajo juramento que el trabajo aquí escrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual, correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normatividad institucional vigente.



José Luis Vela Morales

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por JOSÉ LUIS VELA MORALES, bajo mi supervisión.



Firmado electrónicamente por:
**NICOLAS ALEJANDRO
VASQUEZ PAZMINO**

Nicolás Alejandro Vásquez Pazmiño
Director del Proyecto

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres por su infinita bondad en todo aspecto de la vida. A mis hermanos, que son mis almas gemelas y demás familiares que siempre han estado allí.

A PHD Nicolás Vásquez y la paciencia conmigo.

A esas personas que me hicieron mejorar como persona: Jess, Ale y Pichu

DEDICATORIA

A Peluchin y Marco Antonio

Índice general

Resumen	x
Abstract	XI
1. Introducción	1
2. Ráfagas de Rayos Gamma	3
2.1. GRB de corta duración	3
2.2. GRB de larga duración	4
3. Galaxias Anfitrionas Ráfagas de Rayos Gama	5
3.1. Galaxias Anfitrionas de GRB de Corta Duración	5
3.2. Galaxias Anfitrionas de GRB de Larga Duración	6
4. Propiedades Galácticas y Estimadores	8
4.1. Grupos y Clusters Galácticos	8
4.1.1. Densidad Galácticas	8
4.2. Secuencia de Hubble y Morfología de las Galaxias	9
4.2.1. Flujo de Petrosian	9
4.2.2. Índice de Concentración Inversa	10
4.3. Metalicidad y Formación Estelar	11
4.3.1. Índices de Color	11
5. Fuente y Adquisición de Datos	13
5.1. Proyecto GHostS	13

5.2. Sloan Digital Sky Survey	13
5.3. Adquisición de Datos	15
5.3.1. Determinación de Galaxias Anfitrionas de GRB	15
5.3.2. Determinación del radio local para búsqueda de galaxias vecinas	15
5.3.3. Determinación de galaxias vecinas	16
6. Análisis de Datos y Resultados	17
6.1. Análisis de Conglomerados	17
6.2. Índices de Color	20
6.3. Índice de Concentración Inversa	22
6.4. Densidad Galáctica	23
6.5. Discusión de Resultados	23
7. Conclusiones	26
A. Galaxias Anfitrionas de GRB	29
B. Código para identificar galaxias anfitrionas de GRB	31
C. Código para buscar galaxias vecinas a galaxias anfitrionas de GRB	32
Bibliografía	33

Índice de figuras

3.1. Tres momentos del GRB 990123 en 1999. Imagen de la banda K con $z=1.6$ y ancho de imagen de 32×32 segundos. [5]	6
3.2. Densidad de formación estelar como función del redshift basado en dos métodos. EBL físico y reconstrucción empírica EBL [10]	7
4.1. Esquema de la secuencia de Hubble. Las galaxias elípticas con código E. Lenticular con S0. Espirales con código S y barrenas con Código SB [18]	10
5.1. Cobertura del cielo por el proyecto SDSS. Eje vertical central representa ascensión recta (RA) de 120. Eje central horizontal la declinación (DEC) de 0 [44]	14
6.1. Análisis de numero óptimo de clúster k , entre el índice de color $u-z$ y el índice de concentración inversa ICI. Método de distancia usado, euclidiano.	19
6.2. Clasificación de los datos de galaxias vecinas en función de su índice de color $u-z$ y el índice de concentración inversa ICI, para $k=2$. Índices se muestran normalizados.	19
6.3. Superior: histograma del índice de color $u - r$, se puede apreciar su forma bi-modal. Inferior: histograma normalizado de índice de color $u - r$, en los Grupo A y B con su respectiva linea de tendencia	21
6.4. Superior: histograma del índice de color $g - r$, se puede apreciar los 3 modos. Inferior: histograma normalizado de índice de color $g - r$, en los Grupo A y B con su respectiva linea de tendencia	22
6.5. Superior: diagrama de caja para el ICI con respecto al Numero de GRB, para el grupo A Inferior: diagrama de caja para el ICI con respecto al Numero de GRB, para el grupo B	23

6.6. Densidad galáctica con respecto al numero de GRB. Negro representa
datos del grupo A y rojo a datos del grupo B 24

Resumen

A medida que las observaciones astronómicas crecen, también lo hacen la cantidad de datos disponibles, el uso de nuevas técnicas de análisis de datos que antes no se solían usar ganan espacio en la astronomía. En el presente trabajo se realizó un análisis de conglomerados sobre las galaxias vecinas a galaxias anfitrionas de GRB. Los datos de las galaxias anfitrionas se obtiene del catalogo GHosts (GRBs host galaxies, Savaglio 2006), donde están almacenados todos las galaxias anfitriones de GRBs identificados hasta el 2018. De este catálogo se obtuvieron un total de 30 galaxias anfitrionas. Las galaxias vecinas fueron obtenidas del catálogo Sloan Digital Sky Survey (SDSS), que cuenta con un amplio catálogo de objetos astronómicos. El data release 16, amplió los campos de observación, número de objetos entre otros. Del catálogo SDSS se obtuvo un total de 1322 galaxias vecinas. Las galaxias vecinas se escogen a un radio de $10 h^{-1}\text{Mpc}$ del entorno de la galaxia anfitriona del GRB. Sobre esta muestra de datos se aplicó una análisis de conglomerados para caracterizar y encontrar grupos donde la cantidad de vecinos de GRB de corta duración es más probable. Se busca algún patrón en la distribución de galaxias vecinas de acuerdo al tipo de GRB (largo o corto). El análisis de conglomerados es alimentado con los índices de color entre los canales g, u, y r; así como también con el índice de concentración inversa (ICI) que es la relación entre los radios del flujo de Petrosian al 50 % y 90 %. Los grupos de este análisis de conglomerados permiten caracterizar propiedades dentro de los mismos. De esta manera encontrar relación entra la propiedad de cada grupo con respecto a la abundancia de vecinos de GRB de corta duración.

Abstract

As astronomical observations grow, it so does the amount of data available. The use of new data analysis techniques plays a fundamental role in astronomy. In the present work, we performed a clustering analysis for a group of neighboring galaxies of GRB's host galaxies. The data of the host galaxies is obtained from the GHosts catalog, where all the GRB hosts identified were identified until 2018. A total of 30 host galaxies from this catalog is our sample. The neighboring galaxies were obtained from the Sloan Digital Sky Survey (SDSS) catalog, which has a lot of astronomical objects. The 16th data release from SDSS expanded the fields of observation, number of objects, among others. From the SDSS catalog a total of 1322 neighboring galaxies were obtained. Neighboring galaxies are chosen within a radius of $10 h^{-1}\text{Mpc}$ of the hostgalaxy of the GRB. On this wide variety of data, a cluster analysis allows to characterize and find groups, where the number of short GRB neighbors are more likely. The cluster analysis uses the color indices between the g, u, and r channels. This also uses the inverse concentration index (ICI), which is the relationship between the Petrosian flow radiation at 50% and 90%. The result of this cluster analysis allows us to find similar observational properties within them. In this way, it is found a relationship between the property of each group with respect to the abundance of GRB host galaxy neighbors.

Capítulo 1

Introducción

A veces los grandes descubrimientos ocurren de manera casual. Este es el caso del descubrimiento de los GRBs. A finales de la década de los 60 del siglo pasado, en medio de la Guerra Fría, se lanzaron los satélites Vela por parte de Estados Unidos. Satélites, cuya finalidad era alertar de ensayos nucleares secretos, estaban provistos de detectores para fotones de alta energía. Los satélites lograron detectar señales de ráfaga de rayos gamma mejor conocidos como GRBs por sus siglas en inglés (Gamma Ray Bursts). Usando la red de satélites existentes se logró determinar que estas señales provenían desde el exterior de la Tierra y no eran originadas en el Sol. En un periodo de 3 años los satélites lograron detectar 47 de estas señales de alta energía provenientes del espacio exterior. Debido a que el diseño de los satélites no era específico para detectar estas señales, se planteó que sólo se estaba detectando una pequeña parte de estos eventos y que los mismos deberían ser mucho más frecuentes. A pesar de que estas ráfagas de rayos gamma eran importantes para el ámbito científico, su descubrimiento se mantuvo en secreto debido al carácter reservado del proyecto. No fue hasta 1973 que se pudo publicar los descubrimientos.

El origen de los GRBs fue parte de gran debate durante años y existían múltiples modelos que intentaban responder esta pregunta. A pesar de los grandes esfuerzos, aun las observaciones eran precarias y escasas. La luz sobre la naturaleza de estos eventos llegó con el lanzamiento de los grandes observatorios de la NASA, en específico el telescopio Compton. Debido a la alta sensibilidad de su detector se determinó que las observaciones se distribuían de manera isotrópica, infiriendo su origen extragaláctico y cosmológico. Por otro lado, usando los datos de este satélite, se determinó el espectro de mejor manera. La energía usual de los fotones de los GRBs está en el orden de los megaelectronvoltios (MeV). Así también, se acotó la

duración de los GRB desde 10^{-3} s a 10^3 s. Al aumentar el número de observaciones se notó que los GRBs tenían una distribución bimodal, clasificando así a los GRBs en dos categorías: los de larga duración, con tiempo superior a 2 s; y de corta duración, con tiempo menor a 2 s. En 1997, usando los datos del satélite BeppoSAX, se logró determinar ópticamente la galaxia anfitriona de un GRB. De esta manera se determinó el redshift, o corrimiento al rojo, lo mostró que los GRBs son eventos que ocurren una gran distancia. En este ámbito, el telescopio espacial Swift lanzado en 2004, obtuvo medidas precisas de la posición un minuto después de localizar al GRB. Estas observaciones permitieron determinar propiedades en otras longitudes de onda de los GRB, en especial los de poca duración, así como también detectar GRB con un redshift mayor a 6, siendo de los pocos eventos observados sobre este corrimiento al rojo.

A lo largo de los años con el aumento de la tecnología y el incremento en los datos disponibles, mejoró no sólo el tratamiento de los mismos, sino también se caracterizó de mejor manera las regiones del espacio circundante a estas ráfagas de rayos gamma. Además, esto permite entender la estructura del universo a una distancia cada vez grande con mayor detalle. Esto generó un paradigma, ya que a medida que se intenta estudiar a un mayor redshift en el universo, se hace preciso tener eventos muy energéticos, que permitan tener información de las regiones del espacio circundante a estas explosiones. Es así que dentro de este marco, los GRBs al ser eventos altamente energéticos pueden ser observados a altos redshifts, así como también sus fotones sufren menos interacciones en su camino a la Tierra. Estas características las hace buenos candidatos para permitir caracterizar no sólo las galaxias progenitoras del GRB, sino también de la vecindad galáctica a un radio de 10 Mpc desde donde se produjo el GRB. En el presente trabajo se pretende caracterizar las vecindades galácticas sirviéndose del nuevo catálogo del Sloan Digital Sky Survey (SDSS). Además, se usará herramientas estadísticas de clasificación automática para poder encontrar grupos de galaxias en función de las características observacionales presentes en el catálogo SDSS.

Capítulo 2

Ráfagas de Rayos Gamma

Las ráfagas de rayos gamma (GRB) son pulsos altamente energéticos con fotones que pueden llegar hasta el rango de los GeV, y son considerados uno de los eventos más energéticos del universo. [35] Fueron descubiertos por las observaciones realizadas por los satélites Vega, en la década de los 60. Dentro de sus propiedades más importantes se encuentra que el espectro de emisión no es térmico, que están localizadas aleatoriamente en el cielo, en general con un redshift alto. Además, los GRBs tienen un tiempo de duración típicamente de menos de 1 minuto, pero este tiempo ocurre de manera irregular. A pesar de esta irregularidad de duración, se logró determinar una distribución bimodal del tiempo del 90% de su fluencia de rayos gamma (T_{90}), clasificando así los GRBs de corta y larga duración.[25]

2.1. GRB de corta duración

Los GRB de corta duración son eventos de alta energía que duran menos de dos segundos. Anteriormente a esta clasificación bimodal, se tenía sospechas de que estos sucesos son provocados por la fusión de objetos binarios de alta masa, como puede ser dos estrellas de neutrones o estrella de neutrones con un agujero negro.[32] En los últimos años se obtuvo evidencia estadística de que efectivamente estos fenómenos vienen de fusión de objetos compactos. El GRB 170817A muestra evidencia convincente de este fenómeno de fusión como progenitores. Este fenómeno también fue acompañado por la detección de ondas gravitacionales concordantes con las esperadas de un par de estrellas de neutrones.[1]

El proceso por el cual se produce el GRB de corta duración en la fusión de dos estrellas de neutrones o estrella de neutrón o agujero negro, es que el remanente

esperado de la fusión es un disco de escombros hiper creciente alrededor de un agujero negro. Este disco tiene una tasa de acreción muy alta y de alta velocidad. En este disco se puede generar procesos de conversión de energía mediante aniquilación neutrinos antineutrinos o por procesos magnéticos.[37] Esta fusión generara un chorro ultra relativista altamente colimado, que si esta alineado con la observación en la Tierra, será detectado como un GRB de corta duración. [3] Las galaxias anfitrionas para este tipo de GRB tienen una diversa naturaleza con respecto a la tasa de formación estelar. Este fenómeno es esperado ya que la formación y fusión de sistema binario tiene un amplio rango de tiempo en el que puede ocurrir. [3] [49]

2.2. GRB de larga duración

Los GRB de larga duración son eventos que de alta energía que duran más de dos segundos. Desde hace algunos años, se tiene el consenso que los progenitores de este tipo de GRB son colapsos de estrellas masivas; fenómeno conocido como Hipernova [11]. Este nombre se debe al altísimo brillo debido a una explosión con eyecciones de alta energía cinética [19]. Uno de los factores que son cruciales para la formación de de Hipernovas es la rotación de la estrella progenitora [20]. Cuando esta estrella colapsa forma un Agujero Negro, la materia tiende a acumularse y rotar rápidamente alrededor de este. Cuando el periodo de rotación de esta materia acumulada, llega a ser alrededor de 1 ms, entonces se forma un efecto dínamo inmenso. Este proceso junto con con la energía gravitacional y de rotación, generarán la explosión y la aparición de un jet altamente colimado [30].

El proceso descrito sólo es posible en estrellas masivas con una alta rotación. Además, estas estrella deben tener núcleos muy masivos, lo que favorece el colapso en agujero negro, pero mantienen la envoltura de hidrógeno y de esta manera el jet ultra relativista pueda generarse [20] . Para algunos autores este tipo de progenitores pueden ser estrellas Wolf-Rayet [36] [12]. Las explosiones de GRB de larga duración son eventos muy improbables en el universo actual, pero era relativamente comunes en el universo antiguo. Esto implica que los GRB de larga duración tienen una mayor preferencia en ambientes de baja metalicidad [28].

Capítulo 3

Galaxias Anfitrionas Ráfagas de Rayos Gama

Los GRBs, sin importar si son largos o cortos, son eventos relativamente pocos comunes dentro de las galaxias. Después de tener un buen número de GRB detectados, el siguiente paso fue identificar el tipo de estructuras en las que se producía este tipo de fenómenos. Identificar en que tipo de galaxias se producen los GRB es un trabajo arduo, ya que en primer lugar se necesita encontrar el redshift del GRB para poder comparar con el redshift de las galaxias candidatas. Otro punto que aumenta la dificultad radica en el alto brillo del evento, el GRB aparenta estar en un área grande del cielo. Aun así se logró crear catálogos de estas galaxias anfitrionas. Es así que se planteó desde hace ya algunos años que estas galaxias anfitrionas de GRB tienen características generales distintas a las galaxias en las que no se ha observado un GRB [9].

3.1. Galaxias Anfitrionas de GRB de Corta Duración

Una de las propiedades más sobresalientes de las galaxias anfitrionas de GRB de corta duración, es que ocurren en distintas etapas de la formación estelar [38]. La formación estelar donde mayormente se encuentran esta entre 0.1 y 1 M yr^{-1} [3]. Con respecto al redshift un tercio de las observaciones tiene una distribución alrededor de $z = 0.5$ [14]. Se debe mencionar que puede existir un sesgo para $z > 1$, ya que por el alto redshift hay dificultades técnicas en los instrumentos. Necesitan un resplandor óptico para la ubicación, lo cual es difícil a alto z . Además los canales de los detectores son menos sensibles a GRB de corta duración. Es así que solo el 5 % de

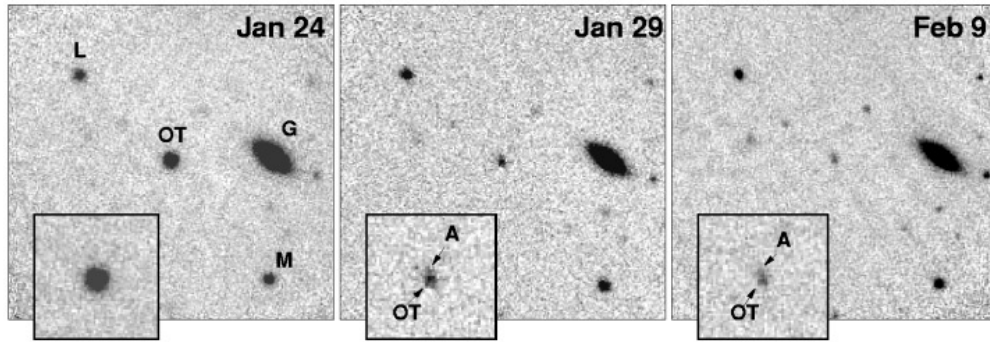


Figura 3.1: Tres momentos del GRB 990123 en 1999. Imagen de la banda K con $z=1.6$ y ancho de imagen de 32 x 32 segundos. [5]

galaxias anfitrionas GRB de corta duración confirmadas tiene alto redshift [39]. Un subgrupo de GRB de corta duración se asocian a clúster de galaxias [38]. En general las galaxias de los clústers tienden a tener una baja formación estelar y población estelar más antigua; así como también tienden a ser galaxias grandes y masivas [39].

3.2. Galaxias Anfitrionas de GRB de Larga Duración

Como ya se mencionó anteriormente por las características del evento que crea los GRB de larga duración, estos tienen baja metalicidad, por lo que sus galaxias anfitrionas también deben tener esta característica. Pero se debe también en cuenta que esto no es cierto en todos los casos. Las galaxias son estructuras dinámicas, por lo cual en algunos casos la distribución de la metalicidad es heterogénea dentro de la misma. Es así como existe posibilidad de que exista GRB de larga duración en galaxias que tengan metalicidad relativamente alta [8].

Otra de las propiedades interesantes de las galaxias con GRB de larga duración, es su alta tasa de formación estelar; con rango usuales de alrededor de 5.6 M yr^{-1} [27]. Esta característica es compatible con los redshift altos a los que encuentran este tipo de GRB [15], coincidiendo con la época de alta formación estelar como se muestra figura 3.2. Los modelos indican que los progenitores de GRB tienen una alta dependencia del entorno y son más probables cuando hay múltiples estrellas, esto sería una de las causas de la dependencia de la alta formación estelar [47]. Además de esta característica, otra importante es la baja masa de las galaxias anfitrionas, en general bajo $10^{8.3}$ masas solares [34]. Pero esto ocurre también en el universo cercano, y se puede sugerir la relación entre galaxias de baja masa y baja metalicidad [33].

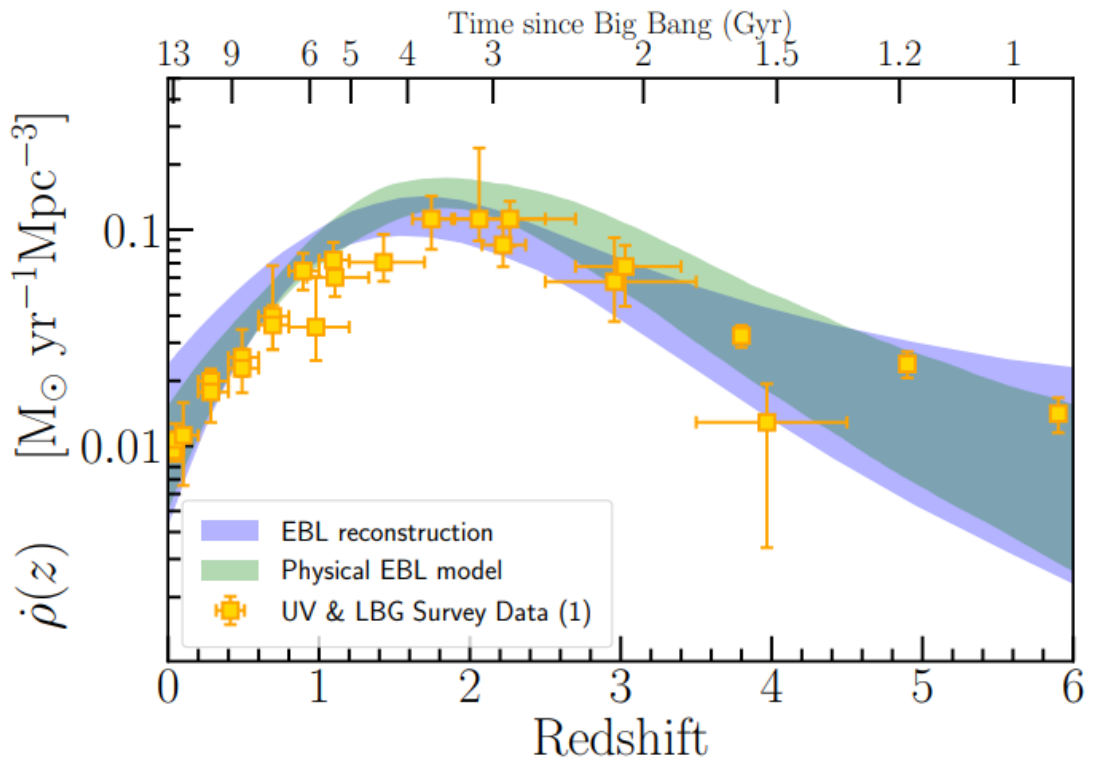


Figura 3.2: Densidad de formación estelar como función del redshift basado en dos métodos. EBL físico y reconstrucción empírica EBL [10]

Las galaxias que son anfitrionas de los GRB de larga duración tienden a tener un color más cercano al azul. Esto es concordante con la alta formación estelar [41]. A la par del color se apreció una tendencia interesantes, es que las galaxias anfitrionas tendían a tener baja luminosidad en comparación de galaxias con el mismo redshift [26]. Una de las razones puede deberse a que en general son galaxias más pequeñas, pero también puede deberse a que están siendo opacadas por el medio interestelar. Cabe mencionar, que existen GRBs oscuros, los cuales ocurren cuando se detecta la señal de rayos gama, pero no se puede localizar una señal en el rango óptico. La principal razón sería que los fotones en el rango óptico serían opacadas por el polvo; se estima que este tipo de GRBs representan el 20% de los detectados [16].

Capítulo 4

Propiedades Galácticas y Estimadores

Como se presentó en el capítulo anterior las galaxias que son anfitrionas de GRBs tienen algunas propiedades que difieren con otras galaxias. Por lo cual, es pertinente definir de manera correcta, que son estas propiedades. Además, de identificar indicadores que caracterizar dichas propiedades, usando los datos recolectados de las observaciones.

4.1. Grupos y Clusters Galácticos

En las simulaciones del universo usando el modelo Λ CDM, se puede apreciar que a gran escala éste es homogéneo e isótropo. Pero a medida que se disminuye a esta escala, se puede notar hay lugares de baja densidad de galaxias; y por el contrario que aparecen estructuras en forma de halos, con alta concentración de galaxias. A medida que se sigue disminuyendo aparecen los clústers grupos[6]. La diferencia entre clúster y grupos no está muy delimitada aunque en general los clústers son más ricos que los grupos. Sea como fuese estas estructuras están acopladas gravitatoriamente, y que contrarresta la expansión del universo [22]. Para el caso del Clúster de Virgo esto para un tamaño de 7.2 Mpc [23].

4.1.1. Densidad Galácticas

Uno de los indicadores que muestran si las galaxias están formando una estructura o están fuera de la misma es la densidad de galaxias: esta densidad es una medida de cuantas galaxias se encuentran dentro de un volumen determinado. Para el presente trabajo se usó la siguiente fórmula

$$d = \frac{N}{V} \quad (4.1)$$

$$d = \frac{N}{4/3\pi r^3}$$

Donde N es el número de galaxias y V es el volumen de la esfera que se analizó.

4.2. Secuencia de Hubble y Morfología de las Galaxias

Las secuencias son intentos de clasificar morfológicamente las distintas formas en que se han observado las galaxias, con respecto a su evolución. Dentro de estas clasificaciones, la de Hubble es la más conocida. Como se muestra en la figura 4.1, empezando por las galaxias elípticas que van desde el E0 al E6. El número indica el grado de excentricidad, empezando con un 0 las esféricas y terminando en 9 las más excéntricas. En este tipo de galaxia la excentricidad ocurre por rotación o velocidad no isotrópica. A medida que estos valores cambian, la estructura evoluciona hacia galaxias lenticulares como la S0. Se caracterizan por tener un abultamiento en el centro pero no contar con espirales. Desde este punto la clasificación toma dos caminos; por un lado están las espirales (S) y por el otro lado las barrenadas (SB). En ambos casos presenta un bulbo brillante en el centro galáctico y en las partes exteriores algunos brazos. La diferencia radica en la barrena, que es una estructura en forma de barra que sale del bulbo y del cual salen los brazos. Finalmente, la secuencia termina en las galaxias irregulares (I) [24].

4.2.1. Flujo de Petrosian

Las galaxias no son objetos puntuales, por lo que tienen objetos con distinto redshift, no tienen el mismo brillo, ni tampoco tienen bordes definidos. Para todo los análisis se necesita tener un diámetro físico estándar[40]. Es así como se introduce el flujo de Petrosian, definido por la siguiente ecuación.

$$F_P = \int_0^{N_P r_P} 2\pi r' dr' I(r') \quad (4.2)$$

Donde F_P es el flujo de 5 bandas de observación para el SDSS, r_P es el radio de Petrosian. El flujo de Petrosian esta definido como el flujo a un específico número

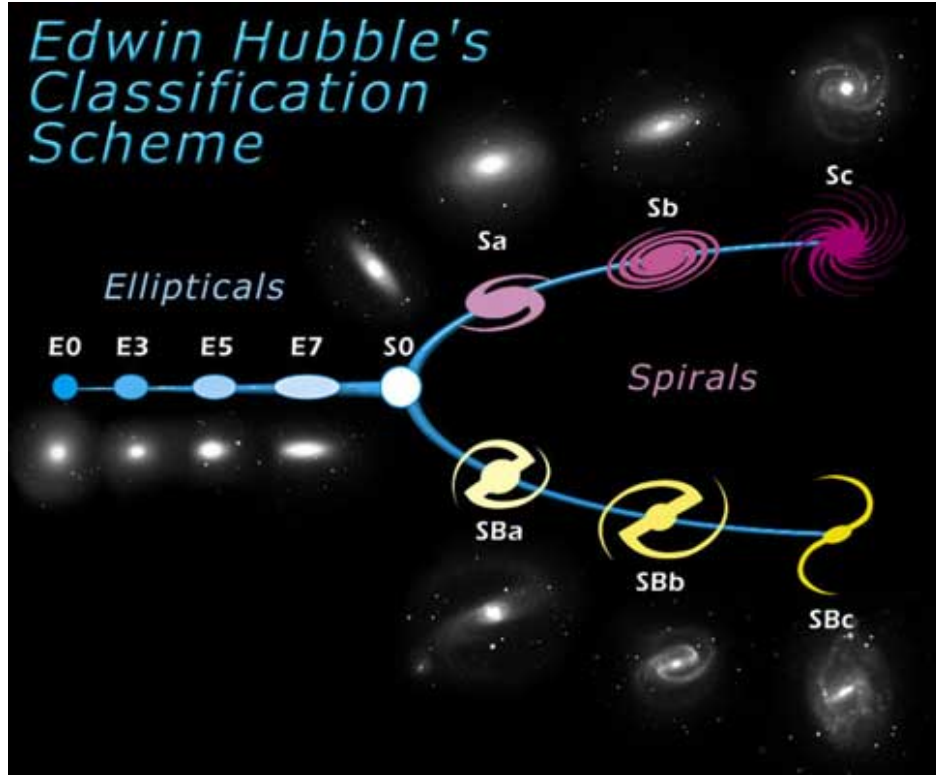


Figura 4.1: Esquema de la secuencia de Hubble. Las galaxias elípticas con código E. Lenticular con S0. Espirales con código S y barreas con Código SB [18]

N_p de r radios de Petrosian, en el caso de SDSS este N_p es 2. $I(r')$ es el perfil de brillo promedio superficial promedio [43].

4.2.2. Índice de Concentración Inversa

El índice de concentración inversa se define con la siguiente relación:

$$ICI = \frac{r_{50}}{r_{90}} \quad (4.3)$$

Donde r_{50} y r_{90} corresponden al radio con flujo integrados igual al 50% y 90% respectivamente, del flujo de Petrosian en la banda r . Índices altos indican galaxias altamente difusas; por el contrario índices altos indican galaxias altamente concentradas [17]. EL índice de concentración inversa es usado tradicionalmente para caracterizar la morfología de las galaxias. Para el presente trabajo se considerará que las galaxias tempranas tienen un ICI de alrededor de 0.36; las galaxias antiguas un ICI alrededor de 0.42 [2].

4.3. Metalicidad y Formación Estelar

La evolución de las galaxias cambia no sólo su morfología, sino también la composición de la misma. La evolución de las galaxias depende de la materia prima para que sus estrellas se puedan formar. La tasa de formación estelar - SFR (star formation rate) expresa la cantidad de materia que se transforma en estrellas en un tiempo específico dentro de una galaxia. Esta medida usualmente en masas solares por año (M/yr) [46]. La tasa de formación estelar no es constante a lo largo de la vida de una galaxia; es más la formación estelar en promedio no fue constante durante la edad del universo como se puede ver en la figura 3.2. Esta característica del SFR a lo largo del tiempo se explica debido a la interacción en las estructuras galácticas como clústers. La región interestelar es un reservorio de gas caliente, que sirve como combustible para la formación de estrellas. El momento de mayor SFR medido en el universo, se conoce como época de formación estelar. [7].

En el universo primigenio, después de la nucleogénesis los compuestos principales era Hidrógeno, Helio y trazas de Litio [13]. Pero medida que las estrellas se formaron estas producen nuevos elementos químicos mediante los procesos estelares como la fusión. La metalicidad se define como la presencia de elementos más pesados que el helio. Mientras más alta sea la abundancia relativa de un compuesto más pesado que el helio, más metalicidad se dice que tendrá una galaxia [29]. Como la metalicidad modifica las líneas espectrales, también hace que cambien la intensidad de ciertos canales de observación.

4.3.1. Índices de Color

Para un análisis de los espectros, la luz proveniente de las galaxias se divide en canales. Estos canales van desde el ultravioleta pasando por el visible y llegando al infrarrojo del espectro. El número de canales, la longitud de onda central de cada canal y su ancho es propio de cada uno de los instrumentos de medida. Cada canal recoge una parte de flujo del espectro y la muestra como una intensidad. Los índices de color son la comparación entre los distintos canales de medida, la comparación se define en forma de resta.

En múltiples estudios se muestran una gran correlación entre los índices de color con la metalicidad. Debido a las altas ionizaciones que surgen en los elementos químicos, el canal ultravioleta es un buen indicador de la metalicidad de una galaxia [29]. Al estar relacionada la metalicidad de una galaxia con su SFR, para poder

estimar su valor también se usa índices de color con ultravioleta como el UV – óptico. Se encontró que a medida que este índice de color es mayor, el SFR también lo es [42]. Los índices de color no sólo son útiles para la metalicidad, sino que también permiten correlacionar la morfología de las galaxias. Para este fin se usó el índice entre verde/azul y el visible. Mientras más alto este índice, la galaxia es de tipo E; mientras más bajo la galaxia es de tipo S [45]. En última instancia, este índice de color permite saber si una galaxia es más antigua o es reciente en el esquema de evolución galáctica.

Capítulo 5

Fuente y Adquisición de Datos

5.1. Proyecto GHostS

GRB Host Studies (GhostS) es una base de datos pública que alberga los datos de las galaxias anfitrionas de GRB (Savaglio 2006). Al 13 de julio del 2018 cuenta con 245 galaxias anfitrionas. El proyecto se centra en compilar, estimar y guardar la información del redshift, ubicación, duración de evento de galaxias anfitrionas. En algunos casos guarda información de SFR, masa, metalicidad, espectro e imagen. El proyecto es mantenido Sandra Savaglio y parcialmente financiado por Spitzer/NASA(1). Los datos pueden ser pre visualizados, pero también tienen opciones de parámetro de búsqueda. El enlace a la base de datos es: <http://www.grbhosts.org/>

5.2. Sloan Digital Sky Survey

Sloan Digital Sky Survey(SDSS) es uno de los mas mayores catálogos multi espectrales y espectrales de objetos estelares y galácticos. El proyecto es parte del Apache point Observatory manejado por la universidad estatal de Nuevo México. El telescopio encargado de la observación es el telescopio SDSS de 2.5 metros; un telescopio reflector tipo Ritchey-Chretien. El telescopio empezó a trabajar en el año 2000, pero hasta el 2014 solo se tenia datos de los centros galácticos. En ese año empezó a trabajar Mapping Nearby Galaxies (MaNGA), aún arreglo bidimensional de fibras ópticas, con exposición de 3 horas. MaNGA permitió tener mapas bidimensionales de velocidad estelar, tasa formación estelar, metalicidad, brillo. La cuarta etapa del SDSS incorporó un nuevo telescopio, el Irénée du Pont que permite explorar el lado sur del cielo. El telescopio Irénée du Pont es un telescopio de 2.5 metros ubicado en

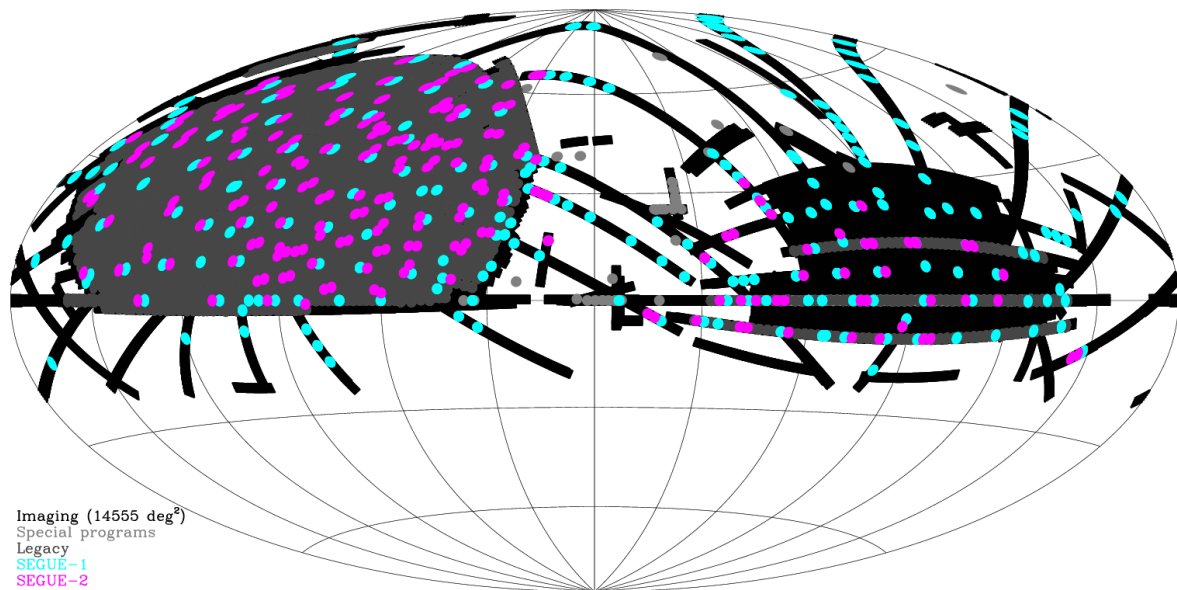


Figura 5.1: Cobertura del cielo por el proyecto SDSS. Eje vertical central representa ascensión recta (RA) de 120. Eje central horizontal la declinación (DEC) de 0 [44]

Las Campanas, Chile; construido en 1977.

El proyecto SDSS realiza campañas de observación, que son compiladas en Data Release (DR). En el trabajo actual se usó el DR16, cuyos datos fueron tomados hasta agosto del 2018 y liberados en el 2019. El DR16 aumenta el tamaño del cielo observado. Tiene el catálogo de 10000 galaxias, así como aumenta el número de fibras de 19 a 127 lo cual mejora la resolución de las características de las galaxias. Además, el DR16 tiene datos infrarrojos del Observatorio de las Campanas[44].

La adquisición de datos del telescopio se produce mediante un arreglo de 30 sensores CCD de 2048 por 2048 píxeles, con arreglo de 6 x 5 sensores. Delante de los arreglos de CCD hay 5 filtros, de donde se tomaron los canales de color. Los canales son u,g,r,i,z, longitudes de onda central de 3551Å, 4686Å, 6166Å, 7480Å y 8932Å respectivamente; además con anchura a media altura (FWHM) de 600Å, 1400Å, 1400Å, 1500Å y 1200Å para cada banda. Adicionalmente ha 24 sensores CCD ubicados después que colectan datos astrométricos[44][31].

Las bases de datos del SDSS están almacenadas en tablas donde objID es el código del objeto astronómico. En el presente trabajo se usó la tabla PhotoObjAll, la cual contiene todos los datos fotométricos del SDSS; y se centró en las galaxias de interés. Para la búsqueda de los datos deseados el proyecto presenta las opciones mediante lenguaje Structured Query Language (SQL). Desde los últimos Data Release (DR), SDSS proporciona un módulo en Python (astroquery.sdss) que permite realizar búsquedas directas con lenguaje SQL. Proporcionando mejores capacidades

de búsqueda ya que de esta manera se puede superar el tiempo preestablecido de búsqueda, útiles para gran cantidad de datos.

5.3. Adquisición de Datos

5.3.1. Determinación de Galaxias Anfitrionas de GRB

El catalogo GhostS contiene 245 galaxias que son anfitrionas de GRB, que están distribuidas uniformemente. No todas estas galaxias están dentro del catalogo SDSS, debido a su aún limitado estudio del cielo. Además, el SDSS al actualizar su DR, las observaciones no están limitadas en un área determinada. Es así que se creó un script Python que toma los datos de redshift, ascensión recta y declinación del catálogo GhostS y los compara con la base de datos de SDSS, en específico de la tabla SpecPhoto. El script, desecha todo aquellos objetos que no se encuentren dentro del catalogo SDSS; y guarda en una tabla los objetos que si lo estén. Para el presente trabajo se encontró 30 galaxias anfitrionas de GRB, todas con $z < 1$; las mismas que se detallan en el Anexo A.

5.3.2. Determinación del radio local para búsqueda de galaxias vecinas

Para buscar los vecinos a las galaxias anfitrionas de GRB es necesario determinar un radio de influencia galáctico. Para el presente trabajo se usará un radio de $10 h^{-1} \text{Mpc}$ desde la galaxia anfitriona. Dicho radio es el tamaño de filamento de grupo local, que muchos autores citan como una distancia óptima. [21] el valor de h es adimensional y es dependiente de la constante de Hubble H_0 que para el presente trabajo se usará un valor de $68.1 \text{ kms}^{-1} \text{Mpc}$ y un h de 0.681

Los requerimientos de búsqueda del SDSS necesitan un tamaño angular. Es cual es la razón entre el distancia angular y la distancia. El diámetro de búsqueda será el doble del radio ($20h^{-1} \text{Mpc}$). Pero debido al corrimiento al rojo, este diámetro sufre un cambio, en forma de la siguiente ecuación

$$D_A = \frac{D_M}{1+z} \quad (5.1)$$

donde D_m es el diámetro de estudio ($20h^{-1}\text{Mpc}$), z es el redshift y D_a es la distancia angular. Para el cálculo de la distancia se usó los cálculos usados por Ned Wright para programar su pagina [48], y de esta manera ser implementados en el script de Phyton.

5.3.3. Determinación de galaxias vecinas

Una vez seleccionada las galaxias anfitrionas de GRB y calculado el tamaño angular, se guarda en un archivo de texto plano junto con los redshifts. Para la búsqueda de las galaxias vecinas se creó un script en Phyton. En dicho script se carga el módulo `astroquery.sdss`; el cual permite realizar una conexión con la base de datos de SDSS y realizar búsquedas usando el lenguaje SQL. Este método de búsqueda tiene dos grandes beneficios. Por un lado permite la automatización de la búsqueda y de esta manera agilizar el proceso; así como poder guardar los datos de manera más eficiente. Por otro lado, en la pagina de SDSS el tiempo de búsqueda sobrecarga el sistema cuando hay muchos datos, cortando la búsqueda y perdiendo información. Al programar el script se tiene control sobre el tiempo de conexión, y así evitando los cortes

El script creado lee los datos de los anfitriones y los guarda en un data frame. Se crea una búsqueda de las galaxias que estén cerca al objeto a un tamaño angulas especificado y aun redshift de ± 0.1 del anfitrión. Esta búsqueda se hace en función al `ObjId` que es el código de objeto. La búsqueda se hace en la tabla `PhotoPrimary`. Los parámetros buscados `RA`, `DEC`, `redshift`. Así como los códigos de color `u`, `g`, `r`, `i`, `z`; además de `petro90` y `petro50`. Una vez se tiene la búsqueda se abre una conexión con la base de datos de SDSS y se obtiene el resultado. Dicho resultado arrojo en total 1323 galaxias, cuyos datos son guardados en texto plano para posterior análisis. El código para la búsqueda esta en el Anexo.

Capítulo 6

Análisis de Datos y Resultados

Para hacer el análisis es necesario poder identificar cuales vecinos provienen de GRB de larga y corta duración. Para lo cual usaremos el dato T90, que identifica el tiempo en el que el 90 % de la intensidad del GRB fue detectada. Como en el caso de diámetro, el tiempo también sufre efecto del alto redshift por lo que debe corregirse con la siguiente ecuación.

$$t_o = \frac{t_e}{1 + z} \quad (6.1)$$

Donde t_o es el tiempo medido, z el redshift y t_e el tiempo del evento. Posteriormente, se clasificó en dos grupos los de corta duración a los que tienen tiempo menor a 2 segundos y a los de tiempo mayor como larga duración.

6.1. Análisis de Conglomerados

El presente análisis fue hecho en R debido a sus múltiples herramientas estadísticas que permiten un mejor análisis de datos. Se calculan inicialmente los índices u-r, r-z, u-z, g-r, ICI. Con estos se procede a hacer una prueba logit y una probit con respecto a que sea GRB de corta o larga duración. Las pruebas logit y probit permiten calcular las contribuciones que un evento ocurra o no.

Para el modelo logit tenemos los resultados en el cuadro 6.1. Los resultados del modelo probit se muestran en el cuadro 6.2. Como se puede notar el índice de color u-z, g-r y ICI son los más significativos en ambos modelos, al momento de explicar la probabilidad de tener un GRB de corta y larga duración.

Coefficiente	Valor	Error estándar	Valor Z	Valor p
Intercepto	2.8599	0.6834	4.185	2.86e-05
u-r	0.3372	0.3407	0.990	0.322320
u-z	-0.8436	0.3254	-2.592	0.009539
r-z	0.7615	3.5473	0.215	0.830030
g-r	-0.6175	0.1835	-3.364	0.000768
ICI	5.3242	1.5794	3.371	0.000749

Cuadro 6.1: Resultados modelo Logit

Coefficiente	Valor	Error estándar	Valor Z	Valor p
Intercepto	1.79179	0.35962	4.982	6.28e-07
u-r	0.19726	0.17461	1.130	0.258592
u-z	-0.48674	0.16243	-2.997	0.002730
r-z	0.03935	1.47503	0.027	0.978716
g-r	-0.33587	0.09582	-3.505	0.000456
ICI	2.68835	0.82325	3.266	0.001093

Cuadro 6.2: Resultados modelo Probit

El análisis de conglomerados o de clúster es una técnica estadística que permite agrupar los datos en conjuntos lo más homogéneo posible de manera autónoma. Dentro de las distintas técnicas de conglomerados se usó el algoritmo de k partición.

El análisis de conglomerados o de clúster es una técnica estadística que permite agrupar los datos en conjuntos lo más homogéneos posibles de manera autónoma. Dentro de las distintas técnicas de conglomerados se usó el algoritmo de k partición. Para el presente trabajo se usó la librería clúster de R. El análisis se llevó a cabo entre el índice de color u-z y ICI. En primer lugar, se debe saber el número óptimo de particiones k se generaran, para lo cual se usara el comando "fviz-nbclust". Dicho comando encuentra centros de agrupación y encuentra la distancia (euclidiana) a los demás elementos. El resultado se puede observar en la figura 6.1, en la cual se puede notar que la solución óptima es k=2.

Para agrupar los datos, u-z y ICI estos deben estar previamente normalizados. Se usa el comando "kmeans" para la agrupación. El comando agrupara con k=2 los datos. El la figura 6.2 se puede observar en dos colores como los datos normalizados fueron clasificado alrededor de dos puntos de agrupación.

Para tener una comprobación que la clasificación fue válida. Se usa un análisis de varianza (ANOVA) entre los índices u-z, g-r y ICI, junto con la clasificación; en función de si es un GRB de larga o corta duración. Los resultados se pueden obser-

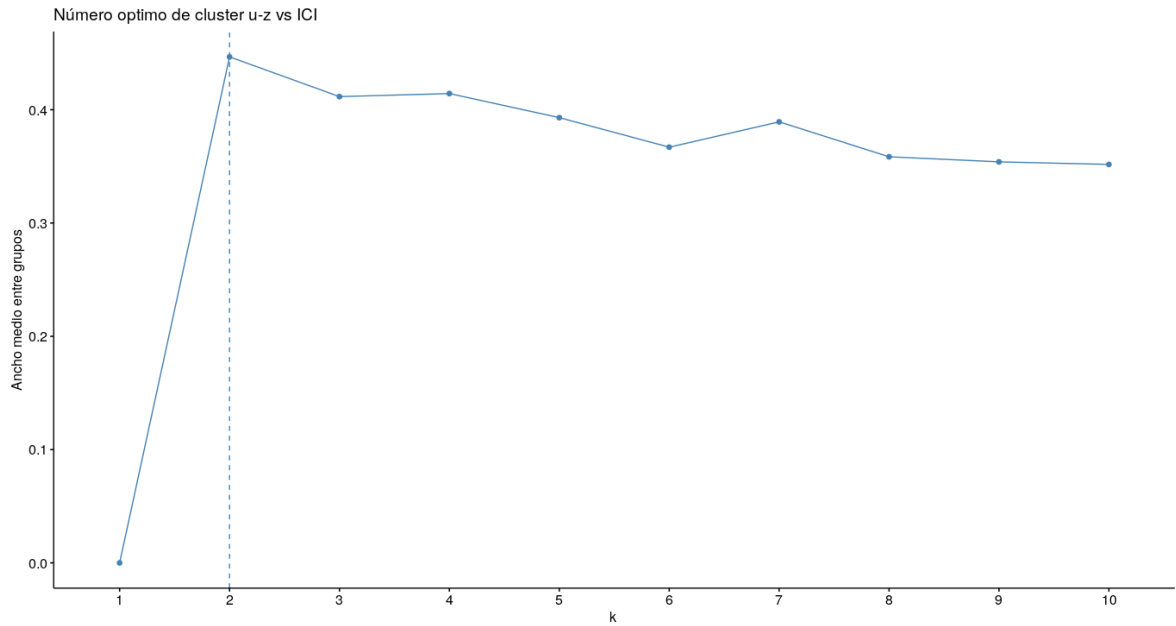


Figura 6.1: Análisis de número óptimo de clúster k , entre el índice de color $u-z$ y el índice de concentración inversa ICI. Método de distancia usado, euclidiano.

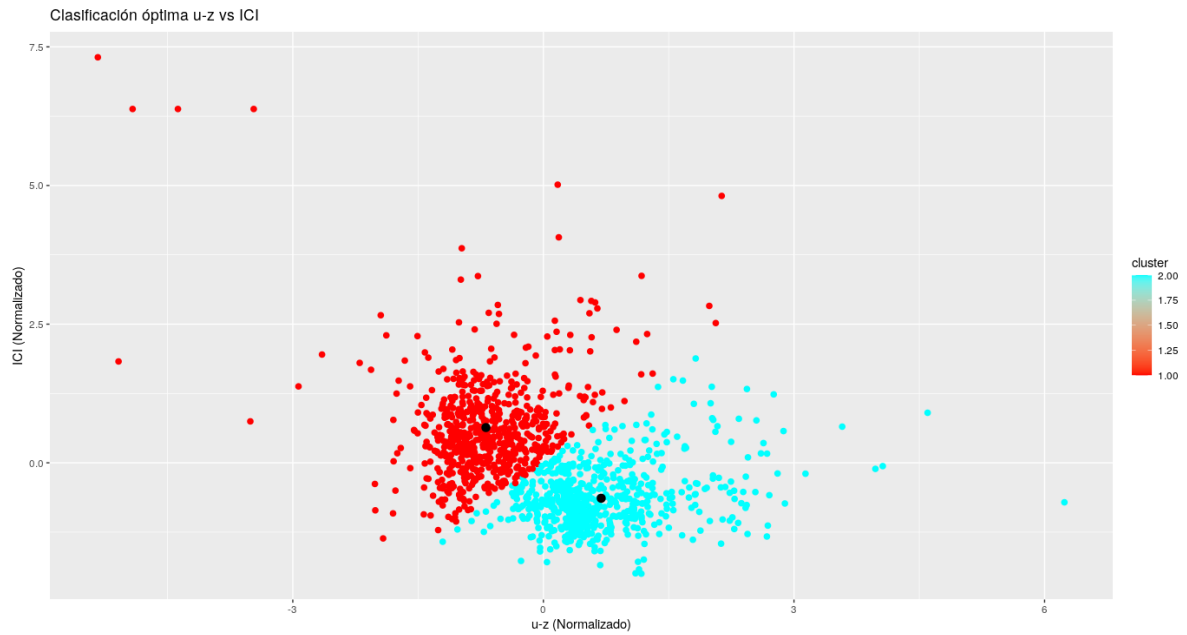


Figura 6.2: Clasificación de los datos de galaxias vecinas en función de su índice de color $u-z$ y el índice de concentración inversa ICI, para $k=2$. Índices se muestran normalizados.

var en el cuadro 6.3. Como se puede apreciar que el nivel de significancia para la clasificación es mejor que para los otros índices.

Coeficiente	Suma Cuadrados	Cuadrados Medios	Valor F	Valor p
Clasificación	14.729	14.7292	148.2317	<2.2e-16
g-r	5.383	5.3828	54.1712	3.224e-13
u-z	3.780	3.7795	38.0362	9.221e-10
ICI	0.006	0.0063	0.0636	0.8009
residuales	130.865	0.0994		

Cuadro 6.3: ANOVA clasificación con índices g-r, u-z y ICI con respecto a GRB de larga y corta duración

En función de la clasificación es posible determinar como esta afecto a la número de galaxias vecinas a los anfitriones de GRB. El el cuadro 6.4 se puede observar el número de galaxias vecinas de GRB de corta y larga duración; con respecto a la clasificación (grupo A y B). Se observa que para el grupo B la cantidad de vecinos de GRB de corta duración es más alta que para los del grupo A.

Vecinos GRB	Grupo A	Grupo B
Corta duración	20	159
Larga duración	643	500
Suma	683	659

Cuadro 6.4: Número de galaxias vecinas en función de anfitriones GRB de larga y corta duración; con respecto a los grupos de clasificación A y B.

6.2. Índices de Color

En el paso anterior ya se calculó los índices de color. Al realizar un histograma sobre los datos u - r se puede notar que estos tiene una distribución bimodal. Se procede a usar la clasificación en conglomerados para realizar un histograma u - r para cada uno; lo que se puede encontrar en la figura 6.3 . Como se puede apreciar, los conglomerados están separando a la curva bimodal en sus dos grupos. Esta tendencia se puede apreciar de mejor manera con la línea de tendencia. Además de permitir separar los modos de la distribución u - r, la clasificación nos permite poder ajustar con una curva gaussiana. Se usa es paquete Smooter para ajustar la curva; la media y la desviación estándar de cada uno de los grupos se muestran en el cuadro 6.5.

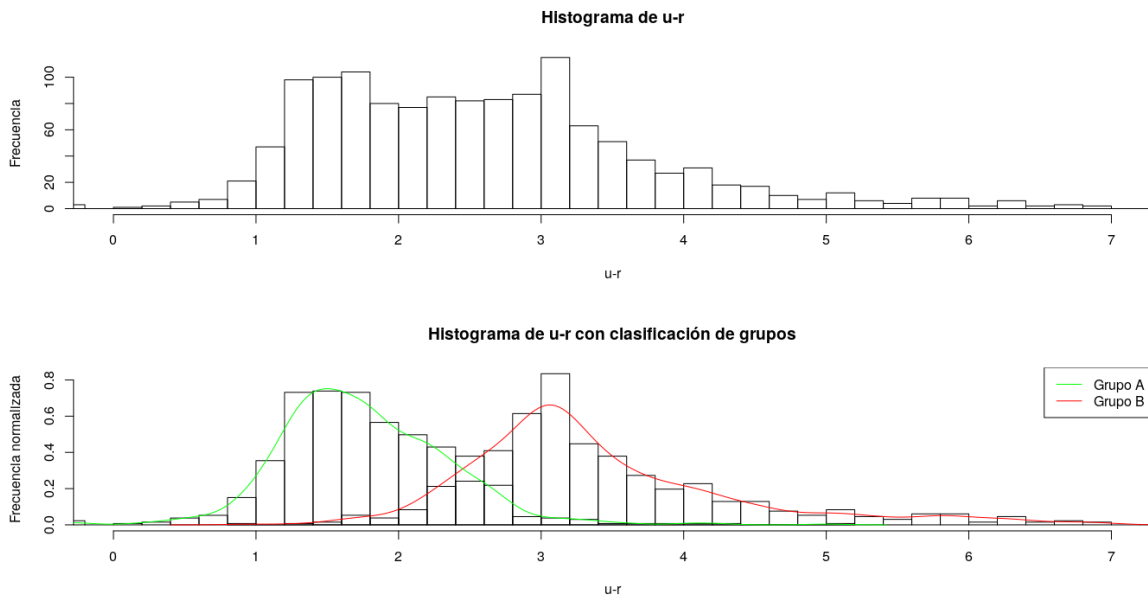


Figura 6.3: Superior: histograma del índice de color $u - r$, se puede apreciar su forma bi-modal. Inferior: histograma normalizado de índice de color $u - r$, en los Grupo A y B con su respectiva línea de tendencia

Los resultados muestran que los datos del grupo A, representan a uno de los modos de la distribución $u - r$. Además, este grupo tiene un índice de color $u - r$ más bajo. En contraposición, el grupo B tienen un índice $u - r$ más alto. Debido a que el índice $u - r$ es usado para indicador de formación estelar, podemos decir que el grupo A tiene una mayor formación estelar que el grupo B

Grupo	Media	desviación estándar
Grupo A	1.702	0.6439
Grupo B	3.187	0.7493

Cuadro 6.5: Resultado del ajuste gaussiano sobre los Grupos A y B con respecto a la distribución de $u - r$

Al realizar un histograma sobre los datos $g - r$ se puede notar que estos tiene una distribución con 3 modos. Se procede a usar la clasificación en conglomerados para realizar un histograma $u - g$ para cada uno. Ambos se muestran en la figura 6.4. Como se puede apreciar la clasificación en conglomerados separo los 3 modos; 1 para el grupo A y 2 para el grupo B. Como se muestra en la línea de tendencia del grupo B no puede ser ajustado por una guassiana por lo cual este paso se omitirá.

Los datos muestran que el el grupo A tiene un índice de color $g - r$ más bajo, mientras que el grupo B tiene índice de colores más altos. El índice de color $g - r$ es asociado típicamente con la forma de las galaxias. El grupo A son de galaxias mas

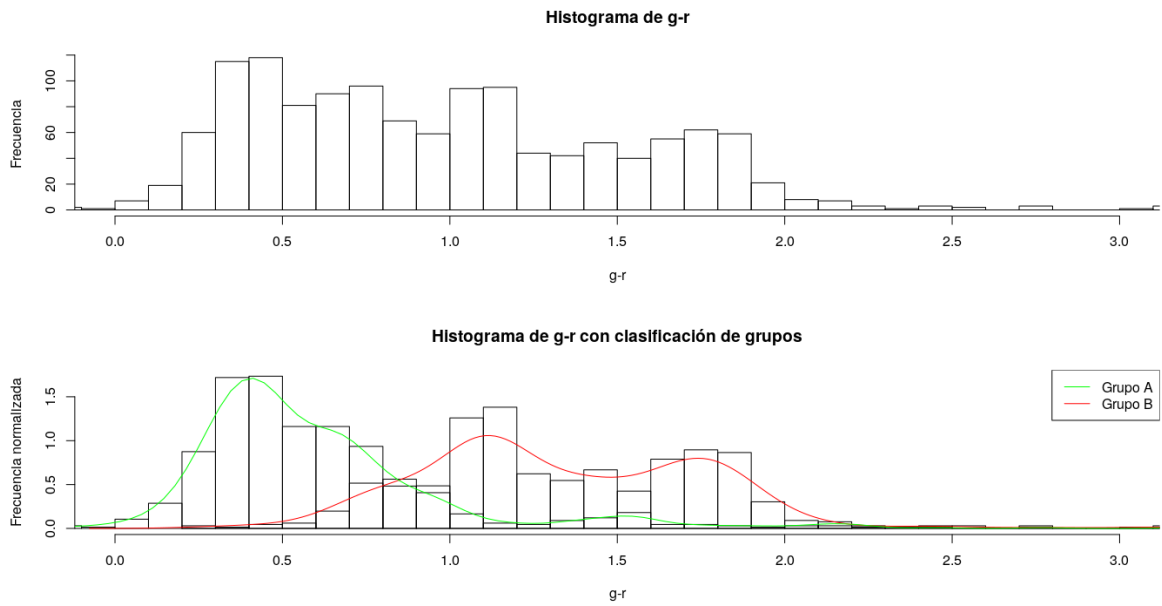


Figura 6.4: Superior: histograma del índice de color $g - r$, se puede apreciar los 3 modos. Inferior: histograma normalizado de índice de color $g - r$, en los Grupo A y B con su respectiva línea de tendencia

elípticas, mientras que el grupo B son de galaxias mas espirales.

6.3. Índice de Concentración Inversa

El calculo del ICI fue realizado en el análisis de conglomerados. Al hacer un examen exploratorio de los ICI de las galaxias vecinas a las anfitrionas de GRB, se encontró que estas seguían una distribución alrededor de 0.4035. Usando los grupos obtenidos por conglomerados se puede analizar el ICI. Para esto se usó un diagrama de caja del ICI para cada uno de los grupos es función del GRB; como se puede ver en el figura 6.5 Se aprecia que los datos del ICI para el grupo B tienden a tener un valor menor a los del grupo A. En específico la media del grupo A es 0.4543, mientras que para B es de 0.3525 . Además se puede ver que para el Grupo B el ICI tiende ha ser más estable en contraposición al grupo A.

Tomando en cuenta que valores bajos de ICI indican galaxias mpas tardías. Se puede decir en promedio que el grupo B tiene galaxias mas tardías que el grupo A. Por ultimo, considerando la dispersión del grupo A, se puede decir que a pesar de tener ICI en promedio, estas tienen un amplio rango de tipos de galaxias.

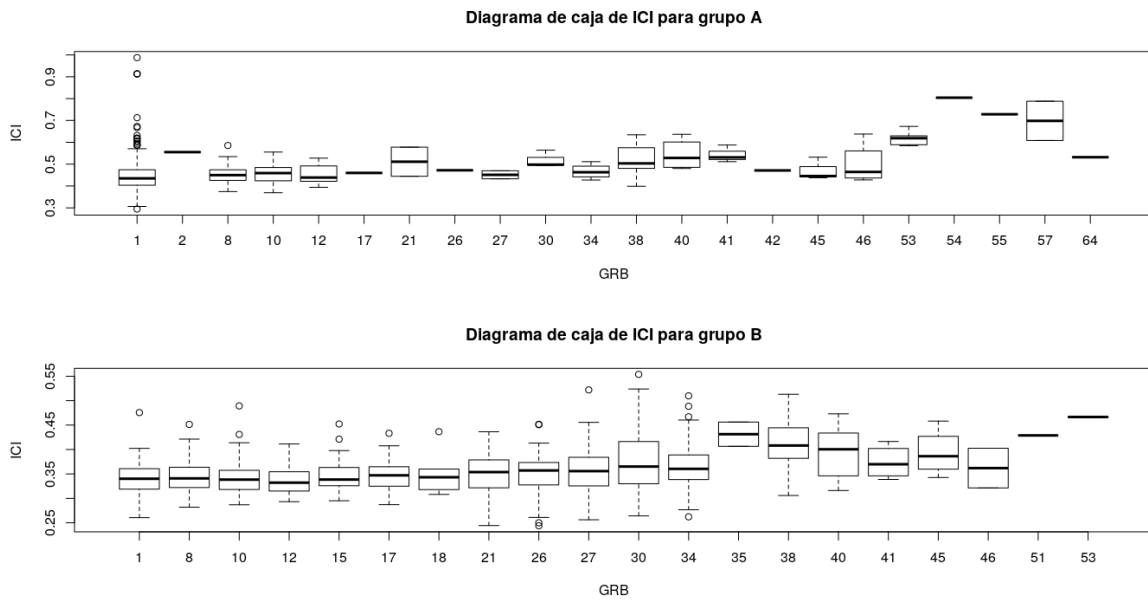


Figura 6.5: Superior: diagrama de caja para el ICI con respecto al Numero de GRB, para el grupo A
 Inferior: diagrama de caja para el ICI con respecto al Numero de GRB, para el grupo B

6.4. Densidad Galáctica

La densidad se calculó con galaxias vecinas a anfitriones de GRB, esto se realizó para cada grupo de galaxias anfitrionas. Según la ecuación 4.1. Los resultados se muestran en la figura 6.6. Como se observa parece haber una relación entre los primeros GRB (más cercanos) y la densidad. En función a una diferencia entre la densidad y los grupos, no parece haber una conclusión, la muestra al parecer es corta. Aunque se observa mayor densidad en los GRB de distancia media, para el grupo A. Aunque sólo puede ser un efecto de la partición.

6.5. Discusión de Resultados

Como se discutió en el capítulo 1 y 2, los GRB son procesos usuales en el universo actual, algo más abundantes son los GRB de larga duración. Además, se sabe que el medio interestelar afecta a las propiedades de las galaxias. El concordancia a los modelos Logit y Probit, cuadro 6.1 y 6.2, que es parte del análisis de conglomerados, se indicó que hay propiedades galácticas que efectivamente son estadísticamente significativas. Estos son los índices de colores $g - r$ (valor p logit=0.000768 probit = 0.000456) y $u - z$ (valor p logit=0.009539 probit = 0.002730); así como también el índice de correlación inversa ICI (valor p logit=0.000749 probit = 0.001093).

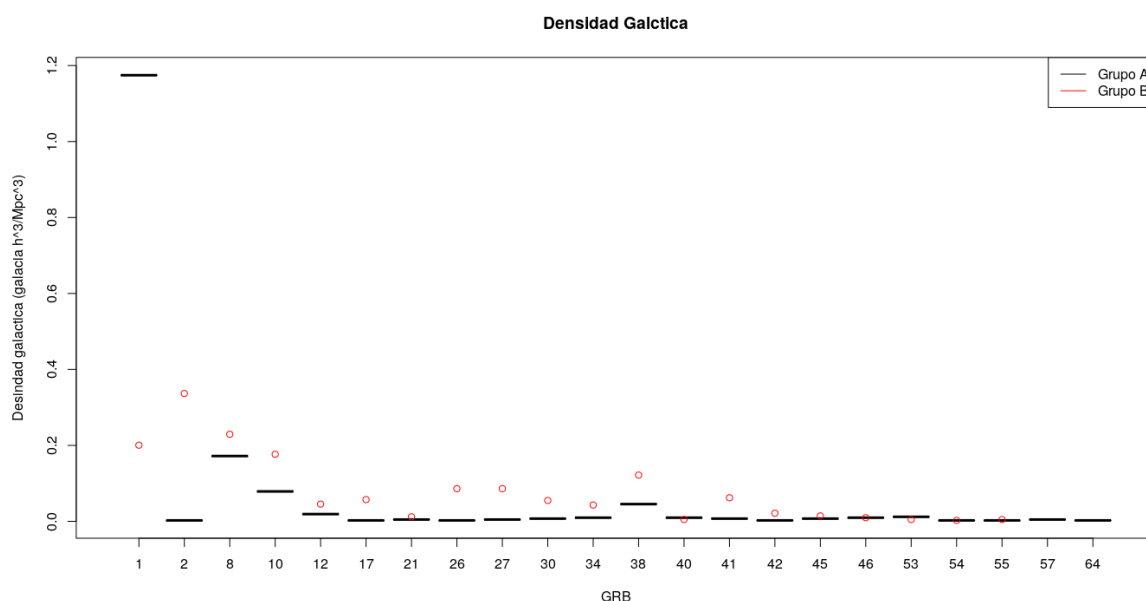


Figura 6.6: Densidad galáctica con respecto al numero de GRB. Negro representa datos del grupo A y rojo a datos del grupo B

En gráfico 6.1 se puede apreciar que la forma de partición es una línea recta, pero esto sólo trae problemas con los valores de cola. Además, el análisis ANOVA, cuadro 6.3, indica que efectivamente la partición tiene un mayor grado de relación con que sea una galaxia vecina a un un anfitrión de GRB. Lo anterior se reafirma en el cuadro 6.4, ya que, se puede apreciar, que el número de galaxias vecinas de GRB cambia en cada uno de los particiones. Siendo la partición A la que menos galaxias tiene.

En trabajos previos se había mostrado que la distribución del índice de color $u - r$ tiene una distribución bimodal [4]. En el caso del presente trabajo, también se aprecia dicha tendencia. Usando el análisis de conglomerados se puede lograr una partición en cada uno de los modos. Esta partición ayuda a que el trabajo de análisis y ajuste de curvas sea más fácil. Se determino que cada grupo tiene un índice de color diferente figura 6.3. El grupo A de de 1.702 y el B de 3.187. Para Schiminovich [42] estos valores implican para A tiene un SFR mas alto que B, ya que tiene un mayor aporte en la banda UV.

Con relación al índice de color $g - r$ se puede apreciar en la distribución con 3 modos figura 6.4. El grupo A tiene uno de los modos y el B dos de ellos. El modo de A tiene un máximo alrededor de 0.4; los modo de de B tiene máximo alrededor de 1.1 y 1.8. Con este criterio Shimasaku [45] indica que El grupo A tiene galaxias mas tempranas, mientras que B mas tardías.

Con relación al índice de concentración inverso (ICI). Se puede apreciar en la

figura 6.5 , que el grupo A tiene un ICI más alto (0.4543) mientras que el grupo B tiene un ICI más bajo (0.3525). Para Arguro [2] esto implicaría que el grupo A tiene galaxias más antiguas en las secuencias por su alta simetría. Mientras que el grupo B tiene galaxias mas asimétricas, es decir mas recientes.

Con respecto a la densidad, la figura 6.6 indica en ambos casos un aumento de densidad a medida que el GRB es más bajo (redshift mas bajo). Pero es difícil saber si se debe a un hecho real o solo a un sesgo de observación. Al igual que en los grupos no se observa una diferencia con respecto a la densidad; las pocas diferencias pueden ser asociadas a la agrupación.

Capítulo 7

Conclusiones

El presente trabajo determinó índices galácticos de vecindades favorables para encontrar GRB de corta y larga duración. Para lo cual se usa los índices de color $u - r$, $g - r$ e índice de concentración inversa. Para las galaxias vecinas, se tomaron los datos del SDSS DR16 que fue liberado en el 2018 y para las galaxias anfitrionas el GHostS actualizado al 2018. Los índices que estadísticamente impactan más encontrar galaxias vecinas a un GRB de corta duración fueron determinados mediante el uso de modelo de regresión logística (logit) y el modelo probit. Dando como resultado la posibilidad de usar análisis de conglomerados.

Se logró encontrar dos grupos, en los cuales la probabilidad de encontrar un vecino de GRB de corta duración es mayor en uno que en el otro. Para lo cual se uso un análisis de conglomerados con $k=2$. Estos grupos casi tienen la misma cantidad de galaxias en uno que en el otro pero cambia la cantidad de galaxias vecinas de un GRB de corta duración. Al analizar los conglomerados, los grupo estos tienen un impacto estadísticamente apreciable sobre la probabilidad de encontrar una galaxia vecina a un GRB de corta duración. Indicando que la clasificación en grupos tiene un impacto mayor que los índices por sí solos.

Se demostró que los grupos en los que clasificados mediante el análisis de conglomerados tienen características diferentes en función del índice del color $u - r$. Es conocido que este índice de color tiene una distribución bimodal. Cada uno de los conjuntos del análisis de conglomerados representa a cada uno de los modos de la distribución $u - r$. Hallando que el grupo en donde la tendencia es hacia el azul, es también el que cuenta con menos galaxias vecinas a galaxias anfitrionas de GRB de corta duración. Por el contrario mostrando que el grupo donde número de vecinos es más abundante, tiene una tendencia hacia el rojo. Mostrando de esta forma que

donde existen más vecinos a GRB de corta duración, también las galaxias tienen un mayor desarrollo evolutivo.

La clasificación de grupos también logró demostrar diferencias con respecto al índice de color $g - r$. La distribución del índice del color $g - r$ mostró una distribución trimodal. Aún así los grupos lograron representar a dichos modos. El grupo donde hay menor número de galaxias vecinas a anfitriones de GRB de corta duración, demostró un modo, así como que tenían el índice de color más bajo. Por otro lado las galaxias con más vecinos de GRB de corta duración, mostró los dos modos; así como también estos tenían los índices de color más alto.

Se logró encontrar una relación entre el índice de concentración inverso (ICI) con respecto a la clasificación de grupos. la distribución del ICI solo tiene un modo, pero al realizar la separación por grupos, se pudo determinar que estos diferían entre sí. Por un lado, el grupo donde existen menos vecinos de GRB de corta duración, tiene un ICI más alto; los de mayor cantidad de vecinos, tiene el ICI más bajo. De esta manera, el grupo donde hay mayor cantidad de vecinos de GRB de corta duración, se rodea de galaxias de forma más simétrica. Estas galaxias son concordantes con galaxias de la secuencia temprana. Además de tener un valor diferente de ICI, el grupo con mayor ICI tiene una dispersión mayor.

No hay una relación clara al momento de clasificar con respecto a la densidad de galaxias. En ambas clasificaciones la densidad cae rápidamente después de los primeros GRB. Esto se debe a que a medida que el redshift crece es más difícil localizar claramente galaxias, existe un límite observacional. Se debería esperar nuevas tecnologías o mayor cantidad de datos para tener una visión más clara a altos redshifts.

El análisis de conglomerados sigue una distribución bimodal del índice $u - r$ de color, este resultado es coherente con los resultados de ICI y de la distribución de $g - r$. Los estimadores de color sirven para describir la dinámica de los índices y están estrechamente relacionadas para la mayoría de galaxias observadas. Para el análisis de conglomerados, se notó que galaxias atípicas se localizan alejadas del conglomerado. Un estudio más profundo de las características de este tipo de galaxias, podría indicar propiedades fuera de lo común. De esta manera el análisis de conglomerados sobre los índices, podría ser una forma eficiente de encontrarlas.

A medida que aumenta la información proveniente de nuevos instrumentos astronómicos, el análisis estadístico de grandes datos puede ser una opción válida para el entendimiento del universo. El trabajo es una muestra de las herramientas

estadísticas de grandes datos, pueden ayudar a caracterizar de buena manera propiedades, y encontrar relaciones que a simple vista no son tan evidentes.

Apéndice A

Galaxias Anfitrionas de GRB

N.º	GRB	Z	Tamaño Angular
1	GRB 980425	0.0085	2758.12711708944
2	GRB 111005	0.0133	1746.43735239961
3	XRF 060218	0.0335	689.442236600664
8	GRB 130702	0.145	163.28878792642
10	GRB 030329	0.168	141.789026540342
12	GRB 050509B	0.2248	107.580062806835
15	XRF 120422	0.2826	86.9183983720064
17	GRB 130427	0.3399	73.3936770026803
18	GRB 090417B	0.345	72.4085970829694
21	GRB 130603B	0.3568	70.2379126911524
26	GRB 061210	0.4095	62.078567072573
27	GRB 020819B	0.411	61.8771448445725
30	GRB 130831	0.4791	54.0702997778373
34	GRB 090424	0.544	48.4637635210528
35	GRB 051221	0.5464	48.2822347921377
38	GRB 110106B	0.618	43.5226036893402
40	XRF 050416	0.6528	41.591205594693
41	GRB 070612	0.671	40.6621088326817
42	GRB 090814	0.694	39.558823492033
45	GRB 991208	0.706	39.0122278267163
46	GRB 041006	0.712	38.7459645797393
51	GRB 060602	0.787	35.7665184676793
53	GRB 100816	0.8049	35.1391532651914
54	GRB 051022	0.807	35.0674168830848
55	XRF 050824	0.8278	34.3769914848498
57	GRB 080710	0.8454	33.8199424887757
60	GRB 100117	0.915	31.8320470729083
64	GRB 060912	0.937	31.2667151216936
66	GRB 980703	0.966	30.5619548828766
67	GRB 070419	0.9705	30.4564811802957

Apéndice B

Código para identificar galaxias anfitrionas de GRB

El presente código corre en Python, y busca las galaxias anfitrionas de GRB que se encuentran en el catalogo SDSS

```
query = "select
p.objID, p.ra, p.dec, p.z
from SpecPhoto as p, dbo.fGetNearbyObjEq(- ra + ", - dec + ", - rad + ") as N
where p.objID = N.objID and class = 'galaxy' and z >- za + .and z <- zb + .and
zWarning = 0"
xid=SDSS.query-sql(query, timeout=400)
```

Apéndice C

Código para buscar galaxias vecinas a galaxias anfitrionas de GRB

El presente código corre en Python, y busca las galaxias vecinas de GRB que se encuentran en el catalogo SDDS, a un radio dado

```
query = "select p.objid, p.ra, p.dec, p.u, p.g, p.r, p.i, p.z, p.petroR50, p.petroR90,  
from PhotoPrimary p  
where p.objid=- oid + " and p.type=3"  
xid=SDSS.query-sql(query)
```

Bibliografía

- [1] Abbott, BP and Abbott, R and Abbott, TD and Acernese, F and Ackley, K and Adams, C and Adams, T and Addesso, P and Adhikari, RX and Adya, VB and others. Properties of the binary neutron star merger gw170817. *Physical Review X*, 9(1):011001, 2019.
- [2] Argudo-Fernández, M and Verley, S and Bergond, G and Sulentic, J and Sabater, J and Lorenzo, M Fernández and Espada, D and Leon, S and Sánchez-Expósito, S and Santander-Vela, JD and others. Effects of the environment on galaxies in the catalogue of isolated galaxies: physical satellites and large scale structure. *Astronomy & Astrophysics*, 564:A94, 2014.
- [3] Berger, E. Short-duration gamma-ray bursts. *Annual review of Astronomy and Astrophysics*, 52:43–105, 2014.
- [4] Bernal Galarza, S. A. Estudio de las propiedades de la vecindad de galaxias anfitrionas de ráfagas de rayos gamma. B.S. thesis, Quito, 2017., 2017.
- [5] Bloom, JS and Odewahn, SC and Djorgovski, SG and Kulkarni, SR and Harrison, FA and Koresko, C and Neugebauer, G and Armus, L and Frail, DA and Gal, RR and others. The host galaxy of grb 990123. *The Astrophysical Journal*, 518(1):L1, 1999.
- [6] Boylan-Kolchin, M., Springel, V., White, S. D., Jenkins, A., y Lemson, G. Resolving cosmic structure formation with the millennium-ii simulation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 398(3):1150–1164, 2009.
- [7] Brodwin, Mark and Stanford, SA and Gonzalez, Anthony H and Zeimann, GR and Snyder, GF and Mancone, CL and Pope, A and Eisenhardt, PR and Stern, Daniel and Alberts, S and others. The era of star formation in galaxy clusters. *The Astrophysical Journal*, 779(2):138, 2013.

- [8] Campisi, M., De Lucia, G., Li, L.-X., Mao, S., y Kang, X. Properties of long gamma-ray burst host galaxies in cosmological simulations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 400(3):1613–1624, 2009.
- [9] Christensen, L., Hjorth, J., y Gorosabel, J. Uv star-formation rates of grb host galaxies. *Astronomy & Astrophysics*, 425(3):913–926, 2004.
- [10] Collaboration, F.-L. A gamma-ray determination of the universe’s star formation history. *Science*, 362(6418):1031–1034, 2018.
- [11] Della Valle, M and Malesani, D and Bloom, JS and Benetti, S and Chincarini, G and D’Avanzo, P and Foley, RJ and Covino, S and Melandri, A and Piranomonte, S and others. Hypernova signatures in the late rebrightening of grb 050525a. *The Astrophysical Journal*, 642(2):L103, 2006.
- [12] Detmers, R., Langer, N., Podsiadlowski, P., e Izzard, R. Gamma-ray bursts from tidally spun-up wolf-rayet stars? *Astronomy & Astrophysics*, 484(3):831–839, 2008.
- [13] Fields, B. D., Molaro, P., y Sarkar, S. Big-bang nucleosynthesis. *arXiv preprint arXiv:1412.1408*, 2014.
- [14] Fong, W-f and Berger, E and Blanchard, PK and Margutti, R and Cowperthwaite, PS and Chornock, R and Alexander, KD and Metzger, BD and Villar, VA and Nicholl, M and others. The electromagnetic counterpart of the binary neutron star merger ligo/virgo gw170817. viii. a comparison to cosmological short-duration gamma-ray bursts. *The Astrophysical Journal Letters*, 848(2):L23, 2017.
- [15] Fynbo, J. P., Prochaska, J. X., Sommer-Larsen, J., Dessauges-Zavadsky, M., y Møller, P. Reconciling the metallicity distributions of gamma-ray burst, damped $Ly\alpha$, and lyman break galaxies at $z \approx 3$. *The Astrophysical Journal*, 683(1):321, 2008.
- [16] Greiner, J and Krühler, T and Klose, S and Afonso, P and Clemens, C and Filgas, R and Hartmann, Dieter H and Yoldaş, A Küpcü and Nardini, M and Rau, A and others. The nature of “dark” gamma-ray bursts. *Astronomy & Astrophysics*, 526:A30, 2011.
- [17] Hoyle, F., Vogeley, M., y Pan, D. Photometric properties of void galaxies in the sloan digital sky survey data release 7. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 426(4):3041–3050, 2012.

- [18] Hubble, E. y de Vaucouleurs, G. Hubble sequence.
- [19] Iwamoto, K and Mazzali, PA and Nomoto, K and Umeda, H and Nakamura, T and Patat, F and Danziger, IJ and Young, TR and Suzuki, T and Shigeyama, T and others. Ahypernova' model for sn 1998bw associated with gamma-ray burst of 25 april 1998. *Arxiv preprint astro-ph/9806382*, 1998.
- [20] Janka, HT2012ARNPS and others. Explosion mechanisms of core-collapse supernovae. *arXiv preprint arXiv:1206.2503*, 2012.
- [21] Karachentsev, I., Grebel, E., Sharina, M., Dolphin, A., Geisler, D., Guhathakurta, P., Hodge, P., Karachentseva, V., Sarajedini, A., y Seitzer, P. Distances to nearby galaxies in sculptor. *Astronomy & Astrophysics*, 404(1):93–111, 2003.
- [22] Karachentsev, I., Kashibadze, O., Makarov, D., y Tully, R. The hubble flow around the local group. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 393(4):1265–1274, 2009.
- [23] Karachentsev, I. D., Tully, R. B., Wu, P.-F., Shaya, E. J., y Dolphin, A. E. Infall of nearby galaxies into the virgo cluster as traced with hubble space telescope. *The Astrophysical Journal*, 782(1):4, 2014.
- [24] Kormendy, J. y Bender, R. A proposed revision of the hubble sequence for elliptical galaxies. *The Astrophysical Journal*, 464(2):L119, 1996.
- [25] Kumar, P. y Zhang, B. The physics of gamma-ray bursts & relativistic jets. *Physics Reports*, 561:1–109, 2015.
- [26] Le Floc'h, Emeric and Duc, P-A and Mirabel, IF and Sanders, DB and Bosch, G and Diaz, Ruben Joaquin and Donzelli, Carlos Jose and Rodrigues, I and Greiner, J and Mereghetti, S and others. Are the hosts of gamma-ray bursts sub-luminous and blue galaxies? *Astronomy & Astrophysics*, 400(2):499–510, 2003.
- [27] Levesque, E. M., Kewley, L. J., Berger, E., y Zahid, H. J. The host galaxies of gamma-ray bursts. ii. a mass–metallicity relation for long-duration gamma-ray burst host galaxies. *The Astronomical Journal*, 140(5):1557, 2010.
- [28] Levesque, E. M., Kewley, L. J., Graham, J. F., y Fruchter, A. S. A high-metallicity host environment for the long-duration grb 020819. *The Astrophysical Journal Letters*, 712(1):L26, 2010.

- [29] Levesque, E. M., Kewley, L. J., y Larson, K. L. Theoretical modeling of star-forming galaxies. i. emission-line diagnostic grids for local and low-metallicity galaxies. *The Astronomical Journal*, 139(2):712, 2010.
- [30] MacFadyen, A. y Woosley, S. Collapsars: Gamma-ray bursts and explosions in “failed supernovae”. *The Astrophysical Journal*, 524(1):262, 1999.
- [31] Mahdi, H. The bimodal color distribution of galaxies at redshift of $z = 0-0.15$ from the sloan digital sky survey (sdss). *galaxies*, 6:10, 2018.
- [32] Mandhai, S., Tanvir, N., Lamb, G., Levan, A., y Tsang, D. The rate of short-duration gamma-ray bursts in the local universe. *Galaxies*, 6(4):130, 2018.
- [33] Mannucci, F and Cresci, G and Maiolino, R and Marconi, A and Pastorini, G and Pozzetti, L and Gnerucci, A and Risaliti, G and Schneider, R and Lehnert, M and others. Lsd: Lyman-break galaxies stellar populations and dynamics—i. mass, metallicity and gas at $z \sim 3.1$. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 398(4):1915–1931, 2009.
- [34] Mannucci, F., Salvaterra, R., y Campisi, M. The metallicity of the long grb hosts and the fundamental metallicity relation of low-mass galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 414(2):1263–1268, 2011.
- [35] Meszaros, P. Gamma-ray bursts. *Reports on Progress in Physics*, 69(8):2259, 2006.
- [36] Mirabal, N., Halpern, J., Chornock, R., Filippenko, A. V., Terndrup, D., Armstrong, E., Kemp, J., Thorstensen, J., Tavarez, M., y Espaillat, C. Grb 021004: a possible shell nebula around a wolf-rayet star gamma-ray burst progenitor. *The Astrophysical Journal*, 595(2):935, 2003.
- [37] Murguia-Berthier, A., Ramirez-Ruiz, E., De Colle, F., Janiuk, A., Rosswog, S., y Lee, W. H. The fate of the merger remnant in gw170817 and its imprint on the jet structure. *The Astrophysical Journal*, 908(2):152, 2021.
- [38] Nugent, Anya E and Fong, Wen-fai and Dong, Yuxin and Palmese, Antonella and Leja, Joel and Escorial, A Rouco and Blanchard, Peter K and Paterson, Kerry and Chornock, Ryan and Monson, Andrew and others. The distant, galaxy cluster environment of the short grb 161104a at $z \sim 0.8$ and a comparison to the short grb host population. *The Astrophysical Journal*, 904(1):52, 2020.
- [39] Paterson, K and Fong, W and Nugent, A and Escorial, A Rouco and Leja, J and Laskar, T and Chornock, R and Miller, AA and Scharwächter, J and Cenko, SB

- and others. Discovery of the optical afterglow and host galaxy of short grb 181123b at $z=1.754$: Implications for delay time distributions. *The Astrophysical Journal Letters*, 898(2):L32, 2020.
- [40] Petrosian, V. Surface brightness and evolution of galaxies. *The Astrophysical Journal*, 209:L1–L5, 1976.
- [41] Savaglio, S., Glazebrook, K., y Le Borgne, D. The galaxy population hosting gamma-ray bursts. *The Astrophysical Journal*, 691(1):182, 2009.
- [42] Schiminovich, David and Wyder, Ted K and Martin, D Christopher and Johnson, Benjamin D and Salim, Samir and Seibert, Mark and Treyer, Marie A and Budavári, Tamás and Hoopes, Charles and Zamojski, Michel and others. The uv-optical color magnitude diagram. ii. physical properties and morphological evolution on and off of a star-forming sequence. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 173(2):315, 2007.
- [43] SDSS. The petrosian magnitude, 2010.
- [44] SDSS. Data release 16 (dr16), 2018.
- [45] Shimasaku, Kazuhiro and Fukugita, Masataka and Doi, Mamoru and Hamabe, Masaru and Ichikawa, Takashi and Okamura, Sadanori and Sekiguchi, Maki and Yasuda, Naoki and Brinkmann, Jon and Csabai, Istvan and others. Statistical properties of bright galaxies in the sloan digital sky survey photometric system. *The Astronomical Journal*, 122(3):1238, 2001.
- [46] Smith, L. F., Biermann, P., y Mezger, P. G. Star formation rates in the galaxy. *Astronomy and Astrophysics*, 66:65–76, 1978.
- [47] van der Horst, A. J., Kouveliotou, C., Gehrels, N., Rol, E., Wijers, R. A., Cannizzo, J. K., Racusin, J., y Burrows, D. N. Optical classification of gamma-ray bursts in the swift era. *The Astrophysical Journal*, 699(2):1087, 2009.
- [48] Wright, E. L. A cosmology calculator for the world wide web. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 118(850):1711, 2006.
- [49] Zheng, Z. y Ramirez-Ruiz, E. Deducing the lifetime of short gamma-ray burst progenitors from host galaxy demography. *The Astrophysical Journal*, 665(2):1220, 2007.