

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

CÁLCULO DEL CORRIMIENTO AL ROJO FOTOMÉTRICO DE
GALAXIAS SUBMILIMÉTRICAS ALREDEDOR DE GALAXIAS
DE NÚCLEOS ACTIVOS

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa de
Estudios de Posgrado de Física para optar al grado y título de
Maestría Académica en Astrofísica

FABIÁN CHAVERRI MIRANDA

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2022

Dedicatoria

A Litos por la paciencia,

a Carol por el apoyo

y

a Andrea por creer.

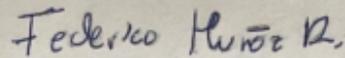
Agradecimientos

Al comité asesor por su invaluable apoyo a esta investigación, muy especialmente a la Dra. I. Aretxaga y la Dra. M. Zeballos por su constante acompañamiento durante la totalidad del proceso de investigación, y a la Dra. L. Taliashvili por su guía y liderazgo.

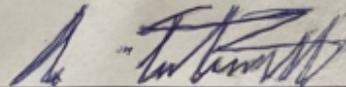
Al Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE) por ofrecer un aporte sustancial durante las pasantías realizadas y su disponibilidad total, principalmente gracias a los proyectos de cooperación bilateral entre INAOE y el Centro de Investigaciones Espaciales de la Universidad de Costa Rica (CINESPA), coordinados por la Dra. Itziar Aretxaga y Dra. Lela Taliashvili.

Finalmente, agradecer de manera muy especial al CINESPA por su importante soporte al proyecto de investigación realizado.

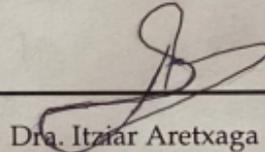
"Esta tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Física de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Académica en Astrofísica."



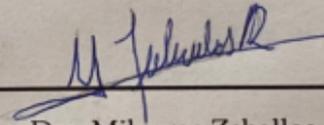
Dr. Federico Muñoz Rojas
**Representante de la Decana
Sistema de Estudios de Posgrado**



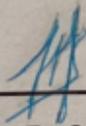
Dra. Lela Taliashvili
Directora de Tesis



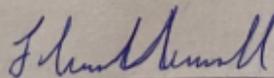
Dra. Itziar Aretxaga
Asesora



Dra. Milagros Zeballos
Asesora



Dr. Jorge Gutiérrez
**Director
Programa de Posgrado en Física**



Fabián Chaverri Miranda
Candidato

Índice general

dedicatoria	II
agradecimientos	III
Hoja de aprobación	IV
Contenidos	V
Resumen	VII
Abstract	VIII
Lista de tablas	IX
Lista de figuras.	X
1 Introducción	1
1.1. Modelo Λ CDM	2
1.2. Corrimiento al rojo	4
1.3. Galaxias elípticas masivas	6
1.4. Galaxias submilimétricas (SMGs)	10
1.4.1. Características principales de las galaxias submilimétricas	10
1.4.2. Determinación de corrimientos al rojo de SMGs	15
1.4.3. Funciones de Luminosidad	16
1.4.4. Distribuciones espectrales de energía SED	18
1.5. Descripción del trabajo	21
2 Simulación del catálogo de galaxias submilimétricas.	23
2.1. Método del rechazo	24
2.2. Función de luminosidad	26
2.3. Comprobaciones del método del rechazo	28

3	Cálculo de corrimientos al rojo.	33
3.1.	Determinación de colores	33
3.2.	Distribuciones de corrimiento al rojo	36
3.3.	Discusión de resultados	40
4	Conclusiones	51
	Bibliografía	54

Resumen

Las galaxias submilimétricas (SMGs) son fuentes que se detectaron por primera vez en los años 90 y se volvieron de mucho interés para la comunidad astronómica debido a sus altas tasas de formación estelar y sus altos corrimientos al rojo, z . Para estudiar una gran cantidad de estas galaxias detectadas en censos de varias decenas y centenas de grados cuadrados, es necesario utilizar telescopios milimétricos. Para obtener sus distancias es necesario observaciones espectroscópicas que pueden llevar mucho tiempo, por lo que, el desarrollo de técnicas fotométricas para la determinación del z de estas poblaciones se vuelve de suma importancia. El siguiente trabajo se basa en la implementación de un algoritmo computacional que permite determinar distribuciones de corrimientos al rojo para galaxias submilimétricas, utilizando sólo observaciones milimétricas y submilimétricas. Este algoritmo utiliza la función de luminosidad de Koprowski et al. [Kop17], $\phi(x)$, para obtener un catálogo simulado de galaxias submilimétricas con corrimientos al rojo entre $0,5 < z < 7$ y con luminosidades a $250 \mu\text{m}$ entre $10^6 < L_{250} < 10^{13} L_{\odot}$.

Se generó un catálogo simulado, que está en concordancia con el número de cuentas observado para este tipo de galaxias a longitudes de onda de $850 \mu\text{m}$. A cada galaxia, se le asigna una distribución espectral de energía representativa, siguiendo recetas propuestas por Casey et al., [Cas12][Cas18], y se logró determinar que el modelo de cuerpo gris es muy eficiente para el modelaje de los SEDs de SMGs. El corrimiento al rojo se estimó a partir de cocientes entre densidades de flujo a determinadas longitudes de onda, que puedan muestrear el pico de la emisión de polvo de estas galaxias submilimétricas. Para corroborar la autoconsistencia del sistema se calculó el z_{phot} para 250 galaxias, elegidas aleatoriamente del propio catálogo. Uno de los principales aportes de la presente investigación es la actualización del método para la generación de galaxias sintéticas y la estimación de corrimientos al rojo fotométricos, utilizando un lenguaje de programación más actual y versátil.

Abstract

Submillimeter galaxies (SMGs) were first detected during the 90s, their great star formation rates and high redshift quickly became of great interest for the astronomical community. The observation of these galaxies is made with censuses of hundreds of square degrees using millimeter telescopes, and as expected, to determine the distance to these populations a spectroscopic analysis is needed, which usually consume long periods of observation. In order to reduce the usage of observational time, photometric techniques for z determination regained importance with the discovery of the SMGs. This work implements a new algorithm that determines the redshift distributions for SMGs using submillimeter and millimeter observations. The algorithm uses the luminosity function proposed by Koprowski et al. [Kop17], $\phi(x)$, in order to create a simulated submillimeter galaxy catalog with $0,5 < z < 0,7$ and a $250 \mu\text{m}$ luminosity between $10^6 < L_{250} < 10^{13} L_{\odot}$.

The catalog replicates the galaxy number counts for these type of galaxies at $850 \mu\text{m}$. Each galaxy of the catalog has a particular spectral energy distribution (SED) assigned, following Casey et al. recipes [Cas12][Cas18], we managed to demonstrate that the gray body model is very efficient for the modelling of the SEDs of SMGs. The redshift was calculated by flux density ratios at chosen wavelengths, which properly sample the maximum of the dust emission for the submillimeter galaxies. Self consistency of the algorithm was tested by calculating the photometric redshift z_{phot} of 250 galaxies, which were randomly chosen from the original catalog. The main input of these research was the computational method update for the generation of synthetic galaxies and the estimation of photometric redshift using a simpler and more versatile programming language.

Lista de tablas

1.1. Parámetros del modelo de Schechter en la función de luminosidad de Koprowski.	17
---	----

Lista de figuras

1.1. Curvas de rotación para galaxias espirales	4
1.2. Ejemplo de galaxia espiral, M81	7
1.3. Ejemplo de galaxia irregular, NGC 292	8
1.4. Ejemplo de galaxia elíptica, M87	9
1.5. Distribuciones de corrimiento al rojo de galaxias submilimétricas	11
1.6. Distribución de energía espectral de la galaxia ARP220	18
1.7. Modelos de SED contruidos por medio de una simulación	20
2.1. Muestreo utilizando el método del rechazo	25
2.2. Efecto de la luminosidad L sobre la función de luminosidad	27
2.3. Efecto del corrimiento al rojo z sobre la función de luminosidad	28
2.4. Diferentes muestreos utilizados en la simulación	29
2.5. Número de cuentas a $850 \mu\text{m}$ simuladas	31
3.1. Distribuciones de temperatura de polvo	34
3.2. Diagramas color color para galaxias simuladas con temperatura de polvo entre 17.76 y 51.38 K	35
3.3. Diagramas color color para galaxias del catálogo simulado	38
3.4. Distribución de corrimiento al rojo para una galaxia de $z = 1,128$	39
3.5. Diagramas color color para galaxias del catálogo simulado	41
3.6. Distribución de corrimiento al rojo para una galaxia de $z = 1,576$	42
3.7. Diagramas color color para galaxias del catálogo simulado	43
3.8. Distribución de corrimiento al rojo para una galaxia de $z = 2,653$	44
3.9. Diagramas color color para galaxias del catálogo simulado	45
3.10. Distribución de corrimiento al rojo para una galaxia de $z = 3,110$	46
3.11. Relación entre la temperatura del polvo y la luminosidad infrarroja para SMGs	48
3.12. Corrimiento al rojo fotométrico versus corrimiento al rojo real	50



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

SEP Sistema de
Estudios de Posgrado

Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.

Yo, Fabían Chaverri Miranda, con cédula de identidad 115330282, en mi condición de autor del TFG titulado Cálculo del Corrimiento al rojo fotométrico de galaxias subcompactas alrededor de galaxias de núcleos activos.

Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. SI NO *

*En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: _____ año (s).

Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.

Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi Director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.

FIRMA ESTUDIANTE

Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declare contrario a la verdad de lo que manifiesta, puede como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 318 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no sólo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.

1 Introducción

La teoría sobre la formación y evolución de galaxias es un tema que se ha mantenido relevante desde las observaciones de Edwin Hubble sobre la naturaleza extragaláctica de nebulosas espirales y su posterior clasificación morfológica de galaxias, realizada en 1926. Nuevas teorías han surgido con el tiempo para intentar explicar los diferentes fenómenos que se observan en las galaxias. A su vez se han detectado nuevas poblaciones de galaxias que han expandido el horizonte marcado por Hubble originalmente.

Claramente, las teorías actuales de formación y evolución galáctica se enmarcan en los modelos cosmológicos, siendo el más aceptado el modelo Lambda Cold Dark Matter (Λ CDM), el cual propone que la densidad inicial del Universo no era perfectamente homogénea y que por los efectos de la gravedad ejercida por materia oscura se generó una agregación de la masa alrededor de fluctuaciones primordiales desarrollando el Universo que se puede observar hoy [Ric09]. Bajo este paradigma, los halos de materia oscura se formaron en un rango amplio de masas, obligando a la materia bariónica a caer en sus pozos de potencial. Debido a que las fluctuaciones de densidad sucedieron inicialmente a escalas pequeñas, la estructura cósmica empezó a formarse jerárquicamente, apareciendo primero los objetos más pequeños, los que luego, al fusionarse con objetos aledaños formaron estructuras de mayor tamaño y terminaron en las galaxias como las observamos actualmente. En este modelo se espera entonces, que las galaxias más masivas se formen por fusiones de galaxias más pequeñas.

Es de interés para este trabajo de tesis, estudiar las propiedades de un tipo muy particular de galaxias, las muy polvorientas con altas tasas de formación estelar. Estas pueden ser clave para determinar la historia de formación estelar de las galaxias más masivas, ya que tienen características que las colocan como posibles progenitoras de estas galaxias[Mic10][Tof14][Wil17] [Zeb18][Fra20]. Estudiarlas supone entonces una pieza importante en el estudio general sobre formación y evolución de estructura del Universo.

1.1 Modelo Λ CDM

Antes de ahondar en el tema de las galaxias submilimétricas, repasemos primero algunos conceptos importantes sobre el modelo Λ CDM.

Comprender cómo se ha distribuido la materia desde el nacimiento del Universo hasta el día de hoy es uno de los retos más importantes de la Física y Astronomía. En 1965 se hacen las primeras observaciones de la radiación de fondo de microondas, CMB por sus siglas en inglés Cosmic Microwave Background, la cual es considerada como la evidencia observacional más importante del Big Bang [Mis17]. En los años siguientes se logran desarrollar las mediciones de la estructura a gran escala y las observaciones del agrupamiento (clustering) de galaxias y esto inevitablemente derivó en el desarrollo de varias teorías para intentar explicar estos fenómenos [Sch07]. El modelo más aceptado hoy en día es el Λ CDM, esto debido a que logra explicar satisfactoriamente, entre otras cosas, la radiación de fondo de microondas y la estructura a gran escala.

Para entender el modelo deben considerarse los conceptos de materia oscura fría y energía oscura. La materia oscura fría se compone de partículas lentas, es decir, que se mueven a velocidades no relativistas, de ahí el término fría, las cuales tienen solo interacciones gravitacionales con la materia bariónica. La razón entre la densidad de materia oscura fría y la densidad crítica Ω_{CDM} , que es el valor de densidad para detener la expansión del Universo en ausencia de energía oscura después de un tiempo infinito (con lo que se tiene un Universo plano), es [Ade16]:

$$\Omega_{CDM} = 0,233 \pm 0,0223. \quad (1.1)$$

Uno de los problemas es que aún no se han podido detectar estas partículas, lo que las hace una de las predicciones más fuertes, derivadas de la cosmología. Considerando que la densidad de material total se constituye a partir de la materia oscura fría y la materia bariónica, tenemos:

$$\Omega_M = \Omega_{CDM} + \Omega_b = 0,308 \pm 0,012 \quad (1.2)$$

De (1.1) y (1.2) podemos asegurar que la materia oscura fría constituye aproximadamente el 85 % de la materia existente. Si bien no ha sido detectada, la materia oscura explica una serie de efectos importantes. Primero, la diferencia que se obtiene al calcular la masa de cúmulos de galaxias, utilizando la cantidad de luz proveniente de sus estrellas y las velocidades peculiares de sus galaxias, además del grado de desviación de los rayos de luz provenientes de objetos lejanos (efecto de lente gravitacional) [Ric09]. Segundo, las curvas de rotación de las galaxias espirales, correspondientes a la velocidad orbital en la dirección radial en función de la distancia al centro de la galaxia. Teóricamente se espera que la velocidad orbital de los cuerpos en una galaxia disminuya al aumentar la distancia entre dicho cuerpo y el centro galáctico. Esto es fácil de calcular, si se iguala la fuerza gravitatoria ejercida por el centro galáctico sobre algún cuerpo de estudio, a la fuerza centrípeta sentida por el mismo objeto al moverse en una órbita alrededor del mismo centro [Com04]

$$\frac{GMm}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

$$\therefore v \propto r^{-1/2}. \quad (1.3)$$

De (1.3) es lógico predecir que la velocidad va a disminuir al incrementar el radio, sin embargo esto no es lo observado en las galaxias espirales. Como se ve en la figura 1.1, la velocidad se vuelve prácticamente constante después de cierto radio. Para que esto se cumpla, se necesitaría una cantidad mucho mayor de masa observable que la que se ha detectado. La explicación actual es que este fenómeno se debe al efecto gravitacional que genera la materia oscura, la cual conforma los halos esféricos de las galaxias. También, la materia oscura tiene efectos medibles en las anisotropías de la radiación de fondo de microondas, y por lo tanto, explica el agrupamiento de galaxias que vemos en el Universo.

El otro concepto necesario de entender es el de la energía oscura, la cual se puede definir como una energía asociada al vacío que se encarga de acelerar la expansión del Universo. La razón entre la densidad de energía oscura y la densidad crítica es [Ade16]

$$\Omega_{\Lambda} = 0,692 \pm 0,012 \quad (1.4)$$

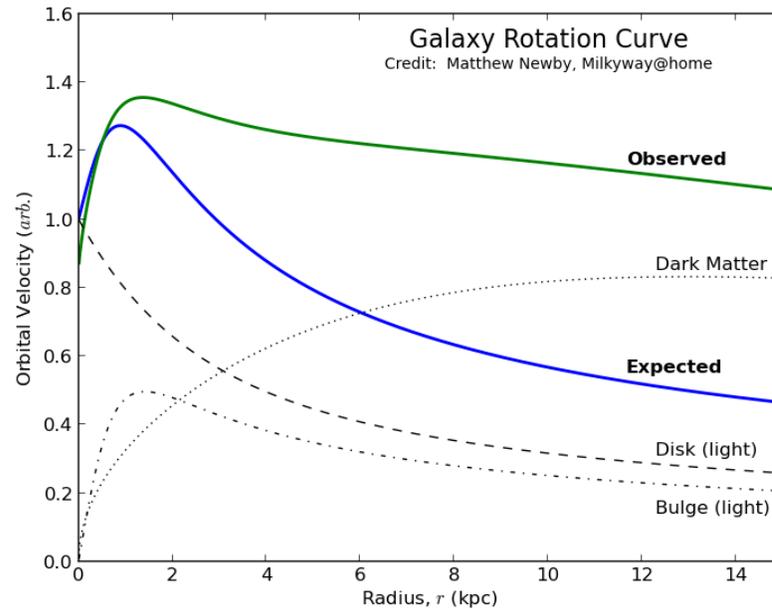


Figura 1.1: Curvas de rotación de varias galaxias espirales en función de la distancia desde el núcleo galáctico [Cas14].

Se puede ver entonces de (1.2) y (1.4) que la combinación de la energía y materia oscura componen aproximadamente el 95% del Universo conocido [Ric09].

En el modelo Λ CDM, la curvatura espacial del Universo es practicamente 0, por lo que el modelo supone un Universo plano. Con este modelo cosmológico se obtiene una edad del Universo de $13,75 \pm 0,11$ Gyr, en el cual las primeras galaxias se formaron probablemente a un $z \sim 20 - 50$ [Ben10].

1.2 Corrimiento al rojo

En 1929, el astrónomo Edwin Hubble postuló que el Universo se expandía de modo tal, que cada galaxia se aleja de nosotros a una velocidad proporcional a su distancia. La velocidad de una galaxia se mide a través de su corrimiento al rojo, que es un fenómeno que sucede cuando la luz en cualquier parte del espectro electromagnético se desplaza hacia el rojo. Esto no se refiere exclusivamente al rojo de la parte óptica, sino en general a un aumento de la longitud de onda de la luz detectada por el observador,

con respecto a la luz emitida originalmente por la fuente. Básicamente esto quiere decir, que la longitud de onda emitida es menor a la observada.

El corrimiento al rojo normalmente se explica através del efecto Doppler, cuando la fuente emisora de luz se está alejando del observador en la Tierra. En el caso de la expansión del Universo, el observador no ve un incremento en la longitud de onda debido a las velocidades relativas entre el observador y la fuente, sino que este efecto se debe a que el espacio por el que viaja la luz está en constante expansión. La explicación de este efecto en el marco de la cosmología física utiliza un parámetro llamado el factor de escala cósmico, el cual depende del tiempo y es propio de la métrica de Friedman Lemaitre Robertson Walker [Mis17]:

$$1 + z = \frac{a(t_0)}{a(t_e)}, \quad (1.5)$$

donde z es el corrimiento al rojo, $a(t_0)$ es el factor de escala al momento de observar la luz y $a(t_e)$ es el factor de escala al momento de que la luz fue emitida.

A nivel observacional existen diferentes técnicas que permiten encontrar el z de una fuente. El corrimiento al rojo espectroscópico, z_{spec} , es el método más directo. Consiste en utilizar el espectro obtenido para dicha fuente y calcular el desplazamiento en frecuencia que tienen las líneas de absorción o emisión, con respecto a sus posiciones originales en un marco de referencia en reposo o de laboratorio. Por ejemplo, la línea de emisión Lyman-alfa es una línea espectral del átomo de hidrógeno que se emite cuando el único electrón pasa de un orbital $n = 2$ al estado fundamental ($n = 1$). Durante esta transición se emite un fotón a 1215.67 \AA . Ahora bien, si una galaxia a un $z = 3$ emite fotones Lyman-alfa, entonces en la Tierra serían detectados a una longitud de onda 4862.68 \AA . Si bien es cierto que este método es el más preciso para encontrar el corrimiento al rojo de cuerpos lejanos, no es muy económico observacionalmente, ya que el tiempo de observación de la fuente debe ser grande para poder obtener un espectro con buena señal a ruido. Por lo tanto, realizar censos espectroscópicos de un gran número de fuentes extragalácticas se vuelve muchas veces impráctico [FS01].

Es por esto que el método que se utilizará en la presente investigación para determinar

el corrimiento al rojo de galaxias submilimétricas será el del corrimiento al rojo fotométrico, z_{phot} , el cual no necesita del espectro del cuerpo, sino que utiliza la fotometría de la fuente, obtenida a partir de imágenes con distintos filtros. El corrimiento al rojo fotométrico se basa en la detección de particularidades en los espectros, por ejemplo el salto de Balmer (salto a aproximadamente los 4000 Å) y el decrecimiento de Lyman (alrededor de los 900 y 1200 Å), de tal forma que la estimación de z depende de los cambios en la densidad de flujo, detectados en una serie de filtros distribuidos a lo largo de una parte del espectro electromagnético [Cas14]. El z_{phot} también se puede estimar a partir del espectro formado por la emisión de polvo encontrado en las galaxias submilimétricas. Esta técnica será la utilizada para determinar el z de las galaxias en estudio. A partir del final de los 90, se retoma la relevancia de esta técnica en la astronomía observacional milimétrica, debido a la posibilidad de realizar censos de campos profundo, en los cuales se detectaron galaxias fuertemente oscurecidas por polvo, a las que era muy difícil o prácticamente imposible observarles líneas de emisión o absorción en el UV/óptico, y por lo tanto determinar sus corrimientos al rojo espectroscópicos resultaba una tarea ardua [Are03].

1.3 Galaxias elípticas masivas

Para poder hacer un correcto estudio de las características de las galaxias, éstas se debieron clasificar. En 1926 Hubble propone una secuencia basada en la morfología de las galaxias observadas en ese momento. De hecho para su clasificación se sugiere una posible relación entre las morfología de las galaxias y su etapa evolutiva, sin embargo esta relación no fue propuesta por Hubble y no es real. La secuencia o la clasificación de Hubble divide las galaxias en tres tipos generales: galaxias elípticas (E), galaxias espirales (S) y las irregulares (Irr).

Las galaxias espirales están caracterizadas por los largos brazos en forma espiral, que giran alrededor de un bulbo central de mayor luminosidad. Generalmente son cuatro brazos opuestos que se acomodan de manera casi simétrica con respecto al centro, estos brazos se van abriendo en función de la distancia radial, medida desde el centro galáctico. Las espirales tienden a ser galaxias con una masa entre $M \sim 10^9 - 10^{12} M_{\odot}$.

[Car06].



Figura 1.2: La galaxia M81 es una galaxia espiral clásica. [Com04]

La figura 1.2 deja claro que los colores en una galaxia espiral varían bastante, esto debido a que estas galaxias tienen grandes poblaciones de estrellas, tanto jóvenes de color azul como estrellas viejas de colores más rojizos. En las galaxias espirales, la abundancia de polvo y gas es importante, esto se refleja en los brazos que muestran una mayor formación estelar. Es en estas galaxias donde se estudian las curvas de rotación, como en la figura 1.1, para demostrar la existencia de materia oscura. Es necesario recordar que nuestra galaxia, la Vía Láctea, es de este tipo y el Sol se ubica en uno de sus dos brazos a aproximadamente unos 8 kpc de distancia con respecto al centro galáctico. [Com04]

Por otra parte, las galaxias irregulares no tienen una forma definida, en general poseen nubes de polvo y gas, lo que las hace lugares óptimos para el nacimiento de nuevas estrellas. El color azulado, que domina este tipo de galaxias, se debe a la alta formación estelar, como se puede ver en la figura 1.3. Existen galaxias irregulares, que son el producto de galaxias espirales o elípticas, que sufrieron algún tipo de interacción gravitacional, provocando así su irregularidad, esto hace que algunas tengan una población de estrellas viejas más significativa. [Sch07]



Figura 1.3: La pequeña nube de Magallanes es un ejemplo clásico de una galaxia irregular. [Com04]

Finalmente, las galaxias elípticas tienen una estructura definida que tiende a observarse como una elipsoide, por lo que es posible calcular los semiejes y así, averiguar la excentricidad de dicha galaxia. Las galaxias elípticas tienen masas que pueden ir entre $M \sim 10^8 - 10^{13} M_{\odot}$. Además, presentan un brillo tenue y que se reduce con el radio de la galaxia. Un tipo particular de estas galaxias son las cD y pertenecen al grupo de galaxias más masivas que existen, además de ser también las más luminosas. Este tipo de galaxias elípticas se encuentran típicamente en el centro de cúmulos de galaxias, por lo que proporcionan una relación entre la morfología de la galaxia y el ambiente en el que evolucionan [Sch07][Com04].

Es posible ver en la figura 1.4, que las galaxias elípticas tienen un tono rojizo. Este es el típico color asociado a las elípticas. Existen algunas excepciones, pero en general, las elípticas están formadas por una población dominante de estrellas muy viejas de tonos rojizos. En el pasado se creía que estas galaxias no tenían polvo o gas frío, sin embargo investigaciones recientes han encontrado estos dos componentes en cantidad muy bajas en comparación con la población de estrellas. Al haber poco gas disponible para la formación estelar, estas galaxias tienen tasas de formación estelar (SFR) bajas [Car06], por lo que la población de estrellas jóvenes es baja.

Para esta investigación habrá particular interés en las galaxias elípticas muy masivas,



Figura 1.4: Galaxia M87, ejemplo de una galaxia elíptica masiva.[Com04]

las cuales son los sistemas galácticos más masivos que se pueden observar en el Universo local, con $M_* > 10^{12} M_\odot$. La homogeneidad en varias características observacionales de estas galaxias, por ejemplo la relación color-magnitud y el plano fundamental, sugieren que estas galaxias se formaron en un solo intenso brote de formación estelar a $z > 2$ [DL06]. Sin embargo, existen simulaciones que muestran la posibilidad de una formación a partir de la fusión de dos galaxias espirales con masas similares [Naa06]. Es decir, existe aún mucho camino por recorrer en el estudio de la formación y evolución de este tipo de galaxias.

Adicionalmente, se han encontrado algunas galaxias con características similares a las elípticas masivas (con población estelar vieja y con muy poca formación estelar) pero a corrimientos al rojo elevados, con $z \sim 2 - 3$ [Sim15]. Esto implica que la formación de estas galaxias tuvo que suceder a una edad muy temprana del Universo, probablemente a $z \sim 5 - 6$, es decir apenas a $\sim 1 \text{ Gyr}$ del Big Bang, teniendo poco tiempo para formar esa población estelar tan masiva [Gla17]. Por lo tanto, la formación estelar de estas galaxias tuvo que haber sucedido de manera muy violenta, en un lapso muy corto de tiempo. Estos indicios muestran que las progenitoras de las galaxias elípticas masivas son probablemente una población de galaxias, localizada en el universo temprano ($z > 2$), capaz de formar estrellas masivas de manera intensa y en plazos cortos

de tiempo.

Una población de galaxias con las características mencionadas es justamente la población de galaxias submilimétricas (SMGs). Se cree que estas pueden ser las progenitoras de las elípticas masivas porque, como se verá más adelante, presentan masas estelares grandes, importantes tasas de formación estelar para su z y se ha observado que algunas de ellas provienen de fusiones de galaxias menores.

1.4 Galaxias submilimétricas (SMGs)

1.4.1 Características principales de las galaxias submilimétricas

Para el estudio de las progenitoras de las galaxias elípticas masivas es posible considerar como guía o indicador de ubicación, las radio galaxias y cuásares muy potentes. Esto debido a que, estas galaxias activas (AGNs) son muy luminosas y generalmente residen en zonas de gran densidad de masa del Universo, por lo que es posible que otros objetos muy masivos, como las galaxias elípticas masivas, se formen alrededor de estos cuerpos.[Bau07][Lac10][Zeb18]

La etapa de formación de una galaxia está caracterizada por la presencia de polvo, ese polvo va a absorber los fotones UV y espectro visible proveniente de las estrellas masivas recién formadas y los va a reemitir a longitudes de onda en el infrarrojo lejano, con el pico de emisión alrededor de $\lambda = 60 - 100 \mu\text{m}$. Sin embargo, debido a la expansión del Universo, este pico de emisión, proveniente de galaxias a altos corrimientos al rojo se observa en la Tierra a longitudes de onda submilimétricas. Cuando se lograron desarrollar detectores que podían observar en estas longitudes de onda, se detectó una gran cantidad de galaxias nuevas, muy oscurecidas por polvo y con altas tasas de formación estelar. Estas galaxias estaban tan oscurecidas por polvo que prácticamente era muy difícil encontrar sus contrapartes en el ultravioleta u óptico, razón por la cual no se habían detectado con anterioridad. A esta población de galaxias se les denominó galaxias submilimétricas (SMGs) [Cas14].

Estudios posteriores acerca de esta población revelaron que su distribución de z , la que

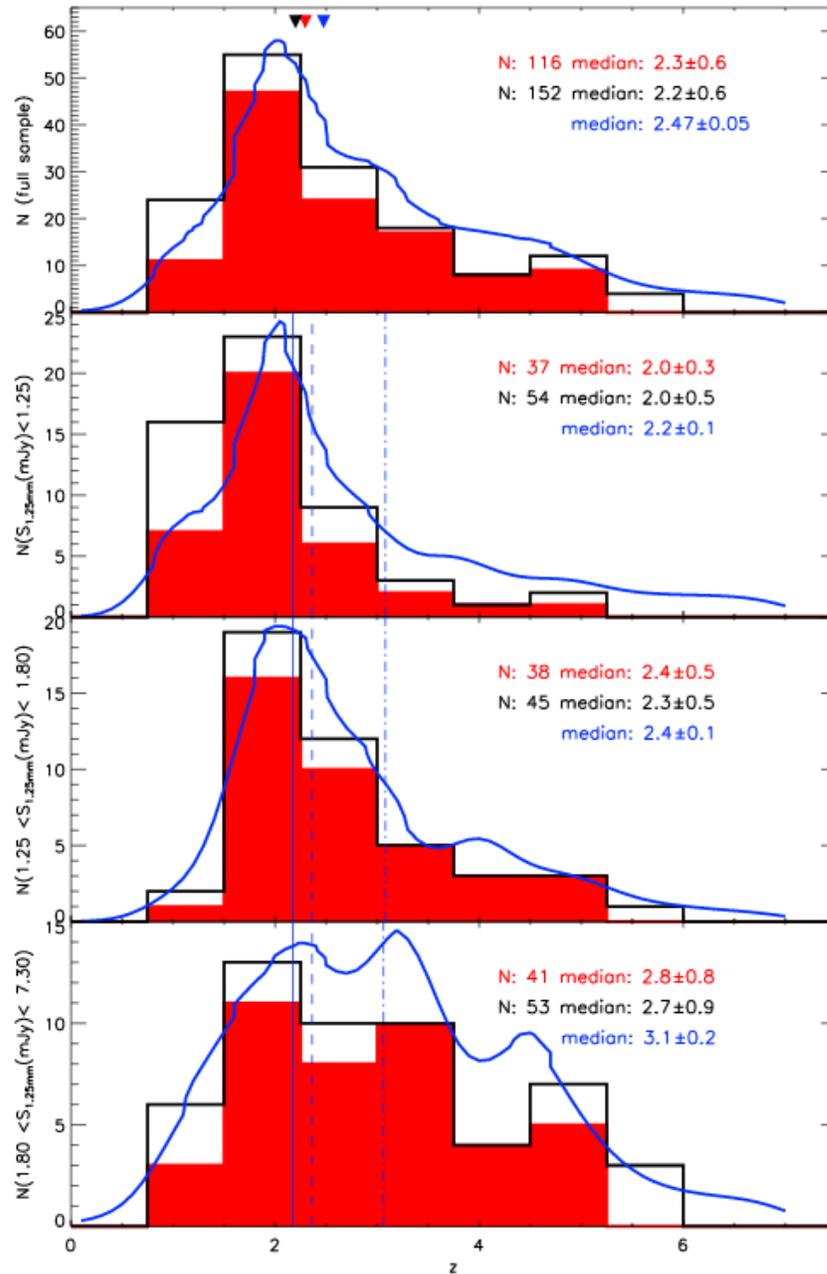


Figura 1.5: Distribución del z para una población de galaxias submilimétricas. El panel de arriba muestra la distribución para toda la población de galaxias, el segundo muestra la distribución para galaxias con densidades de flujo menores a 1.25 mJy, el tercero utiliza filtros para valores entre 1.25 y 1.8 mJy, y el cuarto es para galaxias con densidades de flujo mayores a 1.8 mJy. Los histogramas de color rojo muestran galaxias con valores de z , calculados con espectroscopia y fotometría. Los histogramas negros incluyen también fuentes milimétricas, con contrapartes en radio. Finalmente, la curva de color azul es la función de densidad de probabilidad de corrimiento al rojo, obtenida en este estudio [Bri17] para la muestra completa de galaxias.

se puede ver en la figura 1.5, tiene un pico entre $z \sim 2 - 3$, con una cola hacia z más altos. El primer panel de la figura 1.5 muestra la distribución de corrimientos al rojo para la totalidad de la muestra utilizada (observaciones realizadas a 1,25 mm), mientras que los paneles 2, 3 y 4 muestran las distribuciones de corrimiento al rojo para esa misma muestra, pero separada en tres diferentes bins de densidad de flujo: $S_{1,25\text{mm}} < 1,25$ mJy; $S_{1,25\text{mm}} < 1,8$ mJy y $S_{1,25\text{mm}} < 7,3$ mJy.

Determinar las características del polvo que se aloja en estas galaxias no es una tarea inmediata. Observaciones recientes han determinado que en general, los SED de galaxias a mayores z son más calientes [Lia19]. Por su parte, para galaxias en el Universo local, el polvo se encuentra distribuido de una forma mucho más compacta.[Mo10]

Existe una relación inversa entre la longitud de onda pico de emisión de polvo λ_{peak} con respecto a la temperatura del polvo y la luminosidad en el infrarrojo de la galaxia, esto hace que fuentes con mayor luminosidad parezcan más calientes. La masa de polvo disponible en la galaxia a su vez, tiene sus propias dificultades para ser calculada, en particular por la falta de datos fotométricos en el infrarrojo lejano (FIR) de muchas de estas poblaciones galácticas. Sin embargo, se pueden estimar valores a partir de la temperatura encontrada del polvo y métodos recientes con observaciones en el FIR del telescopio Herschel, que estiman que para galaxias con $T_{dust} \approx 30 - 50$ K, la masa del polvo es de $M_{dust} \approx 1 - 20 \times 10^8 M_{\odot}$. [Cas12]

Una característica importante de las galaxias en general, es la masa estelar, la cual es la masa exclusivamente asociada a las estrellas que se encuentran en la galaxia. Para fuentes a z alto este tema es de constante debate, ya que las incertidumbres en el cálculo de las masas estelares no solo depende de constreñimientos observacionales, sino también de componentes teóricas, relacionadas con el modelamiento de estas poblaciones estelares. Existen tres componentes principales en las técnicas de modelaje de la luz estelar. La historia de formación estelar (SFH, por sus siglas en inglés Star Formation History), primer componente, es como lo dice su nombre es una suposición de la formación de estrellas durante la vida de la galaxia. Algunas de las suposiciones típicas que se utilizan, se refieren a historias de formación estelar, que declinan exponencial-

mente en el tiempo, historias de formación estelar constantes, estallidos de formación estelar únicos pero muy violentos, o incluso una composición de varios de estos. Una suposición razonable suele ser una historia de formación estelar tipo lognormal, calibrada usando la masa del halo de la galaxia, y combinada con un estallido violento como segundo componente [Cas14].

La síntesis de población estelar (SPS, por sus siglas en inglés Stellar Population Synthesis) es otro componente importante, la cual se refiere a los tipos de estrellas que se encuentran en la galaxia. Para construir poblaciones estelares sintéticas de galaxias, se deben tener en cuenta una serie de factores, como la historia de formación estelar, espectros estelares para estrellas de diversas masas, temperaturas, metalicidades, así como la cantidad y características del polvo. Claramente, al ir agregando factores a los modelos de síntesis, se agregan sus propios niveles de incertidumbre.

Finalmente, hay que tomar en cuenta la función de masa inicial (IMF, por sus siglas en inglés Initial Mass Function), la cual consiste en la distribución de las masas de los tipos de estrellas, en el momento de su nacimiento cuando se forma una nueva población estelar [Sch07][Mo10]. El tema de la IMF está también abierto a mucho debate, ya que resultados observacionales y modelos teóricos que han intentado describirla para objetos altamente oscurecidos a altos corrimientos al rojo, han arrojado resultados muy variados. Se suele suponer que la IMF para este tipo de galaxias difiere de la IMF determinada para la Vía Láctea (es decir, que la IMF varía dependiendo de las características físicas de las galaxias), y que ésta suele favorecer a las estrellas más masivas sobre las menos masivas [Bau07] [Tac08][Nar13]. Sin embargo, existen resultados teóricos que apuntan a que se pueden reproducir números de cuenta de SMGs, utilizando una IMF similar a la local [Hay13].

Estas incertidumbres en la determinación de la IMF y en la historia de formación estelar de las SMGs pueden ocasionar incertidumbres en la determinación de masas estelares de un factor 2 - 3. Existen estimaciones del orden de las masas de estas galaxias, que puede oscilar entre los $M \sim 10^{11} - 10^{12} M_{\odot}$. [Cas14]

Habiendo visto las principales características de las SMGs, y comparándolas con las principales características de las galaxias elípticas masivas que vimos en la sección 1.3, es posible observar que las altas tasas de formación estelar $SFR > 100 - 1000 M_{\odot} yr^{-1}$ de las SMGs permitirían formar, quizás en un solo brote de formación estelar violento, las enormes masas estelares que vemos en las galaxias elípticas masivas. Asimismo, debido a la enorme luminosidad infrarroja de las SMGs ($L > 10^{12} L_{\odot}$), y a las estimaciones de sus grandes masas estelares, se observa que estas galaxias son galaxias masivas en sí mismas, por lo que pueden fácilmente evolucionar a elípticas masivas a $z = 0$. Por último, es importante destacar que las SMGs son una población de galaxias predominantemente del Universo temprano ($z > 1$), por lo que coinciden temporalmente con las progenitoras de las elípticas masivas. Por todo esto, es posible inferir, que las galaxias submilimétricas podrían ser unas muy buenas candidatas a ser estas progenitoras tan buscadas [Wil17][Tof14][Zeb18].

Las galaxias submilimétricas son relevantes para este estudio ya que son consideradas las principales antecesoras de las galaxias elípticas masivas. Al determinar la distribución de los corrimientos al rojo de las fuentes submilimétricas, encontradas alrededor de los AGN, se busca confirmar esta relación. Determinar el corrimiento al rojo de poblaciones de SMGs de $z \sim 4 - 6$, podría explicar las observaciones encontradas de elípticas masivas a $z \sim 2 - 3$.

La importancia de este trabajo radica en el análisis de la densidad de SMGs alrededor de AGNs apoya la teoría de que las SMGs pueden ser las progenitoras de las elípticas masivas. Sin embargo, este análisis fue realizado solo en dos dimensiones [Zeb18], por lo que es necesario determinar el z de estas galaxias, para comprobar si existe una conexión física entre la posición de los AGN y la población de las SMGs y si el conjunto evolucionará plausiblemente a un cúmulo de galaxias.

El análisis fotométrico realizado para las galaxias de interés se hará por medio de ajuste para las distribuciones espectrales de energía (SED) de las galaxias. Estas distribuciones son gráficas que muestran la energía irradiada en función de la longitud de onda. Se han realizado numerosos análisis para determinar la exactitud de estos métodos, al

comparar los corrimientos al rojo fotométricos (z_{phot}) con los z determinados por espectroscopía. [Bol00] Existen varias propuestas para estudiar los SED, las simulaciones numéricas es una de las más utilizadas, por lo que algoritmos basados en el método de Monte Carlo han sido usados para calcular el z_{phot} de galaxias lejanas a partir del ajuste de SED [Hug02].

1.4.2 Determinación de corrimientos al rojo de SMGs

En este trabajo de tesis nos enfocaremos en cómo determinar corrimientos al rojo fotométricos de las SMGs. Para ello es imprescindible describir cuáles han sido hasta el momento las técnicas más usadas. Con la primera observación de SMGs se han desarrollado técnicas de ajuste para la estimación de rangos de corrimiento al rojo para dichas poblaciones galácticas. Durante la década de los 2000, las SMGs se identificaban a una longitud de onda en el rango del lejano infrarrojo y milimétrico. Las contrapartes en el radio eran utilizadas usualmente para identificar las contrapartes en el resto de longitudes de onda. Como no había tantos datos observacionales, se utilizaba principalmente el template de Arp220 para ajustar las observaciones encontradas y hacer estimaciones de z [Cas20].

Con el aumento de los datos observacionales, métodos más complejos empezaron a volverse más importantes. La técnica de ajuste, utilizando distintos SEDs con diferente longitud de onda pico de emisión de polvo, aplicando una función de luminosidad para la distribución de los colores de las galaxias fue utilizada primeramente en 2002 [Hug02]. Con base en los parámetros iniciales del catálogo original de SEDs, se logran desarrollar simulaciones de galaxias con diferentes SED asociados, permitiendo así comparar contra nuevas observaciones y generar ajustes más reales en cuanto a la estimación del z y la incertidumbre asociada a la estimación. En Aretxaga et al. se extendi[o el número de SEDs y se consideró además el cambio de pendiente entre la emisión del polvo y la emisión sincrotrón y free-free del radio. [Are03].

Finalmente, existe un modelo interesante, basado en la emisión en el lejano infrarrojo. Utilizando una muestra de 16 SMGs, con un valor de corrimiento al rojo espectrocópico

conocido, se hace un ajuste parabólico inverso, para poder estimar la longitud de onda pico de emisión de polvo. Con ese valor es posible ajustar de manera lineal la longitud de onda con el z y la incertidumbre asociada al modelo tiene que ver con la dispersión del ajuste lineal [Bri17] [Cas20].

Para este trabajo se usará como base el modelo de ajuste, utilizando diversos catálogos de SED y será de suma importancia el uso de una función de probabilidad, que describa correctamente la distribución de las galaxias. El modelo se basará en la técnica utilizada por Hughes et al. [Hug02] y Aretxaga et al. [Are03] actualizando los catálogos de los SED y generando una población de galaxias submilimétricas simuladas de mayor tamaño y con una función de probabilidad más acorde a las observaciones actuales.

1.4.3 Funciones de Luminosidad

Como se mencionó en la sección anterior, el método que se utilizará en esta tesis para determinar el corrimiento al rojo fotométrico de SMG, requiere que asumamos una función de luminosidad, la cual consiste en una distribución de probabilidad, que describe el número de galaxias observables dependiendo de la luminosidad propia de la galaxia por unidad de volumen. Estas funciones se construyen a partir de datos de forma que, al integrar sobre estas funciones se pueda obtener el número de galaxias por grado cuadrado, para una longitud de onda específica. La mejoría en las observaciones submilimétricas y milimétricas ha permitido que se hayan desarrollado funciones de luminosidad cada día más precisas, las cuales consideran efectos importantes como el corrimiento al rojo propio de la galaxia.

Es por esto que se le ha hecho un análisis exhaustivo a la función de luminosidad, que se utilizará de forma que se tenga claro el rango de efectos de cada variable sobre dicha función. Se determinó utilizar la función para SMGs dependiente de L y z de Koprowski et al. [Kop17], esto debido a que recopila los números de cuenta más actualizados a $850 \mu\text{m}$ y 1.3 mm . Primeramente hay que hacer la salvedad, que la función de luminosidad está descrita por la siguiente función de Schechter:

$$\Phi_{Sch} = \Phi_{\star} \left(\frac{L}{L_{\star}} \right)^{\alpha} \exp \left(\frac{-L}{L_{\star}} \right) \quad (1.6)$$

donde L se refiere a la luminosidad a $250 \mu\text{m}$ de la población de galaxias. Esta longitud de onda se utiliza ya que nominalmente se están detectando fuentes a $850 \mu\text{m}$ de forma que, en el marco de referencia en reposo para el z promedio que se va a trabajar, la longitud de onda correspondiente es de $250 \mu\text{m}$, $\alpha = -0,4$ y los términos Φ_* y L_* se definen a continuación:

$$\Phi_*(z|A, \sigma, \mu) = \frac{A}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp -\frac{(z - \mu)^2}{2\sigma^2} \quad (1.7)$$

$$\log(L_*(z|a, b)) = az + b. \quad (1.8)$$

El modelo se define de acuerdo a dos parámetros Φ_* y L_* , que se pueden expresar en función de otros parámetros que se ven en la tabla 1.1. De esta forma es posible determinar la distribución de galaxias, que se encuentran en cierta región del cielo, en función de la luminosidad y el corrimiento al rojo.

Parámetro	Valor
A ($\text{Mpc}^{-3}\text{dex}^{-1}$)	$2,40^{+0,60}_{-0,48} (\times 10^{-3})$
σ	$1.04^{+0,06}_{-0,05}$
μ	$1.28^{+0,20}_{-0,25}$
a (WHz^{-1})	$0.19^{+0,02}_{-0,02}$
b (WHz^{-1})	$25.03^{+0,06}_{-0,05}$

Tabla 1.1: Parámetros del modelo de Schechter en la función de luminosidad de Koprowski.

Las ecuaciones (1.7) y (1.8) están definidas para el rango de $0,5 < z < 4,5$, sin embargo para este trabajo se extrapolaron los límites de z en el rango $0,5 < z < 7$, de forma que se pueda generar un catálogo de galaxias más extenso.

Es entonces claro, que la función de luminosidad depende de 2 variables, la luminosidad (L) y el corrimiento al rojo (z), de forma que se vuelve necesario estudiar el comportamiento de la misma a partir de estas variables; en este trabajo se explora el comportamiento de la función de luminosidad y sus dependencias en la sección 2.2.

1.4.4 Distribuciones espectrales de energía SED

Las distribuciones espectrales de energía son representaciones de la energía irradiada en intervalos de frecuencia o longitud de onda. Hay que tener claro, que estas distribuciones se crean por las componentes de la galaxia que emite dicha radiación, por lo que en el caso de galaxias compuestas de cantidades muy masivas de polvo, como lo son las SMGs, dicho polvo va a modificar la forma del SED, ya que el polvo se va a calentar al absorber la radiación UV y va a emitir parte de esa energía en zonas del IR. Como se ve en la figura 1.6, los puntos marcados son las detecciones obtenidas a nivel

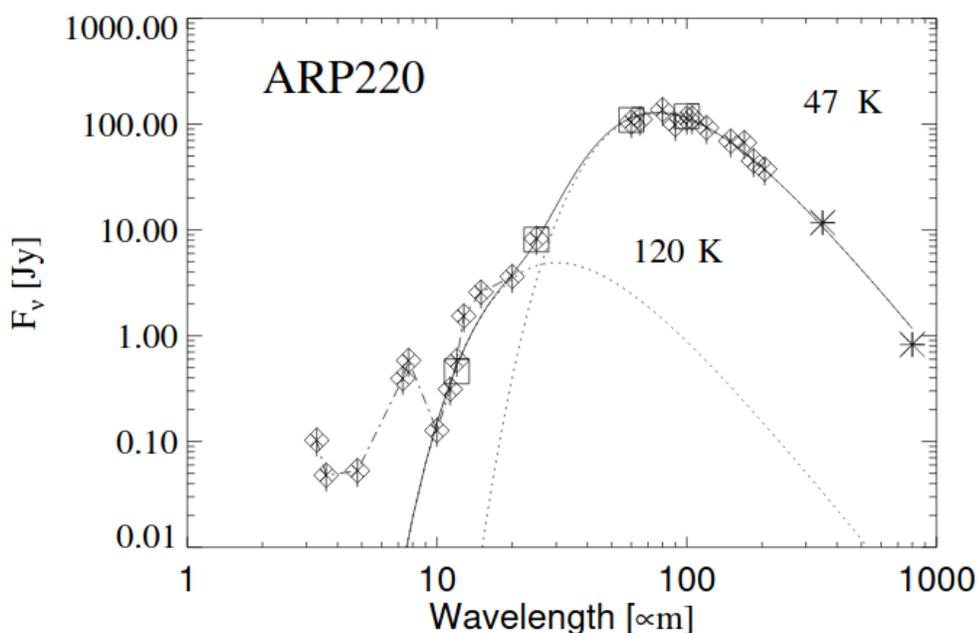


Figura 1.6: Efecto del polvo en el SED de la galaxia ARP220. Figura tomada de Klass et al. [Kla97].

observacional. Para valores de longitud de onda alrededor de los 100 μm , se encuentra el pico de emisión de polvo. Esto se debe a que la emisión del óptico está suprimida debido a la extinción del polvo en el gas que tienen estos tipos de galaxias. La figura muestra que, para los 1000 μm el valor de la densidad de flujo vuelve a ser menor a 1 Jy. Las líneas sólidas y punteadas muestran modelos teóricos de cuerpo negro modificado, se puede ver que para ajustar a los puntos detectados se necesitan 2 componentes, uno con una temperatura de 120 K y el otro a 47 K [Kla97][Com04][Ben10].

Las SMGs emiten la gran mayoría de su luminosidad total como radiación UV-óptica

proveniente de regiones de formación estelar, reprocesada por polvo y re emitida en el infrarrojo lejano. Debido a esto, es posible simplificar el SED de una SMG, utilizando simplemente un cuerpo negro modificado, es decir, modelos de cuerpo gris, los cuáles dependen de la temperatura del polvo de la galaxia T y un factor β definido como el índice de emisividad espectral. La densidad de flujo observada, en función de la frecuencia ν observada y la temperatura es:

$$S(\nu, T) \propto (1 - e^{-(\nu/\nu_0)^\beta}) B_\nu(T) = \frac{(1 - e^{-(\nu/\nu_0)^\beta}) \nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (1.9)$$

donde $B_\nu(T)$ es la conocida función de Planck, en la cual k y h son las constantes de Boltzmann y Planck respectivamente. El valor de ν_0 , la frecuencia de corte, la cual determina el límite de detección para el modelo, se ajusta a partir de la longitud de onda de corte $\lambda_0 = 200 \mu\text{m}$ [Cas18].

En este trabajo, se generará un catálogo de SMGs a partir de la función de luminosidad (sección 2.2), y se necesitará asociar cada una de ellas con un SED. Debido a que la función de luminosidad proporcionará pares ordenados, luminosidad a 250 micras - corrimiento al rojo (L, z), consideraremos el hecho de que, la temperatura de polvo está inversamente relacionada con la luminosidad IR de la galaxia. Para definir el valor de T se utilizará la siguiente relación:

$$\lambda_{pico}(L) = \lambda_0 \left(\frac{L}{L_t} \right)^\eta \quad (1.10)$$

donde $L_t = 10^{12} L_\odot$ y $\eta = -0,068$ [Cas18], de forma que se puede usar la relación $\lambda_{pico} \approx b/T^{0,9}$ para encontrar la temperatura del polvo, donde b es la constante de desplazamiento de Wien. Con estas relaciones es claro que se necesita únicamente de la luminosidad de la galaxia para poder asignarle un SED, que siga las relaciones descritas por Casey [Cas18], de manera apropiada.

La ecuación 1.9 describe el modelo de un cuerpo gris, sin embargo existen ciertas correcciones que se le pueden agregar, para que se describa más fielmente la aproximación a un SED de una galaxia real. Una de las principales es la suma de un segundo

término, que siga una ley de potencia para la parte del mediano infrarrojo MIR, la cual busca ajustar el comportamiento del SED alrededor de los valores del infrarrojo medio, de forma que pierde intensidad con el incremento de la longitud de onda.

$$S(\lambda) = N_{bb} \frac{\left(1 - e^{-(\lambda_0/\lambda)^\beta}\right) \left(\frac{c}{\lambda}\right)^3}{e^{hc/\lambda kT} - 1} + N_{pl} \lambda^\alpha e^{-(\lambda/\lambda_c)^2} \quad (1.11)$$

donde el primer término es el del cuerpo gris y el segundo es el agregado de la ley de potencia. Aparecen una serie de constantes α la pendiente de la ley de potencia para el mediano infrarrojo, λ_c la longitud de onda a la que la ley de potencia se vuelve despreciable, este valor depende propiamente de la temperatura del polvo. Ambos parámetros permiten ajustar el SED de manera correcta [Cas12]. Las constantes N_{bb} y N_{pl} se definen de forma que, se logre determinar la normalización del término del cuerpo gris a partir de la luminosidad FIR de la propia galaxia. Se debe cumplir, además, la relación $N_{pl} \lambda_c^\alpha = S_\nu(\lambda_c)$.

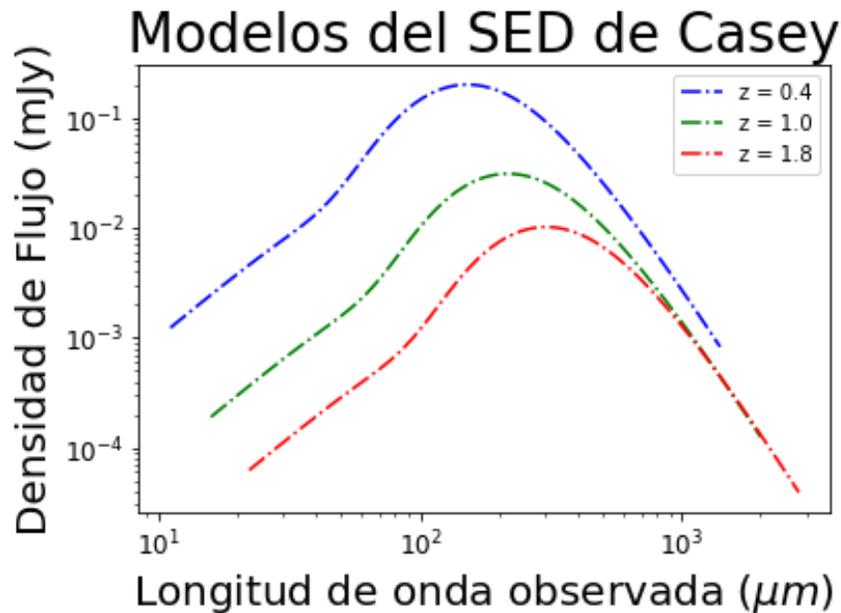


Figura 1.7: Efecto de z sobre el SED, para los modelos se utilizó $L_{FIR} = 10^{12} L_{\odot}$.

La figura 1.7 muestra exactamente como al incrementar el valor de z existe un desplazamiento del SED hacia abajo, es decir, una disminución de la densidad de flujo y hacia la derecha, quiere decir un aumento de la longitud de onda observada [Cas14] [Zeb18].

Esto se debe a la dilución cósmica, debido a la disminución de la densidad de flujo consecuencia de la expansión del Universo.

Finalmente, debe tomarse en cuenta el efecto que tiene sobre el SED la temperatura del CMB, en el momento en que se ubica la galaxia de estudio, la cual depende del z propio de la galaxia. Por lo tanto se debe corregir la temperatura del polvo T dependiendo del z :

$$T'_{dust}(z) = ((T_d)^{4+\beta_E} + T_{CMB}^{4+\beta_E} [(1+z)^{4+\beta_E} - 1])^{\frac{1}{4+\beta_E}} \quad (1.12)$$

donde $T_{CMB} = 2,725K$ y $\beta_E = 1,8$. Con este ajuste es claro, que se necesitan sólo 2 variables para definir el SED de la galaxia en su totalidad, la luminosidad FIR L_{FIR} y su corrimiento al rojo z . De este modo se define la simulación, generando valores L_{250} y z . Además, para relacionar L_{250} con L_{FIR} , es necesario encontrar la L_{FIR} para un SED en particular y luego compararlo con la L_{250} de ese mismo SED y así definir un factor de conversión.

Por lo tanto, para poder estudiar nuevas galaxias, lo que se busca es poder ajustar los datos observados a los SED de galaxias con espectros conocidos, para así poder relacionar las nuevas observaciones con galaxias ya previamente estudiadas. Se esperaría que exista una correlación entre los SED de galaxias del mismo tipo, sin embargo siempre deben hacerse ajustes que correspondan a las particularidades de las galaxias estudiadas. Con esto se muestra el comportamiento del SED de una galaxia típica del tipo SMG, de forma que con el avance de los telescopios y técnicas de observación se han ido determinando mejores modelos para reproducir el comportamiento de los SEDs para galaxias submilimétricas.

1.5 Descripción del trabajo

Se vuelve evidente la importancia de estudiar la formación y evolución de las galaxias elípticas masivas. Es aquí donde surgen las galaxias submilimétricas, las cuales están oscurecidas por polvo llegando a tener luminosidades $> 10^{12}L_{\odot}$ y grandes tasas de formación estelar de hasta varios miles $M_{\odot}yr^{-1}$. Su población abunda alrededor de $z \sim 2$ y su distribución de corrimientos al rojo presenta una cola hacia $z > 4$. To-

das estas características las hacen las principales candidatas para ser las antecesoras de las elípticas masivas, porque son galaxias del Universo temprano, capaces de formar rápidamente una considerable masa estelar. Para profundizar el estudio de la evolución de estas galaxias, se busca desarrollar un algoritmo computacional, que calcule el corrimiento al rojo fotométrico z_{phot} , a partir del ajuste de los SED de distintas galaxias.

El capítulo 2 explica la metodología utilizada para generar los catálogos de galaxias simuladas a partir de la función de luminosidad. Se muestran diferentes pruebas que evidencian la validez de las galaxias simuladas al compararlas con galaxias submilimétricas observadas.

Por su parte, el capítulo 3 describe cómo a partir de los catálogos simulados se calculan las distribuciones de corrimiento al rojo para objetos a los cuales se conoce su z_{spec} . Finalmente se muestran los valores calculados para el z_{phot} para distintas fuentes y sus márgenes de error asociado. Para esta investigación se utilizaron los parámetros cosmológicos $\Omega_{\Lambda} = 0,7$, $\Omega_M = 0,3$ y $H_0 = 70(\text{km/s})/\text{Mpc}$.

2 Simulación del catálogo de galaxias submilimétricas

En este capítulo se describe de forma detallada el diseño y metodología usado para construir el catálogo de galaxias submilimétricas simuladas, necesario para implementar el algoritmo de estimación de corrimientos al rojo fotométricos. Primero se describe detalladamente el método del rechazo, utilizado para muestrear la función de luminosidad. Posteriormente, se muestra un estudio detallado de las características propias de la función de luminosidad. Por último, mostramos las distintas comprobaciones que se hicieron al catálogo generado, de forma que reproduzca las observaciones con el menor grado de incertidumbre posible.

Para determinar el z_{phot} se puede utilizar un algoritmo basado en el método de Monte Carlo, que permita asignarle una distribución de probabilidad al z asignado a cada galaxia en particular. Se usa este método como base, ya que se debe tomar en cuenta la imprecisión en los valores observados de densidad de flujo y la dependencia de la luminosidad con características de las SEDs.[Hug02]

El algoritmo consiste en generar catálogos simulados de galaxias con una amplia distribución de z y el modelo cosmológico elegido. Adoptamos la función de luminosidad $\phi[L, z]$ de $250 \mu\text{m}$, que ajusta al número de cuentas de $850 \mu\text{m}$. [Kop17]

Con la función de luminosidad se procede a generar un catálogo de luminosidad a $250 \mu\text{m}$ y z . Para este trabajo se decidió utilizar el SED de Michalowski et al. [Mic10], el cual ya es un promedio de galaxias submilimétricas, además, de ser el usado por Koprowski et al. [Kop17] para la determinación de la función de luminosidad. Luego, se define la L_{FIR} de las galaxias simuladas, para así poder utilizar la ecuación 1.11 y definir una SED particular para cada galaxia simulada. Se debe agregar ruido y errores asociados a la calibración del flujo total. Esto generará que los cálculos finales del z_{phot} tengan un mayor realismo en su incertidumbre. Existen otros factores que generan

error, que no se considerarán para el método, por ejemplo el agrupamiento (clustering) de galaxias o el blending.[Hug02]

Por último se deben extraer catálogos limitados por densidad de flujo similares a los mapas a estudiar. Hay mapas que tienen profundidades de 5 a 2.5 mJy para la muestra de estudio [Zeb18]. Básicamente lo que se hace, es una comparación entre el catálogo obtenido originalmente al límite de las observaciones, para así generar un catálogo más pequeño y que a su vez reproduzca más fielmente las observaciones.

2.1 Método del rechazo

Se desea generar un catálogo de galaxias submilimétricas que siga una cierta función de probabilidad, que en nuestro caso será una función de luminosidad. El método del rechazo es una técnica muy útil para generar números aleatorios, cuya distribución de probabilidad sea conocida, $f(x)$, pero cuya función acumulativa y su inversa no sean necesariamente fáciles de calcular.[Bes79]

Se basa en escoger pares ordenados (x, y) aleatorios y uniformes, que se ubiquen en el área bajo la curva de la función $f(x)$. Así, las componentes x tendrán la distribución de probabilidad deseada. Para implementar este método, es necesario escoger una función de comparación, $g(x)$, que tenga área finita y se encuentre siempre por encima de $f(x)$. Esta función de comparación debe tener una función acumulativa, que se conozca analíticamente y que sea invertible.

Bajo estas condiciones, si se genera un número aleatorio uniforme entre 0 y el valor del área bajo $g(x)$, es posible usar la inversa de la función acumulativa de $g(x)$ para hallar el valor correspondiente de x . Así, generando aleatoria y uniformemente otro número y en el intervalo $[0,1]$, aplicamos el siguiente criterio para aceptar el par ordenado (x, y) :

$$y \leq f(x)/g(x) \tag{2.1}$$

En la figura 2.1 se muestra un histograma de los valores generados por medio del método del rechazo para cierta función $f(x)$, definida en el intervalo $0 \leq x \leq 15$. En

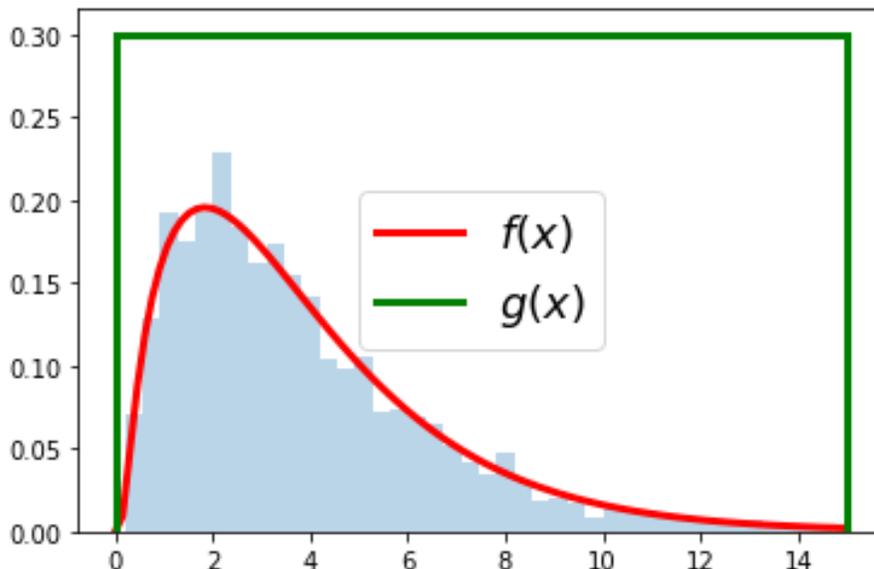


Figura 2.1: Muestreo de una función $f(x)$, utilizando el método del rechazo (histograma color azul claro). La función de comparación empleada es una función escalón, es decir, una función de valor constante en un rango de x particular, y de valor igual a cero fuera de este.

este caso, se utilizó como función comparativa la función escalón:

$$g(x) = \begin{cases} 0 & , x < 0 \\ 0,3 & , 0 \leq x \leq 15 \\ 0 & , x > 15 \end{cases}$$

En este trabajo de tesis, la función de comparación para muestrear la función de luminosidad también es la función escalón. La ventaja de este tipo de función es que su acumulativa inversa es igual a x . Por lo tanto, el método del rechazo se reduce a obtener dos números aleatorios uniformes, x entre 0 y el área bajo el escalón, y y entre 0 y 1. Luego se evalúa x en f y g , y aplicando el criterio de la ecuación 2.1, se acepta o se rechaza el valor de x . El proceso se repite N veces hasta tener la función $f(x)$ bien muestreada.

Para el caso particular de la función de luminosidad hay que tener claro que es una función que depende de 2 variables distintas, la luminosidad (L) y el corrimiento al rojo (z). Por lo tanto, la función de comparación será un escalón en dos dimensiones. De esta forma se generan 3 números aleatorios x , y_1 y y_2 , por lo que la ecuación 2.1 se

transforma en:

$$x \leq \frac{f(y_1, y_2)}{g(y_1, y_2)} \quad (2.2)$$

2.2 Función de luminosidad

Una vez definido el método del rechazo, es necesario describir la función de probabilidad que se va a muestrear. En nuestro caso, se ha elegido la función de luminosidad a $250 \mu\text{m}$ (ϕ) descrita por Koprowski et al. [Kop17], porque ésta fue obtenida a partir de observaciones a $850 \mu\text{m}$ y 1.3 mm , las que permiten mostrar de manera más efectiva a la población de galaxias oscurecidas por polvo a altos corrimientos al rojo detectadas en ondas a $\sim 1 \text{ mm}$. Asimismo, esta función de luminosidad reproduce los números de cuenta de galaxias submilimétricas más actualizados.

La función de luminosidad de Koprowski et al. [Kop17] está descrita por las ecuaciones 1.6, 1.7 y 1.8. En la figura 2.2 se representa esta función para diferentes corrimientos al rojo, y se puede observar cómo los distintos valores de z van generando que la función de luminosidad disminuya su escala. Alrededor de $z \sim 2$, donde ϕ alcanza sus valores más altos para $L_{250\mu\text{m}} \lesssim 10^{11} L_{\odot}$, se espera la mayor cantidad de galaxias. Para luminosidades mayores, la "rodilla" de la función ϕ se desplaza hacia la derecha, conforme el corrimiento al rojo crece. Esto permite predecir que es posible encontrar galaxias con luminosidades altas a altos valores de z , generando una cola hacia altos z en la distribución de corrimientos al rojo.[Cas14]

La dependencia que tiene ϕ con respecto a $L_{250\mu\text{m}}$ es lo que se esperaría para las poblaciones de galaxias estudiadas, esto debido a que la densidad de galaxias con luminosidades muy altas de $L_{\text{FIR}} \sim 10^{13} - 10^{14} L_{\odot}$ es mucho menor que las galaxias con luminosidades menores. Debido a que no se espera encontrar galaxias con luminosidades a $250 \mu\text{m}$ mayores a $10^{13} L_{\odot}$, se tomará éste valor como límite superior para el rango de luminosidades que se simulan en este trabajo.

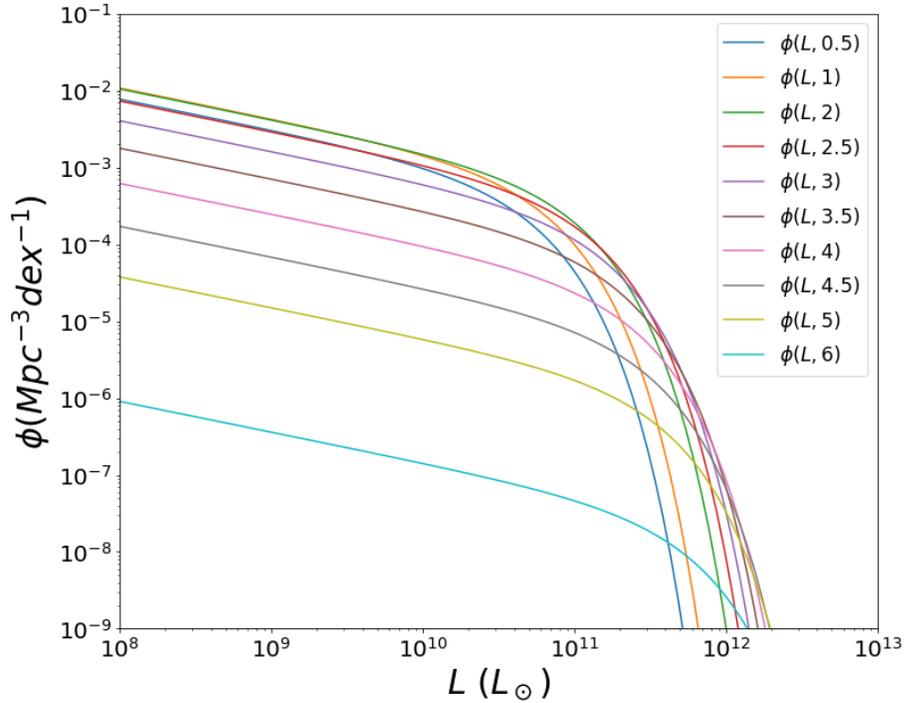


Figura 2.2: Funciones de luminosidad a $250 \mu m$ (ϕ) para luminosidades entre 10^8 y $10^{12,5} L_{\odot}$, determinadas con base en la ecuación 1.6. Los colores representan los diferentes valores de corrimientos al rojo, para los cuales se muestrearon las funciones de luminosidad.

La figura 2.3 muestra otra faceta de la función de luminosidad: cuando se grafica versus el corrimiento al rojo. Se puede ver mucho más claramente cómo para diferentes valores de luminosidad a $250 \mu m$, la función tiene un comportamiento primero creciente hasta un $z \sim 2$ y luego decreciente. Como se mencionó anteriormente, esto es consecuente con lo observado en las distribuciones de corrimiento al rojo para las poblaciones de galaxias submilimétricas, las cuales generalmente tienen un pico a $z \sim 2 - 2,5$. (e.g. [Are03][Cha03][Zav18])

Esto a su vez permite delimitar el rango de z , para el cual se va a generar la simulación. El rango definido es de $0,5 < z < 7$. El límite superior fue definido a partir de la tendencia que siguen las distribuciones en la figura 2.3, donde claramente se ve, que sin importar la luminosidad de las galaxias, luego de $z \sim 7$ la probabilidad de encontrar galaxias decrece de forma abrupta y las galaxias polvorientas más lejanas conocidas están a $z < 7$ [Rie13][Zav18]. Por su parte, el límite inferior se define en 0.5, ya que no

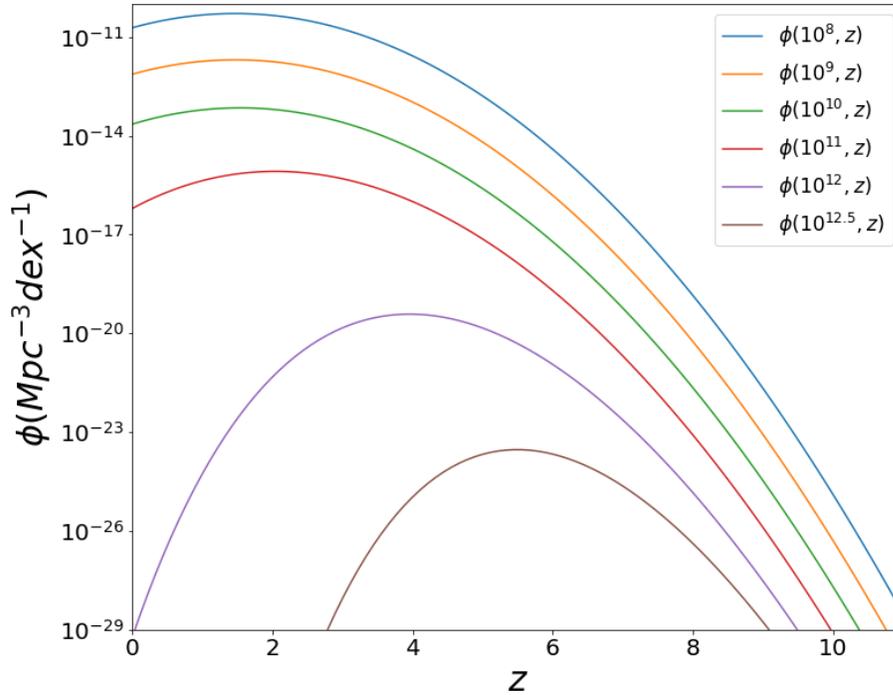


Figura 2.3: Funciones de luminosidad a $250 \mu m$ (ϕ) para corrimientos al rojo (z) entre 0 y 11, determinadas con base en la ecuación 1.6. Los colores representan diferentes luminosidades a $250 \mu m$, entre 10^8 y $10^{12.5} L_{\odot}$.

se espera observar galaxias submilimétricas a bajos corrimientos al rojo [Cas14].

2.3 Comprobaciones del método del rechazo

Para determinar la eficiencia del método del rechazo, se hicieron una serie de pruebas, tanto para el muestro de la función de luminosidad, como para las características de las galaxias generadas a partir de la simulación.

La figura 2.4 muestra cómo mediante el método del rechazo se generan galaxias con luminosidades aleatorias para z definidos en $z_1 = 1,577$, $z_2 = 2,115$ $z_3 = 4,269$ (puntos rojos). Los muestreos siguen de forma correcta la distribución de probabilidad descrita por la función de luminosidad (curva azul). Sin embargo, podemos ver cómo existen 2 regiones donde hay una ausencia de galaxias para cada uno de los diferentes valores de z . La parte izquierda de la curva azul no se logra muestrear, debido a que para la simulación se definió un valor mínimo de detección para la densidad de flujo a $850 \mu m$. Por lo tanto, luminosidades correspondientes a densidades de flujo menores

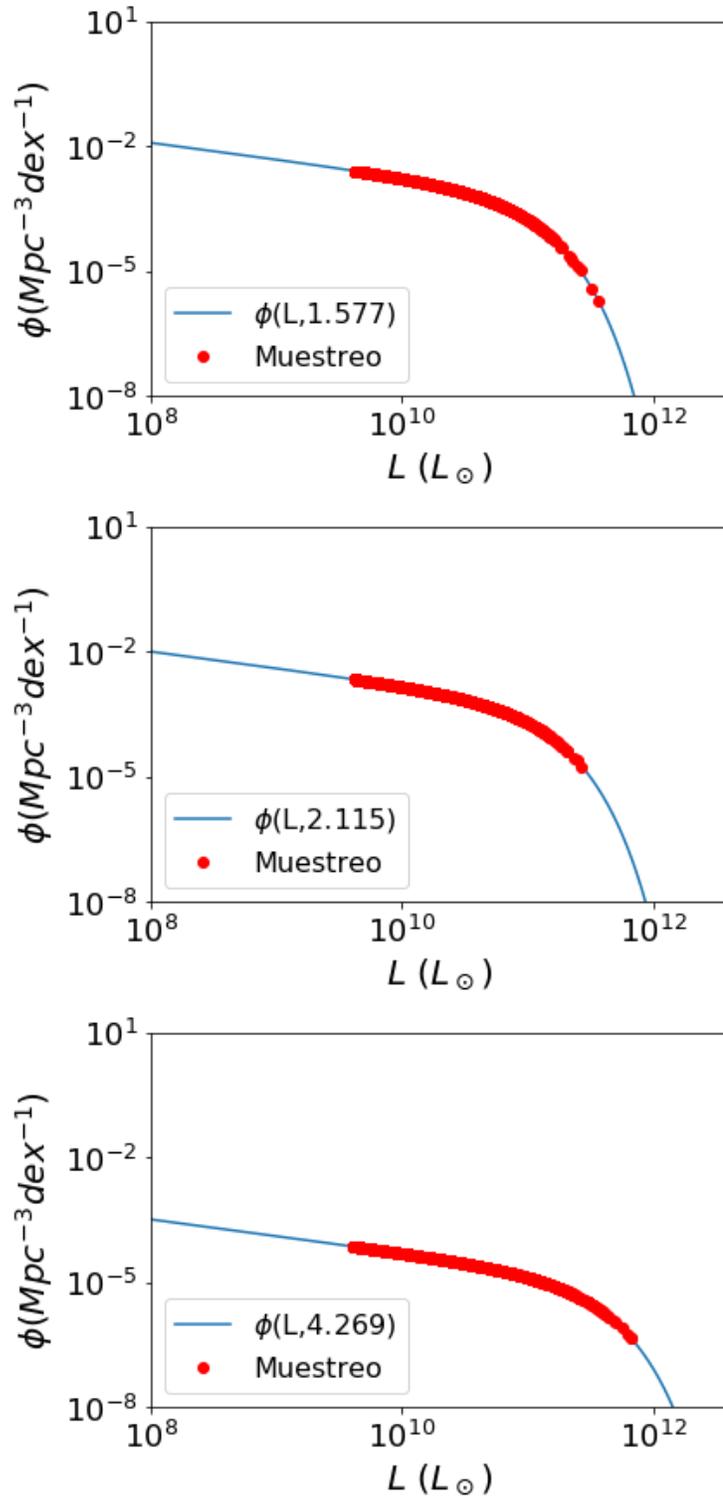


Figura 2.4: Muestreo de funciones de luminosidad a $250 \mu\text{m}$ a diferentes valores de z , los puntos rojos muestran la tendencia que siguen las galaxias simuladas. La curva azul es la función de luminosidad analítica, definida para el corrimiento al rojo elegido y el rango de luminosidad muestreado.

a $S_{850\mu\text{m}} = 0,1$ mJy no pasan el límite de detección. Este límite se escogió por corresponder apropiadamente con los límites de detección de los instrumentos más recientes en el rango submilimétrico de plato simple (e.g. SCUBA2), así como para poder comparar los números de cuenta de este trabajo con los números de cuenta presentados por Koprowski et al [Kop17]. Por otra parte, la falta de galaxias muestreadas a luminosidades altas se debe a que el tamaño de la simulación se limitó a un área del cielo igual a un grado cuadrado, de forma que la probabilidad de encontrar galaxias con esas luminosidades es muy baja. Los 3 muestreos permiten determinar, que el método del rechazo es exitoso para generar galaxias de forma aleatoria, siguiendo la superficie en tres dimensiones generada por la función de luminosidad y sus dependencias, tanto en luminosidad como en corrimiento al rojo.

Para verificar si realmente el catálogo de galaxias generadas por medio del método del rechazo describe adecuadamente las observaciones de galaxias submilimétricas, se procedió a calcular los números de cuenta a $850 \mu\text{m}$ y se compararon con los valores obtenidos de observaciones provenientes de diferentes censos.

La figura 2.5 muestra dos curvas, que describen el número de cuentas, según la función de luminosidad elegida para este trabajo. La curva verde considera corrimientos al rojo, definidos en el rango entre $0,5 - 5$, el cual corresponde con el rango definido por Koprowski et al. en su trabajo [Kop17]. La curva roja, a su vez tiene un rango de z definido por $0,5 - 7$, el cual fue el rango elegido para la simulación en este trabajo. Estas 2 curvas se superponen una sobre la otra, esto quiere decir que extrapolar la función de luminosidad a corrimientos al rojo $5 < z < 7$ permite ampliar el rango de z de las diferentes galaxias, que pueden ser generadas en la simulación, sin afectar observables como el número de cuentas.

Se muestra además, una serie de puntos rojos que corresponden con los números de cuentas obtenidos de la simulación. Éstos se ajustan de una manera bastante aceptable, tanto a las curvas de las cuentas con base en la función de luminosidad teórica, como a las distintas cuentas determinadas a partir de observaciones submilimétricas (símbolos azules).

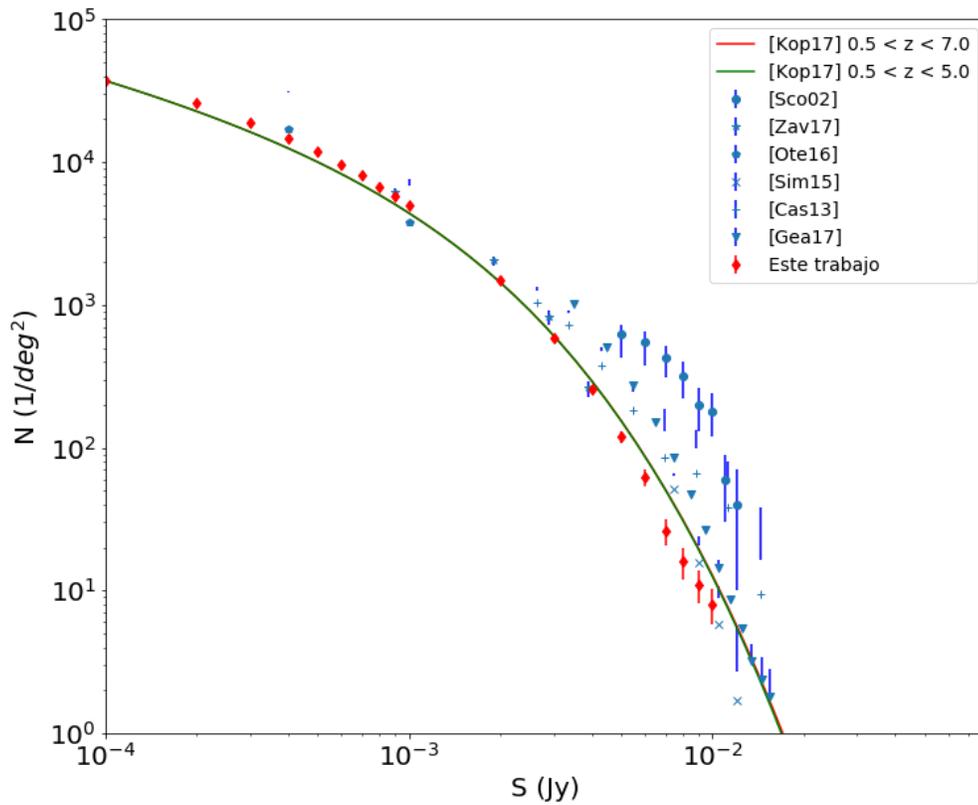


Figura 2.5: Números de cuentas a $850 \mu\text{m}$ para las galaxias simuladas con el método del rechazo (puntos rojos). Se compara con 6 diferentes números de cuentas, obtenidos de observaciones reportadas en [Sco02][Zav17][Ote16][Sim15][Cas13][Gea17]. Las curvas verde y roja muestran el número de cuentas obtenido de integrar analíticamente la función de luminosidad de Koprowski et al [Kop17], evolucionadas para rangos de z entre 0.5-5.0 y 0.5-7.0 respectivamente.

Es posible ver cómo a densidades de flujo menores a 6 mJy las cuentas prácticamente siguen la tendencia de la curva roja. Es a partir de las cuentas superiores a 7 mJy , que empieza a verse una ausencia de fuentes con densidades de flujo altas. Esta insuficiencia de galaxias se puede deber a la limitante impuesta para la simulación de generar únicamente 1 grado cuadrado y al límite de $L(\text{IR})$. Otra razón importante, que afecta el número de cuentas es el SED, asociado a las galaxias, ya que es éste el que describe su densidad de flujo a diferentes longitudes de onda. Koprowski et al [Kop17] utilizan en su trabajo el SED promedio, descrito por Michalowski et al [Mic10], en cambio, para la

simulación en este trabajo el SED de cada galaxia simulada es único y se define a partir del modelo descrito por Casey et al [Cas18], como se describe en la sección 1.3.5 del capítulo 1.

3 Cálculo de corrimientos al rojo

Para determinar el corrimiento al rojo fotométrico z_{phot} de una galaxia submilimétrica, es necesario tener primero, un catálogo robusto de galaxias simuladas, que representen adecuadamente la función de luminosidad de dicha población. En el capítulo 2, se desarrolló un catálogo, con base en la función de luminosidad, propuesta por Koprowski et al [Kop17] y descrita por la ecuación 1.6. Este catálogo simula una población de galaxias submilimétricas, con densidades de flujo a $850 \mu\text{m} > 0.1 \text{ mJy}$, con un rango de corrimientos al rojo $0,5 < z < 7$ y distribuidas en un 1 grado cuadrado de cielo. Esta simulación reproduce los números de cuentas a $850 \mu\text{m}$, mostrado en la figura 2.5.

3.1 Determinación de colores

Una vez obtenido el catálogo de galaxias submilimétricas, es necesario definir los diferentes colores que se utilizarán para determinar el z_{phot} . Un color (c) se define como la razón entre dos densidades de flujos (f_1 y f_2) a diferentes longitudes de onda:

$$c = \frac{f_1}{f_2} \quad (3.1)$$

En este trabajo, las densidades de flujo utilizadas, para la determinación de los corrimientos al rojo fotométricos son $250, 350$ y $500 \mu\text{m}$, ya que a estas longitudes de onda es posible muestrear adecuadamente la región del pico de emisión de polvo, característica de las galaxias submilimétricas para un rango de corrimientos al rojo aproximadamente entre 1 y 3 (e.g. [Hug02][Cas14]).

Utilizando los SEDs, generados con el modelo descrito en la sección 1.4.4, se obtienen las densidades de flujo requeridas y se calculan los siguientes dos colores para todas las galaxias del catálogo, ya que los corrimientos al rojo fotométricos se estimarán a

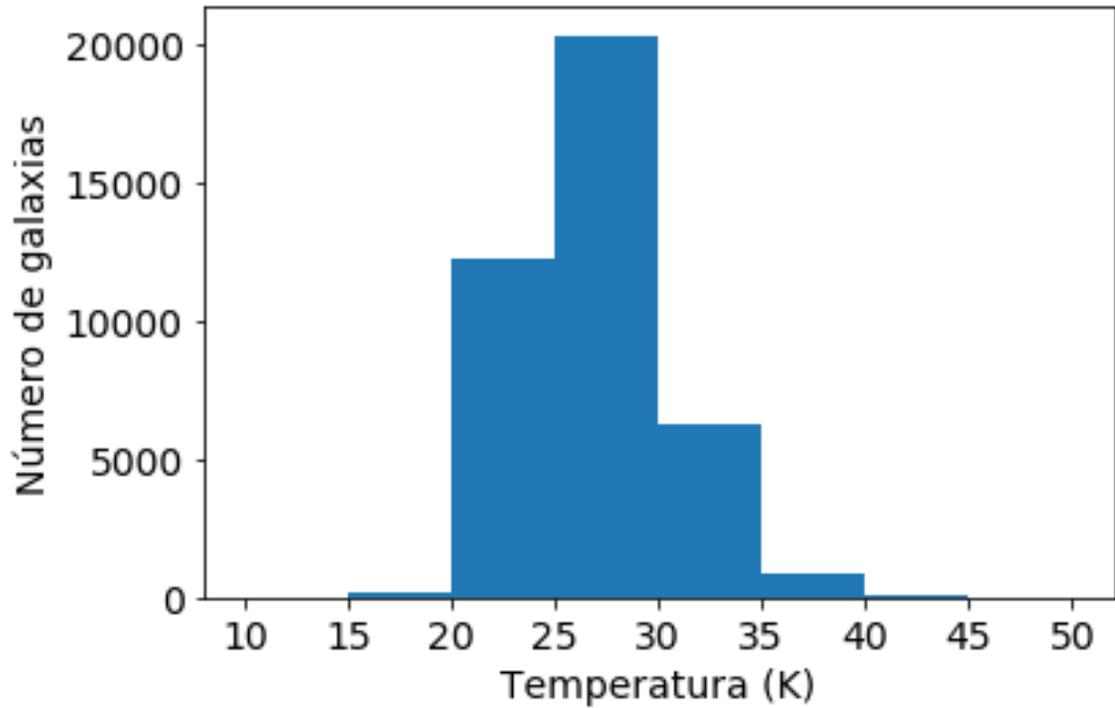


Figura 3.1: Distribución de temperaturas de polvo del catálogo de 40 000 galaxias simuladas, producido en este trabajo. Las temperaturas se calculan a partir del modelo propuesto por Casey et al [Cas18], que se puede ver en la sección 1.4.4.

partir de diagramas c_2 versus c_1 :

$$c_1 = \frac{f_{250}}{f_{500}} \quad (3.2)$$

$$c_2 = \frac{f_{350}}{f_{500}} \quad (3.3)$$

La incertidumbre asociada a c se determina mediante la técnica de propagación de errores, la que produce la siguiente ecuación:

$$\sigma_c = |c| \sqrt{\left(\frac{\sigma_1}{f_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{f_2}\right)^2} \quad (3.4)$$

Debido a que la temperatura del polvo es un parámetro que afecta la posición del pico de emisión del polvo, es importante conocer la distribución de estas temperaturas, asociada al catálogo simulado.

La figura 3.1 muestra cómo la mayoría de las galaxias simuladas tienen temperaturas

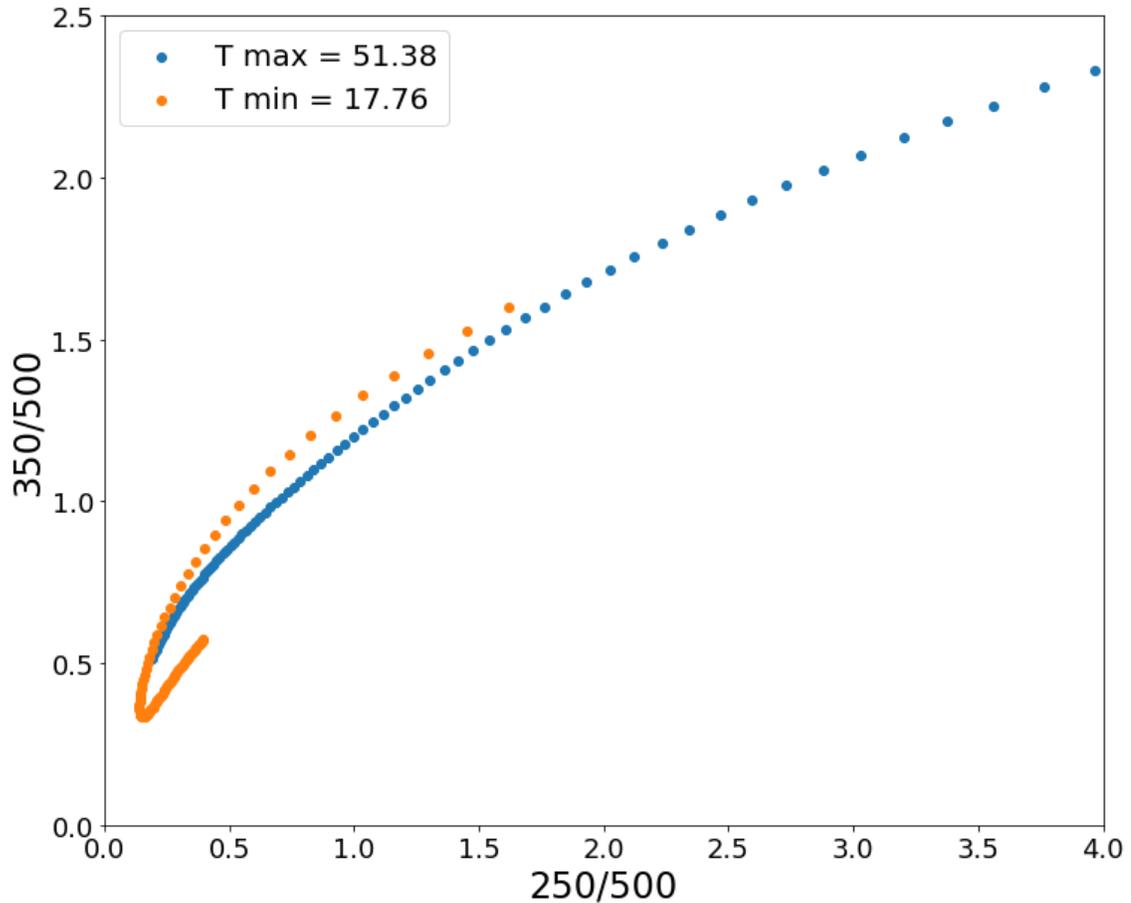


Figura 3.2: Diagrama color color para galaxias simuladas con temperaturas de polvo de 17.76 y 51.38 K, que son los valores límite que alcanzan las temperaturas de las galaxias simuladas, incluidas en este trabajo. Ambas curvas representan galaxias con $L_{FIR} = 1 \times 10^{13} L_{\odot}$ y un rango de z definido entre 0.5-7.

de polvo entre los 20 K y 35 K, lo cual puede representar un problema, ya que la temperatura del polvo en galaxias submilimétricas puede alcanzar valores incluso de hasta 80 K [Zav18].

Para mostrar el efecto, que puede tener la temperatura en las gráficas color color, que se utilizan en este trabajo, se graficaron dichos diagramas para los valores máximo y mínimo de la distribución de temperaturas representada en la figura 3.1 ($T_{max} = 51,38$ K y $T_{min} = 17,76$ K). La siguiente figura, 3.2, muestra los resultados. Los colores provienen de galaxias con luminosidades en el lejano infrarrojo $L_{FIR} = 1 \times 10^{13} L_{\odot}$, ubicadas en un rango de corrimientos al rojo de $0,5 < z < 7$, los cuales corresponden con los z

utilizados en este trabajo.

En este caso se puede ver que las trazas color color delimitan un área en el diagrama, relativamente angosta, dentro de la cual se esperaría encontrar a las galaxias simuladas. Esto puede representar un problema a la hora de estimar corrimientos al rojo fotométricos, porque galaxias con colores fuera de esta área no estarían representadas.

3.2 Distribuciones de corrimiento al rojo

Para el cálculo del z_{phot} se debe obtener una distribución, que muestre la probabilidad de que dos o más colores de una galaxia submillimétrica correspondan con dichos colores, asociados a las galaxias del catálogo usado como modelo [Hug02][Are03]. El primer paso es agrupar las galaxias del catálogo en bins de z , con un tamaño de 0.5. La probabilidad de que la galaxia objetivo pertenezca a cierto bin z , se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$P(z) = a \sum_i \Phi(c_i - c_0), \quad (3.5)$$

donde la distribución Φ está dada por

$$\Phi = (2\pi)^{-k/2} |\mathbf{A}^{-1}|^{1/2} \exp\left(-\frac{1}{2}(c_i - c_0)' \mathbf{A}^{-1} (c_i - c_0)\right), \quad (3.6)$$

para la cual c_i es el vector de color de la i -ésima galaxia modelo en el bin z , c_0 es el vector de color de la galaxia objetivo, la constante k está asociada a la dimensionalidad del problema (en nuestro caso $k = 2$) y finalmente, A es la matriz de covariancia de la distribución de colores. La función Φ describe la distribución de probabilidad Gaussiana multivariable, por lo que es posible a partir de la misma encontrar la distribución $P(z)$, que mejor describe la correspondencia con los colores de la galaxia objetivo. La constante a de la ecuación 3.5 es una constante de normalización tal que:

$$\int_0^{z_{max}} P(z) dz = 1, \quad (3.7)$$

donde $z_{max} = 7$ en este trabajo.

El valor elegido como el corrimiento al rojo fotométrico para la galaxia objetivo se calcula a partir de la media de la curva Gaussiana, que mejor ajusta a $P(z)$ en función

de los bins z . Para determinar las barras de error asociadas al z_{phot} se procede de la siguiente forma:

$$\int_{z_-}^{z_+} P(z) dz = 0,68, \quad (3.8)$$

donde los valores z_- y z_+ son las barras asimétricas, que garantizan un nivel de confianza del 68 % en un intervalo de z mínimo.

La figura 3.3 muestra los diagramas color color para las galaxias del catálogo simulado. El primer diagrama muestra los colores de las galaxias sin error asociado a criterios de observación. Los puntos están marcados de diferentes tonalidades, para poder identificar los diferentes bins de z necesarios para el cálculo del corrimiento al rojo fotométrico. El segundo diagrama incluye una dispersión en la densidad de flujo asociada a los criterios de observación, elegidos para este trabajo. Esto significa, que para el segundo diagrama cada una de las densidades de flujo asignadas a una galaxia simulada proviene de una distribución Gaussiana centrada en la densidad de flujo, obtenida directamente de su SED y con un sigma (σ) igual al nivel del ruido, que se esperaría si esta galaxia hubiera sido observada en un determinado censo submilimétrico. Para definir ese sigma, se supusieron detecciones con señales a ruido (S/N) de 4, con la finalidad de hacer un ejercicio académico para el cual se podría calcular el corrimiento al rojo incluso para las galaxias más debilmente detectadas. Esto significa, que el valor de 1σ para cada banda de densidad de flujo se define como la densidad de flujo de la galaxia objetivo entre cuatro, es decir $1\sigma = f/4$.

El punto negro en ambos diagramas de la figura 3.3 representa los colores de la galaxia objetivo y las barras asociadas representan las incertidumbres. Se puede ver cómo el punto negro se ubica en la región donde los puntos de colores verde y rojo predominan. Estos puntos señalan valores de z entre $1,5 < z < 2,5$. Sin embargo, se debe tener cuidado cuando se observa este tipo de gráficas, ya que puntos de diferentes tonalidades se pueden superponer unos sobre otros. Dicha superposición se vuelve más evidente, cuando se observa el diagrama que incluye la dispersión en flujo, ya que al separar los puntos, se ve claramente, que tanto los puntos rojos como verdes están sobre una región de puntos naranja e incluso hay puntos de tonalidad azul. Todos estos factores

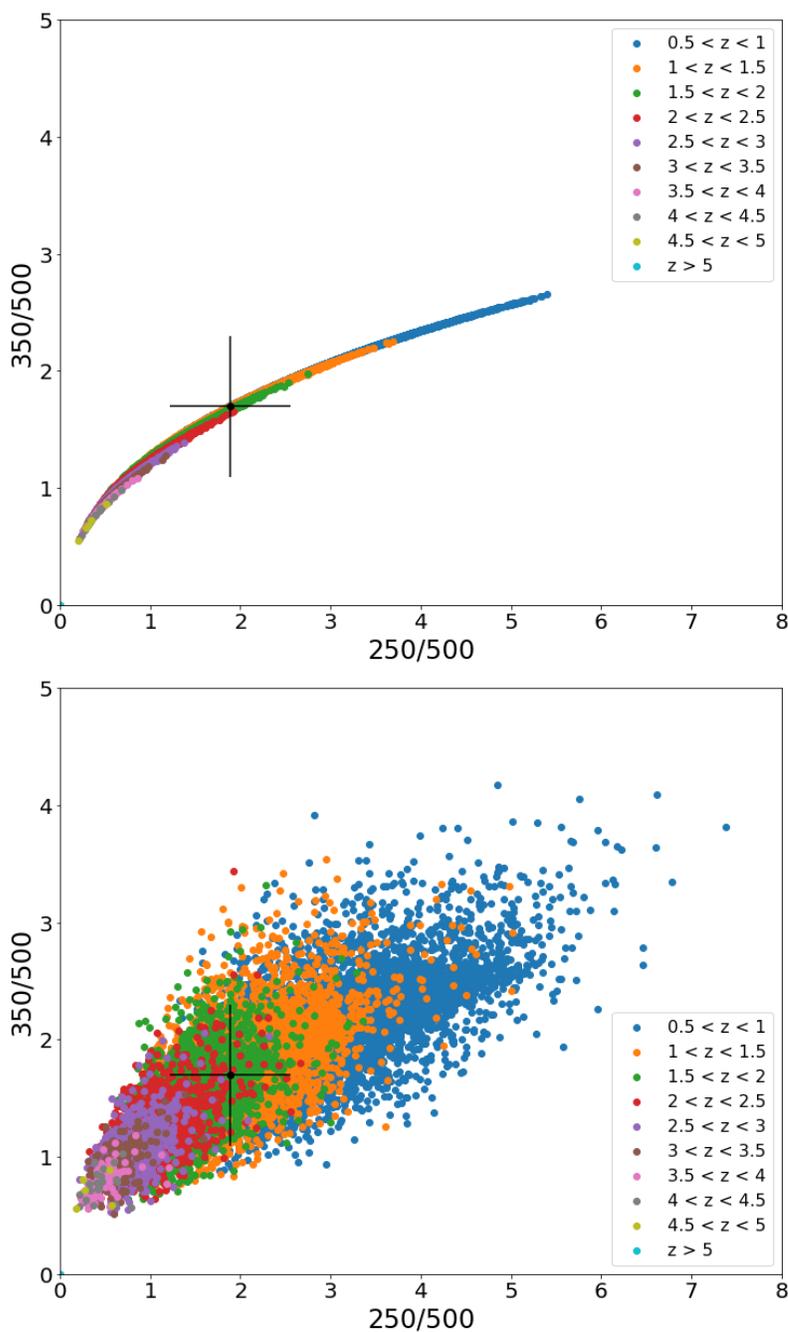


Figura 3.3: Diagramas color color para las galaxias del catálogo simulado utilizado en este trabajo. El punto negro representa una galaxia objetivo con $z = 1,128$. Las líneas negras son las barras de error asociadas a sus colores. Los puntos con diferentes tonalidades representan distintos rangos de z . En la figura de arriba no se incluyeron errores observacionales en la determinación de los colores; mientras que en la figura de abajo se agregaron, suponiendo que las densidades de flujo provienen de distribuciones Gaussianas con $1\sigma = f/4$.

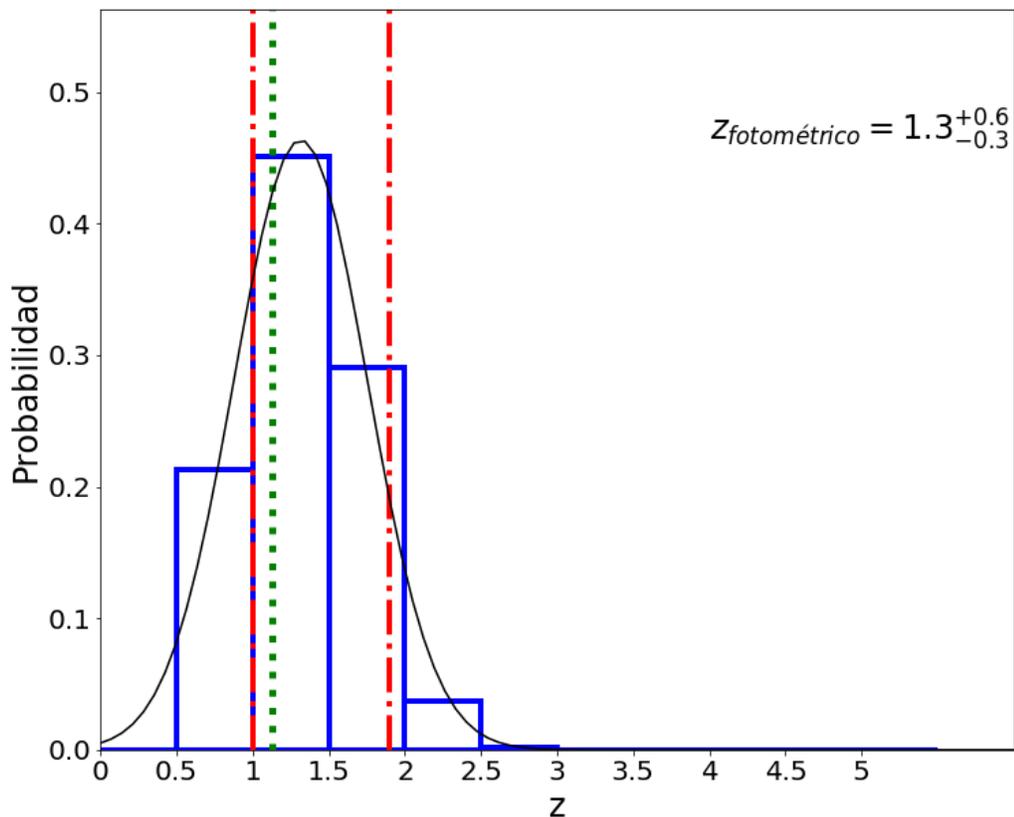


Figura 3.4: Distribución de corrimiento al rojo calculada para una galaxia con $z = 1,128$. La curva negra muestra el ajuste Gaussiano al histograma, cuya moda representa el z_{phot} más probable para la galaxia. Las líneas rojas delimitan el intervalo de confianza al 68 % para este z_{phot} . La línea punteada de color verde muestra el valor real del z de la galaxia.

se ponderan, cuando se utiliza la función 3.5 para determinar el corrimiento al rojo fotométrico. Por lo que la distribución de probabilidad de z de la galaxia objetivo se extiende sobre varios bins, pero tiene su valor máximo cuando las galaxias simuladas tienen colores similares a la galaxia objetivo.

La figura 3.4 muestra la distribución de corrimientos al rojo (histograma azul), calculada a partir de los diagramas color color de la figura 3.3. La curva Gaussiana de color negro corresponde al mejor ajuste asociado a dicho histograma, de forma que el z_{phot} se define como la moda de la curva Gaussiana. Las líneas rojas representan el intervalo de confianza al 68 % calculado sobre el histograma. Finalmente, el valor del corrimiento al rojo real de la galaxia se muestra como la línea verde punteada.

Las figuras 3.5 a 3.9 muestran ejemplos de diagramas color color y distribuciones de corrimiento al rojo para otras 3 galaxias objetivo, con corrimientos al rojo $z_1 = 1,576$, $z_2 = 2,653$ y $z_3 = 3,110$.

Los diagramas color color obtenidos en este trabajo muestran, que los colores 350/500 y 250/500 tienen valores menores, como consecuencia del incremento en el valor del z . Este fenómeno se puede ver tanto en la curva sin dispersión, como en la curva que tiene el error asociado a los criterios de observación. Siguiendo con esta tendencia, el punto negro en estas 3 figuras también se desplaza hacia abajo y a la izquierda, lo cual significa que la razón de colores de las galaxias objetivo sigue el comportamiento esperado. Los diagramas color color también muestran, que la dispersión en los colores está básicamente gobernada por los errores asociados a criterios de observación y no a la variación en las características de los SEDs simulados.

3.3 Discusión de resultados

El método utilizado en este trabajo de tesis, para determinar corrimientos al rojo fotométricos tiene 5 partes principales, las que se basan en los trabajos anteriores de Hughes et al. [Hug02] y Aretxaga et al. [Are03]. Estas partes principales son: a) generar un catálogo de galaxias submilimétricas simuladas a partir del muestreo de la función de luminosidad elegida; b) asignar un SED a cada una de las galaxias del catálogo simulado y usarlo para calcular los colores submilimétricos; c) añadir dispersión a las densidades de flujo de las galaxias simuladas a partir de criterios observacionales, con el fin de que el catálogo simulado represente mejor a las galaxias observadas; d) filtrar el catálogo simulado para galaxias que cumplan con los criterios de detección de la galaxia objetivo; y e) calcular el corrimiento al rojo fotométrico, utilizando las razones de color del catálogo final.

En este trabajo, se realizaron una serie de ajustes al método de Hughes et al. [Hug02] y Aretxaga et al. [Are03], con el fin de incluir nuevos datos y nueva información acerca de las galaxias submilimétricas. La primera actualización que se realizó fue el cambio de función de luminosidad utilizada. En los trabajos anteriores se utilizó la función de

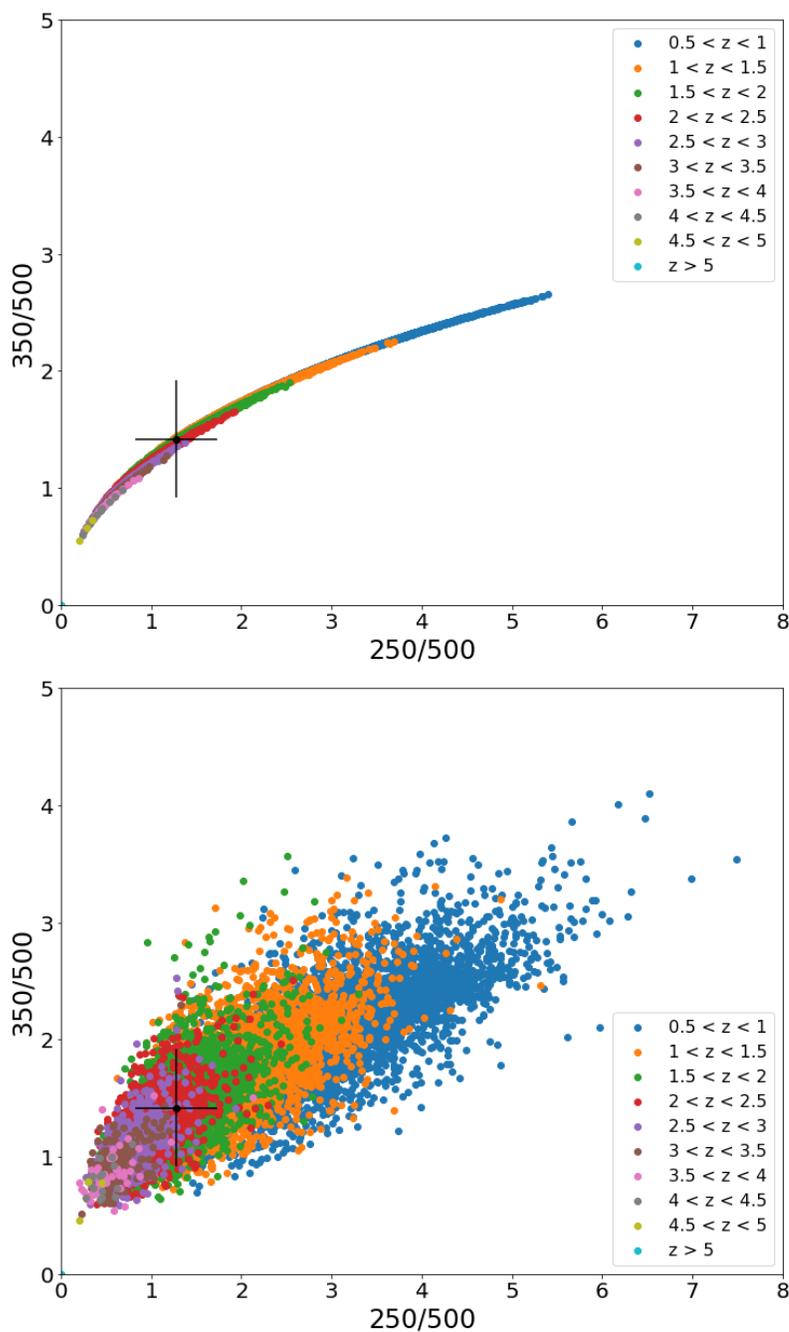


Figura 3.5: Diagramas color color para las galaxias del catálogo simulado utilizado en este trabajo. El punto negro representa una galaxia objetivo con $z = 1,576$. Las líneas negras son las barras de error asociadas a sus colores. Los puntos con diferentes tonalidades representan distintos rangos de z . En la figura de arriba no se incluyeron errores observacionales en la determinación de los colores; mientras que en la figura de abajo se agregaron suponiendo que las densidades de flujo provienen de distribuciones Gaussianas con $1\sigma = f/4$.

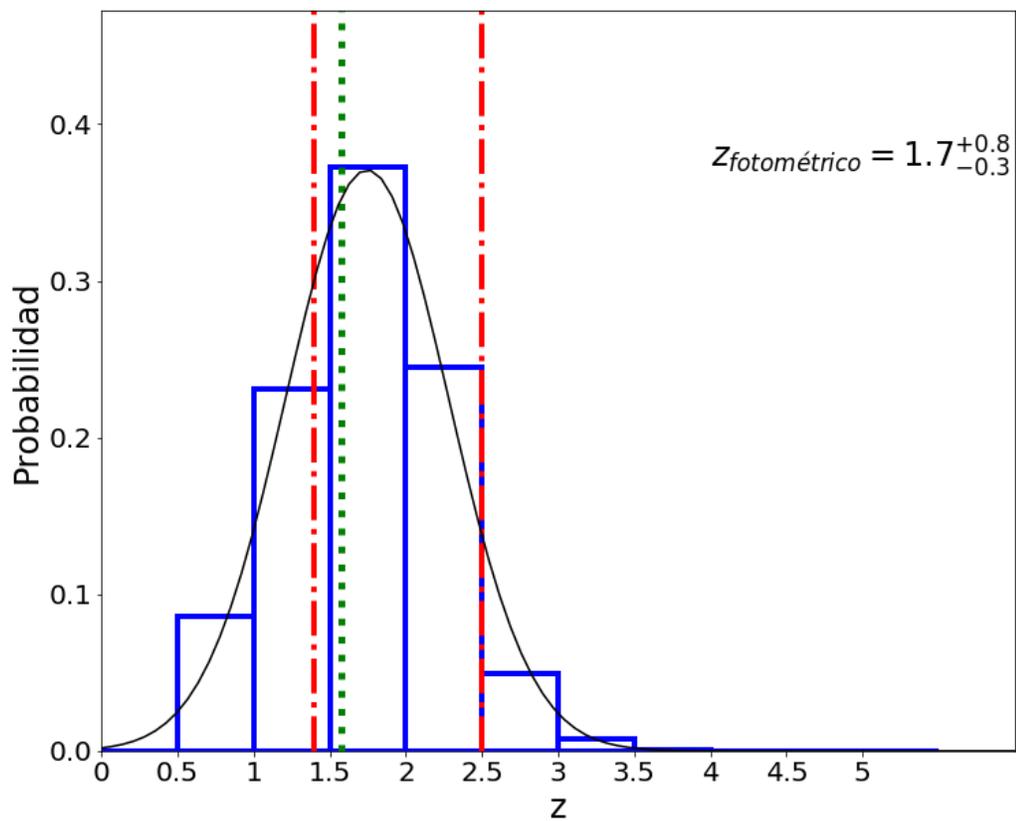


Figura 3.6: Distribución de corrimiento al rojo calculada para una galaxia con $z = 1,576$. La curva negra muestra el ajuste Gaussiano al histograma, cuya moda representa el z_{phot} más probable para la galaxia. Las líneas rojas delimitan el intervalo de confianza al 68 % para este z_{phot} . La línea punteada de color verde muestra el valor real del z de la galaxia.

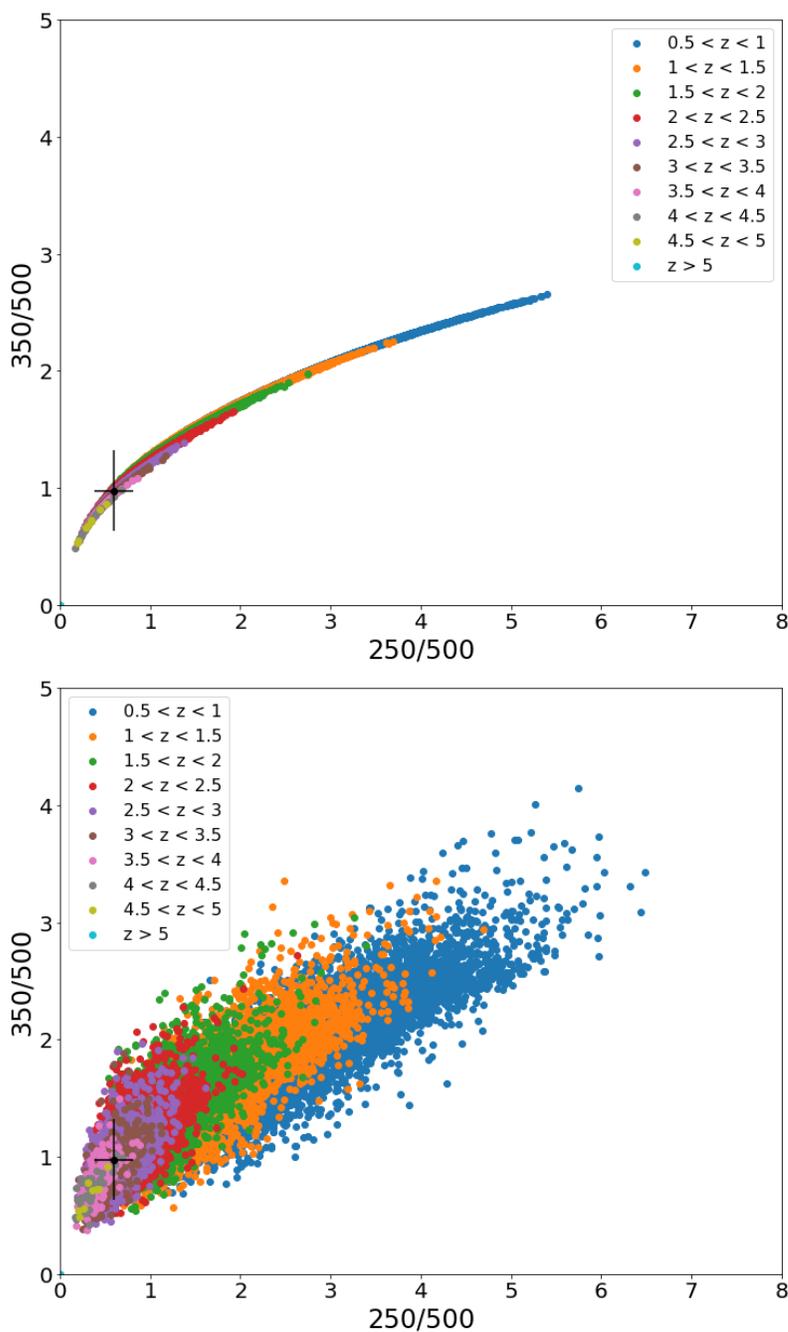


Figura 3.7: Diagramas color color para las galaxias del catálogo simulado utilizado en este trabajo. El punto negro representa una galaxia objetivo con $z = 2,653$. Las líneas negras son las barras de error asociadas a sus colores. Los puntos con diferentes tonalidades representan distintos rangos de z . En la figura en el cuadro superior no se incluyeron errores observacionales en la determinación de los colores; mientras que en la figura de abajo se agregaron, suponiendo que las densidades de flujo provienen de distribuciones Gaussianas con $1\sigma = f/4$.

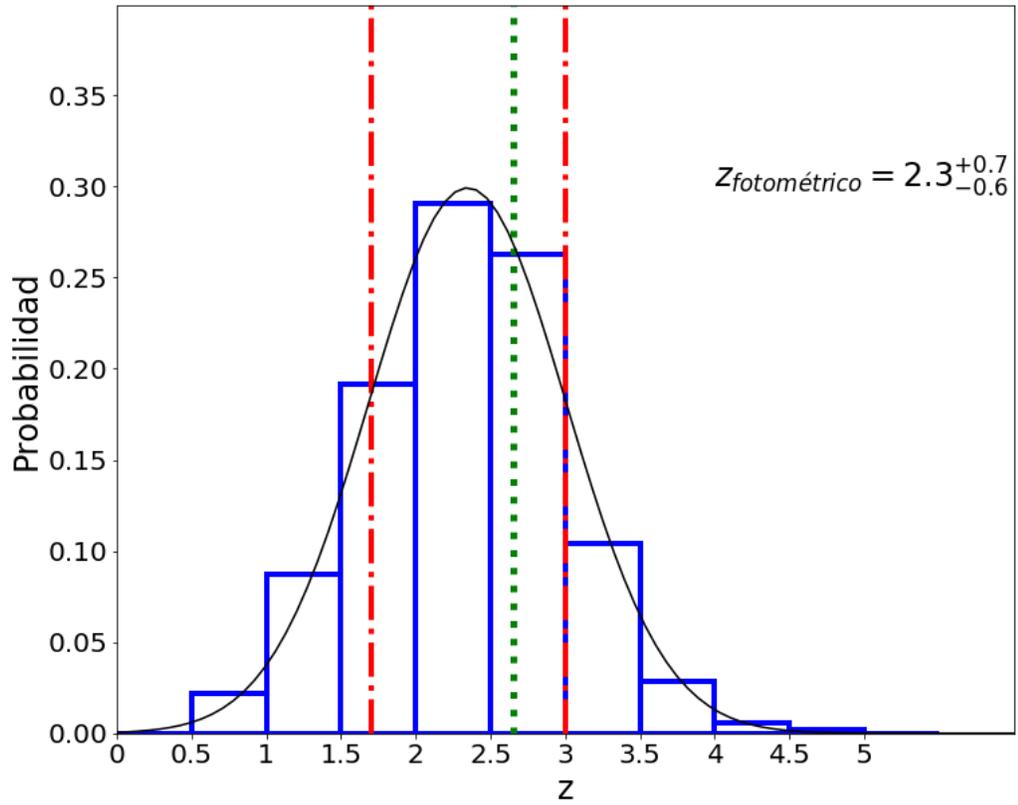


Figura 3.8: Distribución de corrimiento al rojo calculada para una galaxia con $z = 2,653$. La curva negra muestra el ajuste Gaussiano al histograma, cuya moda representa el z_{phot} más probable para la galaxia. Las líneas rojas delimitan el intervalo de confianza al 68% para este z_{phot} . La línea punteada de color verde muestra el valor real del z de la galaxia.

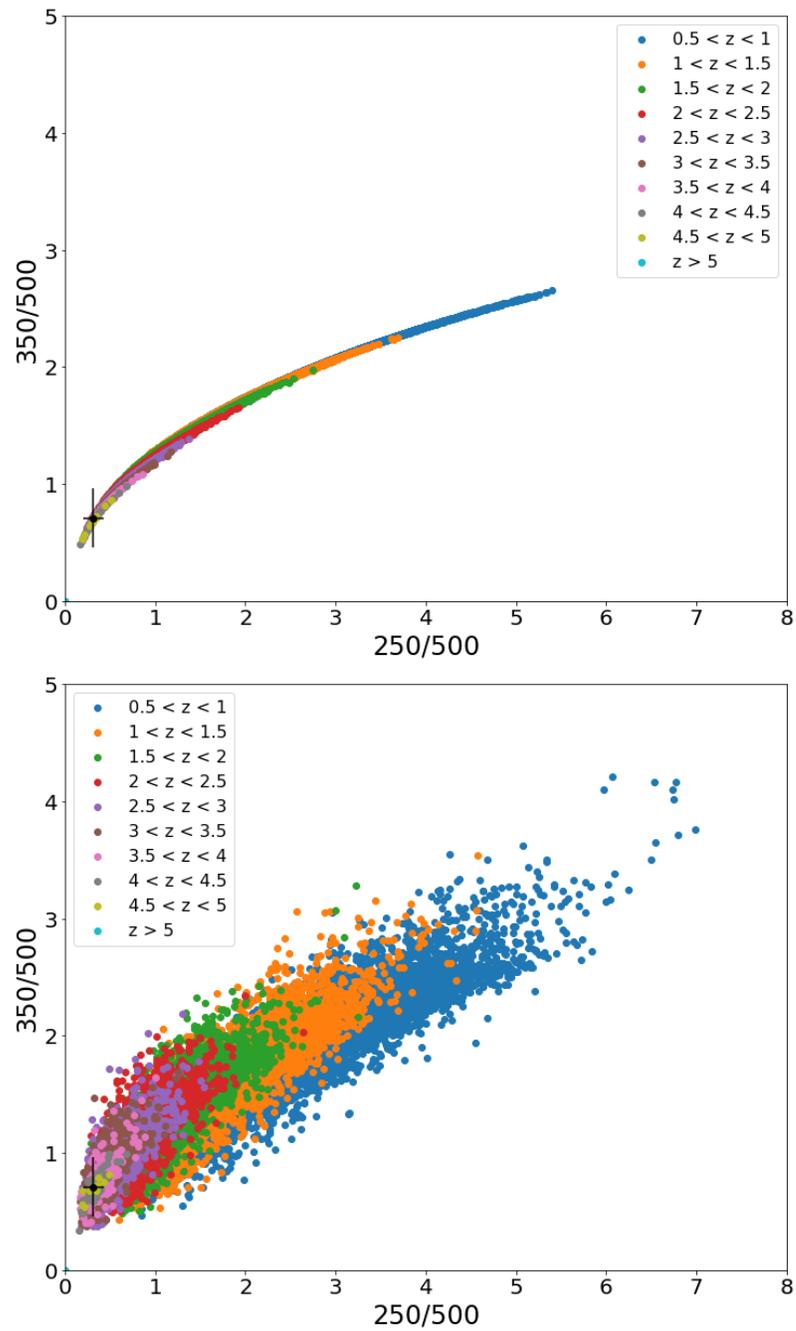


Figura 3.9: Diagramas color color para una galaxia con $z = 311$. El punto negro representa los colores de dicha galaxia, a la que se le quiere calcular el corrimiento al rojo fotométrico ($z_{\text{fotométrico}}$), las líneas negras son las barras de error asociado a los colores calculados. Los colores de las galaxias del catálogo se clasificaron según los distintos rangos de z , representados por las diferentes tonalidades de los puntos. La figura de arriba muestra los puntos sin la inclusión de errores observacionales. En la siguiente figura, se agregan estos errores por medio de una dispersión a las densidades de flujo utilizadas, donde $1\sigma = f/4$.

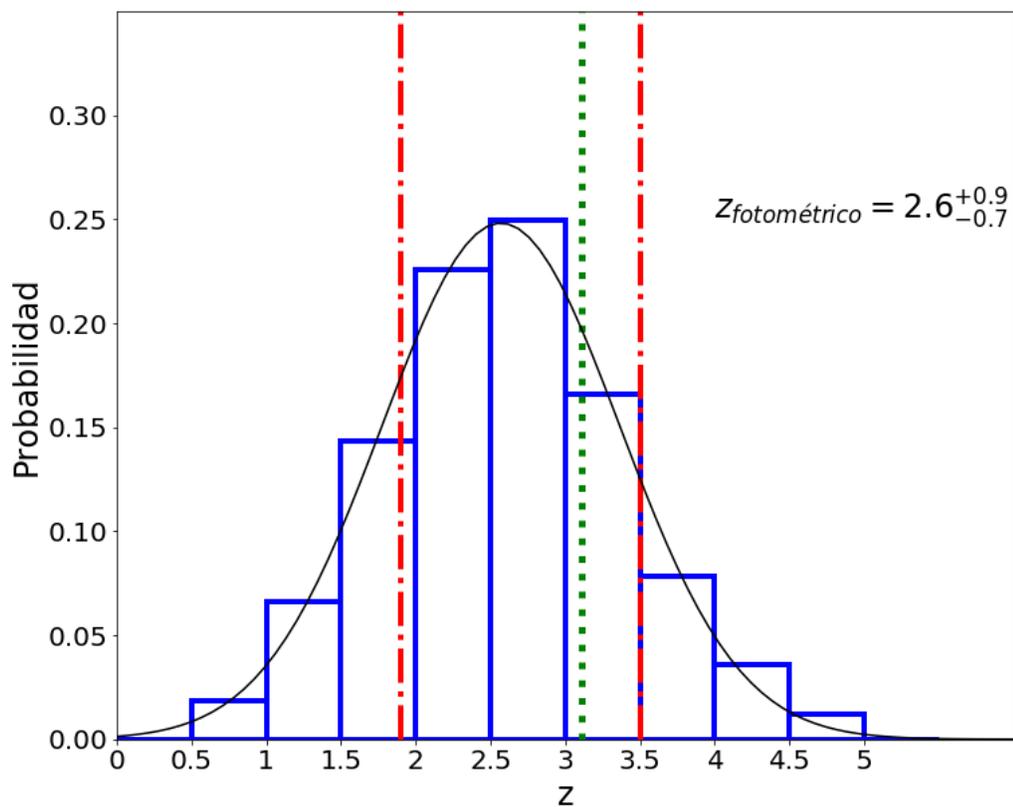


Figura 3.10: Distribución de corrimiento al rojo calculada para una galaxia con $z = 3,110$. La curva negra muestra el ajuste Gaussiano al histograma, cuya moda representa el z_{phot} más probable para la galaxia. Las líneas rojas delimitan el intervalo de confianza al 68% para este z_{phot} . La línea punteada de color verde muestra el valor real del z de la galaxia.

luminosidad a $60 \mu\text{m}$, definida por Saunders et al. [Sau90], adoptando un modelo de evolución solamente en luminosidad $\phi(L,z) = \phi(L/L^*(z))$, donde:

$$L^*(z) = \begin{cases} (1+z)^{3,2}L^*(0) & \text{si } z \leq 2 \\ 33,6L^*(0) & \text{si } 2 < z \leq 6 \end{cases} \quad (3.9)$$

Para este trabajo, sin embargo, se utilizó la función de luminosidad a $250 \mu\text{m}$ de Koprowski et al. [Kop17], cuya evolución no solamente está descrita en términos de luminosidad, sino también en términos de densidad de fuentes (tanto L^* como Φ^* son dependientes de z , ver ecuaciones 1.8 y 1.7). La principal ventaja de esta función de luminosidad es que proviene del ajuste a observaciones submilimétricas y milimétricas ($850 \mu\text{m}$ y 1.3 mm), en vez de observaciones a $60 \mu\text{m}$; logrando así representar mejor a la población de galaxias submilimétricas. Asimismo, la función de luminosidad de Koprowski et al. [Kop17] reproduce de manera apropiada los números de cuentas a $450, 850$ y $1100 \mu\text{m}$.

El segundo gran cambio efectuado fue el de la asignación de los SEDs para las galaxias simuladas. Originalmente se contaba con un banco de menos de 20 SEDs, correspondientes a galaxias observadas, a las que se les conocía el corrimiento al rojo espectroscópico. Si bien es cierto, se espera que estos SEDs (mezcla de galaxias "starburst", AGN, y galaxias con ambas componentes) representen adecuadamente a las galaxias submilimétricas, debido al bajo número de SEDs disponibles, ésta población de galaxias podría estar sub representada. Por el contrario, en este trabajo se adopta una nueva metodología, para la cual se tiene un SED propio para cada galaxia simulada. Dicho SED es la unión de un modelo simple de cuerpo negro modificado, identificado con una única temperatura de polvo, y una ley de potencias, que representa la emisión de polvo caliente en el mediano infrarrojo. Para encontrar la temperatura del polvo para el SED particular de cada galaxia, se utiliza la ecuación 1.10 y relación $\lambda_{pico} \approx b/T^{0,9}$, las cuales describen la dependencia que tiene la temperatura del polvo con la longitud de onda del pico de emisión de la galaxia, y ésta con la luminosidad infrarroja (L_{FIR}). La ventaja de utilizar este modelo de SED, era incluir en la metodología, la bien conocida relación temperatura de polvo - luminosidad infrarroja, mencionada en diversos estudios [Cha05][Mag12][Swi14][Hod16].

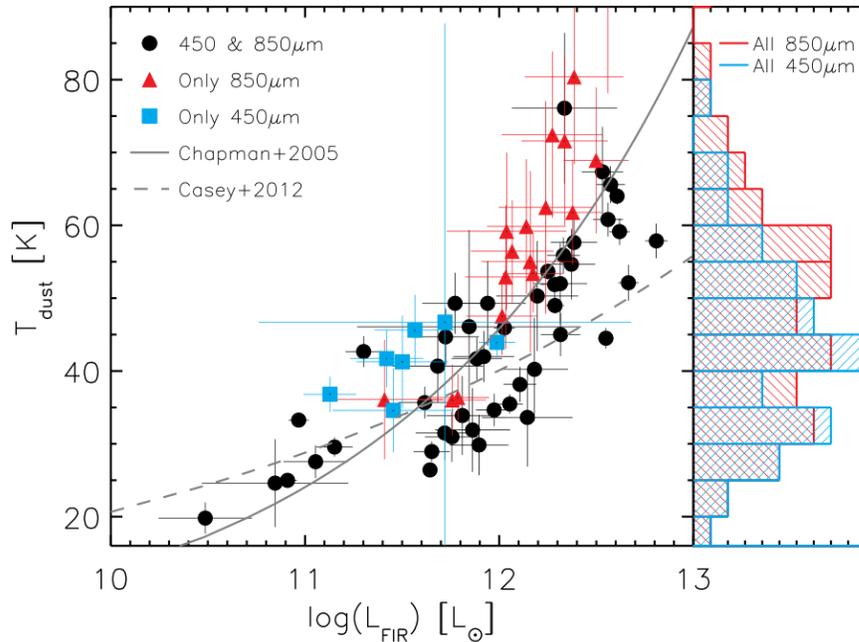


Figura 3.11: Figura tomada del artículo de Zavala et al [Zav18], que muestra la relación entre la temperatura del polvo y la luminosidad infrarroja para galaxias submilimétricas. Los puntos rojos, azules y negros representan galaxias observadas a 450 y 850 μm , mientras que las líneas representan modelos que buscan reproducir esta relación. La línea sólida es el modelo utilizado por Chapman et al [Cha05] y la línea discontinua describe el modelo de Casey et al [Cas18].

Sin embargo, la figura 3.1 muestra claramente, como el rango de temperaturas para el catálogo de 40000 galaxias simuladas en este trabajo resulta muy estrecho: 15 – 50 K. La forma del SED y su temperatura asociada son 2 de las principales variables, que pueden afectar las trazas de color generadas para determinar el z_{phot} . Por lo tanto, como se ve en la figura 3.2, el rango de temperaturas encontrado genera poca dispersión en las trazas de color, esto limita automáticamente la posibilidad de determinar el z_{phot} de galaxias con temperaturas mayores a 50 K, de manera correcta.

La figura 3.11 fue tomada del artículo de Zavala et al [Zav18] y muestra la relación entre la temperatura del polvo y la luminosidad infrarroja para galaxias submilimétricas. Los puntos rojos, azules y negros representan galaxias observadas a 450 y 850 μm . mientras que las líneas mostradas representan modelos que buscan reproducir esta relación. La línea sólida es el modelo utilizado por Chapman et al [Cha05] y la línea discontinua describe el modelo de Casey et al [Cas18]. Como se puede observar, este

último modelo no describe apropiadamente los resultados obtenidos en el artículo de Zavala et al. [Zav18], ya que predice un rango menor de temperaturas. Dicha curva es exactamente el modelo que se utiliza en este trabajo, por lo que es posible que las galaxias submilimétricas simuladas tengan un rango de temperatura de polvo limitado, que no necesariamente coincide con las observaciones. La limitante en las temperaturas de polvo tiene una consecuencia directa sobre la estimación del corrimiento al rojo fotométrico, ya que al tener una población de galaxias modelo, con un rango de temperaturas bajo, la determinación de z_{phot} para observaciones de galaxias reales, con temperaturas mayores se ve afectada. Distintos autores han encontrado relaciones, que muestran una correlación entre la temperatura del polvo y z de la galaxia, por lo que el algoritmo propuesto en este trabajo podría presentar problemas para el cálculo de corrimientos al rojo fotométricos de galaxias con un z alto [Zav18].

El último cambio significativo realizado en la implementación de este método, para determinar corrimientos al rojo fotométricos fue la actualización al lenguaje Python. Este lenguaje de programación ofrece muchas ventajas, como por ejemplo que es de libre acceso, tiene implementados paquetes específicos para trabajar en Astronomía, y es ampliamente usado en la comunidad de astrofísicos. Por lo tanto, ofrece versatilidad, y facilidad de uso.

Finalmente, con el fin de evaluar la eficacia del método mostrado en esta tesis para determinar corrimientos al rojo fotométricos, se determinaron los corrimientos al rojo fotométricos de una población de 250 galaxias objetivo. En este caso, las galaxias objetivo son galaxias extraídas del catálogo simulado (y que no participarán en la asignación de SEDs), ya que el primer paso para probar la autoconsistencia de cualquier método consiste en mostrar, que puede arrojar resultados correctos, utilizando como entrada modelos conocidos. La figura 3.12 muestra la relación entre los valores de corrimiento al rojo reales de las galaxias objetivo y los determinados por el método implementado. La línea discontinua representa una relación 1:1 entre el z real y el z fotométrico. Debido a que la mayoría de los puntos de la gráfica se encuentran distribuidos alrededor de la línea discontinua, es posible concluir que la eficacia del método aplicado es bastante alta, especialmente para valores de $z < 2,5$. Sin embargo, para valores mayores

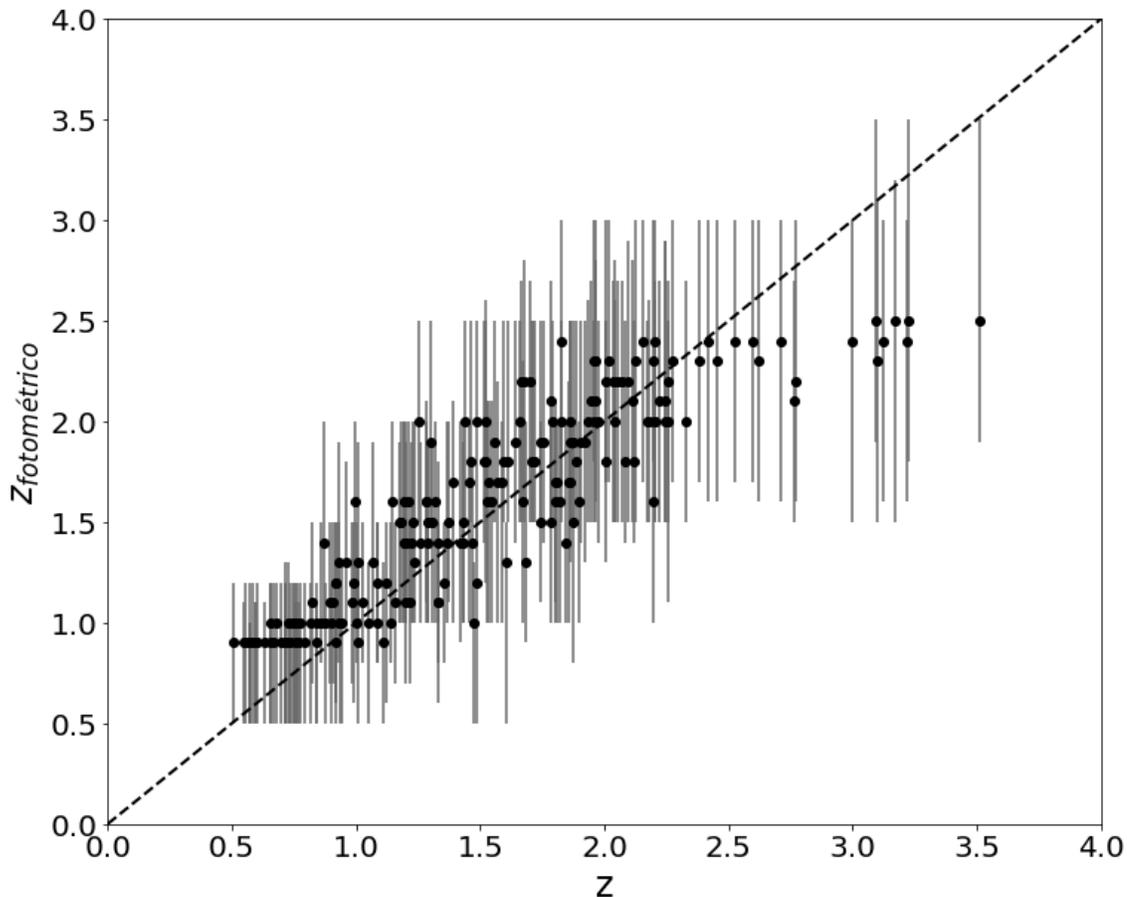


Figura 3.12: Corrimiento al rojo fotométrico versus corrimiento al rojo real para 250 galaxias extraídas del catálogo simulado. El cálculo del corrimiento al rojo fotométrico supone una detección con una señal a ruido de 4σ a 250, 350 y 500 μm simultáneamente. Las líneas grises representan el intervalo de confianza al 68% del z_{phot} . La línea discontinua representa una relación 1:1 entre el corrimiento al rojo fotométrico y el corrimiento al rojo real.

a $z \sim 2,5$, se observa una tendencia de los puntos a alejarse de la línea discontinua; es decir, que la estimación de corrimientos al rojo fotométricos pierde su eficacia y subestima los valores de z . La razón es que a altos corrimientos al rojo, observaciones a 250, 350 y 500 μm no permiten un correcto muestreo del pico de emisión de polvo de las galaxias. Por consiguiente, este problema se soluciona utilizando observaciones a longitudes de onda mayores. Por ejemplo, a 850, 1100 y 1400 μm , que son algunas de las bandas más comúnmente utilizadas. Este efecto ha sido ampliamente observado y documentado en los trabajos previos [Hug02] [Are03].

4 Conclusiones

En este trabajo se implementó un algoritmo computacional, utilizando observaciones a longitudes de onda entre el lejano infrarrojo y el milimétrico, para el cálculo del corrimiento al rojo fotométrico de galaxias submilimétricas. Se logró, de manera exitosa, el desarrollo de un catálogo para generar galaxias submilimétricas simuladas a partir de su luminosidad a $250 \mu\text{m}$ y el corrimiento al rojo z . Dicho catálogo muestrea, de manera apropiada, la función de luminosidad elaborada por Koprowski et al. [Kop17], la cual describe correctamente las propiedades de las galaxias submilimétricas.

Los catálogos generados reproducen los números de cuentas a $850 \mu\text{m}$, reportados en diferentes estudios [Sco02][Zav17][Ote16][Sim15][Cas13][Gea17], la selección adecuada de la función de luminosidad. Las galaxias elegidas para el catálogo final debían cumplir los criterios observacionales mínimos definidos para distintas densidades de flujo. El catálogo final consiste en alrededor de 40000 galaxias sintéticas, que como se dijo anteriormente reproducen correctamente los números de cuenta a $850 \mu\text{m}$.

Se logró determinar, que el modelo de cuerpo gris, utilizado por Casey et al. [Cas18] es bastante eficiente para modelar los SEDs de galaxias submilimétricas. Sin embargo, presenta un problema, ya que el intervalo de temperaturas es menor que en trabajos anteriores, esto puede mejorarse al agregar una distribución de temperatura que permita representar mejor la dispersión observada en la figura 3.11. Los SEDs generados mostraron un máximo de temperatura de 50 K, mientras que se han reportado observaciones de galaxias con temperaturas hasta los 80 K [Zav18]. Para encontrar el corrimiento al rojo fotométrico se basó en una distribución de probabilidad Gaussiana multivariable, que es función de los colores de las distintas galaxias. Con esta función es posible determinar la probabilidad de que la galaxia estudiada tenga ciertos valores de z , finalmente se estimaron las barras de error para el valor de z encontrado, con un 68% de confianza.

La validez del método para determinar corrimientos al rojo se corroboró por medio del cálculo de la distribución de corrimientos al rojo fotométricos de galaxias escogidas aleatoriamente del propio modelo. Es decir, una vez definido el catálogo de 40 000 galaxias, se eligieron 250 galaxias al azar, se las retiró del catálogo y se les determinó el z_{phot} con un intervalo de confianza del 68 %. Para la determinación de corrimiento al rojo se utilizaron las densidades de flujo de 250, 350 y 500 μm , esto generó que los cálculos fueran bastante precisos para valores de corrimiento al rojo menores a 2.5. El cálculo se vuelve menos exacto para valores de z mayores a 2.5, lo cual es posible de mejorar por medio de un aumento de las densidades de flujo utilizadas, en particular a longitudes de onda mayores desde los 850 a los 1400 μm .

Para próximos trabajos sería importante considerar nuevas funciones de luminosidad para generar el muestreo del catálogo de galaxias simuladas, ya que permitiría comparar las distintas funciones de luminosidad disponibles por medio de los números de cuenta, correspondientes a los catálogos generados. Así mismo, se podrían comparar por medio de los corrimientos al rojo fotométricos, calculados con cada una de las distintas funciones de luminosidad. Adicionalmente, una de las principales consideraciones es desarrollar un modelo nuevo para la relación entre la luminosidad de las galaxias y la temperatura de emisión de polvo, para modelar de forma más eficiente las galaxias a altas temperaturas y altos corrimientos al rojo. Finalmente, para mejorar la precisión del algoritmo es recomendable utilizar observaciones a mayor longitud de onda en adición con las densidades de flujo a 250, 350 y 500 μm , principalmente 850, 1100 y 1400 μm , para así poder ajustar de mejor forma los cálculos del corrimiento al rojo fotométrico para galaxias con corrimientos al rojo mayores a 2.5.

Así mismo, para mejorar la eficacia del algoritmo desarrollado en este trabajo, será esencial aplicarlo a fuentes reales, para cuales se conoce su corrimiento al rojo espectroscópico. Este trabajo se realizó con la finalidad de desarrollar una herramienta para el cálculo del corrimiento al rojo fotométrico de galaxias submilimétricas, que tiene observaciones únicamente en el rango del lejano infrarrojo hasta el milimétrico. Por ejemplo, el censo efectuado con la cámara AzTEC a 1.1 mm entre 2007 y 2008 [Zeb18]. Los campos elegidos en dicho censo están centrados alrededor de AGNs, con valores

de z entre 0.5-6.3, los cuales se espera sean centros de concentración de galaxias masivas con altos corrimientos al rojo.

Bibliografía

- [Ade16] P. A. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, M. Ashdown, J. Aumont, C. Baccigalupi, A. Banday, R. Barreiro, J. Bartlett, N. Bartolo et al. Planck 2015 results-xiii. cosmological parameters. *Astronomy & Astrophysics*, 594:A13, 2016.
- [Are03] I. Aretxaga, D. H. Hughes, E. L. Chapin, E. Gaztañaga, J. S. Dunlop and R. J. Ivison. Breaking the ‘redshift deadlock’—ii. the redshift distribution for the submillimetre population of galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 342(3):759–801, 2003.
- [Bau07] C. Baugh, C. Lacey, C. Frenk, G. Granato, L. Silva, A. Bressan, A. Benson and S. Cole. The nature of (sub) millimeter galaxies in hierarchical models. In *From Z-Machines to ALMA:(Sub) Millimeter Spectroscopy of Galaxies*, volume 375, page 7. 2007.
- [Ben10] A. J. Benson. Galaxy formation theory. *Physics Reports*, 495(2):33–86, 2010.
- [Bes79] D. Best and N. I. Fisher. Efficient simulation of the von mises distribution. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 28(2):152–157, 1979.
- [Bol00] M. Bolzonella, J.-M. Miralles and R. Pelló. Photometric redshifts based on standard sed fitting procedures. Arxiv preprint astro-ph/0003380, 2000.
- [Bri17] D. Brisbin, O. Miettinen, M. Aravena, V. Smolčić, I. Delvecchio, C. Jiang, B. Magnelli, M. Albrecht, A. M. Arancibia, H. Aussel et al. An alma survey of submillimeter galaxies in the cosmos field: Multiwavelength counterparts and redshift distribution. *Astronomy & Astrophysics*, 608:A15, 2017.
- [Car06] B. W. Carroll and D. A. Ostlie. An introduction to modern astrophysics and cosmology. An introduction to modern astrophysics and cosmology/BW Carroll and DA Ostlie. 2nd edition. San Francisco: Pearson, 2006.

- [Cas12] C. M. Casey. Far-infrared spectral energy distribution fitting for galaxies near and far. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 425(4):3094–3103, 2012.
- [Cas13] C. M. Casey, C.-C. Chen, L. L. Cowie, A. J. Barger, P. Capak, O. Ilbert, M. Koss, N. Lee, E. Le Floch, D. B. Sanders and J. P. Williams. Characterization of SCUBA-2 450 μm and 850 μm selected galaxies in the COSMOS field. , 436(3):1919–1954, December 2013. doi:10.1093/mnras/stt1673.
- [Cas14] C. M. Casey, D. Narayanan and A. Cooray. Dusty star-forming galaxies at high redshift. *Physics Reports*, 541(2):45–161, 2014.
- [Cas18] C. M. Casey, J. A. Zavala, J. Spilker, E. da Cunha, J. Hodge, C.-L. Hung, J. Staguhn, S. L. Finkelstein and P. Drew. The brightest galaxies in the dark ages: Galaxies’ dust continuum emission during the reionization era. *The Astrophysical Journal*, 862(1):77, 2018.
- [Cas20] C. M. Casey. Far-infrared photometric redshifts: A new approach to a highly uncertain enterprise. *The Astrophysical Journal*, 900(1):68, 2020.
- [Cha03] S. C. Chapman, R. Windhorst, S. Odewahn, H. Yan and C. Conselice. Hubble Space Telescope Images of Submillimeter Sources: Large Irregular Galaxies at High Redshift. , 599(1):92–104, December 2003. doi:10.1086/379120.
- [Cha05] S. C. Chapman, A. W. Blain, I. Smail and R. J. Ivison. A Redshift Survey of the Submillimeter Galaxy Population. , 622(2):772–796, April 2005. doi:10.1086/428082.
- [Com04] F. Combes, P. Boissé, A. Mazure and A. Blanchard. *Galaxies and cosmology*. Springer Science & Business Media, 2004.
- [DL06] G. De Lucia, V. Springel, S. D. White, D. Croton and G. Kauffmann. The formation history of elliptical galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 366(2):499–509, 2006.
- [Fra20] M. Franco, D. Elbaz, L. Zhou, B. Magnelli, C. Schreiber, L. Ciesla, M. Dickinson, N. Nagar, G. Magdis, D. Alexander et al. Goods-alma: The slow down-

fall of star formation in $z=2-3$ massive galaxies. *Astronomy & Astrophysics*, 643:A30, 2020.

- [FS01] A. Fernandez-Soto, K. M. Lanzetta, H.-W. Chen, S. M. Pascarelle and N. Yahata. On the compared accuracy and reliability of spectroscopic and photometric redshift measurements. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 135(1):41, 2001.
- [Gea17] J. E. Geach, J. S. Dunlop, M. Halpern, I. Smail, P. van der Werf, D. M. Alexander, O. Almaini, I. Aretxaga, V. Arumugam, V. Asboth, M. Banerji, J. Beaulieu, P. N. Best, A. W. Blain, M. Birkinshaw, E. L. Chapin, S. C. Chapman, C. C. Chen, A. Chrysostomou, C. Clarke, D. L. Clements, C. Conselice, K. E. K. Coppin, W. I. Cowley, A. L. R. Danielson, S. Eales, A. C. Edge, D. Farrah, A. Gibb, C. M. Harrison, N. K. Hine, D. Hughes, R. J. Ivison, M. Jarvis, T. Jenness, S. F. Jones, A. Karim, M. Koprowski, K. K. Knudsen, C. G. Lacey, T. Mackenzie, G. Marsden, K. McAlpine, R. McMahon, R. Meijerink, M. J. Michałowski, S. J. Oliver, M. J. Page, J. A. Peacock, D. Rigopoulou, E. I. Robson, I. Roseboom, K. Rotermund, D. Scott, S. Serjeant, C. Simpson, J. M. Simpson, D. J. B. Smith, M. Spaans, F. Stanley, J. A. Stevens, A. M. Swinbank, T. Targett, A. P. Thomson, E. Valiante, D. A. Wake, T. M. A. Webb, C. Willott, J. A. Zavala and M. Zemcov. The SCUBA-2 Cosmology Legacy Survey: 850 μm maps, catalogues and number counts. , 465(2):1789–1806, February 2017. doi: 10.1093/mnras/stw2721.
- [Gla17] K. Glazebrook, C. Schreiber, I. Labbé, T. Nanayakkara, G. G. Kacprzak, P. A. Oesch, C. Papovich, L. R. Spitler, C. M. Straatman, K.-V. H. Tran et al. A massive, quiescent galaxy at a redshift of 3.717. *Nature*, 544(7648):71–74, 2017.
- [Hay13] C. C. Hayward, D. Narayanan, D. Kereš, P. Jonsson, P. F. Hopkins, T. Cox and L. Hernquist. Submillimetre galaxies in a hierarchical universe: number counts, redshift distribution and implications for the imf. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 428(3):2529–2547, 2013.
- [Hug02] D. Hughes, I. Aretxaga, E. Chapin, E. Gaztanaga, J. Dunlop, M. Devlin, M. Halpern, J. Gundersen, J. Klein, C. Netterfield et al. Breaking the ‘redshift

- deadlock'–i. constraining the star formation history of galaxies with submillimetre photometric redshifts. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 335(4):871–882, 2002.
- [Kla97] U. Klaas, M. Haas, I. Heinrichsen and B. Schulz. Infrared spectral energy distributions of the interacting galaxies arp 244, ngc 6240, and arp 220. *Astronomy and Astrophysics*, 325:L21–L24, 1997.
- [Kop17] M. P. Koprowski, J. S. Dunlop, M. J. Michałowski, K. E. K. Coppin, J. E. Geach, R. J. McLure, D. Scott and P. P. van der Werf. The evolving far-IR galaxy luminosity function and dust-obscured star formation rate density out to $z=5$. , 471(4):4155–4169, November 2017. doi:10.1093/mnras/stx1843.
- [Lac10] C. Lacey, C. Baugh, C. Frenk, A. Benson, A. Orsi, L. Silva, G. Granato and A. Bressan. Predictions for herchel from λ -cold dark matter: unveiling the cosmic star formation history. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 405(1):2–28, 2010.
- [Lia19] L. Liang, R. Feldmann, D. Kereš, N. Z. Scoville, C. C. Hayward, C.-A. Faucher-Giguère, C. Schreiber, X. Ma, P. F. Hopkins and E. Quataert. On the dust temperatures of high-redshift galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 489(1):1397–1422, 2019.
- [Mic10] M. Michałowski, J. Hjorth and D. Watson. Cosmic evolution of submillimetre galaxies and their contribution to stellar mass assembly. *Astronomy & Astrophysics*, 514:A67, 2010.
- [Mis17] C. W. Misner, K. S. Thorne and J. A. Wheeler. *Gravitation*. Princeton University Press, 2017.
- [Mo10] H. Mo, F. Van den Bosch and S. White. *Galaxy formation and evolution*. Cambridge University Press, 2010.
- [Naa06] T. Naab, S. Khochfar and A. Burkert. Properties of early-type, dry galaxy mergers and the origin of massive elliptical galaxies. *The Astrophysical Journal Letters*, 636(2):L81, 2006.

- [Nar13] D. Narayanan and R. Davé. The cosmic evolution of the imf under the jeans conjecture with implications for massive galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 436(4):2892–2906, 2013.
- [Ote16] I. Oteo, M. Zwaan, R. Ivison, I. Smail and A. Biggs. Almacal i: First dual-band number counts from a deep and wide alma submillimeter survey, free from cosmic variance. *The Astrophysical Journal*, 822(1):36, 2016.
- [Ric09] J. Rich. *Fundamentals of cosmology*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [Rie13] D. A. Riechers, C. M. Bradford, D. L. Clements, C. D. Dowell, I. Pérez-Fournon, R. J. Ivison, C. Bridge, A. Conley, H. Fu, J. D. Vieira, J. Wardlow, J. Calanog, A. Cooray, P. Hurley, R. Neri, J. Kamenetzky, J. E. Aguirre, B. Altieri, V. Arumugam, D. J. Benford, M. Béthermin, J. Bock, D. Burgarella, A. Cabrera-Lavers, S. C. Chapman, P. Cox, J. S. Dunlop, L. Earle, D. Farrah, P. Ferrero, A. Franceschini, R. Gavazzi, J. Glenn, E. A. G. Solares, M. A. Gurwell, M. Halpern, E. Hatziminaoglou, A. Hyde, E. Ibar, A. Kovács, M. Krips, R. E. Lupu, P. R. Maloney, P. Martinez-Navajas, H. Matsuhara, E. J. Murphy, B. J. Naylor, H. T. Nguyen, S. J. Oliver, A. Omont, M. J. Page, G. Petitpas, N. Rangwala, I. G. Roseboom, D. Scott, A. J. Smith, J. G. Staguhn, A. Streblyanska, A. P. Thomson, I. Valtchanov, M. Viero, L. Wang, M. Zemcov and J. Zmuidzinas. A dust-obscured massive maximum-starburst galaxy at a redshift of 6.34. *Nature*, 496(7445):329–333, April 2013. doi:10.1038/nature12050.
- [Sau90] W. Saunders, M. Rowan-Robinson, A. Lawrence, G. Efstathiou, N. Kaiser, R. Ellis and C. Frenk. The 60- μ and far-infrared luminosity functions of iras galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 242(3):318–337, 1990.
- [Sch07] P. Schneider. *Extragalactic astronomy and cosmology: an introduction*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [Sco02] S. E. Scott, M. J. Fox, J. S. Dunlop, S. Serjeant, J. A. Peacock, R. J. Ivison, S. Oliver, R. G. Mann, A. Lawrence, A. Efstathiou, M. Rowan-Robinson, D. H.

Hughes, E. N. Archibald, A. Blain and M. Longair. The SCUBA 8-mJy survey - I. Submillimetre maps, sources and number counts. , 331(4):817–838, April 2002. doi:10.1046/j.1365-8711.2002.05193.x.

- [Sim15] J. Simpson, I. Smail, A. Swinbank, S. Chapman, J. Geach, R. Ivison, A. Thomson, I. Aretxaga, A. Blain, W. Cowley et al. The scuba-2 cosmology legacy survey: Alma resolves the bright-end of the sub-millimeter number counts. *The Astrophysical Journal*, 807(2):128, 2015.
- [Tac08] L. Tacconi, R. Genzel, I. Smail, R. Neri, S. Chapman, R. Ivison, A. Blain, P. Cox, A. Omont, F. Bertoldi et al. Submillimeter galaxies at $z \sim 2$: Evidence for major mergers and constraints on lifetimes, imf, and co-h₂ conversion factor. *The Astrophysical Journal*, 680(1):246, 2008.
- [Tof14] S. Toft, V. Smolčić, B. Magnelli, A. Karim, A. Zirm, M. Michalowski, P. Capak, K. Sheth, K. Schawinski, J.-K. Krogager et al. Submillimeter galaxies as progenitors of compact quiescent galaxies. *The Astrophysical Journal*, 782(2):68, 2014.
- [Wil17] A. Wilkinson, O. Almaini, C.-C. Chen, I. Smail, V. Arumugam, A. Blain, E. L. Chapin, S. C. Chapman, C. J. Conselice, W. I. Cowley et al. The scuba-2 cosmology legacy survey: the clustering of submillimetre galaxies in the ukidss uds field. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 464(2):1380–1392, 2017.
- [Zav17] J. A. Zavala, I. Aretxaga, J. E. Geach, D. H. Hughes, M. Birkinshaw, E. Chapin, S. Chapman, C.-C. Chen, D. L. Clements, J. S. Dunlop, D. Farrah, R. J. Ivison, T. Jenness, M. J. Michałowski, E. I. Robson, D. Scott, J. Simpson, M. Spaans and P. van der Werf. The SCUBA-2 Cosmology Legacy Survey: the EGS deep field - I. Deep number counts and the redshift distribution of the recovered cosmic infrared background at 450 and 850 μ m. , 464(3):3369–3384, January 2017. doi:10.1093/mnras/stw2630.
- [Zav18] J. Zavala, I. Aretxaga, J. Dunlop, M. Michałowski, D. Hughes, N. Bourne, E. Chapin, W. Cowley, D. Farrah, C. Lacey et al. The scuba-2 cosmology le-

gacy survey: The egs deep field–ii. morphological transformation and multi-wavelength properties of faint submillimetre galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 475(4):5585–5602, 2018.

- [Zeb18] M. Zeballos, I. Aretxaga, D. H. Hughes, A. Humphrey, G. W. Wilson, J. Austerlmann, J. S. Dunlop, H. Ezawa, D. Ferrusca, B. Hatsukade, R. J. Ivison, R. Kawabe, S. Kim, T. Kodama, K. Kohno, A. Montaña, K. Nakanishi, M. Pliionis, D. Sánchez-Argüelles, J. A. Stevens, Y. Tamura, M. Velazquez and M. S. Yun. AzTEC 1.1 mm observations of high-z protocluster environments: SMG overdensities and misalignment between AGN jets and SMG distribution. , 479(4):4577–4632, October 2018. doi:10.1093/mnras/sty1714.

