

MASTER'S DEGREE IN ASTROPHYSICS

MASTER EN ASTROFÍSICA



Desvelando las propiedades de la Emisión Anómala de Microondas a partir de datos de QUIJOTE-MFI: análisis de apilamiento en regiones galácticas

Autor / Author: Hamza Akoudad Ekajouan

**Supervisores / Supervisors : Carlos Hugo López Caraballo y
Mateo Fernández Torreiro**

لأمي حكمة إجموعن

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Emisiones galácticas en radio	1
1.2. Emisión Anómala de Microondas (AME)	3
1.3. Motivación y objetivos	5
2. Datos y metodología	7
2.1. Catálogo de fuentes AME	7
2.1.1. Propiedades del catálogo y objetos a estudiar	8
2.2. Distribución espectral de energía (SED)	10
2.2.1. Mapas QUIJOTE-MFI y auxiliares	11
2.2.2. Fotometría de apertura	15
2.3. Distribución espectral de energía: técnica de apilamiento	16
2.4. Ajuste paramétrico de la SED mediante el método MCMC	18
2.4.1. Modelos	20
2.5. Distribución espectral de energía: SED sintética	21
3. Resultados y discusión	24
3.1. Muestra 1	24
3.2. Muestra 2	25
3.3. Muestra 3	28
4. Conclusiones	33

Resumen

La emisión anómala de microondas (AME, *Anomalous Microwave Emission*) es una importante componente de la emisión en el rango de frecuencias entre 10 y 60 GHz cuyo origen aún no se comprende completamente. Para analizar esta situación, en este trabajo realizamos un análisis estadístico de la AME de muestras conformadas por fuentes compactas de nuestra Galaxia, seleccionadas según criterios específicos. Para ello, se han utilizado los mapas públicos del instrumento QUIJOTE-MFI (Q-U-I JOint TEnerife-Multifrequency Instrument) junto con otra serie de mapas. Luego, se utiliza el método de apilamiento (*stacking*) de mapas para estudiar las propiedades generales de las muestras. Estos mapas se utilizan para producir así los espectros (SED, *Spectral Energy Distribution*) a una escala angular de 1° para cada muestra. Finalmente, se ajusta la SED apilada mediante un método paramétrico de separación de componentes, teniendo en cuenta las principales componentes entre frecuencias de MHz y THz, proporcionando los valores de los parámetros de las muestras.

El estudio ha permitido caracterizar los principales procesos físicos que actúan en los rangos de frecuencias de radio a infrarrojo lejano, tales como la emisión sincrotrón, la radiación libre-libre y la emisión del polvo térmico, prestando especial atención a la AME. Se ha creado un catálogo reducido de fuentes galácticas compactas con AME y se han utilizado datos de experimentos de microondas e infrarrojos como QUIJOTE-MFI, WMAP y *Planck*. Posteriormente, se exploraron las propiedades físicas estadísticas de la AME aplicando códigos de separación de componentes para la caracterización de cada SED apilada. Finalmente se identificaron las degeneraciones que surgen al comparar las SEDs apilada y sintética, donde el espectro sintético se genera mediante las predicciones de los modelos de cada fuente de una muestra dada.

La técnica de *stacking* consiste en sumar, a nivel de mapa, la emisión de los distintos objetos dentro de cada muestra incrementando la señal a ruido de las mediciones. Esto se puede observar en la muestra $W_{0.8}$ donde hay un cambio en el valor promedio de $W_{\text{AME}} = 1.11^{+0.24}_{-0.21}$ para el caso sintético a $W_{\text{AME}} = 0.92^{+0.07}_{-0.06}$ para el caso apilado. El hecho de que disminuya la anchura de la AME podría ser debido a la sobrestimación del parámetro W_{AME} en el del ajuste de las SEDs de las fuentes individuales. No obstante, la SED apilada muestra valores que no alcanzan el rango de 0.4–0.7 predicho por los modelos teóricos de *spinning dust*.

Por otro lado, cuando se presenta una medida de emisión alta, $EM = 1888^{+82}_{-83} \text{ pc cm}^{-6}$ para el caso apilado de la muestras 3, la frecuencia de la AME varía de un valor de $23 \pm 3 \text{ GHz}$ para el caso sintético a un valor de $20.7^{+1.6}_{-1.4} \text{ GHz}$ para el caso apilado. Este cambio evidencia la correlación que existe entre los parámetros ν_{AME} y EM .

En este trabajo hemos demostrado que el uso de la técnica de *stacking* permite esquivar algunas de las limitaciones del análisis estadístico convencional. Además, según vayan surgiendo nuevos estudios que aporten datos adicionales sobre la AME, estos se podrán sumar al trabajo presente para mejorar la precisión. Ejemplos de esto podrían ser tanto los datos de CBASS a 5 GHz, como estudios de fuentes extragalácticas y polarización de la AME.

Palabras clave: Apilamiento - AME - CMB - análisis de datos - QUIJOTE - Planck - WMAP - sincrotrón - radiación libre-libre - fotometría.

Abstract

The Anomalous Microwave Emission (AME) is a significant component of the emission in the frequency range between 10 and 60 GHz whose origin is still not fully understood. To analyze this situation, we conducted a statistical analysis of the AME from samples composed of compact sources in our Galaxy, selected according to specific criteria. For this purpose, we used the public maps from the QUIJOTE-MFI instrument (Q-U-I JOint TEnerife-Multifrequency Instrument) along with a series of other maps. Then, the stacking method of maps is used to study the general properties of the samples. These maps are used to produce the Spectral Energy Distributions (SED) at an angular scale of 1° for each sample. Finally, the stacked SED is fitted using a parametric component separation method, taking into account the main components between MHz and THz frequencies, providing the parameter values for the samples.

The study has allowed us to characterize the main physical processes that operate in the frequency ranges from radio to far-infrared, such as synchrotron emission, free-free radiation, and thermal dust emission, with particular attention to the AME. A reduced catalog of compact galactic sources with AME has been created, and data from microwave and infrared experiments such as QUIJOTE-MFI, WMAP, and *Planck* have been used. Subsequently, the statistical physical properties of the AME were explored by applying component separation codes for the characterization of each stacked SED. Finally, the degeneracies that arise when comparing the stacked and synthetic SEDs, where the synthetic spectrum is generated by averaging the predictions of the models of each source of a given sample, were identified.

The stacking technique consists of summing, at the map level, the emission from different objects within each sample to increase the signal-to-noise ratio of the measurements. This can be observed in the $W_{0.8}$ sample, where there is a change in the average value of $W_{\text{AME}} = 1.11_{-0.21}^{+0.24}$ for the synthetic case to $W_{\text{AME}} = 0.92_{-0.06}^{+0.07}$ for the stacked case. The fact that the width of the AME decreases could be due to the overestimation of the W_{AME} parameter in the fit of the individual sources' SEDs. Nevertheless, the stacked SED shows values that do not reach the 0.4–0.7 range predicted by theoretical *spinning dust* models.

On the other hand, when a high emission measurement is presented, $EM = 1888_{-83}^{+82} \text{ pc cm}^{-6}$ for the stacked case of sample 3, the AME frequency varies from $23 \pm 3 \text{ GHz}$ for the synthetic case to $20.7_{-1.4}^{+1.6} \text{ GHz}$ for the stacked case. This change shows the correlation between the ν_{AME} and EM parameters.

In this work, we have demonstrated that the use of the stacking technique allows us to circumvent some of the limitations of conventional statistical analysis. Additionally, as new studies providing additional data on the AME emerge, they can be added to the present work to improve accuracy. Examples of this could be data from CBASS at 5 GHz, as well as studies of extragalactic sources and AME polarization.

Keywords: Stacking - AME - CMB - data analysis - QUIJOTE - Planck - WMAP - synchrotron - free-free radiation - photometry.

Capítulo 1

Introducción

El estudio de las emisiones galácticas es crucial para comprender las propiedades de los procesos de emisión en el medio interestelar (ISM, por sus siglas en inglés de *Interstellar Medium*), así como su impacto como contaminante en el análisis de la fondo cósmico de microondas (CMB, por sus siglas *Cosmic Microwave Background*). En este capítulo, se describen de manera general las diversas emisiones galácticas, donde se detallará las características específicas de la emisión anómala de microondas (AME, por sus siglas en inglés *Anomalous Microwave Emission*), las cuales son importantes para entender nuestras motivaciones y objetivos.

1.1. Emisiones galácticas en radio

El estudio de los procesos de emisión del ISM son importantes para la caracterización del CMB tanto en intensidad como en polarización ([Planck Collaboration et al. 2020a](#); [LiteBIRD Collaboration et al. 2023a](#)). En intensidad, la emisión de la galaxia es dominante en un amplio rango de frecuencias (Figura 1.1); al extraer la señal del CMB, esta se puede ver contaminada por el resto de emisiones en el caso de que no se sustraigan correctamente. Estas emisiones galácticas también dificultan la separación de una posible componente polarizada de la emisión del CMB que podría aportar información sobre la inflación ([Abazajian et al. 2015](#); [BICEP2 Collaboration et al. 2014](#)). Esta tarea de la caracterización de las diferentes emisiones galácticas, es un serio reto para la búsqueda los modos-B de la polarización del CMB ([Watts et al. 2015](#); [POLARBEAR Collaboration et al. 2017](#); [Ade et al. 2019](#); [Planck Collaboration et al. 2020a](#); [Ade et al. 2021](#); [LiteBIRD Collaboration et al. 2023b](#)) y para la comunidad de interesada en comprender las variaciones espectrales y espaciales de la emisión galáctica ([Jones et al. 2018b](#); [Carretti et al. 2019](#); [Rubiño-Martín et al. 2023](#)).

Las emisiones de la galaxia se solapan a lo largo de la línea de visión junto con la señal del CMB. Como se mencionó anteriormente, durante los procesos de sustracción de las emisiones de la galaxia, es posible que queden residuos que contaminen el CMB. Por lo tanto, comprender las propiedades observacionales de estas emisiones puede contribuir a minimizar estos residuos. Como se puede observar en la Figura 1.1, a bajas frecuencias (< 15 GHz) domina la emisión sincrotrón de la galaxia, dicha radiación es producida por la aceleración de electrones por el campo magnético galáctico ([Ginzburg & Syrovatskii 1965](#); [Gardner & Whiteoak 1966](#); [Condon & Ransom 2016](#)) y está polarizada ([Gardner & Whiteoak 1966](#); [López-Caraballo et al. 2011](#)). La radiación libre-libre, también es importante a bajas frecuencias (< 10 GHz), es producida por la desaceleración de electrones por un campo eléctrico ([Condon & Ransom 2016](#)), pero

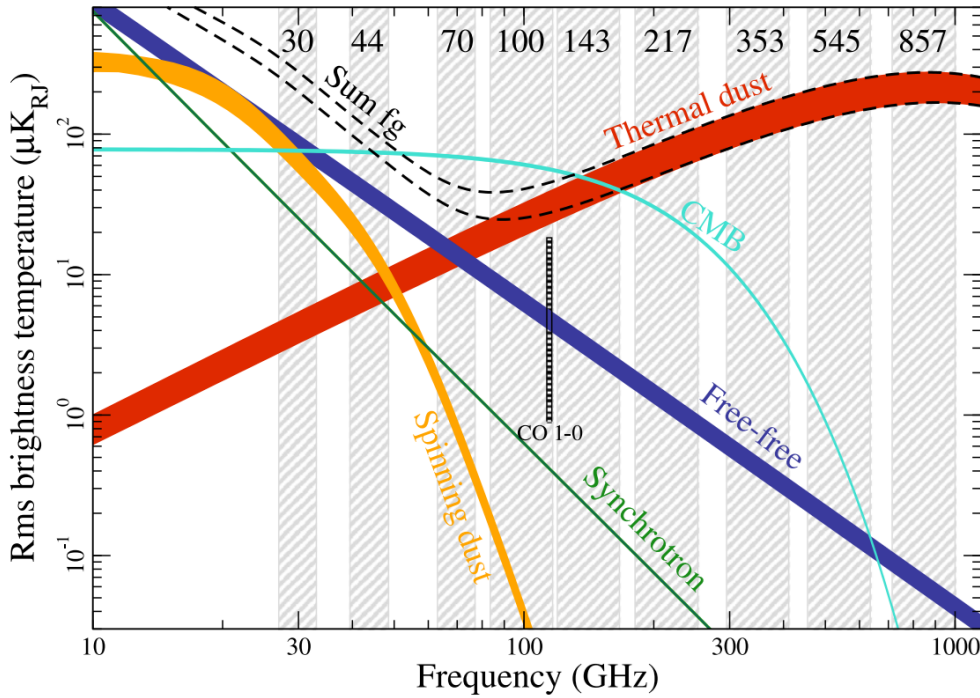


Figura 1.1: Resumen de la amplitud de las emisiones de la galaxia de intensidad (temperatura) a partir de los resultados de Planck de la separación de componentes. La temperatura de brillo r.m.s. frente a la frecuencia, en escalas angulares de 40 arcmin, se representa gráficamente para cada componente. *Spinning dust* es el modelo más aceptado para la AME (Erickson 1957; Draine & Lazarian 1998). Figura tomada de (Planck Collaboration et al. 2016)

al contrario que la emisión sincrotrón, no está polarizada (Rybicki & Lightman 1979; Trujillo-Bueno et al. 2002). En las bandas de alta frecuencia (> 300 GHz) domina la emisión del polvo térmico de la galaxia, consecuencia de granos de polvo que emiten un espectro de cuerpo negro modificado (Draine & Li 2001). La otra componente observable en el rango de microondas es la AME, descubierta hace menos de 30 años (Leitch et al. 1997; de Oliveira-Costa et al. 1998). Su espectro abarca el rango de las microondas, cuya naturaleza y origen aún no se comprenden completamente. Se ha propuesto que podría estar relacionada con los pequeños granos de polvo que giran rápidamente en el medio interestelar (Draine & Lazarian 1998; Draine & Lazarian 1999), pero aún se requiere más estudios observacionales para confirmar esta hipótesis y entender completamente el proceso físico que la origina (Ginzburg & Syrovatskii 1965; Ali-Haïmoud 2013; Dickinson et al. 2018).

Experimentos como WMAP (Bennett et al. 2013) y *Planck* (Planck Collaboration et al. 2020a,b) han hecho importantes aportes al proporcionar datos precisos en múltiples frecuencias (23 a 847 GHz), siendo de gran interés para nosotros los nuevos datos multifrecuencias (10-20 GHz) del experimento QUIJOTE (Q-U-I JOint TENERIFE-Multifrequency Instrument) (Rubiño-Martín et al. 2023), cuyo rango de frecuencias de 10 a 20 GHz cubre la caída de la emisión de la AME a bajas frecuencias, permitiendo una mejor separación entre los espectros de la emisión libre-libre, sincrotrón y la AME (Génova-Santos et al. 2015; Rubiño-Martín et al. 2023; Poidevin et al. 2023; Fernández-Torreiro et al. 2023).

1.2. Emisión Anómala de Microondas (AME)

Las primeras detecciones de la AME se llevaron a cabo hace menos de 30 años (Boggess et al. 1992; Kogut et al. 1996): los radiómetros diferenciales de microondas (DMR, de sus siglas en inglés Differential Microwave Radiometers) (Smoot et al. 1990), registraron un exceso inesperado de emisión a 31 GHz. Inicialmente, se pensó que podría ser debido a una componente de la emisión sincrotrón o libre-libre. Sin embargo, esta radiación no está correlacionada con la emisión H_α , la cual se espera de la emisión libre-libre (Smoot 1998; Dong & Draine 2010), no muestra evidencia de polarización, como la sincrotrón (Leitch et al. 1997; Condon & Ransom 2016). Además, la forma del espectro cuando se incluyeron observaciones de 10 o 19 GHz (Draine & Lazarian 1998; Génova-Santos et al. 2015; Rubiño-Martín et al. 2023; Poidevin et al. 2023; Fernández-Torreiro et al. 2023). Todo ello respalda un escenario en donde hay una nueva emisión que es importante en el rango de frecuencias 10-60 GHz (de Oliveira-Costa et al. 1999; Watson et al. 2005; Hildebrandt et al. 2007). Desde entonces se han identificado fuentes AME galácticas en regiones HII, nubes moleculares, remanentes de supernova y en el ISM (Dickinson et al. 2008; Todorović et al. 2010; Génova-Santos et al. 2015; Planck Collaboration et al. 2014; Battistelli et al. 2019; Rennie et al. 2022) y evidencias de AME tanto en regiones de otras galaxias, como en las distribuciones espectrales de energía (SED, de sus siglas *Spectral Energy Distribution*) integradas de las galaxias (Murphy et al. 2010; Scaife et al. 2010; Hensley et al. 2015; Murphy et al. 2018; Linden et al. 2020; Fernández-Torreiro et al. 2024; Poojon et al. 2024).

El mecanismo que genera la emisión para la componente no está del todo claro. Se han propuesto mecanismos físicos como la emisión de dipolos magnéticos (MD, por sus siglas *Magnetic Dipole*) procedente de fluctuaciones térmicas en granos de polvo magnético (Draine & Lazarian 1999; Draine & Hensley 2013). Sin embargo, el problema que tiene esta hipótesis MD es que hay límites superiores de la polarización para la emisión AME. El valor predicho para la polarización de la mayoría de los modelos magnéticos es alto (Draine & Lazarian 1999; Draine & Hensley 2013; Hoang & Lazarian 2016). Sin embargo, varios estudios muestran que la fracción de emisión polarizada de la AME es $\leq 5\%$ (López-Caraballo et al. 2011; Génova-Santos et al. 2015; Poidevin et al. 2018; Tramonte et al. 2023), siendo la restricción más fuerte $\leq 0.5\%$ (Génova-Santos et al. 2017), por lo que estas limitaciones son incompatibles con todas las predicciones teóricas para las fracciones de polarización asociadas a dipolos magnéticos. Otro modelo propuesto es la emisión térmica a partir de granos de polvo amorfos (Nashimoto et al. 2020). Sin embargo, la hipótesis más aceptada, y que se va a considerar en este trabajo, es la emisión de dipolos eléctricos (ED, por sus siglas *Electric Dipole radiation*), debida a los pequeños granos de polvo que giran rápidamente (en adelante *spinning dust* Erickson 1957; Draine & Lazarian 1998). Esto podría explicar la correlación entre AME y la emisión del polvo en el infrarrojo lejano (de Oliveira-Costa et al. 1997; Davies et al. 2006). Este modelo describe el intercambio de momento angular entre los granos de polvo y el entorno, incluyendo colisiones y la absorción y emisión de fotones (Draine & Lazarian 1998; Hensley et al. 2016; Hensley & Draine 2017). El problema de la hipótesis de ED, es la dificultad que involucra en el estudio de la teoría de granos, donde varios parámetros tienen una influencia directa en la forma espectral de la emisión (Ali-Haïmoud et al. 2009; Ysard, N. et al. 2011; Ali-Haïmoud 2013). Las predicciones teóricas y las hipótesis de estos modelos tienen que contrastarse con datos reales, para arrojar luz sobre cuál es el principal mecanismo que produce la AME. En la Figura 1.2 se muestra los modelos de la AME

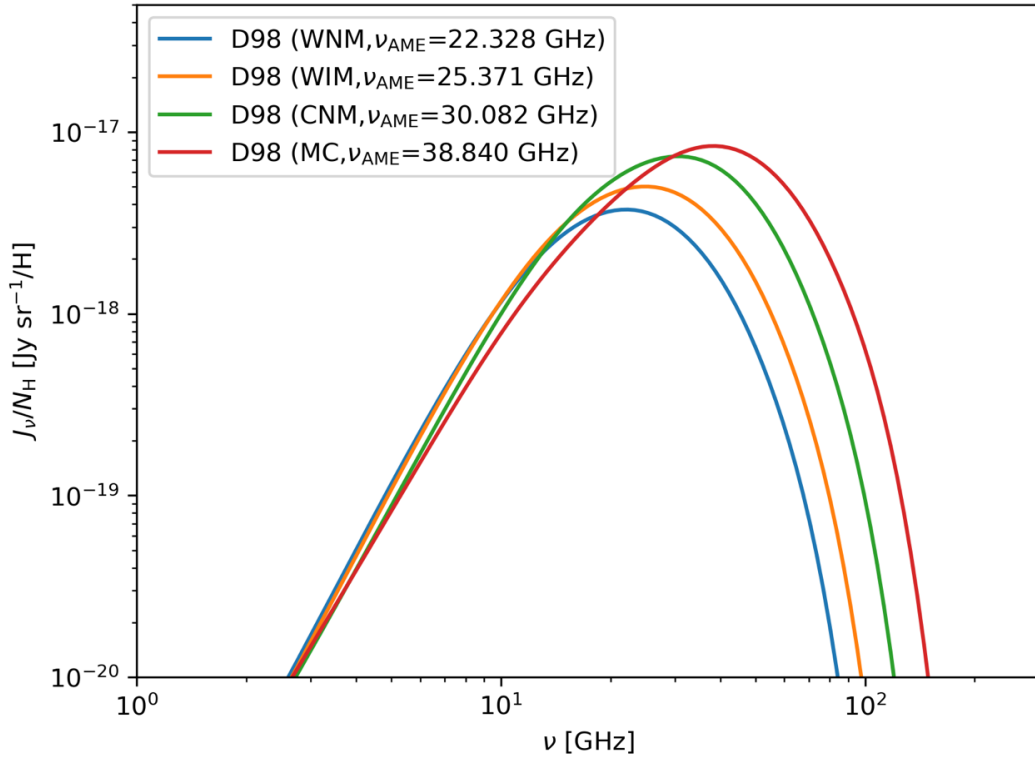


Figura 1.2: Emisividad por átomos de hidrógeno debida a los granos de polvo para las condiciones de cuatro ambientes interestelares: nube molecular (MC), medio neutro frío (CNM), medio neutro cálido (WNM) y medio ionizado cálido (WIM). El valor de ν_{AME} es la frecuencia en la cual se alcanza el máximo de cada modelo de spinning dust. Para las condiciones de cada ambiente MC, CNM, WNM, y WIM, véase [Draine & Lazarian \(1998\)](#).

para cuatro condiciones interestelares diferentes: nube molecular (MC), medio neutro frío (CNM), medio neutro cálido (WNM) y medio ionizado cálido (WIM), los cuales se toman de [Draine & Lazarian \(1998\)](#).

En un reciente estudio de la colaboración QUIJOTE ([Poidevin et al. 2023](#)) (en adelante P23VII) se emplearon modelos paramétricos para describir el espectro de 52 fuentes con AME. En dicho estudio, se utiliza modelos paramétricos para describir la AME, los parámetros que la describen son: la anchura de la AME, W_{AME} , es un parámetro que describe el rango espectral que abarca la AME, ν_{AME} que es el frecuencia de máxima emisión de la AME; y A_{AME} que es la amplitud de la AME (sección 2.4.1). Una parte significativa de la muestra utilizada presenta anchos de la AME mayores o igual a 0.8, donde 8 fuentes han alcanzado el límite superior usado (PUL, de sus siglas en inglés *Prior Upper Limit*) de $W_{\text{AME}} = 1$. Estos resultados contrastan con los valores esperados de los modelos teóricos de ED, que predicen anchos de AME en el rango de 0.4 a 0.7, como se ilustra en el panel superior de la Figura 2.1 (sección 2.1.1) ya que [Draine & Lazarian \(1998\)](#); [Ali-Haïmoud et al. \(2009\)](#) no utilizan el modelo paramétrico. Algunas explicaciones a estas diferencias pueden estar asociadas con degeneraciones entre las diferentes componentes galácticas, contaminación de las fluctuaciones del fondo y hasta el poco conocimiento del real mecanismo físico que da origen a la AME. Por consiguiente, nos proponemos explorar las propiedades observacionales de la AME mediante el empleo de una herramienta estadística basada en el apilamiento de mapas. Este enfoque tiene como objetivo mitigar las fluctuaciones del

fondo, particularmente el residuo del CMB, con la expectativa de obtener perspectivas sobre las posibles degeneraciones entre las diversas componentes. El análisis se fundamentará en la SED promedio derivado del mencionado método de apilamiento.

1.3. Motivación y objetivos

Como se dijo anteriormente, algunas fuentes exhiben comportamientos espectrales de la AME que difieren significativamente de lo predicho por los modelos teóricos (por ejemplo, W_{AME} , P23VII). Se utilizará como referencia el catálogo de fuentes de AME proporcionado por el trabajo de QUIJOTE-MFI (P23VII), dado que los valores obtenidos para algunas fuentes están por encima de lo esperado según los modelos teóricos [Draine & Lazarian \(1998\)](#). Esto sugiere la posibilidad de una sobreestimación en la anchura de la AME al estudiar fuentes individuales. Se emplearán los nuevos datos proporcionados por el experimento QUIJOTE-MFI ([Rubiño-Martín et al. 2023](#)) con el fin de mejorar la caracterización de la AME en el rango de 5 a 25 GHz, tal como se ha demostrado en previos estudios ([Génova-Santos et al. 2015](#); [Rubiño-Martín et al. 2023](#); [Poidevin et al. 2023](#); [Fernández-Torreiro et al. 2023](#)). Estos datos son especialmente importantes para el espectro de la AME a bajas frecuencias, permitiendo una separación más precisa entre los espectros de la AME y la emisión libre-libre ([Dickinson et al. 2018](#)).

Para llevar a cabo la caracterización de las propiedades promedio de la AME, se estudiará la SED ajustándola a un modelo paramétrico con el método de Montecarlo basado en la cadena de Markov (MCMC, de sus siglas en inglés *Markov chain Monte Carlo*), que proporciona `emcee` ([Foreman-Mackey et al. 2013](#)). Uno de los potenciales problemas en la definición de los parámetros de la AME surge con otros parámetros del modelo, las cuales han sido identificadas como uno de los desafíos a resolver en la caracterización de la AME ([Génova-Santos et al. 2015](#); [Poidevin et al. 2018](#); [Dickinson et al. 2018](#); [Fernández-Torreiro et al. 2023](#)). Por lo que, se abordará la degeneración que surge al analizar parámetros como la anchura de la AME (W_{AME}), el residuo del CMB (ΔT_{CMB}) la medida de emisión (EM) o el pico de frecuencia de la AME (ν_{AME}) entre otros. Para ello, se seleccionarán muestras con aquellas fuentes que tienen valores altos o peculiares de los siguientes parámetros: W_{AME} , ΔT_{CMB} y EM . Esta investigación representa la primera implementación de un método de apilamiento de fuentes galácticas compactas para estudiar las propiedades promediadas de la AME.

Por lo tanto, los objetivos de este trabajo son los siguientes:

- Crear un catálogo a partir del catálogo de fuentes galácticas con AME de P23VII.
- Implementar la técnica de apilamiento en datos de experimentos como QUIJOTE-MFI, WMAP y *Planck* utilizando las muestras de fuentes seleccionadas, para construir la SED promedio de cada muestra, especialmente aquellas con características peculiares como $W_{\text{AME}} \geq 0.8$.
- Caracterizar la AME mediante las SEDs obtenidas a partir de mapas apilados de fuentes compactas. Se obtendrán las propiedades observacionales de las SEDs apiladas de cada muestra.
- Contrastar con modelos sintéticos que se obtienen de promediar las predicciones de los modelos de cada fuente con los parámetros del catálogo base.

- Para cada muestra, identificar las degeneraciones que surgen al comparar la SED apilada y la sintética, centrándose especialmente en las propiedades físicas estadísticas de los parámetros de la AME.

Capítulo 2

Datos y metodología

En este capítulo se describe el proceso para construir el catálogo de las fuentes AME, definiendo así las muestras de fuentes AME y los mapas utilizados, la fotometría de apertura para construir las SEDs, la técnica de apilado de fuentes AME y el ajuste de la SED.

2.1. Catálogo de fuentes AME

El catálogo de fuentes AME utilizado proviene de una submuestra del catálogo de fuentes seleccionadas y estudiadas en P23VII. En su trabajo, la lista se obtuvo teniendo como referencia [Planck Collaboration et al. \(2014\)](#), al que se le añadieron nuevas fuentes detectadas mediante tres métodos diferentes. Un método consistió en identificar fuentes ya conocidas en la literatura y añadirlas al catálogo. Otro método consistió en elaborar un mapa de 1° , del cual se sustrajeron las componentes sincrotrón, libre-libre, polvo térmico y CMB. Se creó otra versión del mapa de 5° , que luego se restó del mapa de 1° para minimizar la emisión difusa. En un tercer método, se construyó una muestra inicial utilizando el software SExtractor ([Bertin, E. & Arnouts, S. 1996](#)) para detectar fuentes brillantes en el mapa a 70 GHz de *Planck*, una vez se le sustrajo el mapa del CMB obtenido por [Planck Collaboration: et al. \(2015\)](#). La combinación de estos tres métodos permitió definir 98 fuentes candidatas a AME. De estas 98 fuentes candidatas, 42 han sido detectadas satisfactoriamente en todas las frecuencias de QUIJOTE ([Poidevin et al. 2023](#)). Otras fuentes que fueron incluidas provienen de catálogos y listas de regiones de nubes moleculares. La literatura utilizada son tres: el catálogo SCUPOL, que recopila información de polarimetría de polvo térmico en escalas pequeñas (~ 14 arcsec) proporcionado por [Matthews et al. \(2009\)](#); la lista de nubes moleculares hacia las que las medidas de Zeeman proporcionan estimaciones de la línea de visión (Line-Of-Sight, LOS) del campo magnético obtenidas por [Crutcher \(1999\)](#), y el catálogo de nubes moleculares de [Lee et al. \(2016\)](#). Gracias a estos estudios, identificaron 10 fuentes candidatas AME adicionales, alcanzando a tener 52 fuentes candidatas a AME.

De ese catálogo de 52 fuentes con AME, nosotros hemos excluido fuentes devolvían bajos valores de señal a ruido debido a un mal ajuste de la AME, de la componente libre-libre o de la componente térmico del polvo. Esto incluye NGC 1499 (nebulosa de California) debido a su compleja estructura de fondo y su valor ν_{AME} es significativamente mayor que el del resto de objetos del catálogo. Nuestro catálogo final de fuentes con AME se presenta en la Tabla 2.1, la cual incluye los nombres, coordenadas galácticas, tipo de región, los valores de la amplitud (A_{AME}), frecuencia del pico

(ν_{AME}) y anchura de la AME (W_{AME}), el residuo del CMB (ΔT_{CMB}) y una columna específica para la detección. Nuestro catálogo consta de un total de 43 fuentes. Aquí se usan las propiedades observacionales de P23VII, por ejemplo, su clasificación según su significancia en dos categorías: fuentes 'significativas' ($\sigma_{\text{AME}} > 5$) y fuentes 'semisignificativas' ($2 < \sigma_{\text{AME}} < 5$).

Se utilizará nuestro catálogo de fuentes con AME para definir diferentes muestras, a las cuales se le aplicará la técnica de apilado (en adelante *stacking*). Este método de apilamiento reduce las fluctuaciones del ruido de fondo y disminuye el nivel del residuo del CMB en comparación con las observaciones de fuentes compactas individuales debido a que el CMB es la única radiación que presenta fluctuaciones tanto positivas como negativas. Esto permitirá explorar las propiedades estadísticas de las regiones AME con características similares.

2.1.1. Propiedades del catálogo y objetos a estudiar

El catálogo está compuesto por 15 fuentes catalogadas como 'significativas' y 28 fuentes clasificadas como 'semisignificativas', formando un total de 43 fuentes con emisión de AME. Para analizar el catálogo, se han calculado la media y la desviación estándar de los parámetros observacionales para una serie de muestras, conformadas por fuentes seleccionadas según criterios específicos (véase Tabla 2.2). La muestra total presenta una frecuencia promediada de la AME de $\nu_{\text{AME}} = 24$ GHz con una dispersión de 4 GHz. La anchura promedio de la AME, W_{AME} , es de 0.60 y una dispersión de 0.21, mientras que en P23VII el valor promedio de es $W_{\text{AME}} = 0.66 \pm 0.24$. Además, se observa una variabilidad menor en otras propiedades como ΔT_{CMB} , con un promedio de $22 \mu\text{K}$ y una dispersión de $58 \mu\text{K}$. La medida de emisión, EM , muestra un valor promedio y una desviación estándar de $762 \pm 1278 \text{ pc cm}^{-6}$, sin embargo, las amplitudes de los parámetros no necesariamente indican detecciones significativas, dado que se están comparando fuentes con propiedades muy variables. En la muestra semisignificativa (SS), la medida de emisión es más alta que en la muestra total, con un promedio de 904 pc cm^{-6} y una dispersión de 1492 pc cm^{-6} mientras que la frecuencia de la AME se mantiene en 24 ± 4 GHz y la anchura disminuye ligeramente a 0.58 con una desviación estándar de 0.23. Respecto al residuo del CMB, se encuentra en $26 \pm 57 \mu\text{K}$. Para la muestra significativa (S), se destaca una anchura de la AME de 0.75 ± 0.21 y un residuo del CMB con un promedio de $41 \mu\text{K}$ y una desviación estándar de $60 \mu\text{K}$.

El modelo propuesto por [Draine & Lazarian \(1998\)](#) se compara con el modelo paramétrico (ecuación 2.12), que presenta anchuras W_{AME} en el rango de 0.2 a 1.0, aplicable a diversos entornos del ISM (Figura 2.1). En nuestro caso, se observa que existen valores de anchura de la AME mayores de 0.8 que no se contemplan en dicho modelo. Con el fin de señalar esto, se ha definido una muestra $W_{\text{AME}} \geq 0.8$ (denominada $W_{0.8}$), donde el valor promedio y su desviación estándar obtenido $W_{\text{AME}} = 0.93 \pm 0.09$ (Tabla 2.2) difiere notablemente del valor esperado según el modelo propuesto por [Draine & Lazarian \(1998\)](#), que oscila entre 0.4 y 0.7. Estos valores atípicos de W_{AME} se deben a que algunas fuentes en P23VII presentan valores considerablemente altos, como se puede observar en el histograma mostrado en la parte inferior de la Figura 2.1. La línea verde discontinua delimita las fuentes incluidas en la muestra $W_{0.8}$, las cuales constan de 13 fuentes, de las cuales 8 llegan a alcanzar el PUL.

Se observa una influencia significativa en las fuentes con una alta medida de emisión, EM , a sobrestimar la anchura de la AME. Esta característica se puede ver en la Figura 2.2, donde hay una clara relación entre una anchura de la AME y la medida

Nomb. fuente	Gl _{lon} [°]	Gl _{lat} [°]	Tip. región	A_{AME} [Jy]	ν_{AME} [GHz]	W_{AME}	ΔT_{CMB} [μK]	Detección
G010.19-00.32	10.19	-0.32	SNR	66.7±26.0	23.5±7.9	0.5±0.7	125.0 ^(PUL)	SS
G010.84-02.59	10.84	-2.59	MC	13.3±2.7	20.6±2.2	0.3±0.1	7.3±20.5	SS
G011.11-00.12	10.60	-0.12	MC	40.6±16.4	23.7 ±3.5	0.3±0.2	-28.2±115.6	SS
G015.06-00.69	15.06	-0.69	MC	57.7±7.2	27.0±6.0	0.6±0.3	125.0 ^(PUL)	SS
G017.00+00.85	17.00	0.85	MC	91.8±15.4	30.3±9.3	1.0±0.5	-74.7±151.9	S
G037.79-00.11	37.79	-0.11	SNR	56.0±7.4	21.8±2.9	0.5±0.3	69.5±72.9	SS
G040.52+02.53	40.52	2.53	MC/HII	12.5±1.0	24.9±5.6	0.8±0.2	69.3±10.3	SS
G041.03-00.07	41.03	-0.07	MC	51.8±6.6	21.5±2.5	0.6±0.3	125.0 ^(PUL)	S
G043.20-00.10	43.20	-0.10	MC	45.7±5.5	21.7±2.5	0.5±0.2	67.5±62.3	SS
G045.47+00.06	45.47	0.06	SNR	62.4±4.0	21.7±2.1	0.8±0.2	125.0 ^(PUL)	SS
G049.14-00.60	49.14	-0.60	MC/HII	76.2±3.3	17.2±2.4	1.0 ^(PUL)	42.2±38.1	SS
G059.42-00.21	59.42	-0.21	MC/HII	20.9±2.4	20.2±2.3	0.6±0.2	-60.4±29.1	SS
G061.47+00.11	61.47	0.11	MC/HII	5.3±1.3	25.3±2.8	0.3±0.1	8.0±10.6	SS
G062.98+00.05	62.98	0.05	MC	7.4±1.2	23.1±1.8	0.3±0.1	5.2±11.4	SS
G071.59+02.85	71.59	2.85	MC/HII	12.7±2.7	24.5±7.7	0.6±0.4	-12.8±32.9	SS
G075.81+00.39	75.81	0.39	MC/HII	19.1±3.2	19.9±5.3	0.7±0.4	125.0 ^(PUL)	SS
G081.59+00.01	81.59	0.01	MC/HII	94.0±5.2	26.3±3.6	1.0 ^(PUL)	125.0 ^(PUL)	S
G084.68-00.58	84.68	-0.58	MC	34.6±1.8	22.5±3.8	1.0 ^(PUL)	-1.3±23.2	S
G085.00+04.20	84.90	3.80	MC/HII	16.7±0.8	19.5±2.9	1.0 ^(PUL)	86.2±11.0	S
G093.02+02.76	93.02	2.76	MC/HII	13.4±0.6	22.6±2.1	0.7±0.1	-19.6±9.7	SS
G094.47-01.53	94.47	-1.53	MC/HII	2.2±0.5	32.6±3.3	0.3±0.1	-6.1±5.6	SS
G098.00+01.47	98.00	1.47	MC/HII	10.8±0.6	27.1±4.5	1.0 ^(PUL)	-20.9±6.4	SS
G099.60+03.70	99.60	3.70	MC	3.0±1.0	35.9±4.7	0.2±0.2	-34.5±9.1	SS
G102.88-00.69	102.88	-0.69	MC/HII	7.5±0.7	26.7±8.1	0.8±0.3	-83.2±11.7	S
G107.20+05.20	107.20	5.20	MC	18.5±0.7	25.6±2.7	0.7±0.1	-1.7±11.8	SS
G110.25+02.58	110.25	2.58	MC/HII	7.6±2.8	38.7±31.0	0.6±0.6	-52.8±30.4	SS
G111.54+00.81	111.54	0.81	Open Cluster	21.4±2.0	24.2±4.3	0.8±0.3	117.3±16.2	SS
G118.09+04.96	118.09	4.96	SNR	12.9±0.9	30.2±9.8	1.0 ^(PUL)	18.2±13.0	S
G123.13-06.27	123.13	-6.27	MC/HII	4.6±0.2	26.8±2.6	0.7±0.1	5.5±3.4	SS
G133.74+01.22	133.74	1.22	MC	54.4±2.2	24.1±3.3	1.0 ^(PUL)	68.9±25.9	SS
G142.35+01.35	142.35	1.35	MC	6.7±0.8	20.6±2.7	0.6±0.2	25.6±13.1	S
G151.62-00.28	151.62	-0.28	MC/HII	5.6±0.5	29.9±3.9	0.5±0.1	-12.5±7.3	SS
G160.26-18.62	160.26	-18.62	MC	14.7±0.8	25.6±1.5	0.5±0.1	19.8±16.1	S
G173.56-01.76	173.56	-1.76	Open Cluster	2.7±0.6	26.4±7.0	0.6±0.4	-26.6±7.6	SS
G173.62+02.79	173.62	2.79	Cluster	9.6±0.6	24.7±1.1	0.4±0.1	-26.6±8.6	SS
G190.00+00.46	190.00	0.46	MC/HII	14.3±0.5	22.2±1.4	0.7±0.1	5.1±9.5	SS
G192.60-00.06	192.60	-0.06	Cluster	3.8±0.5	20.8±1.4	0.3±0.1	-13.4±6.0	SS
G201.62+01.63	201.62	1.63	MC	10.0±0.4	21.6±2.8	0.9±0.2	60.9±6.4	S
G203.24+02.08	203.24	2.08	MC/HII	7.1±0.4	26.9±5.0	0.7±0.2	-26.4±8.1	S
G239.40-04.70	239.40	-4.70	MC	6.9±0.4	21.2±2.0	0.7±0.1	9.2±7.7	S
G351.31+17.28	351.31	17.28	MC/HII	12.0±0.4	20.0±1.3	0.7±0.1	1.7±8.2	S
G353.05+16.90	353.05	16.90	MC	20.0±0.7	28.8±1.2	0.5±0.1	40.9±12.7	SS
G353.97+15.79	353.97	15.79	MC	13.1±1.2	23.7±1.2	0.3±0.1	-25.4±17.1	S

Tabla 2.1: Catálogo de fuentes de AME empleado donde se muestra los nombres, coordenadas galácticas, tipo de región, los valores de la amplitud (A_{AME}), frecuencia del pico (ν_{AME}) y anchura de la AME (W_{AME}), el residuo del CMB (ΔT_{CMB}) y una columna específica para la detección. La lista fue extraída del catálogo de P23VII (Poidevin et al. 2023) descartando las fuentes que tenían una estructura compleja de fondo, una baja o mala detección. Las abreviaturas *S* para 'significativas' y *SS* para 'semisignificativas'.

θ	<i>Total</i>	$W_{0.8}$	$EM_{>10^3}$	ΔT_{80}	$EM_{<10^3}$	<i>S</i>	<i>SS</i>
EM [pc cm ⁻⁶]	762 ± 1278	920 ± 1012	2503 ± 1736	1717 ± 2245	235 ± 147	497 ± 649	904 ± 1492
A_{AME} [Jy]	24 ± 24	39 ± 31	54 ± 21	49 ± 26	16 ± 18	25 ± 29.	24 ± 22
ν_{AME} [GHz]	24 ± 4	24 ± 4	24 ± 3	23 ± 3	25 ± 5	24 ± 3	24 ± 5
W_{AME}	0.60 ± 0.21	0.93 ± 0.09	0.74 ± 0.27	0.75 ± 0.17	0.61 ± 0.22	0.75 ± 0.21	0.58 ± 0.23
ΔT_{CMB} [μ K]	22 ± 58	40 ± 67	61 ± 51	119 ± 13	10 ± 55	16 ± 60	26 ± 57
τ_{1200} [10^5]	57 ± 78	45 ± 49	142 ± 110	114 ± 96	31 ± 41	41 ± 52	66 ± 88
T_{td} [K]	22 ± 2	23 ± 3	23 ± 3	22 ± 2	22 ± 2	22 ± 3	22 ± 2
β_{td}	1.61 ± 0.15	1.63 ± 0.14	1.70 ± 0.14	1.74 ± 0.09	1.59 ± 0.15	1.60 ± 0.15	1.62 ± 0.15
Núm. fuentes	43	13	10	8	33	15	28

Tabla 2.2: Los valores promediados de los parámetros de las muestras total, $W_{AME} \geq 0.8$, $EM > 1000$ pc cm⁻⁶, $\Delta T_{CMB} > 80 \mu$ K, $EM < 1000$ pc cm⁻⁶, significativa y semisignificativa obtenidos con su desviación estandar.

de emisión alta (de las 8 fuentes que llegan al PUL para W_{AME} de nuestro catálogo, 5 son con medidas altas de EM). Por lo tanto se definieron dos muestras. La primera muestra tiene fuentes con una medida de emisión $EM > 1000$ pc cm⁻⁶ (en adelante, $EM_{>10^3}$). El valor promediado de la anchura AME de la muestra $EM > 1000$ pc cm⁻⁶ es alto, 0.74 ± 0.27 comparado con el promedio total 0.60 ± 0.21 . Asimismo, es importante resaltar la diferencia en la medida de emisión entre ambas muestras. Para la muestra $EM_{>10^3}$ el valor promedio es 2503 ± 1736 pc cm⁻⁶, mientras que para la muestra total se tiene 762 ± 1278 pc cm⁻⁶. Esta muestra contiene un 23% de las fuentes totales del catálogo.

La segunda muestra son las fuentes complementarias de la muestra $EM_{>10^3}$, se le denominará $EM_{<10^3}$. Esta muestra complementaria es importante ya que se encuentran las fuentes que no albergan una emisión libre-libre alta, por lo que se espera caracterizar mejor el comportamiento de la anchura de la AME a la hora de aplicar el *stacking*, esperando así obtener las degeneraciones que surgen a la hora de reducir el residuo del CMB. En el catálogo utilizado, la cantidad de fuentes es 33, lo que representa un 77%.

Una muestra de particular interés para analizar consiste en un conjunto de 8 fuentes, representando el 19% del total (véase la Figura 2.2). Esta muestra, denominada ΔT_{80} , corresponde a fuentes con $\Delta T_{CMB} > 80 \mu$ K, y se destaca por dos razones. La primera es el promedio de W_{AME} alto con respecto al promedio total, con un valor de 0.75 y una dispersión de 0.27 (véase Tabla 2.2). La segunda razón es que debido al promedio del método de *stacking*, que se presentará en la sección 2.3, se espera que el nivel del residuo del CMB disminuya. Como ejemplo ver Figura 2.5, donde se han promediado 10 regiones seleccionadas al azar sobre una mapa de CMB de SMICA de *Planck*. Este proceso ha resultado en la reducción de las fluctuaciones de entre -140 a 170 μ K, a fluctuaciones de -23 a 33 μ K (imagen inferior derecha). El residuo del CMB es una componente importante a la hora de abordar estos análisis, ya que cuando se reduce esta componente se podría estudiar las degeneraciones que surgen entre las otras componentes.

2.2. Distribución espectral de energía (SED)

La construcción de una SED se logra mediante la aplicación de fotometría de apertura a mapas obtenidos a diferentes frecuencias. Estos procedimientos se detallan en las secciones siguientes.

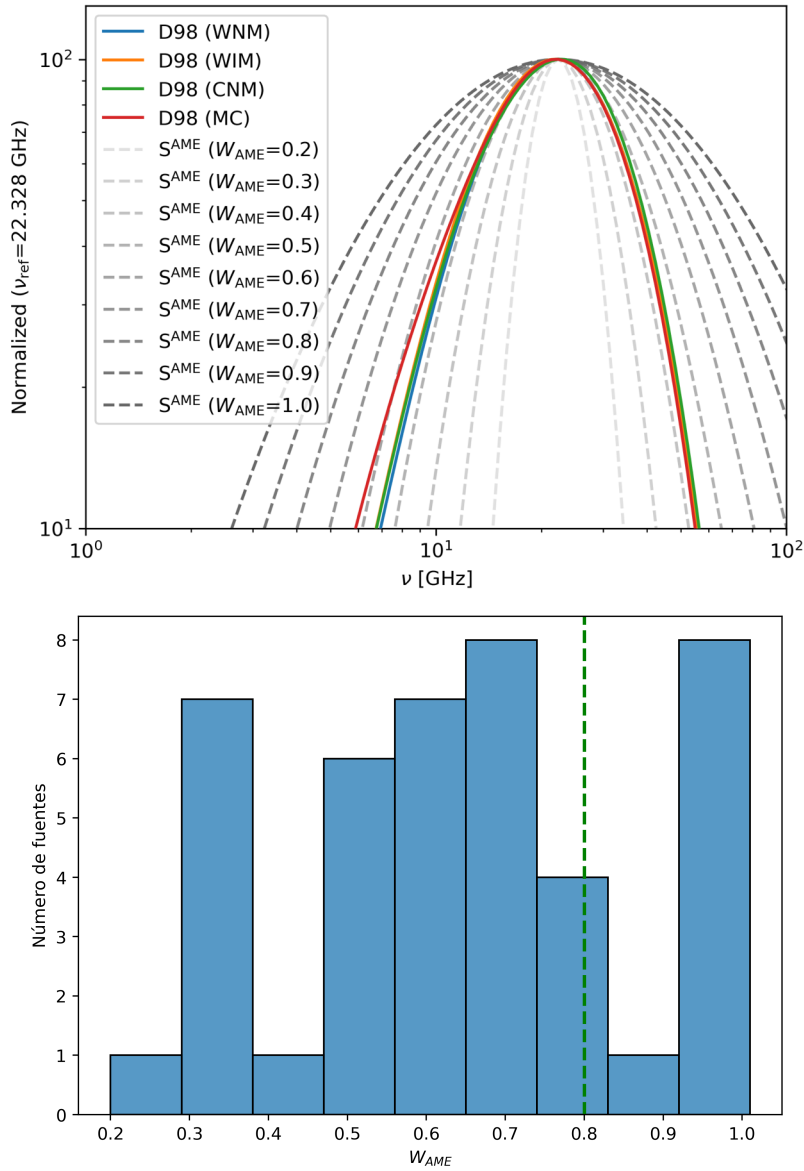


Figura 2.1: Panel superior: Los colores muestran los modelos de (Draine & Lazarian 1998) desplazados a una frecuencia común de 22.3 GHz y normalizados a 100 Jy. Las líneas grises muestran los modelos paramétricos para diferentes valores de W_{AME} (desde 0.2 a 0.8) normalizados a 100 Jy en 22.3 GHz. Se observa que algunos valores del modelo paramétrico no son contemplados por el modelo teórico Draine & Lazarian (1998). Panel inferior: histograma de (W_{AME}). La línea discontinua de color verde separa las fuentes de la muestra $W_{0.8}$.

2.2.1. Mapas QUIJOTE-MFI y auxiliares

Los datos usados en las frecuencias 11, 13, 17, 19 GHz corresponden a los primeros mapas publicados del sondeo de QUIJOTE (Rubiño-Martín et al. 2023). Estos mapas se obtuvieron a partir de 9200 horas de datos recogidos a lo largo de 6 años de observación desde 2012 hasta 2018 con el (Multi-Frequency Instrument, MFI) que se ubicaba en el primer telescopio de QUIJOTE, en el Observatorio del Teide en Tenerife, Islas Canarias. Las observaciones se realizaron a elevaciones constantes y con el telescopio girando continuamente alrededor del eje acimutal para obtener mapas

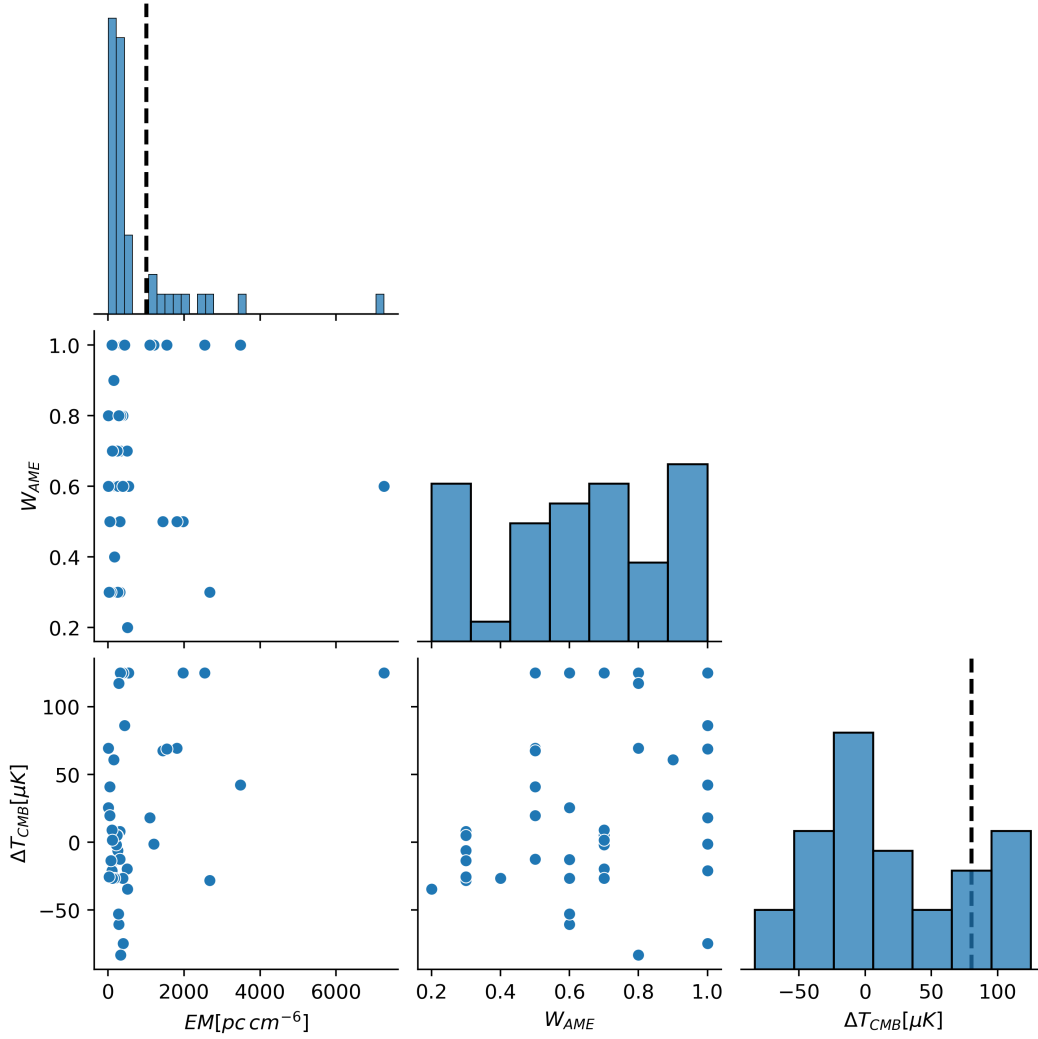


Figura 2.2: Relación entre los parámetros EM , ν_{AME} y ΔT_{CMB} de las fuentes del catálogo. La línea discontinua de color negro del histograma de la esquina superior izquierda separa las fuentes que tienen una medida de emisión mayor 1000 pc cm^{-6} , definiendo así la muestra $EM_{>10^3}$. Por otro lado, la línea discontinua de color negro de la esquina inferior derecha define la muestra ΔT_{80} .

diarios de todo el cielo norte. Tras la combinación de todos los datos se obtuvieron mapas que cubren $\sim 70\%$ del cielo y con sensibilidades en intensidad total entre 60 a $200 \mu\text{K}/\text{deg}$, dependiendo de la bocina y de la frecuencia, hasta $\sim 35 \mu\text{K}/\text{deg}$ en polarización. Todos los detalles sobre los mapas, las caracterizaciones, validaciones y el proceso general de los datos de MFI se describen en [Rubiño-Martín et al. \(2023\)](#).

Hay que señalar que, debido al uso de las mismas bocinas, los ruidos de las bandas de frecuencia observadas por una misma bocina están significativamente correlacionados. El instrumento MFI consiste de 4 bocinas, dos de ellas cubren una banda de 10-14 GHz (bocina 1 y 3) con dos canales de salida centrados en 11 y 13 GHz, y las dos restantes (bocina 2 y 4) cubren las bandas entre 16 y 20 GHz con dos canales de salida a 17 y 19 GHz ([Rubiño-Martín et al. 2023](#)). Los parámetros de la AME son los más afectados, al ser las correlaciones entre 11 y 13 GHz, y entre 17 y 19 GHz, pues estas bandas son importantes para describir el espectro de la AME. La presencia de las correlaciones introduce diferencias en los parámetros que suelen ser inferiores al 3%. Por lo que, se decidió que los datos presentados de QUIJOTE se tendrá en

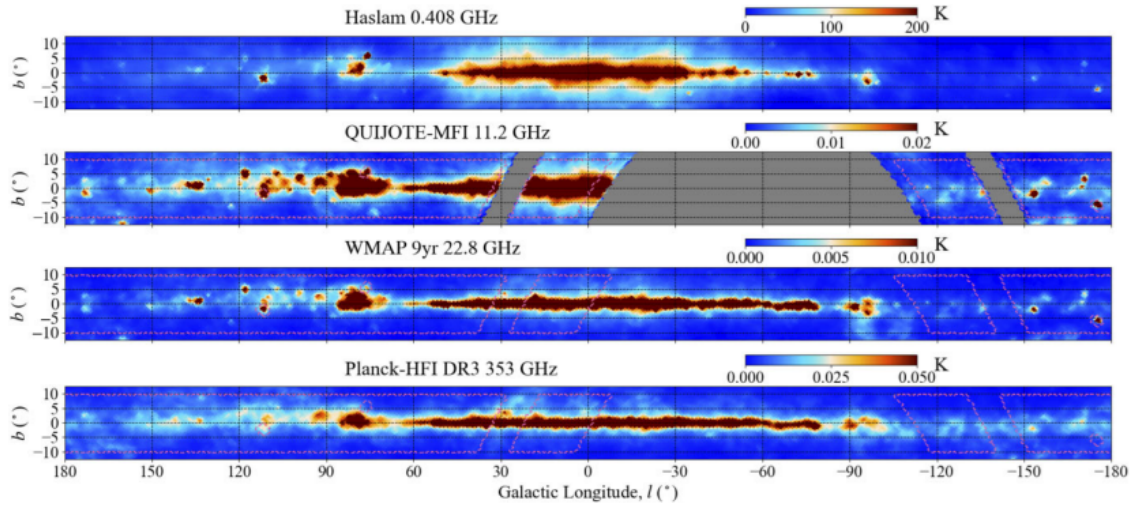


Figura 2.3: Ejemplos de algunos de los mapas de frecuencias del plano galáctico. De arriba abajo: Haslam a 0.408 GHz, QUIJOTE-MFI a 11.2 GHz, WMAP 9yr a 22.8 GHz, y Planck-HFI PR3 a 353 GHz. El primero y los dos últimos son buenos trazadores de la emisión AME y de polvo térmico, respectivamente (Figura tomada del artículo [Fernández-Torreiro et al. \(2023\)](#)).

cuenta la correlación para el ajuste y se asume una incertidumbre de calibración del 5% de los datos de QUIJOTE-MFI ([Rubiño-Martín et al. 2023](#); [Fernández-Torreiro et al. 2023](#); [López-Caraballo et al. 2023](#)).

Mapas auxiliares de baja frecuencia

En frecuencias bajas se utiliza el mapa cósmico de 408 MHz de [Haslam et al. \(1982\)](#), exactamente se usa una versión procesada ([Platania et al. 2003](#)), el mapa de HartRAO a 2.326 GHz de [Jonas et al. \(1998\)](#), y el mapa de 1.42 GHz de [Reich \(1982\)](#). El mapa de 1.42 GHz está calibrado para el patrón de radiación completo, por lo que el factor de recalibración del haz completo al lóbulo principal es de 1.55 para fuentes compactas ([Reich & Reich 1988](#)).

Algunas de las fuentes consideradas los mapas no cubren la región donde se encuentran o coincide con la máscara del mapa. Por lo tanto para una fuente dada un mapa se utiliza sólo si todos los píxeles dentro de un radio circular de 3° están cubiertos. De forma general, se asume una incertidumbre de calibración del 10% en los datos de baja frecuencia, que engloba incertidumbres de calibración intrínsecas, así como cuestiones relacionados con las incertidumbres del haz y los factores de recalibración.

Mapas de WMAP, Planck, COBE-DIRBE

En las frecuencias de 23, 33, 41, 61 y 94 GHz, se utiliza los mapas de intensidad de WMAP ([Bennett et al. 2013](#)). Todos los mapas se obtuvieron de la base de datos de LAMBDA¹. Para todos los mapas se ha supuesto una incertidumbre de calibración del 3%. La incertidumbre en la calibración nominal de amplitud de WMAP es menor, pero asumimos el 3% en coherencia con estudios cuando se aplica fotometría de apertura ([López-Caraballo et al. 2023](#); [Fernández-Torreiro et al. 2023](#)).

¹<https://lambda.gsfc.nasa.gov/product/expt/>

Telescopio	Frec. [GHz]	Cal [%]	FWHM [']	Cob. del cielo	Referencias
Varias	0.408	10	51	All-sky	1, 2
Stockert/Villa-Elisa	1.42	10	34.2	All-sky	3, 4
HartRAO	2.326	20	20	$\delta > 13^\circ$	5
QUIJOTE-MFI	11.2	5	53.2	$\delta > -32^\circ$	6
QUIJOTE-MFI	12.9	5	53.5	$\delta > -32^\circ$	6
QUIJOTE-MFI	17.8	5	39.1	$\delta > -32^\circ$	6
QUIJOTE-MFI	18.7	5	39.1	$\delta > -32^\circ$	6
WMAP 9yr	22.8	3	51.3	All-sky	7
<i>Planck-LFI</i> DR2	28.4	3	33.1	All-sky	8
WMAP 9yr	33	3	39.1	All-sky	7
WMAP 9yr	40.7	3	30.8	All-sky	7
<i>Planck-LFI</i> DR2	44.1	3	27.9	All-sky	8
WMAP 9yr	60.7	3	21.0	All-sky	7
<i>Planck-LFI</i> DR2	70.4	3	13.1	All-sky	8
WMAP 9yr	93.5	3	14.8	All-sky	7
<i>Planck-HFI</i> DR2	143	3	7.3	All-sky	8
<i>Planck-HFI</i> DR2	353	3	4.9	All-sky	8
<i>Planck-HFI</i> DR2	545	6.1	4.8	All-sky	8
<i>Planck-HFI</i> DR2	857	6.4	4.6	All-sky	8
COBE-DIRBE	1249	11.6	37.1	All-sky	9
COBE-DIRBE	2141	10.6	38.0	All-sky	9
COBE-DIRBE	2998	13.5	38.6	All-sky	9

Tabla 2.3: Los mapas utilizados en este estudio. La SED utiliza sólo los mapas que cubren las fuentes. En la columna 'calibración', se cita los valores utilizados en este estudio para estimar la incertidumbre de calibración. Referencias: 1: [Platania et al. \(2003\)](#), 2: [Haslam et al. \(1982\)](#), 3: [Reich \(1982\)](#), 4: [Reich & Reich \(1986\)](#), 5: [Jonas et al. \(1998\)](#), 6: [Rubiño-Martín et al. \(2023\)](#), 7: [Bennett et al. \(2013\)](#), 8: [Planck Collaboration: et al. \(2015\)](#), 9: [Hauser et al. \(1998\)](#).

Los mapas a las frecuencias de 28, 44 y 70 GHz, se obtuvieron con el instrumento de baja frecuencia (Low-Frequency Instrument, LFI) en el satélite *Planck* ([Planck Collaboration: et al. 2015](#)). Por encima de 100 GHz se ha utilizado la segunda versión de los mapas de intensidad obtenidos con el instrumento de alta frecuencia (High Frequency Instrument, HFI) ([Planck Collaboration: et al. 2015](#)) con frecuencias centradas en 100, 143, 217, 353, 545, 857 GHz. El mapa de intensidad de 100 GHz se descartó debido a un exceso de la contaminación introducida por las líneas de transición rotacional del CO (1-0). Por coherencia con trabajos previos que aplican fotometría de apertura, se asume una incertidumbre de calibración global de 3% para los datos LFI; y HFI a frecuencias inferiores o iguales a 3353 GHz, un valor de 6.1% a 545 GHz y un valor de 6.4% a 857 GHz ([Planck Collaboration: et al. 2015](#)).

En el rango del infrarrojo lejano se utiliza los mapas de las versiones de los mapas de COBE-DIRBE con la componente de luz zodiacal sustraída (ZSMA) COBE-DIRBE ([Hauser et al. 1998](#)) a 1249 GHz, 2141 GHz y 2997 GHz. Se considera las incertidumbres de calibración del 11.9, 10.6 y 13.5% para las frecuencias 1249, 2141 y 2998 GHz respectivamente.

2.2.2. Fotometría de apertura

Los flujos de intensidad se calcularon aplicando una fotometría de apertura sobre los mapas. Se trata de una técnica conocida y ampliamente utilizada (López-Caraballo et al. 2011; Dickinson et al. 2008; Génova-Santos et al. 2011; Poidevin et al. 2023; López-Caraballo et al. 2023), que consiste en integrar las temperaturas de todos los píxeles dentro de una apertura determinada y restando un nivel de fondo. Para la estimación del nivel del fondo se utiliza la mediana de la temperatura de los píxeles en un anillo externo. La mediana es una buena aproximación para el nivel conservador en casos de fondos muy variables evitando una emisión difusa intensa y fuentes puntuales (Génova-Santos et al. 2011). La densidad de flujo viene dada por

$$S_\nu = a(\nu) \left[\frac{\sum_{i=1}^{n_1} T_i}{n_1} - \tilde{T}_j \right], \quad (2.1)$$

donde n_1 es el número de píxeles en la apertura, T_i y T_j representan, respectivamente, las temperaturas de los píxeles en la apertura y en el anillo de fondo. \tilde{T}_j se calcula sobre los n_2 píxeles de este anillo. La función $a(\nu)$ da el factor de conversión de temperatura termodinámica a densidad de flujo,

$$a(\nu) = \frac{h^2 \nu^4}{2k_b T_{CMB}^2 c^2} \sinh^{-2} \left(\frac{h\nu}{2k_b T_{CMB}} \right) n_1 \Omega_{pix}, \quad (2.2)$$

donde h y k_b son la constante de Planck y Boltzmann, c es la velocidad de la luz, $T_{CMB} = 2.726$ K (Fixsen 2009) es la temperatura del CMB y Ω_{pix} es en ángulo sólido cubierto por cada píxel.

Asumir que cada estimación tiene un error asociado compuesto únicamente de ruido blanco simplifica el tratamiento de las incertidumbres considerablemente. De esta forma, cada medida es independiente de las demás. Sin embargo, en QUIJOTE el ruido del instrumento está correlacionado debido a la presencia de residuos $1/f$, y también las fluctuaciones del fondo galáctico introducen, principalmente en la intensidad total, una importante contribución al error que está correlacionado en términos del tamaño del haz. Lo ideal sería utilizar las matrices de covarianza del instrumento y del ruido de fondo. El ruido del instrumento puede extraerse mediante una caracterización del espectro de ruido $1/f$, sin embargo las fluctuaciones del fondo son difíciles de determinar. En su lugar, en la ecuación anterior se puede introducir el número de píxeles independientes en la apertura y en el anillo, que se denominará, respectivamente, n'_1 y n'_2 . La varianza del píxel se calculará a partir de la desviación estándar píxel a píxel en el fondo, $\sigma(T_j)$. La desviación típica de los píxeles en la apertura estaría sesgada por la presencia de la fuente, por lo tanto, la desviación típica de los píxeles en el anillo proporciona una estimación razonable de las contribuciones del fondo y del ruido instrumental. Así pues, la ecuación final que se utiliza para estimar los errores en este trabajo es la siguiente

$$\sigma(S_\nu) = a(\nu) \sigma(T_j) \left[\frac{1}{n'_1} - \frac{\pi}{2} \frac{1}{n'_2} \right]^{1/2}. \quad (2.3)$$

Aquí se utilizan los mapas suavizados a una resolución común de 1° en la pixelización de Healpix $N_{side} = 512$ (Górski et al. 2005). Se han considerado un radio de apertura de $r_{aper} = 60$ arcmin y un radio interior de $r_{IN} = 80$ arcmin y un radio exterior de $r_{OUT} = 100$ arcmin para el anillo exterior (mismas aperturas usadas en P23VII). Sin embargo, en nuestra propuesta actual, la fotometría de apertura se

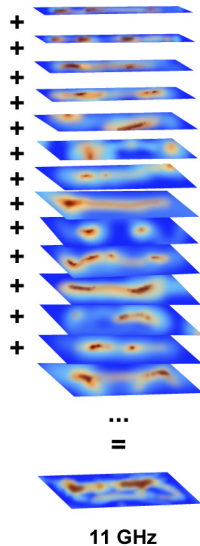


Figura 2.4: Ilustración de la técnica del apilamiento utilizada en el trabajo. Primero se seleccionó las fuentes de la muestra una banda dada (por ejemplo, 11 GHz de QUIJOTE), Para, posteriormente, centrar y apilar todos los submapas definidos de un mapa promedio.

aplicará en mapas apilados para las diferentes muestras consideradas. Esta técnica de apilamiento será descrita en la siguiente sección.

2.3. Distribución espectral de energía: técnica de apilamiento

La técnica de *stacking* es un proceso en el cual suman los submapas de las fuentes que componen una muestra, para obtener un solo mapa a una frecuencia dada. Cada submapa se obtiene a partir de la posición central de cada fuente y estos submapas están proyectados en un sistema cartesiano tangencial de 51×51 píxeles, donde la resolución de cada píxel es de 5.6 arcmin, lo cual genera un mapa cuadrado con un tamaño de $4.76^\circ \times 4.76^\circ$. Posteriormente, se suman todos los submapas en unidades del mapa y se divide entre el número de submapa utilizados (véase la Figura 2.4). El mapa apilado final, m_{stck} , se obtiene de la siguiente manera:

$$m_{\text{stck}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m(l_i, b_i), \quad (2.4)$$

donde N es el número total de fuentes individuales siendo $m(l_i, b_i)$ el submapa individual i centrado en las coordenadas galácticas (l_i, b_i) .

Cuando se ha apilado un número de submapas (fuentes), el ruido del mapa apilado será menor (Dole et al. 2006; Lindroos et al. 2014). Si se realiza la propagación de errores se obtiene:

$$\sigma_{\text{stck}}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_i^2(l_i, b_i) \quad (2.5)$$

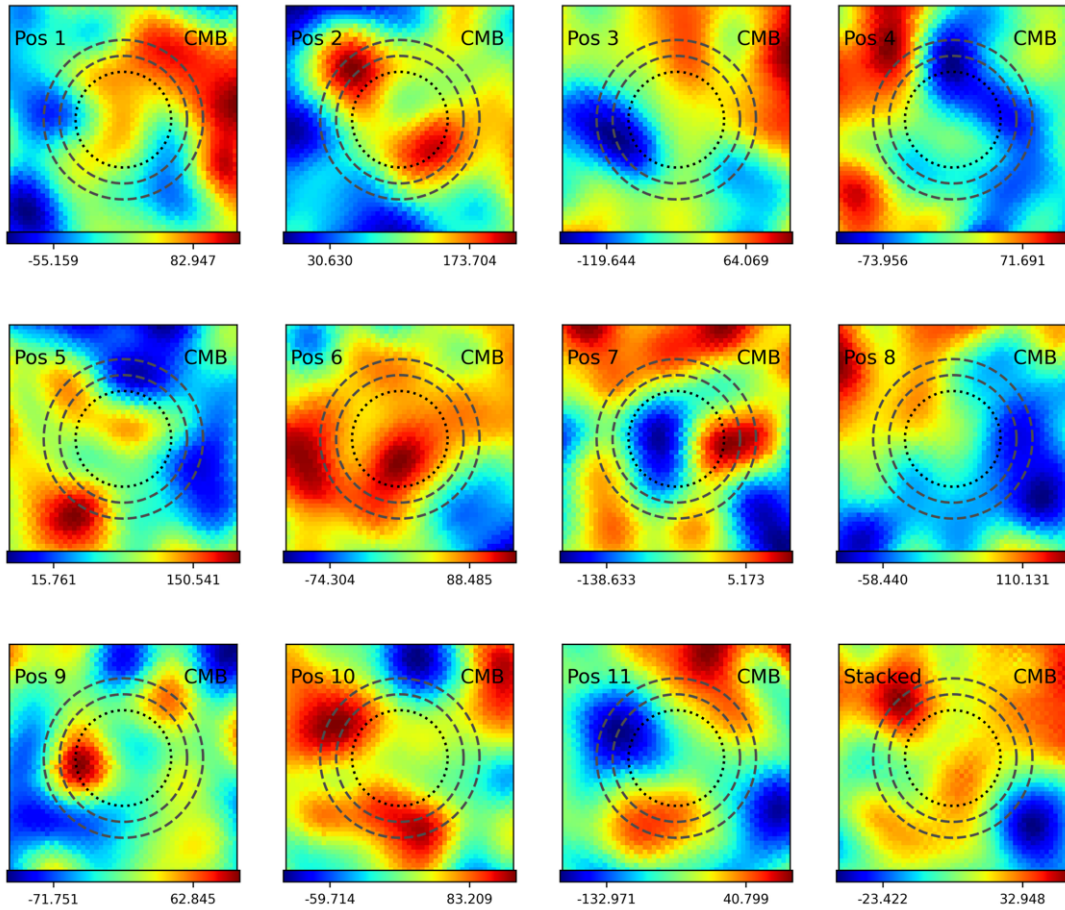


Figura 2.5: Técnica de *stacking* aplicada sobre un mapa de Planck del CMB suavizado a 1° y el tamaño de píxel es de $N_{side} = 512$. Los círculos representan la fotometría de apertura aplicada para las diferentes fuentes. El stacking disminuye la amplitud de las variaciones.

para la varianza media ponderada, donde $\sigma_i^2(l_i, b_i)$ es la desviación estándar del ruido de cada píxel de cada mapa. Si se toma como primera aproximación el ruido en cada píxel como un ruido estándar para el submapa, σ_o , se obtiene la expresión

$$\sigma_{\text{stck}} = \frac{\sigma_o}{\sqrt{N}}, \quad (2.6)$$

donde N es el número total de fuentes apiladas. Aunque se espera que el apilamiento siga aproximadamente esta tendencia, esto sólo se cumple en un caso ideal. Esto se propaga también a la estimación de las densidades de flujo (Lindroos et al. 2014).

Una característica esperada de la técnica del *stacking* es la disminución del nivel del residuo del CMB. Esta propiedad se debe a que el CMB es la única radiación que presenta fluctuaciones tanto positivas como negativas. Esto se puede observar en la Figura 2.5, donde las fluctuaciones del CMB obtenido caen al apilar diversas posiciones del mapa de CMB de *Planck* SMICA², pasando de valores comprendidos entre -58.440 y $110.131 \mu\text{K}$ a un rango entre -23.422 y $32.948 \mu\text{K}$. Sin embargo, en la construcción de la SED apilada no se consideran los errores de calibración ya que dicha incertidumbre disminuye la efectividad de la reducción del ruido y del nivel de residuo del CMB logradas mediante el apilamiento de fuentes. Este fenómeno se ilustra en las Figuras 2.6 y 2.7 y Tabla 2.4, donde se observa una dispersión considerablemente

alta en los valores. Por lo tanto, en el caso del apilamiento, se opta por no incluir los errores de calibración incluyendo en su lugar los errores derivados del *stacking* (ecuaciones 2.3 y 2.6).

Para cada muestra de la Sección 2.1.1 se obtendrán los mapas apilados para cada banda, luego se aplicará la fotometría de apertura para construir la SED apilada.

En la siguiente sección se muestra la metodología para hacer el ajuste de la SED apilada para así obtener las propiedades observacionales promedio de cada muestra.

2.4. Ajuste paramétrico de la SED mediante el método MCMC

Para ajustar la SED, se utiliza el método MCMC, el cual permite realizar un análisis mediante la marginalización de la función de distribución de probabilidad posterior. De esta manera, se obtiene para cada parámetro su valor estimado y su correspondiente incertidumbre. Se usa el algoritmo de muestreo MCMC denominado *emcee* (Foreman-Mackey et al. 2013), mediante el cual el modelo se ajusta a los datos a través de una función objetivo:

$$\log \mathcal{L}(\theta) = -0.5 \cdot \chi^2, \quad (2.7)$$

donde $\mathcal{L}(\theta)$ es la *likelihood*. Para los priors, se aplicaron los denominados priors uniformes a los parámetros de cada muestra. La medida de emisión, EM , está acotada a valores positivos, la temperatura del polvo, T_{td} , tiene un intervalo de 10 - 40 K, la emisividad del índice del polvo, β_{td} , un rango de 1.0 - 4.0 y para τ_{353} se ha limitado a valores positivos. Por otro lado, los priors de los parámetros: A_{AME} , ν_{AME} , W_{AME} y ΔT_{CMB} , se definieron de tal manera que sean lo menos restrictivos basándose en trabajos anteriores (Fernández-Torreiro et al. 2023; López-Caraballo et al. 2024).

Una vez establecidos los priors uniformes sobre los parámetros de la ecuación 2.7, la maximización de la distribución posterior, se define mediante χ^2 :

$$\chi^2 = \left(\mathbf{S} - \frac{\mathbf{m}(\theta)}{\mathbf{cc}(\theta)} \right)^T N^{-1} \left(\mathbf{S} - \frac{\mathbf{m}(\theta)}{\mathbf{cc}(\theta)} \right), \quad (2.8)$$

donde $\mathbf{cc}(\theta)$ es el vector con los factores de corrección del color, un ajuste que se aplica a los objetos debido a que la luz no se distribuye uniformemente en una banda de un detector para todas las frecuencias. Cuando $\mathbf{cc}(\theta) = 1$, no se aplica la corrección de color, es el caso de la SED sintética que se describirá en la sección 2.5. \mathbf{S} y $\mathbf{m}(\theta)$ identifican vectores con las densidades de flujo brutas y las predicciones del modelo para todas las frecuencias, respectivamente. En la ecuación 2.8, N es la matriz de covarianza del ruido, cuya matriz inversa N^{-1} debe existir (López-Caraballo et al. 2024).

Para las mediciones QUIJOTE-MFI, los efectos de la correlación entre sus bandas son también elementos que deben tenerse en cuenta. La correlación entre bandas de frecuencia conduce a una matriz de ruido no diagonal. Por lo tanto, los términos de correlación normalizados, ρ_{ij} , entre los pares de bandas no son despreciables:

$$\begin{pmatrix} \sigma_i^2 & \rho_{i,j} \sigma_i \sigma_j \\ \rho_{j,i} \sigma_i \sigma_j & \sigma_j^2 \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

²https://irsa.ipac.caltech.edu/data/Planck/release_3/all-sky-maps/previews/COM_CMB_IQU-smica_2048_R3.00_full/index.html

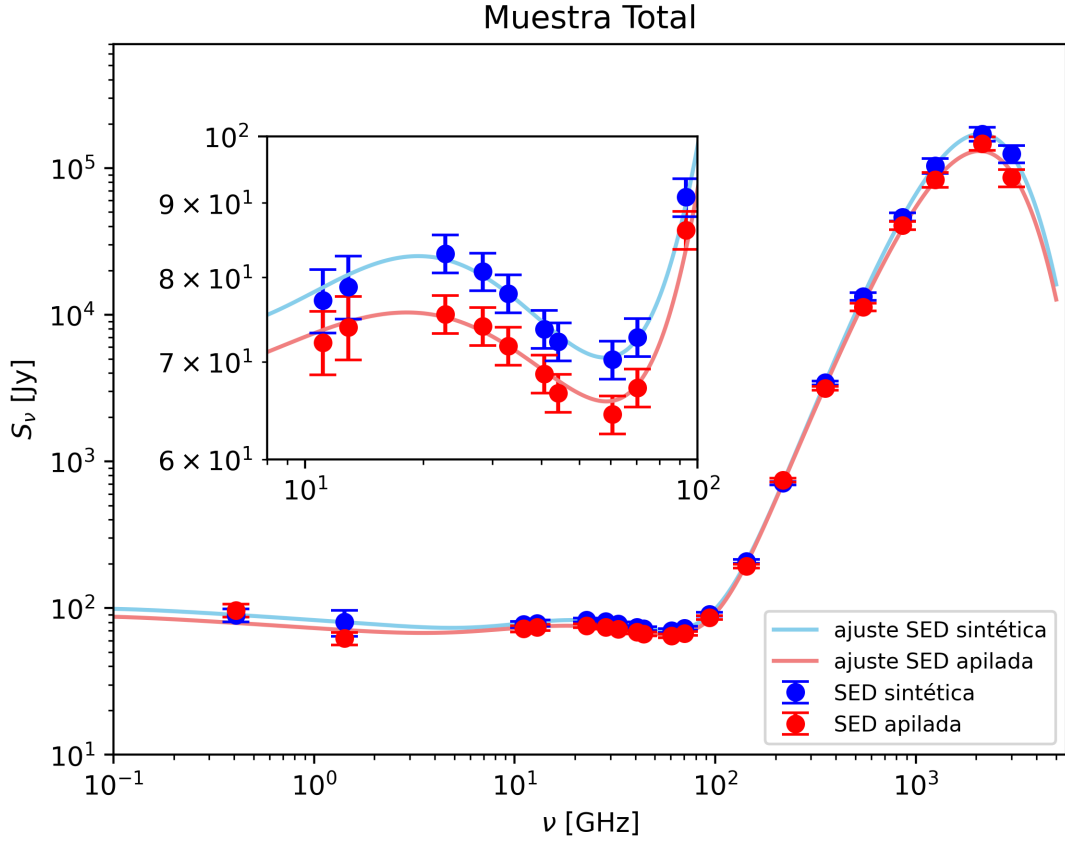


Figura 2.6: SED de la muestra total. El color rojo representa la SED y datos obtenidos mediante la técnica del *stacking*, mientras que de color azul describe la SED y los datos obtenidos mediante el promediado de densidad de flujo de cada muestra empleando en ambos ajustes los errores de calibración.

donde se supone $\rho_{i,j} = \rho_{j,i} = 1$, si $i = j$ y σ_k es la incertidumbre de la densidad de flujo de medida en la banda k (Fernández-Torreiro et al. 2023; López-Caraballo et al. 2024).

La caracterización de las distribuciones a posteriori se realiza utilizando EMCEE con 32 cadenas, con 30000 pasos de iteración y una muestra de burn-in (primeros pasos excluidos de cada cadena) de 3500 pasos. Para obtener los parámetros a partir del modelado de la SED, se marginaliza la función de distribución a posteriori (PDF(θ_i), de sus siglas *the Posterior Distribution Function*) sobre cada parámetro θ_i para obtener la PDF(θ_i). El valor del parámetro θ_i se calcula como la mediana (percentil 50) de su PDF(θ_i), mientras que su incertidumbre asociada se obtiene a partir de los percentiles 16 y 84.

Por ejemplo, la Figura 2.6 presenta el ajuste de la SED para la muestra total de las fuentes, donde se tiene dos curvas. La SED roja se obtiene mediante el apilado de fuentes y la curva azul es el promedio de las predicciones de los modelos de cada fuente de todas las fuentes de la muestra total, más detalle Sección 2.5. Por otro lado, para poder analizar los diferentes parámetros, se utilizó los diagramas de correlaciones (véase ejemplo Figura 2.7) (Foreman-Mackey 2016; Lewis 2019). Estos ajustes de SEDs consideran modelos de cada unas las componentes galácticas, cuyas representaciones paramétricas se presentan en la siguiente sección.

2.4.1. Modelos

Se ha considerado cuatro emisiones diferentes en el rango de frecuencias entre 0.4 y 3000 GHz: emisión libre-libre, AME, emisión del polvo térmico y de las anisotropías del CMB. Se ha descartado la emisión sincrotrón debido a que en el catálogo utilizado hay muy pocas fuentes que muestran dicha emisión. Por lo tanto, en este trabajo se ha adoptado una descripción de los parámetros de la densidad de flujo de cuatro componentes que se basa en un conjunto de 8 parámetros independientes. (θ):

$$S_{\nu}^{\text{total}}(\theta) = S_{\nu}^{\text{ff}}(EM) + S_{\nu}^{\text{AME}}(A_{\text{AME}}, \nu_{\text{AME}}, W_{\text{AME}}) + S_{\nu}^{\text{dust}}(\tau_{353}, \beta_{td}, T_{td}) + \Delta S_{\nu}^{\text{CMB}}(\Delta T_{\text{CMB}}), \quad (2.10)$$

donde $S_{\nu}^{\text{total}}(\theta)$ es la densidad de flujo total, S_{ν}^{ff} la densidad de flujo de la emisión libre-libre, S_{ν}^{AME} la densidad de flujo de la AME, S_{ν}^{dust} la densidad de flujo del polvo térmico y $\Delta S_{\nu}^{\text{CMB}}$ la emisión del residuo del CMB, los cuales serán descritos en cada sección.

Emisión libre-libre

La emisión libre-libre es radiada por electrones acelerados por un campo eléctrico (Rybicki & Lightman 1979; Condon & Ransom 2016). En unidades de flujo tiene un espectro casi plano que implica que puede ser importante tanto frecuencias bajas (debajo de 10 GHz) como medias (entre 10 y 100 GHz). El modelo que se va a utilizar es de Draine (2011):

$$S_{\nu}^{\text{ff}}(EM) = \frac{2\kappa_B \nu^2}{c^2} \Omega T_{\text{ff}} \quad (2.11)$$

donde

$$T_{\text{ff}} = T_e \left(1 - \exp \left(-5.468 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{EM}{\text{pc} \cdot \text{cm}^{-6}} \right) \left(\frac{T_e}{K} \right)^{-3/2} \left(\frac{\nu}{\text{GHz}} \right)^{-2} g_{\text{ff}}(\nu) \right) \right)$$

$$g_{\text{ff}}(\nu) = \ln \left[\exp \left(5.960 - \frac{\sqrt{3}}{\pi} \ln \left[\frac{\nu}{\text{GHz}} \left(\frac{T_e}{10^4 K} \right)^{-3/2} \right] \right) + e \right],$$

donde el único parámetro libre es la medida de emisión (EM), Ω es el ángulo sólido, κ_B es la constante de Boltzmann, c es la velocidad de la luz y $g_{\text{ff}}(\nu)$ es el factor de Gaunt. La temperatura electrónica se fija en un valor de $T_e = 7000$ K (Planck Collaboration et al. 2011; Génova-Santos et al. 2015). La emisión sincrotrón y libre-libre solapan entre 3 y 10 GHz, por lo que suelen estar fuertemente degeneradas (Irfan et al. 2015; Cepeda-Arroita et al. 2021). Sin embargo, en este trabajo no se considera la componente de sincrotrón.

AME

Consideramos un modelo fenomenológico para la AME, cuyo espectro queda descrito por tres parámetros. El modelo paramétrico consiste en una distribución logarítmico-normal que describe los modelos de *spinning dust* (Stevenson 2014; Cepeda-Arroita et al. 2021; Poidevin et al. 2023):

$$S_{\nu}^{\text{AME}}(A_{\text{AME}}, \nu_{\text{AME}}, W_{\text{AME}}) = A_{\text{AME}} \cdot \exp \left[-\frac{0.5}{W_{\text{AME}}^2} \ln^2 \left(\frac{\nu}{\nu_{\text{AME}}} \right) \right] \quad (2.12)$$

donde A_{AME} es el flujo máximo debido a la AME, ν_{AME} es la correspondiente frecuencia para el máximo y W_{AME} es el ancho del espectro en el espacio logarítmico.

Emisión térmica de polvo

Para la emisión del polvo térmico se ha utilizado la radiación de cuerpo negro modificada [Draine & Li \(2001\)](#):

$$S_{\nu}^{\text{dust}}(\tau_{353}, \beta_{\text{td}}, T_{\text{td}}) = \frac{2\kappa_B \nu^2}{c^2} \left(\frac{\nu}{353 \text{ GHz}} \right)^{\beta_{\text{td}}} \tau_{353} \frac{1}{e^x - 1} \Omega \quad (2.13)$$

donde τ_{353} es la profundidad óptica normalizada a 353 GHz, β_{td} es la emisividad de polvo y $x = h\nu/\kappa_B T_{\text{td}}$ con T_{td} como temperatura del polvo.

CMB

Por último, se estima la densidad del residuo del CMB como:

$$\Delta S_{\nu}^{\text{CMB}}(\Delta T_{\text{CMB}}) = \frac{2\kappa_B \nu^2}{c^2} \frac{x^2 e^x}{(e^x - 1)^2} \Delta T_{\text{CMB}} \Omega, \quad (2.14)$$

donde $x = h\nu/k_B T_{\text{CMB}}$ y ΔT_{CMB} ajustan el residuo del CMB. T_{CMB} tiene el valor de 2.726 K ([Fixsen 2009](#)).

Las propiedades de las SEDs apiladas obtenidas, se contrastarán con las características de las SEDs sintéticas. Dichas SEDs sintéticas se obtienen mediante los parámetros de nuestro catálogo, descrito en la siguiente sección.

2.5. Distribución espectral de energía: SED sintética

Para validar y comparar los resultados de este estudio, se utilizó lo que se denominará SED sintética. Para cada muestra, se promedian las predicciones de los modelos de cada i -fuente, $S_i(\nu; \theta_i^{\text{input}})$, y se extraen esos flujos para las frecuencias que deseamos. La densidad de flujo de cada banda ν se obtiene como:

$$S_{\nu}^{\text{sint}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i(\nu; \theta_i^{\text{input}}) \quad (2.15)$$

donde S_{ν}^{sint} es el espectro promedio de todas las fuentes y N el número de fuentes. Para estimar el error en la densidad de flujo en cada banda, $\sigma_{\nu}^{\text{sint}}$, se utilizó el error de calibración, $\sigma_{\nu}^{\text{cal}}$, de cada banda como la medida de incertidumbre:

$$\sigma_{\nu}^{\text{sint}} = S_{\nu}^{\text{sint}} \sigma_{\nu}^{\text{cal}} \quad (2.16)$$

Posteriormente, se ajusta la SED mediante el método MCMC obteniendo los valores del espacio de parámetros con sus incertidumbres. Los valores de los parámetros y

θ	Muestra Total		
	$M_{\text{total}}^{\text{stck}}$	$M_{\text{total}}^{\text{stck,cal}}$	$M_{\text{total}}^{\text{ sint}}$
$EM[\text{pc cm}^{-6}]$	677 ± 20	670_{-49}^{+48}	762_{-69}^{+67}
$A_{\text{AME}} [\text{Jy}]$	23.6 ± 1.7	24.2 ± 3.9	23.6 ± 5.3
$\nu_{\text{AME}} [\text{GHz}]$	$22.7_{-1.2}^{+1.3}$	24.4 ± 4.2	23.1 ± 2.6
W_{AME}	$0.78_{-0.07}^{+0.09}$	$0.99_{-0.19}^{+0.26}$	$0.77_{-0.16}^{+0.24}$
$\Delta T_{\text{CMB}} [\mu\text{K}]$	18_{-23}^{+20}	-39_{-44}^{+39}	20_{-37}^{+32}
$\tau_{353} [10^{-5}]$	$6.3_{-0.2}^{+0.3}$	$6.0_{-0.3}^{+0.4}$	$7.5_{-0.20}^{+0.15}$
$T_{\text{td}} [\text{K}]$	21.1 ± 0.4	$22.3_{-0.9}^{+1.0}$	$21.7_{-0.9}^{+1.1}$
β_{td}	1.65 ± 0.04	1.53 ± 0.08	1.71 ± 0.08
χ_{dof}^2	4.29	1.41	0.07

Tabla 2.4: Parámetros observacionales que describen los espectros de tres casos para la muestra total. $M_{\text{stck}}^{\text{stck}}$ representa los valores del caso apilado utilizando los errores derivados del apilamiento; $M_{\text{cal}}^{\text{stck}}$ los valores de caso apilado utilizando los errores de calibración; $M_{\text{cal}}^{\text{ sint}}$ el caso sintético con los errores de calibración.

SEDs resultantes de este procedimiento se referirán como el caso **sintético**. En contraste, los parámetros y SEDs obtenidos mediante la técnica de apilado de imágenes se denominará caso **apilado**.

En la Tabla 2.4 se presenta los valores de los parámetros de la muestra total para tres casos diferentes: $M_{\text{total}}^{\text{stck}}$ representa los valores del caso apilado utilizando los errores derivados del apilamiento; $M_{\text{total}}^{\text{stck,cal}}$ los valores de caso apilado utilizando los errores de calibración; $M_{\text{total}}^{\text{ sint}}$ el caso sintético (errores de calibración).

En lo referente a los parámetros de la Tabla 2.4, la emisión del CMB es una radiación bien definida. Por consiguiente, para la muestra total, se espera obtener el mismo valor del parámetro, ΔT_{CMB} , tanto para el valor estadístico como a través del ajuste de la SED mediante el método MCMC del caso sintético. El valor para el residuo de CMB en el caso sintético es de $20_{-37}^{+32} \mu\text{K}$ y el valor estadístico es $22 \pm 58 \mu\text{K}$. Sin embargo, los valores de los parámetros del caso sintético (Tabla 2.4) y los valores estadísticos (Tabla 2.2) presentan discrepancias en otros parámetros. El valor de la anchura de la AME, W_{AME} , para el caso sintético es $0.77_{-0.16}^{+0.24}$, mientras que su valor estadístico es 0.60 ± 0.21 . Así mismo, el parámetro de la emisividad del polvo, β_{td} , siendo su valor 1.61 ± 0.15 para el caso estadístico, mientras que para el caso sintético el valor 1.71 ± 0.08 . Esta diferencia podría ser atribuida a las degeneraciones que ocurren al ajustar la SED, mientras que el valor estadístico de cada parámetro se obtiene de forma independiente en el análisis de las fuentes individuales de P23VII, llegando en ocasiones a sobrestimar los valores de los parámetros, dando más peso a las fuentes que tienen un alto valor de cada parámetro.

Los valores de los parámetros y la SED obtenidos mediante el apilamiento de los mapas deben compararse utilizando una metodología similar a la empleada mediante el *stacking* con el fin de extraer conclusiones coherentes, como se observa en la Tabla 2.4. Por un lado, comparar los valores apilados con los valores estadísticos no refleja adecuadamente las propiedades de las fuentes, ya que predominarán aquellas con los valores más altos en cada parámetro. Por otro lado, el caso sintético permite una comparación con el caso apilado, dado que se ha utilizado el mismo método de ajuste de la SED y puede tener las degeneraciones que se quieren caracterizar. Esto

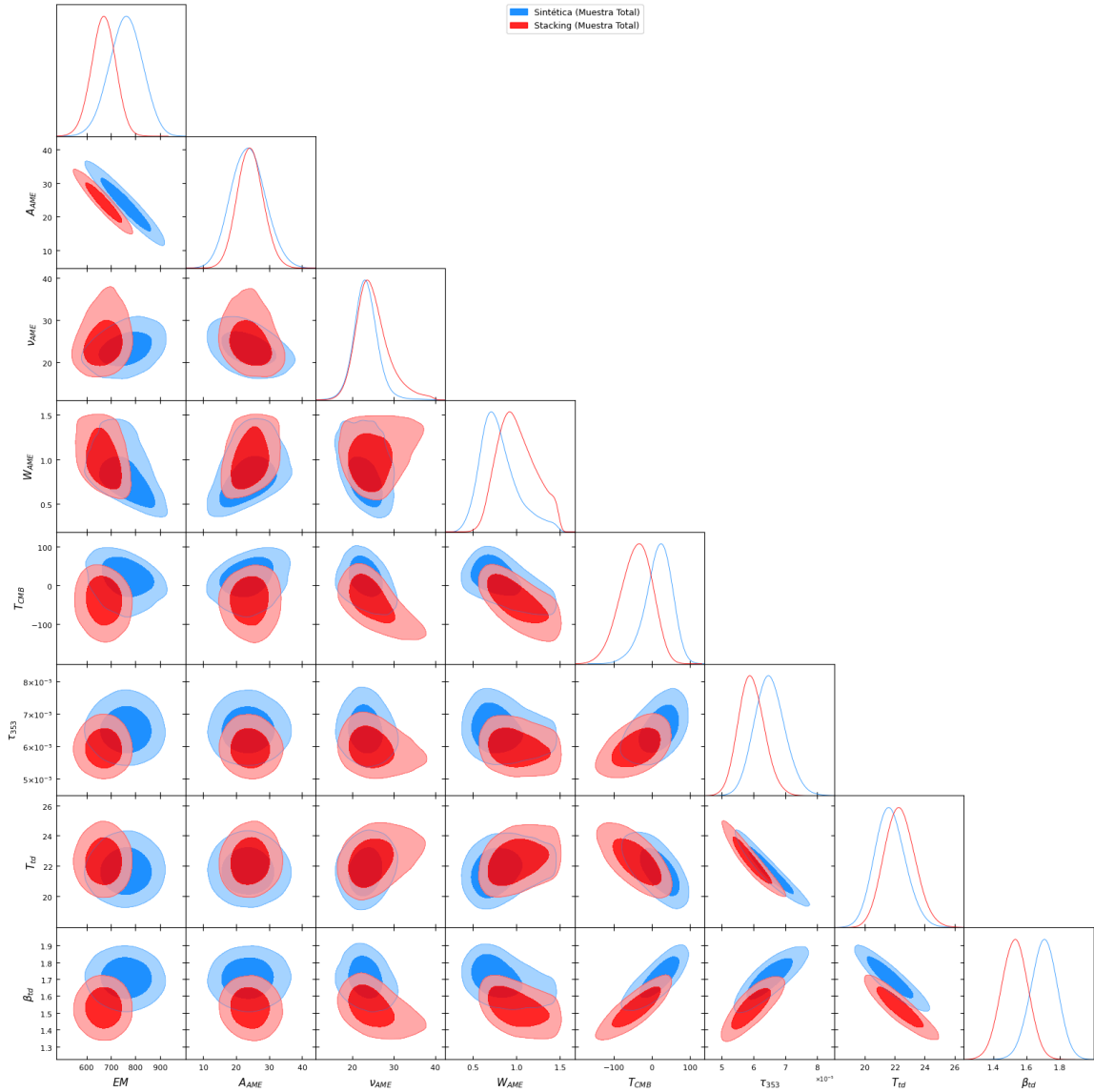


Figura 2.7: Corner plot que contiene los valores marginales posteriores y los gráficos de correlación para los parámetros que describen la SED de la muestra total para dos casos. En rojo se tiene el caso de *stacking* y en azul el caso sintético, ambos con los errores de calibración. Los valores mostrados son del caso sintético.

se puede observar en los valores de los parámetros para los casos $M_{\text{stack}}^{\text{stck}}$ y $M_{\text{cal}}^{\text{stck}}$, los cuales son similares, por ejemplo, el valor de la anchura de la AME es $0.78^{+0.09}_{-0.07}$ y $0.77^{+0.24}_{-0.16}$ respectivamente, mientras que para el caso $M_{\text{cal}}^{\text{stck}}$ es $0.99^{+0.26}_{-0.19}$. Con respecto al valor de χ^2_{dof} del caso sintético es bajo debido a utilizar los modelos de la Sección 2.4.1 para extraer las densidades de flujo introduciendo los valores de los parámetros de cada fuente, lo cual resulta en valores suaves. Por lo tanto, para realizar un análisis más riguroso y acorde con la metodología empleada, se procederá a comparar el caso apilado utilizando errores obtenidos mediante el método de apilamiento, mientras que para el caso sintético se utilizarán los errores de calibración, como se explicó en la Sección 2.3.

Capítulo 3

Resultados y discusión

En este capítulo se abordará el estudio de las propiedades estadísticas de los parámetros físicos correspondientes a muestras específicas. Asimismo, se busca entender y caracterizar las diferentes degeneraciones que sufren los parámetros en cada muestra comparando los casos apilado y sintético. La Tabla 3.1 muestra los resultados del caso apilado y el caso sintético para las muestras seleccionadas. La tabla con los valores de los parámetros de las mismas muestras, ambas con el error de calibración, se encuentra en el Apéndice B.

3.1. Muestra 1

La muestra 1 consta de fuentes con un ancho de AME mayor o igual a 0.8, etiquetada como $W_{0.8}$ (sección 2.1.1). Las SEDs apiladas, sintética y la diferencia entre ambas se presentan en la Figura 3.1, donde los ajustes de las SEDs son representados por las líneas continuas en color rojo y azul, respectivamente y de color púrpura y magenta la diferencia entre las SEDs y los ajustes. Los dos espectros son muy similares, pero en el rango de la AME (10 - 60 GHz) y de la emisión del polvo térmico (100 - 3000 GHz) la SED apilada presenta una disminución con respecto a la SED sintética. Una versión de los contornos de correlación se muestra en la Figura 3.2, tanto para la SED apilada (rojo) como para la SED sintética (azul). En el gráfico se presentan indicios de degeneraciones tanto entre los parámetros ΔT_{CMB} y β_{td} , así como entre ΔT_{CMB} y W_{AME} . Asimismo, un análisis detallado de las diferentes relaciones en el diagrama de correlación revela una ligera conexión entre los parámetros ν_{AME} y ΔT_{CMB} . En el Apéndice C se presenta tanto el ajuste de la SED apilada como su gráfico de correlación del espacio de parámetros. Los parámetros que se obtienen de los ajustes se presentan en la Tabla 3.1.

Del ajuste de las SED sintética y apilada se observa el valor del residuo del CMB (ΔT_{CMB}) para el caso apilado de $12^{+17}_{-18} \mu\text{K}$, mientras que para el caso sintético es de $18^{+43}_{-45} \mu\text{K}$, los valores son similares debido posiblemente a la ausencia de degeneración, aunque hay que tener en cuenta la incertidumbre. El valor de la amplitud de la AME para el caso apilado es de $26.5 \pm 0.9 \text{ Jy}$ y para el caso sintético es de $39 \pm 6 \text{ Jy}$, esta diferencia podría ser debida a la reducción de ruido y las fluctuaciones del fondo al aplicar el *stacking*. El parámetro de la emisividad del polvo térmico presenta valores 1.50 ± 0.4 para el caso apilado y $1.65^{+0.08}_{-0.09}$ para el caso sintético. Asimismo, el parámetro de la anchura de la AME ha pasando de un valor para el caso sintético de $1.11^{+0.24}_{-0.21}$ Y superando el valor de todas las fuentes por separado, a un valor del caso apilado de $0.92^{+0.07}_{-0.06}$. Por un lado, el valor de la anchura de la AME para la SED sintética

θ	Muestra 1		Muestra 2	
	$W_{0.8}^{\text{stck}}$	$W_{0.8}^{\text{stck}}$	$\Delta T_{80}^{\text{stck}}$	$\Delta T_{80}^{\text{stck}}$
$EM[\text{pc cm}^{-6}]$	932 ± 10	916_{-81}^{+80}	1486_{-54}^{+52}	1710_{-158}^{+153}
$A_{\text{AME}} [\text{Jy}]$	26.5 ± 0.9	39 ± 6	55 ± 5	47_{-11}^{+12}
$\nu_{\text{AME}} [\text{GHz}]$	$24.2_{-0.9}^{+1.0}$	24_{-3}^{+4}	$22.0_{-1.5}^{+1.8}$	23_{-3}^{+4}
W_{AME}	$0.92_{-0.06}^{+0.07}$	$1.11_{-0.21}^{+0.24}$	$0.82_{-0.09}^{+0.12}$	$0.83_{-0.20}^{+0.30}$
$\Delta T_{\text{CMB}} [\mu\text{K}]$	12_{-18}^{+17}	18_{-45}^{+43}	127_{-61}^{+51}	92_{-79}^{+67}
$\tau_{353} [10^{-5}]$	4.0 ± 0.2	$5.3_{-0.3}^{+0.4}$	$13_{-0.20}^{+0.15}$	$12.0_{-0.3}^{+0.2}$
$T_{\text{td}} [\text{K}]$	23.8 ± 0.4	$23.9_{-1.1}^{+1.3}$	20.7 ± 0.5	$21.9_{-1.0}^{+1.1}$
β_{td}	1.50 ± 0.04	$1.65_{-0.09}^{+0.08}$	1.75 ± 0.06	1.75 ± 0.08
χ_{dof}^2	2.44	0.05	1.37	0.08

θ	Muestra 3		Muestra 4	
	$EM_{>10^3}^{\text{stck}}$	$EM_{>10^3}^{\text{stck}}$	$EM_{<10^3}^{\text{stck}}$	$EM_{<10^3}^{\text{stck}}$
$EM[\text{pc cm}^{-6}]$	1888_{-83}^{+82}	2513_{-220}^{+209}	197 ± 9	235 ± 21
$A_{\text{AME}} [\text{Jy}]$	84 ± 7	50_{-16}^{+17}	11.1 ± 0.7	15.1 ± 1.6
$\nu_{\text{AME}} [\text{GHz}]$	$20.7_{-1.4}^{+1.6}$	23 ± 4	$24.3_{-1.0}^{+1.2}$	$23.7_{-1.2}^{+1.3}$
W_{AME}	$0.96_{-0.10}^{+0.12}$	$0.85_{-0.26}^{+0.36}$	$0.74_{-0.07}^{+0.08}$	$0.71_{-0.08}^{+0.10}$
$\Delta T_{\text{CMB}} [\mu\text{K}]$	127_{-78}^{+61}	31_{-94}^{+87}	-2_{-13}^{+11}	15_{-16}^{+14}
$\tau_{353} [10^{-5}]$	$16.0_{-0.3}^{+0.2}$	$15.0_{-0.3}^{+0.2}$	2.5 ± 0.3	$4.0_{-0.3}^{+0.4}$
$T_{\text{td}} [\text{K}]$	$21.0_{-0.4}^{+0.5}$	22.0 ± 1.0	21.7 ± 0.5	$20.8_{-0.8}^{+0.9}$
β_{td}	$1.75_{-0.06}^{+0.05}$	1.75 ± 0.08	$1.47_{-0.06}^{+0.05}$	1.66 ± 0.07
χ_{dof}^2	3.27	0.13	1.39	0.03

Tabla 3.1: Parámetros observacionales que describen los espectros de las diferentes muestras de este estudio. El exponente $^{\text{stck}}$ representa los valores del caso apilado, mientras que para el caso sintético, identificada con el exponente $^{\text{stck}}$. Las muestras que se analizan son: $W_{0.8}$, ΔT_{80} , $EM_{>10^3}$ y $EM_{<10^3}$ (sección 2.1.1).

se dispara por encima del PUL de P23VII podría ser al juntar muchas fuentes con distintos valores de ν_{AME} y ello implica una mayor anchura de forma natural. El hecho de que disminuya la anchura de la AME podría ser debido a la sobrestimación del parámetro W_{AME} que surge del ajuste de las SED de las fuentes individuales y quizá se deba también a que las fuentes con altas ν_{AME} son de detecciones no muy buenas. Como se mencionó anteriormente, se esperaba un rango entre 0.4 y 0.7 para este parámetro según el modelo [Draine & Lazarian \(1998\)](#), sin embargo, el análisis de la SED apilada muestra valores que no entran en ese rango.

3.2. Muestra 2

La muestra 2 está constituida por fuentes con un residuo de CMB igual o superior a $80 \mu\text{K}$, designada como ΔT_{80} (sección 2.1.1). Es relevante destacar que no se utilizó las frecuencias de Stockert/Villa-Elisa, 17 y 19 GHz de QUIJOTE a porque hay fuentes que dan alguno de los problemas explicados anteriormente en la Sección 2.2. En la Figura 3.3 se presentan tanto la SED apilada como la sintética además

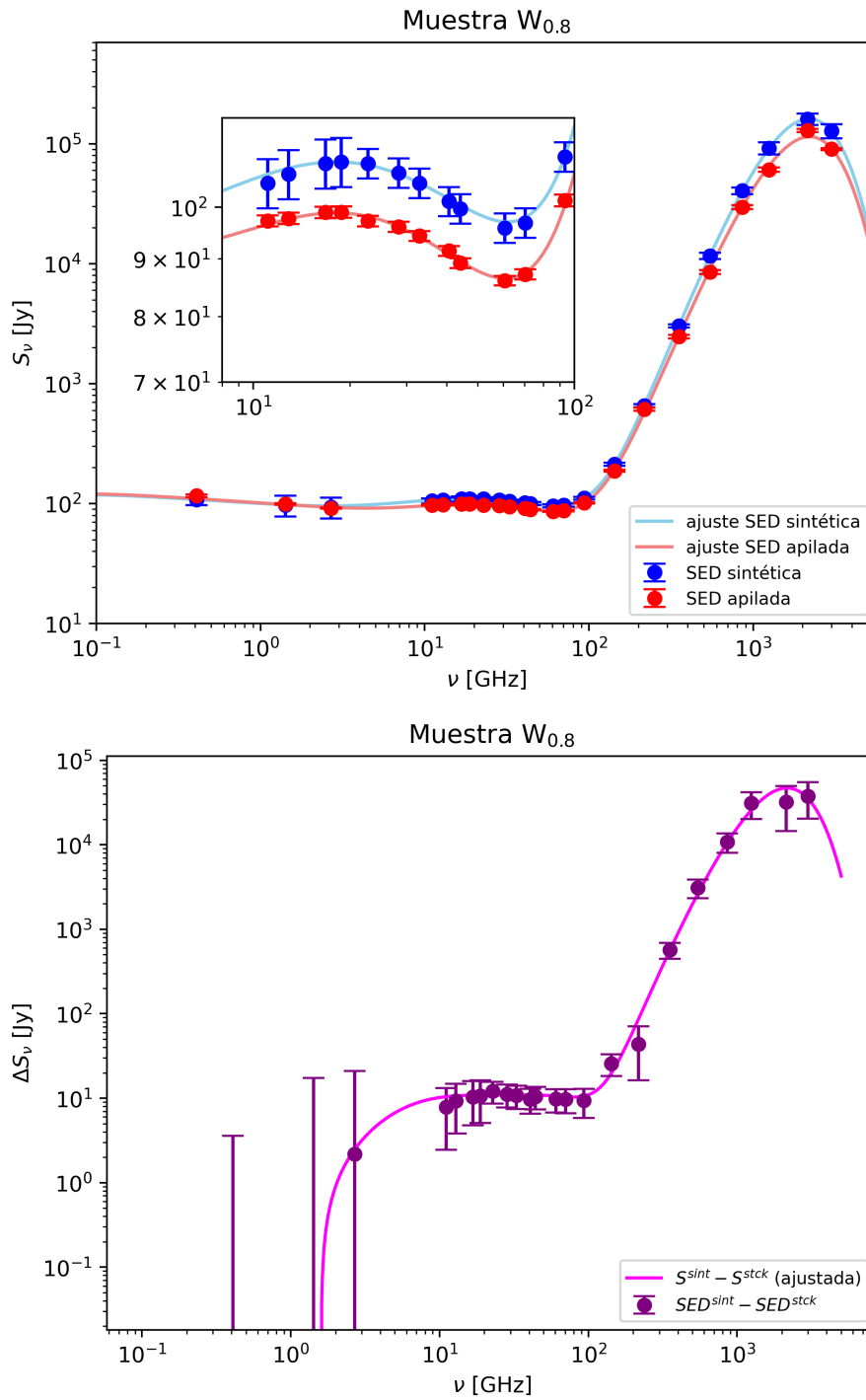


Figura 3.1: Panel superior: SEDs a partir de la muestra $W_{0.8}$. El color rojo representa las densidades de flujo y ajuste para el caso de la SED apilada, mientras que de color azul describe el ajuste y las densidades de flujo obtenidos mediante el promediado de la densidad de flujo. Panel inferior: Diferencia entre las SEDs y ajustes de las SEDs del caso sintético y el caso apilado que se obtienen a partir de la muestra $W_{0.8}$. El color púrpura representa la diferencia de SEDs y en magenta la diferencia entre los ajustes para el caso sintético y apilado.

de su diferencia, empleando los mismos colores que en la sección precedente. Ambas SEDs exhiben un comportamiento análogo, aunque en el intervalo de 0.4 a 10 GHz

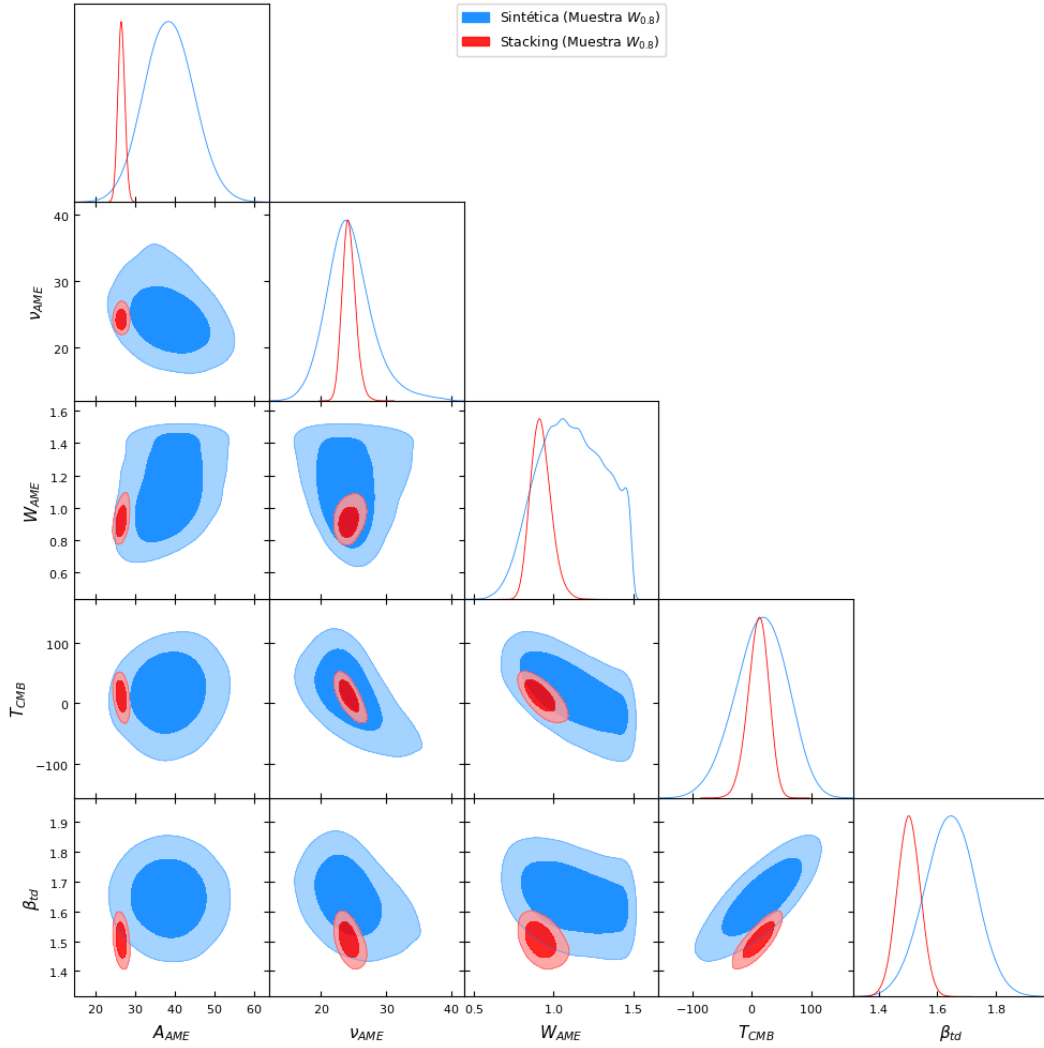


Figura 3.2: Corner plot que contiene los valores posteriores y los gráficos de correlación para algunos parámetros que describen la SED de la muestra $W_{0.8}$. En rojo se tiene el caso apilado y en azul el sintético. Nótese que la diferencia de las incertidumbre se debe a que la SED apilada considera los errores derivados del apilamiento en contraste a la SED sintética.

se observa una disminución en la SED apilada en comparación con la SED sintética, fenómeno que también se manifiesta en frecuencias elevadas (≥ 1100 GHz). Los diagramas de correlación, que se ilustran en la Figura 3.4, corresponden a ambos casos: SED apilada (en rojo) y sintética (en azul). El análisis sugiere la existencia de posibles degeneraciones entre los parámetros A_{AME} y EM , así como entre ΔT_{CMB} y W_{AME} , perceptibles tanto en el caso apilado como en el sintético. Adicionalmente, se detecta una leve relación entre ν_{AME} y ΔT_{CMB} . Para la SED apilada, se presenta el ajuste de la SED y los contornos de correlación de los parámetros en el Apéndice C. Los ajustes de las SEDs se representan mediante líneas continuas, y los parámetros derivados del ajuste se encuentran en la Tabla 3.1.

Los valores del parámetro del residuo del CMB presenta valores de $127^{+51}_{-61} \mu K$ para el caso apilado y $92^{+67}_{-79} \mu K$ el caso sintético. El valor apilado del residuo del CMB ha aumentado. Por otro lado, a diferencia de la muestra anterior $W_{0.8}$, no se observa una variación notable en los parámetros de la AME. La anchura de la AME tiene un valor de W_{AME} de $0.82^{+0.12}_{-0.09}$ para el caso apilado, mientras que el caso sintético

es de $0.83_{-0.20}^{+0.30}$; el pico de frecuencia AME con valores $22_{-1.5}^{+1.8}$ GHz y 23_{-3}^{+4} GHz para los casos apilado y sintético respectivamente; la amplitud de la AME en el caso apilado es de 55 ± 5 Jy y para el caso sintético es 47_{-11}^{+12} Jy. El valor de la medida de emisión para el caso apilado es de 1710_{-54}^{+52} pc cm⁻⁶ y el valor de el caso sintético es 1486_{-158}^{+153} pc cm⁻⁶. Esta observación podría atribuirse a limitaciones en el modelado que afecten la representación precisa de la SED, ya que la radiación de cuerpo negro modificada es un modelo muy simple que sabemos que puede fallar con medidas de alta relación señal de ruido, por lo que se corrige con el residuo del CMB. La ausencia de variación en los parámetros de la AME podría indicar que en muestras con alta valor de (EM), la AME podría tener menos relevancia a menos que sea notable, lo cual podría estar reflejando un efecto de selección.

3.3. Muestra 3

La muestra 3 consta de fuentes con una medida de emisión mayor o igual a 1000 pc cm⁻⁶, denominada como $EM_{>10^3}$ (sección 2.1.1). Hay que comentar que no se usaron las frecuencias HartRAO y 17 y 19 GHz de QUIJOTE debido al mismo problema que en la muestra anterior. Las SEDs apilada y sintética se presentan en la Figura 3.5 en color rojo y azul, respectivamente y la diferencia entre sus SEDs y sus ajustes. Al comparar los dos espectros en el rango de bajas frecuencias (0.4 - 10 GHz) y en el rango (≥ 1200 GHz) presenta una disminución la SED apilada con respecto a la SED sintética. Los diagramas de correlación se muestran en la Figura 3.6, tanto para el caso de la SED apilada (rojo) y sintética (azul). Del gráfico sugiere una degeneración entre los parámetros EM y W_{AME} , así como, entre ΔT_{CMB} y W_{AME} , tanto en el caso sintético como en el caso apilado. Asimismo, hay una degeneración importante entre A_{AME} con EM , citada en algunos trabajos (Dickinson et al. 2018; Poidevin et al. 2023). Para la SED apilada se presenta su ajuste de la SED y el gráfico de correlación de los parámetros en el Apéndice C. Los ajustes de las SEDs son representados por las líneas continuas y los parámetros que se obtienen del ajuste se listan en la Tabla 3.1.

Del ajuste de las SEDs sintética y apilada se observa que el parámetro ΔT_{CMB} en el caso apilado tiene un valor de 127_{-78}^{+61} μ K y en el caso sintético 31_{-94}^{+87} μ K. Esto refleja una situación similar a la observada en la sección anterior con la muestra ΔT_{80} . Por otro lado, la medida de emisión para esta muestra tiene una gran importancia, siendo su valor para el caso apilado 1888_{-83}^{+82} pc cm⁻⁶ y 2513_{-220}^{+209} pc cm⁻⁶ para el caso sintético. La disminución del valor EM refleja la degeneración entre la emisión libre-libre y la AME, prestando especial atención a sus parámetros. El valor de la anchura de la AME para el caso apilada es de $0.96_{-0.10}^{+0.12}$, mientras que para el caso sintético es de $0.85_{-0.26}^{+0.36}$. La amplitud de la AME con valores de 84 ± 7 Jy y 50_{-16}^{+17} Jy para los casos apilado y sintético respectivamente. En cuanto a los valores de ν_{AME} del caso apilado, $20.7_{-1.4}^{+1.6}$ GHz, y el caso sintético, 23 ± 4 GHz. El hecho de que haya disminuido la frecuencia de la AME, aumentado la amplitud de la AME y, especialmente, que la anchura de la AME haya aumentado hasta alcanzar un valor superior al muestra $W_{0.8}$, manifiesta la degeneración que existe entre la emisión libre-libre y la AME. Por otro lado, el aumento del residuo del CMB se atribuye a la limitación en el modelado, igual que en la muestra anterior.

La muestra 4, la cual consiste en fuentes con una medida de emisión menor o igual a 1000 pc cm⁻⁶, denominados $EM_{<10^3}$ es la muestra complementaria de la muestra $EM_{>10^3}$ (Apéndice A). Los parámetros que se obtienen del ajuste se presentan en la

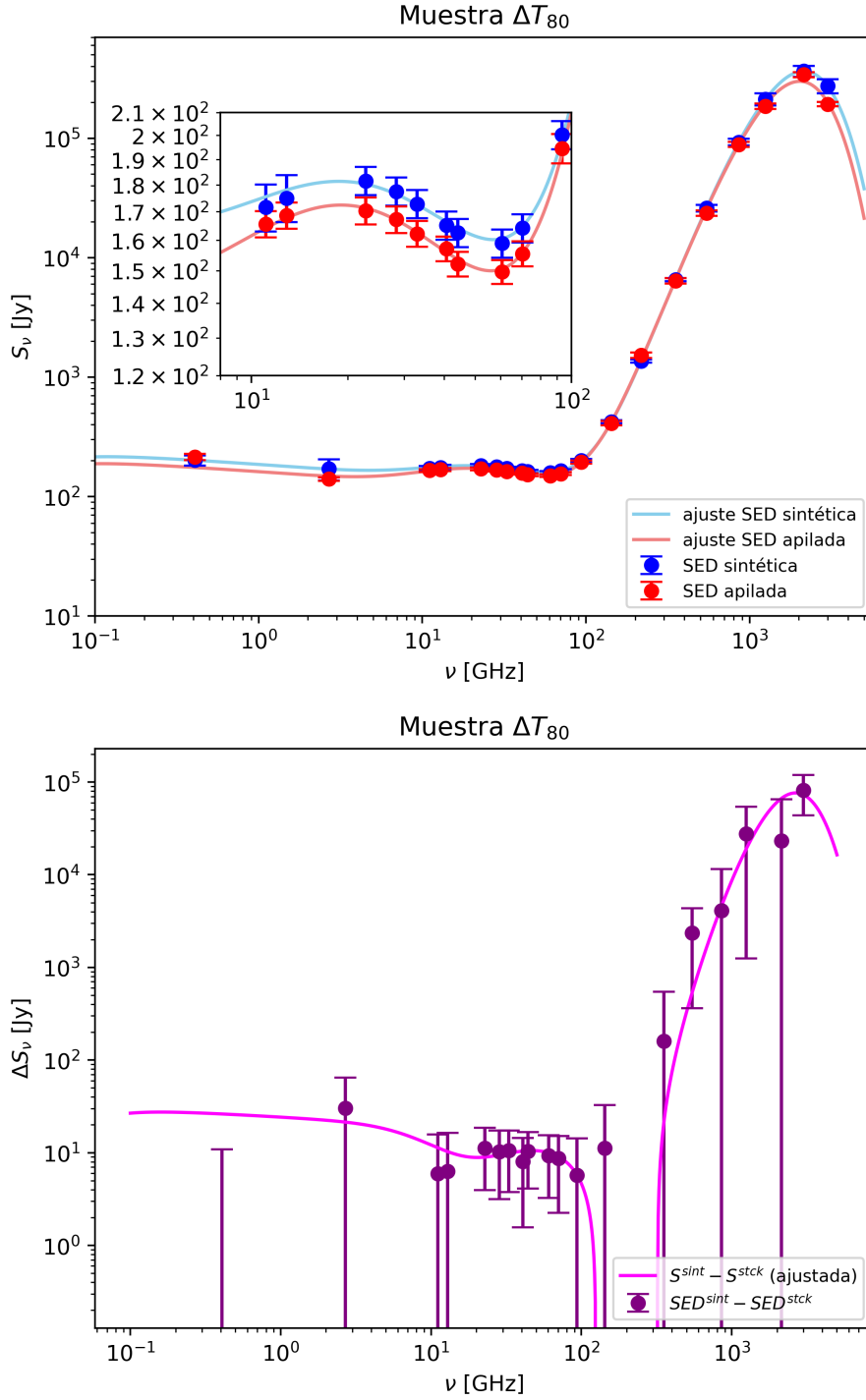


Figura 3.3: Panel superior: SEDs a partir de la muestra ΔT_{80} . Los colores y los errores son los mismos que en la Figura 3.1. Panel inferior: Diferencia entre las SEDs y ajustes de las SEDs del caso sintético y el caso apilado que se obtienen a partir de la muestra ΔT_{80} . Los colores son los mismos que en la Figura 3.1.

Tabla 3.1. El valor de la anchura de la AME del caso apilado de la muestra $EM_{<10^3}$ es $0.74^{+0.08}_{-0.07}$, que baja considerablemente comparado con el valor $0.96^{+0.12}_{-0.10}$ del caso apilado de la muestra $EM_{>10^3}$. Por otro lado, para la muestra total, el valor de la anchura de la AME es $0.78^{+0.09}_{-0.07}$. Esto evidencia una clara correlación entre valores altos de EM y valores de W_{AME} grandes.

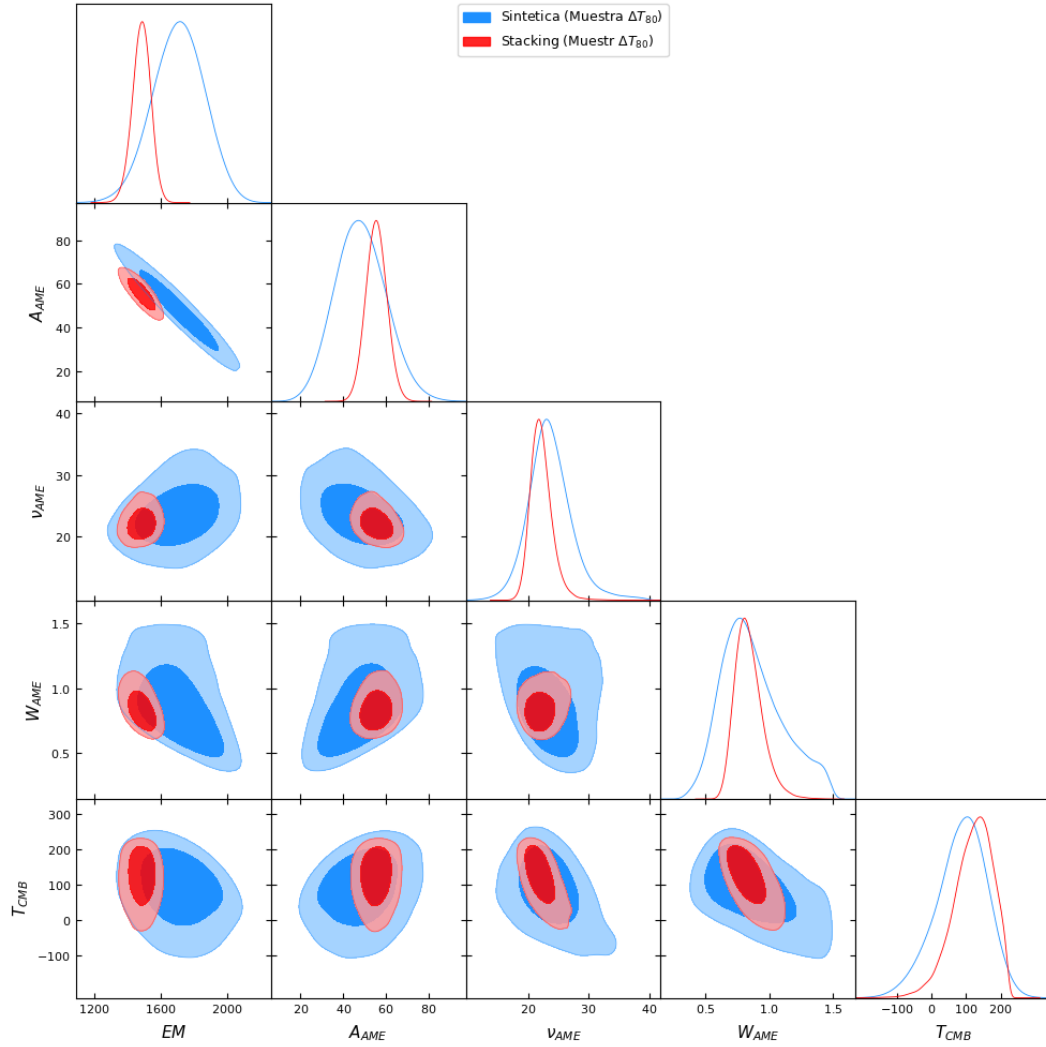


Figura 3.4: Corner plot que contiene los valores posteriores y los gráficos de correlación para algunos parámetros que describen las SEDs de la muestra ΔT_{80} . Los colores son los mismos que la Figura 3.2.

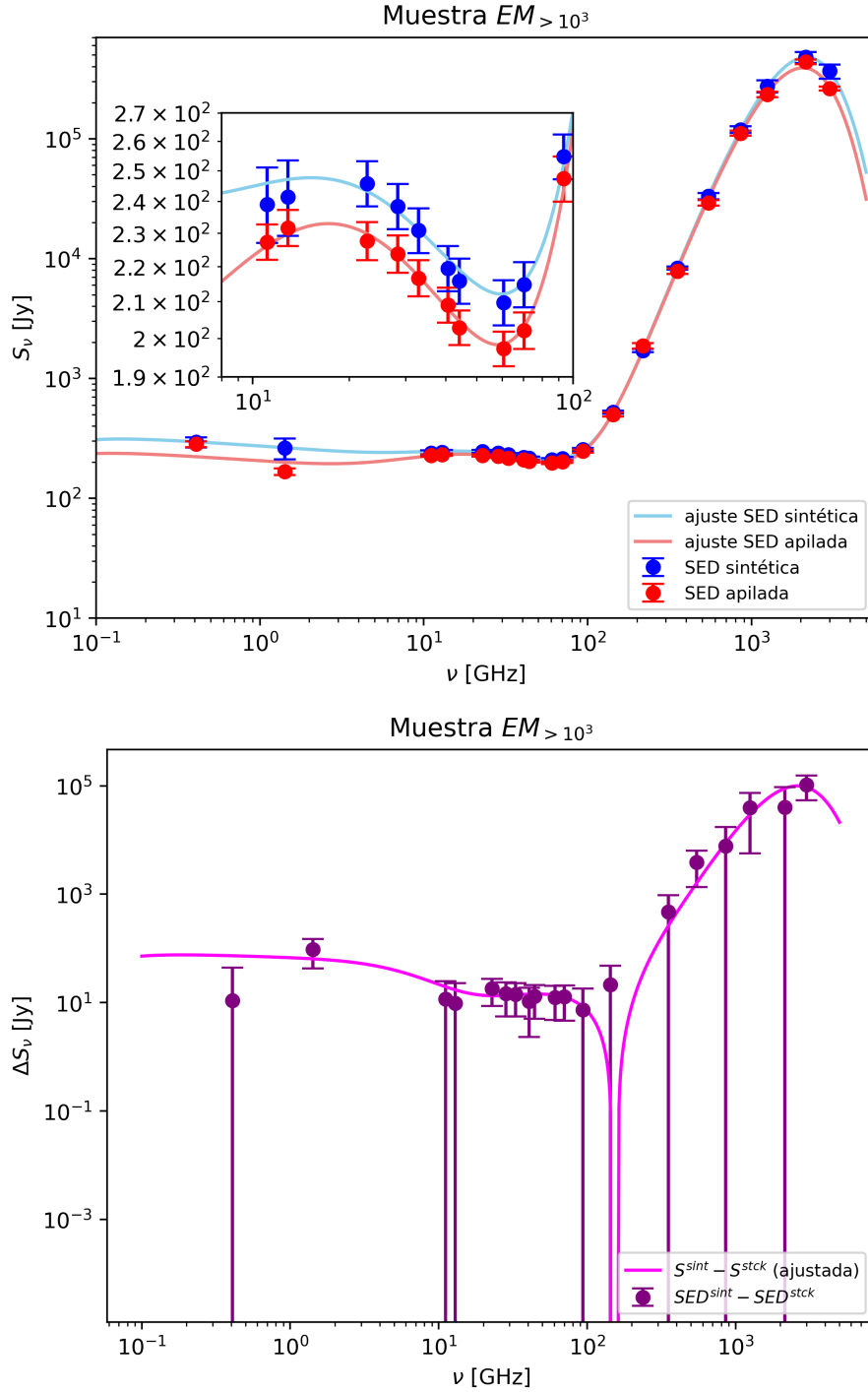


Figura 3.5: Panel superior: SEDs a partir de la muestra $EM_{>10^3}$. Los colores y los errores son los mismos que en la Figura 3.1. Panel inferior: Diferencia entre las SEDs y ajustes de las SEDs del caso sintético y el caso apilado que se obtienen a partir de la muestra $EM_{>10^3}$. Los colores son los mismos que en la Figura 3.1.

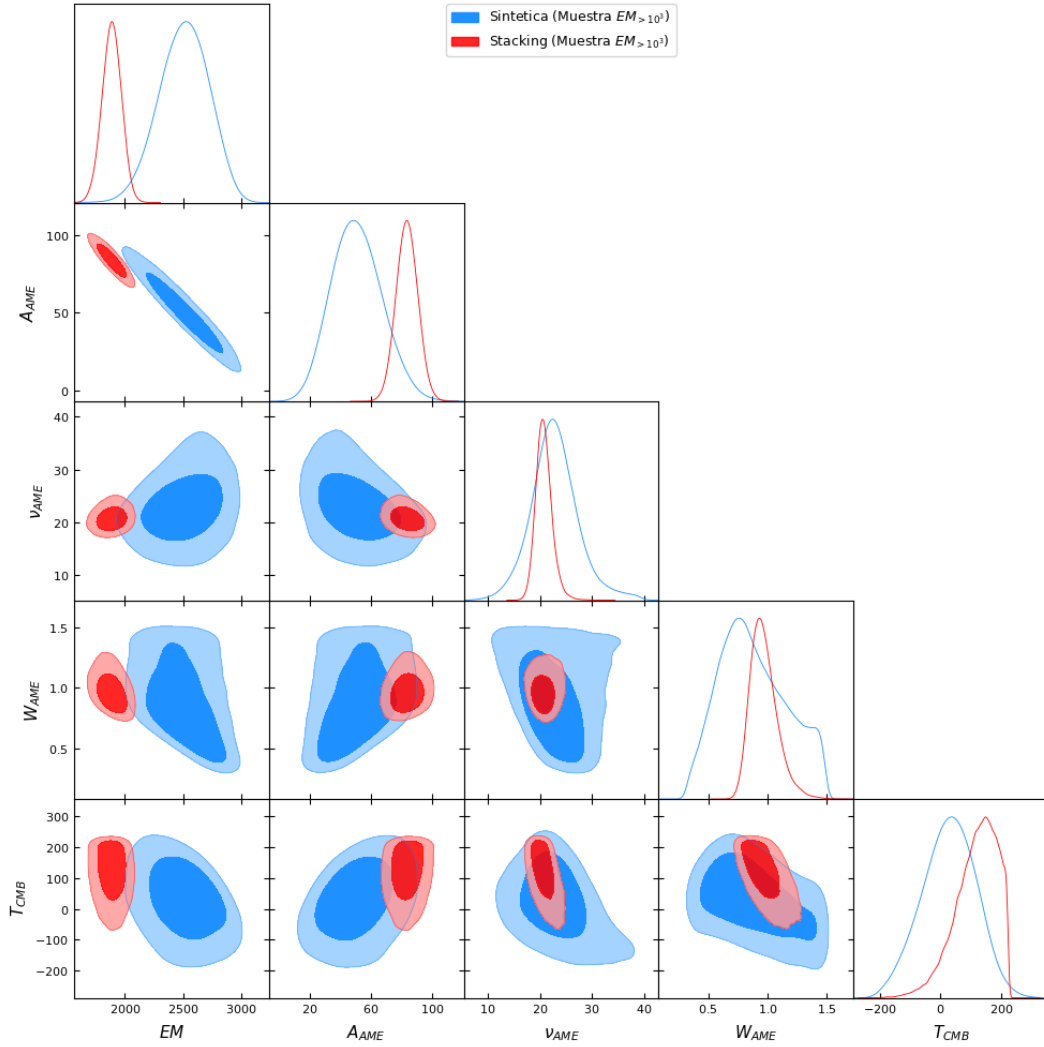


Figura 3.6: Corner plot que contiene los valores posteriores y los gráficos de correlación para algunos parámetros que describen las SEDs de la muestra $EM_{>10^3}$. Los colores son los mismos que la Figura 3.2.

Capítulo 4

Conclusiones

El estudio ha permitido comprender los principales procesos físicos que actúan en los rangos de frecuencias de radio a infrarrojo lejano, tales como la sincrotrón, la radiación libre-libre y la emisión del polvo térmico, prestando especial atención a la AME. Se ha utilizado el catálogo de fuentes con AME creado por [Poidevin et al. \(2023\)](#). Luego, se han seleccionado y separando las fuentes de interés para generar nuestro catálogo de fuentes AME, definiendo un catálogo reducido (Tabla 2.1). Después, se han utilizado datos de experimentos de radio, microondas e infrarrojo lejano como QUIJOTE-MFI, WMAP y *Planck*. Luego, se han definido muestras con motivaciones físicas para explorar y se aplicó la técnica del *stacking*. Esta es la primera implementación de un método de apilamiento de fuentes galácticas para estudiar las propiedades de la AME. Se ha realizado la fotometría de apertura en cada mapa suavizado a 1° obtenemos la SED combinada de cada muestra. Posteriormente, se exploraron las propiedades físicas estadísticas de la AME aplicando los códigos disponibles para la caracterización de la SED (basado en [López-Caraballo et al. 2024](#)). A continuación, las SEDs se ajustaron a partir de las distribuciones marginalizadas (posteriors) obtenidas mediante el método MCMC, se obtuvieron los valores y su correspondiente incertidumbre en el espacio de parámetros. El caso apilado se compara con el caso sintético, utiliza las predicciones a partir de los modelos obtenidos por [Poidevin et al. \(2023\)](#). De este análisis, se extraen las siguientes conclusiones:

- Se observa que para la SED apilada el W_{AME} es menor que en el caso sintético de la muestra $W_{0.8}$, lo que sugiere la sobretimación del parámetro W_{AME} en el ajuste de las SED de las fuentes individuales. No obstante, la SED apilada muestra valores que no alcanzan el rango de 0.4–0.7 predicho por los modelos teóricos de *spinning dust* ([Draine & Lazarian 1998](#)).
- Existen degeneraciones importantes entre los parámetros β_{td} y W_{AME} con ΔT_{CMB} . Por ejemplo, en la muestra $W_{0.8}$ el valor de β_{td} varía de $1.65^{+0.08}_{-0.09}$ para el caso sintético a 1.50 ± 0.4 para el caso apilado. Asimismo, el valor de W_{AME} cambia de $1.11^{+0.24}_{-0.21}$ a $0.92^{+0.07}_{-0.06}$ del caso apilado, mientras que el residuo del CMB ha variado de $18^{+43}_{-45} \mu\text{K}$ para el caso sintético y $12^{+17}_{-18} \mu\text{K}$ para el caso apilado.
- El aumento del residuo en las muestras apiladas ΔT_{80} y $EM_{>10^3}$, por ejemplo, el valor del residuo del CMB para la muestra $EM_{>10^3}$ varía en el caso sintético $31^{+87}_{-94} \mu\text{K}$ a $127^{+61}_{-78} \mu\text{K}$ en el caso apilado. Por otro lado, la medida de emisión tiene un valor para el caso apilado $1888^{+82}_{-83} \text{pc cm}^{-6}$ y $2513^{+209}_{-220} \text{pc cm}^{-6}$ para el caso sintético. Esto podría indicar limitaciones en el modelado que afecten la representación precisa de la SED, ya que la radiación de cuerpo negro modificada

es un modelo muy simple que puede fallar con medidas de alta relación señal de ruido, por lo que se corrige con el residuo del CMB.

- Hay una degeneración entre los parámetros de la AME (A_{AME} , W_{AME} , ν_{AME}) y la medida de emisión (EM) para las fuentes con valores altos de EM .

Se concluye que las degeneraciones son uno de los principales problemas al caracterizar fuentes galácticas. No obstante, se ha encontrado que la técnica de *stacking* permite acceder a las propiedades estadísticas de cada muestra proporcionando indicios sobre ciertas degeneraciones.

Para próximas investigaciones, este trabajo puede ser un buen punto de partida para comprender las propiedades de la AME utilizando la técnica de *stacking*. Por otra parte, se podría mejorar este análisis si se añade más datos a frecuencias bajas, por ejemplo 5 GHz de CBASS (Jones et al. 2018a), ya que así se lograría separar mejor la radiación sincrotrón, AME y la emisión libre-libre. Además, aplicando la corrección de CO para corregir los mapas de intensidad de 100, 217 y 353 GHz de la contaminación introducida por las líneas de transición rotacional (1-0), (2-1) y (3-2), respectivamente, comparar con este trabajo qué cambios genera e incrementar el volumen de datos disponibles.

Bibliografía

- Abazajian, K. N., Arnold, K., Austermann, J., et al. 2015, *Astroparticle Physics*, 63, 55
- Ade, P., Aguirre, J., Ahmed, Z., et al. 2019, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2019, 056
- Ade, P. A. R., Ahmed, Z., Amiri, M., et al. 2021, *Phys. Rev. Lett.*, 127, 151301
- Ali-Haïmoud, Y. 2013, *Advances in Astronomy*, 2013, 1–13
- Ali-Haïmoud, Y., Hirata, C. M., & Dickinson, C. 2009, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 395, 1055
- Battistelli, E. S., Fatigoni, S., Murgia, M., et al. 2019, *The Astrophysical Journal Letters*, 877, L31
- Bennett, C. L., Larson, D., Weiland, J. L., et al. 2013, , 208, 20
- Bertin, E. & Arnouts, S. 1996, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 117, 393
- BICEP2 Collaboration, Ade, P. A. R., Aikin, R. W., et al. 2014, , 112, 241101
- Boguess, N. W., Mather, J. C., Weiss, R., et al. 1992, , 397, 420
- Carretti, E., Haverkorn, M., Staveley-Smith, L., et al. 2019, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 489, 2330
- Cepeda-Arroita, R., Harper, S. E., Dickinson, C., et al. 2021, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 503, 2927
- Condon, J. J. & Ransom, S. M. 2016, *Essential Radio Astronomy*, sch - school edition edn. (Princeton University Press)
- Condon, J. J. & Ransom, S. M. 2016, *Essential Radio Astronomy*
- Crutcher, R. M. 1999, , 520, 706
- Davies, R. D., Dickinson, C., Banday, A. J., et al. 2006, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 370, 1125
- de Oliveira-Costa, A., Kogut, A., Devlin, M. J., et al. 1997, *The Astrophysical Journal*, 482, L17
- de Oliveira-Costa, A., Tegmark, M., Gutiérrez, C. M., et al. 1999, *The Astrophysical Journal*, 527, L9

- de Oliveira-Costa, A., Tegmark, M., Page, L. A., & Boughn, S. P. 1998, *The Astrophysical Journal*, 509, L9
- Dickinson, C., Ali-Haïmoud, Y., Barr, A., et al. 2018, *New Astronomy Reviews*, 80, 1
- Dickinson, C., Davies, R. D., Allison, J. R., et al. 2008, *The Astrophysical Journal*, 690, 1585
- Dole, H., Lagache, G., Puget, J. L., et al. 2006, , 451, 417
- Dong, R. & Draine, B. T. 2010, *The Astrophysical Journal*, 727, 35
- Draine, B. T. 2011, *Physics of the Interstellar and Intergalactic Medium*
- Draine, B. T. & Hensley, B. 2013, *The Astrophysical Journal*, 765, 159
- Draine, B. T. & Lazarian, A. 1998, *The Astrophysical Journal*, 508, 157
- Draine, B. T. & Lazarian, A. 1999, , 512, 740
- Draine, B. T. & Li, A. 2001, , 551, 807
- Erickson, W. C. 1957, , 126, 480
- Fernández-Torreiro, M., Génova-Santos, R. T., Rubiño-Martín, J. A., et al. 2024, , 527, 11945
- Fernández-Torreiro, M., Rubiño-Martín, J. A., López-Caraballo, C. H., et al. 2023, , 526, 1343
- Fixsen, D. J. 2009, *The Astrophysical Journal*, 707, 916
- Foreman-Mackey, D. 2016, *Journal of Open Source Software*, 1, 24
- Foreman-Mackey, D., Hogg, D. W., Lang, D., & Goodman, J. 2013, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 125, 306
- Gardner, F. F. & Whiteoak, J. B. 1966, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 4, 245
- Génova-Santos, R., Rubiño-Martín, J. A., Peláez-Santos, A., et al. 2017, , 464, 4107
- Ginzburg, V. L. & Syrovatskii, S. I. 1965, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 3, 297
- Górski, K. M., Hivon, E., Banday, A. J., et al. 2005, , 622, 759
- Génova-Santos, R., Martín, J. A. R., Rebolo, R., et al. 2015, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 452, 4169
- Génova-Santos, R., Rebolo, R., Rubiño-Martín, J. A., López-Caraballo, C. H., & Hildebrandt, S. R. 2011, *The Astrophysical Journal*, 743, 67
- Haslam, C. G. T., Salter, C. J., Stoffel, H., & Wilson, W. E. 1982, , 47, 1
- Hauser, M. G., Arendt, R. G., Kelsall, T., et al. 1998, *The Astrophysical Journal*, 508, 25

- Hensley, B., Murphy, E., & Staguhn, J. 2015, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 449, 809
- Hensley, B. S. & Draine, B. T. 2017, *The Astrophysical Journal*, 836, 179
- Hensley, B. S., Draine, B. T., & Meisner, A. M. 2016, *The Astrophysical Journal*, 827, 45
- Hildebrandt, S. R., Rebolo, R., Rubiño-Martín, J. A., et al. 2007, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 382, 594
- Hoang, T. & Lazarian, A. 2016, *The Astrophysical Journal*, 821, 91
- Irfan, M. O., Dickinson, C., Davies, R. D., et al. 2015, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 448, 3572
- Jonas, J. L., Baart, E. E., & Nicolson, G. D. 1998, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 297, 977
- Jones, M. E., Taylor, A. C., Aich, M., et al. 2018a, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 480, 3224–3242
- Jones, M. E., Taylor, A. C., Aich, M., et al. 2018b, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 480, 3224
- Kogut, A., Banday, A. J., Bennett, C. L., et al. 1996, *The Astrophysical Journal*, 464, L5
- Lee, E. J., Miville-Deschênes, M.-A., & Murray, N. W. 2016, , 833, 229
- Leitch, E. M., Readhead, A. C. S., Pearson, T. J., & Myers, S. T. 1997, *The Astrophysical Journal*, 486, L23
- Lewis, A. 2019
- Linden, S. T., Murphy, E. J., Dong, D., et al. 2020, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 248, 25
- Lindroos, L., Knudsen, K. K., Vlemmings, W., Conway, J., & Martí-Vidal, I. 2014, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 446, 3502
- LiteBIRD Collaboration, Allys, E., Arnold, K., et al. 2023a, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2023, 042F01
- LiteBIRD Collaboration, Allys, E., Arnold, K., et al. 2023b, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2023, 042F01
- López-Caraballo, C. H., Ruiz-Granados, B., Génova-Santos, R. T., et al. 2024, , 527, 171
- López-Caraballo, C. H., Rubiño-Martín, J. A., Rebolo, R., & Génova-Santos, R. 2011, *The Astrophysical Journal*, 729, 25
- López-Caraballo, C. H., Ruiz-Granados, B., Génova-Santos, R. T., et al. 2023, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 527, 171

- Matthews, B. C., McPhee, C. A., Fissel, L. M., & Curran, R. L. 2009, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 182, 143
- Murphy, E. J., Helou, G., Condon, J. J., et al. 2010, *The Astrophysical Journal Letters*, 709, L108
- Murphy, E. J., Linden, S. T., Dong, D., et al. 2018, *The Astrophysical Journal*, 862, 20
- Nashimoto, M., Hattori, M., Poidevin, F., & Génova-Santos, R. 2020, *The Astrophysical Journal Letters*, 900, L40
- Planck Collaboration, Adam, R., Ade, P. A. R., et al. 2016, *AA*, 594, A10
- Planck Collaboration:, Ade, P. A. R., Aghanim, N., et al. 2015, *AA*, 580, A13
- Planck Collaboration, Ade, P. A. R., Aghanim, N., et al. 2014, *AA*, 565, A103
- Planck Collaboration, Ade, P. A. R., Aghanim, N., et al. 2011, *AA*, 536, A1
- Planck Collaboration, Aghanim, N., Akrami, Y., et al. 2020a, , 641, A1
- Planck Collaboration, Aghanim, N., Akrami, Y., et al. 2020b, , 641, A1
- Platania, P., Burigana, C., Maino, D., et al. 2003, , 410, 847
- Poidevin, F., Génova-Santos, R. T., Rubiño-Martín, J. A., et al. 2023, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 519, 3481
- Poidevin, F., Rubiño-Martín, J. A., Dickinson, C., et al. 2018, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 486, 462
- POLARBEAR Collaboration, Ade, P. A. R., Aguilar, M., et al. 2017, , 848, 121
- Poojon, P., Chung, A., Hoang, T., et al. 2024, , 963, 88
- Reich, P. & Reich, W. 1986, , 63, 205
- Reich, P. & Reich, W. 1988, , 74, 7
- Reich, W. 1982, , 48, 219
- Rennie, T. J., Harper, S. E., Dickinson, C., et al. 2022, *The Astrophysical Journal*, 933, 187
- Rubiño-Martín, J. A., Guidi, F., Génova-Santos, R. T., et al. 2023, , 519, 3383
- Rubiño-Martín, J. A., Guidi, F., Génova-Santos, R. T., et al. 2023, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 519, 3383
- Rybicki, G. B. & Lightman, A. P. 1979, *Radiative processes in astrophysics*
- Scaife, A. M. M., Nikolic, B., Green, D. A., et al. 2010, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 406, L45
- Smoot, G., Bennett, C., Weber, R., et al. 1990, , 360, 685
- Smoot, G. F. 1998, *Galactic Free-free and H-alpha Emission*

- Stevenson, M. A. 2014, *The Astrophysical Journal*, 781, 113
- Todorović, M., Davies, R. D., Dickinson, C., et al. 2010, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 406, 1629
- Tramonte, D., Génova-Santos, R. T., Rubiño-Martín, J. A., et al. 2023, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 519, 3432
- Trujillo-Bueno, J., Moreno-Insertis, F., & Sanchez Martinez, F. 2002, *Astrophysical Spectropolarimetry*
- Watson, R. A., Rebolo, R., Rubiño-Martín, J. A., et al. 2005, *The Astrophysical Journal*, 624, L89
- Watts, D. J., Larson, D., Marriage, T. A., et al. 2015, , 814, 103
- Ysard, N., Juvela, M., & Verstraete, L. 2011, *AA*, 535, A89

Apéndice A

Muestra 4

La muestra 4 consiste en las fuentes con una medida de emisión menor o igual a 1000 pc cm^{-6} , denominada como $EM_{<10^3}$ (sección 2.1.1). Hay que resaltar que no se usó HartRAO debido a zonas donde el experimento no observa alguna fuente de la muestra. Esta muestra es la complementaria de la muestra $EM_{>10^3}$, Las SEDs apilada y sintética se presentan en la Figura A.1 en color rojo y azul, respectivamente y . Al comparar los dos espectros la SED apilada tiene una densidad de flujo menor en todo el rango con respecto a la SED sintética mostrado. Los diagramas de correlación se muestran en la Figura A.2, tanto para el caso de la SED apilada (rojo) y sintética (azul). Existe correlación entre el parámetro ΔT_{CMB} y β_{td} , así como entre W_{AME} y ΔT_{CMB} y además, una leve correlación entre ΔT_{CMB} y ν_{AME} . Para la SED apilada se presenta su ajuste de la SED y el gráfico de correlación de los parámetros en el Apéndice C. Los ajustes de las SEDs son representados por las líneas continuas y los parámetros que se obtienen del ajuste se presentan en la Tabla 3.1.

Los valores de ΔT_{CMB} para los casos apilado y sintético son $-2_{-13}^{+11} \mu\text{K}$ y $15_{-16}^{+14} \mu\text{K}$, respectivamente. El valor obtenido para el caso apilado es cercano a cero debido a la presencia de 33 fuentes que le han sido aplicado el *stacking*, aunque el caso sintético también tiene un valor bajo. El parámetro de la emisividad del polvo térmico, β_{td} , ha presentado el mismo comportamiento que la muestra $W_{0.8}$. Los valores de este parámetro son para el caso apilado $1.47_{-0.06}^{+0.05}$ y para el caso sintético 1.66 ± 0.07 . El valor apilado es muy bajo debido a la misma degeneración ocasionada en la muestra $W_{0.8}$, aunque la diferencia esta vez es la ausencia de variación sustancial en los parámetros de la AME. La anchura de la AME tiene un valor para la muestra apilada de $0.74_{-0.07}^{+0.08}$ y un valor para la muestra sintética de $0.71_{-0.08}^{+0.10}$. La frecuencia de la AME, ν_{AME} , tiene valores de $24.3_{-1.0}^{+1.2} \text{ GHz}$ y $23.7_{-1.2}^{+1.3} \text{ GHz}$ para los casos apilado y sintético. Por otro lado, el valor de la amplitud AME para el caso apilado es $11.1 \pm 0.7 \text{ Jy}$ y $15.1 \pm 1.6 \text{ Jy}$ para el caso sintético. El hecho de que solo varíe la emisividad del polvo podría ser debido a la fuerte degeneración que tiene los tres parámetros citados en las muestras, W_{AME} , β_{td} y ΔT_{CMB} .

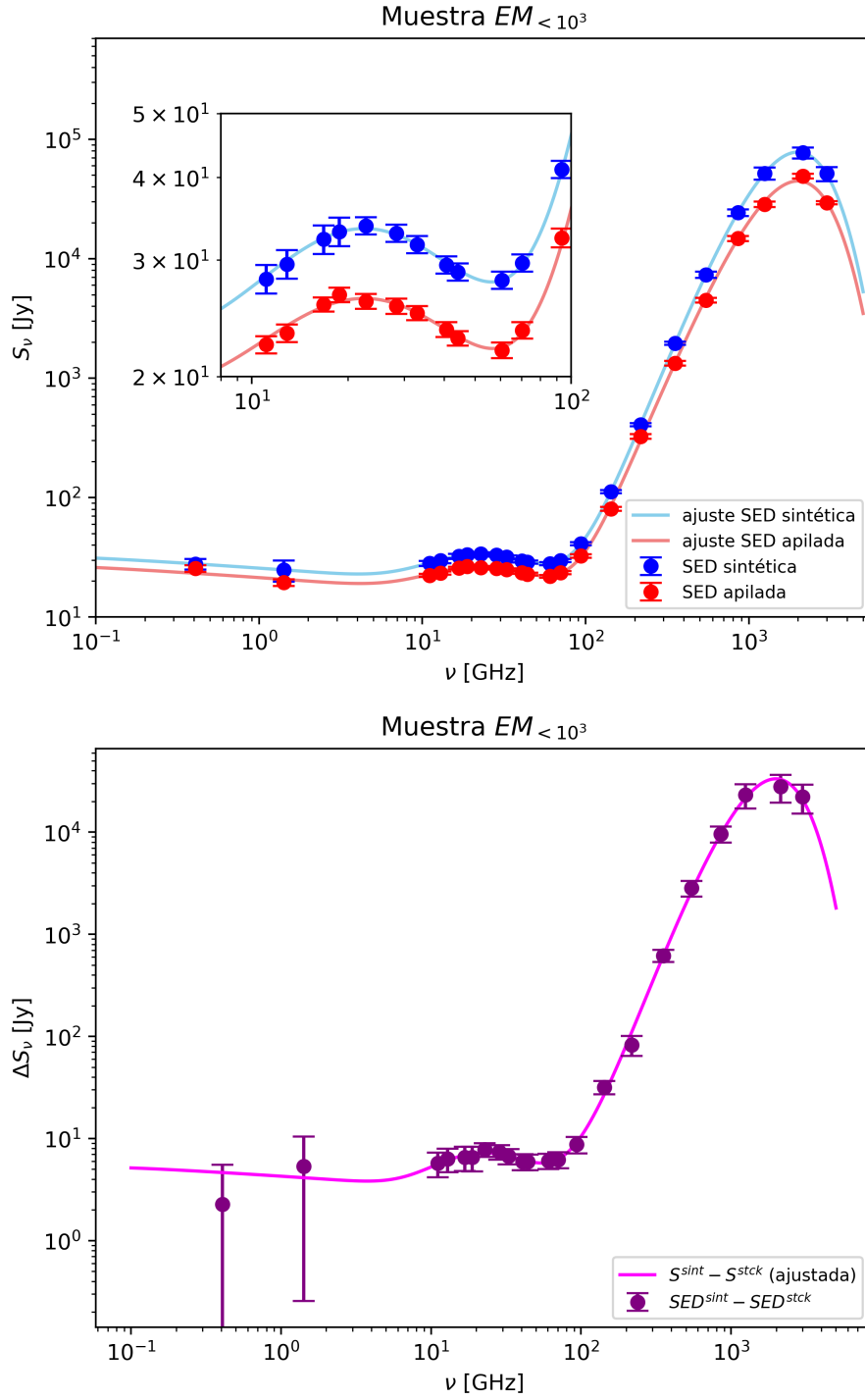


Figura A.1: Panel superior: SEDs a partir de la muestra $EM_{<10^3}$. Los colores y los errores son los mismos que en la Figura 3.1. Panel inferior: Diferencia entre las SEDs y ajustes de las SEDs del caso sintético y el caso apilado que se obtienen a partir de la muestra $EM_{<10^3}$. Los colores son los mismos que en la Figura 3.1.

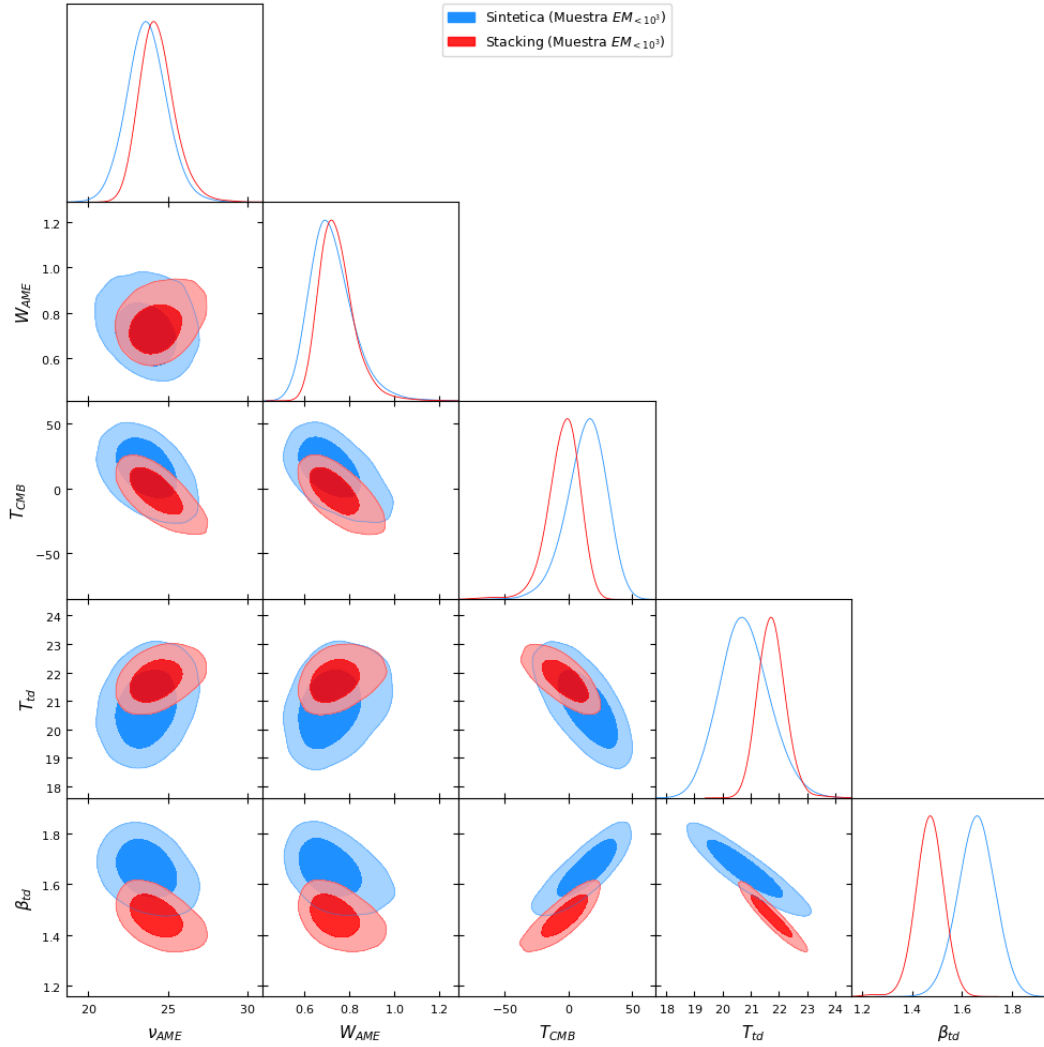


Figura A.2: Corner plot que contiene los valores posteriores y los gráficos de correlación para algunos parámetros que describen la SED de la muestra $EM_{<10^3}$. Los colores son los mismos que la Figura 3.2.

Apéndice B

Caso apilado con error de calibración

En esta sección figura la tabla que presenta los casos apilado y sintético de cada muestra al utilizar los errores de calibración, proporcionando una visión completa de los resultados obtenidos.

θ	Muestra 1		Muestra 2	
	$W_{0.8}^{\text{stck}}$	$W_{0.8}^{\text{ sint}}$	$\Delta T_{80}^{\text{stck}}$	$\Delta T_{80}^{\text{ sint}}$
$EM[pc\ cm^{-6}]$	947_{-61}^{+59}	916_{-81}^{+80}	1576_{-125}^{+120}	1710_{-158}^{+153}
A_{AME} [Jy]	26 ± 5	39 ± 6	49_{-9}^{+10}	$47_{-11.00}^{+12}$
ν_{AME} [GHz]	28_{-5}^{+6}	24 ± 2	24_{-3}^{+5}	23_{-3}^{+4}
W_{AME}	$1.16_{-0.24}^{+0.22}$	$1.11_{-0.21}^{+0.24}$	$0.974_{-0.20}^{+0.27}$	$0.83_{-0.20}^{+0.30}$
ΔT_{CMB} [μ K]	-54 ± 39	18_{-45}^{+43}	-9_{-93}^{+80}	92_{-79}^{+67}
τ_{353} [10^{-5}]	$3.8_{-0.4}^{+0.4}$	$5.3_{-0.3}^{+0.4}$	$12.00_{-0.20}^{+0.15}$	$12.0_{-0.3}^{+0.2}$
T_{td} [K]	$25.5_{-1.3}^{+1.4}$	$23.9_{-1.1}^{+1.3}$	$22.1_{-0.9}^{+1.0}$	$21.9_{-1.0}^{+1.1}$
β_{td}	$1.37_{-0.08}^{+0.08}$	$1.65_{-0.09}^{+0.08}$	$1.60_{-0.08}^{+0.08}$	1.75 ± 0.08
χ_{dof}^2	0.47	0.05	1.37	0.08
θ	Muestra 3		Muestra 4	
	$EM_{>10^3}^{\text{stck}}$	$EM_{>10^3}^{\text{ sint}}$	$EM_{<10^3}^{\text{stck}}$	$EM_{<10^3}^{\text{ sint}}$
$EM[pc\ cm^{-6}]$	1819_{-160}^{+147}	2513_{-220}^{+209}	197_{-15}^{+14}	235 ± 21
A_{AME} [Jy]	88_{-12}^{+13}	50_{-16}^{+17}	$11.1_{-1.1}^{+1.2}$	15.1 ± 1.6
ν_{AME} [GHz]	22_{-3}^{+4}	23 ± 4	26_{-2}^{+3}	$23.7_{-1.2}^{+1.3}$
W_{AME}	$1.16_{-0.20}^{+0.30}$	$0.85_{-0.26}^{+0.36}$	$0.89_{-0.14}^{+0.25}$	$0.71_{-0.08}^{+0.10}$
ΔT_{CMB} [μ K]	-24_{-114}^{+108}	31_{-94}^{+87}	-27_{-24}^{+16}	15_{-16}^{+14}
τ_{353} [10^{-5}]	$14.0_{-0.3}^{+0.2}$	$15.0_{-0.3}^{+0.2}$	$2.4_{-0.3}^{+0.3}$	$4.0_{-0.3}^{+0.4}$
T_{td} [K]	22.0 ± 0.9	22.0 ± 1.0	$22.6_{-1.07}^{+1.14}$	$20.8_{-0.8}^{+0.9}$
β_{td}	$1.61_{-0.07}^{+0.08}$	1.75 ± 0.08	$1.39_{-0.09}^{+0.08}$	$1.66 \pm \text{p.07}$
χ_{dof}^2	1.89	0.13	1.15	0.03

Tabla B.1: Parámetros observacionales que describen los espectros de las diferentes muestras de este estudio. El exponente $^{\text{stck}}$ representa los valores del caso apilado, mientras que para el caso sintético, identificada con el exponente $^{\text{ sint}}$, ambos con el error de calibración. Las muestras que se analizan son: $W_{0.8}$, ΔT_{80} , $EM_{>10^3}$ y $EM_{<10^3}$.

Apéndice C

SED y diagramas de correlación

En esta sección se presenta las SEDs de las diferentes muestras apiladas. Asimismo, se incluyen el diagrama de correlación que ilustra gráficamente las distribuciones de los parámetros derivados de los casos apilados.

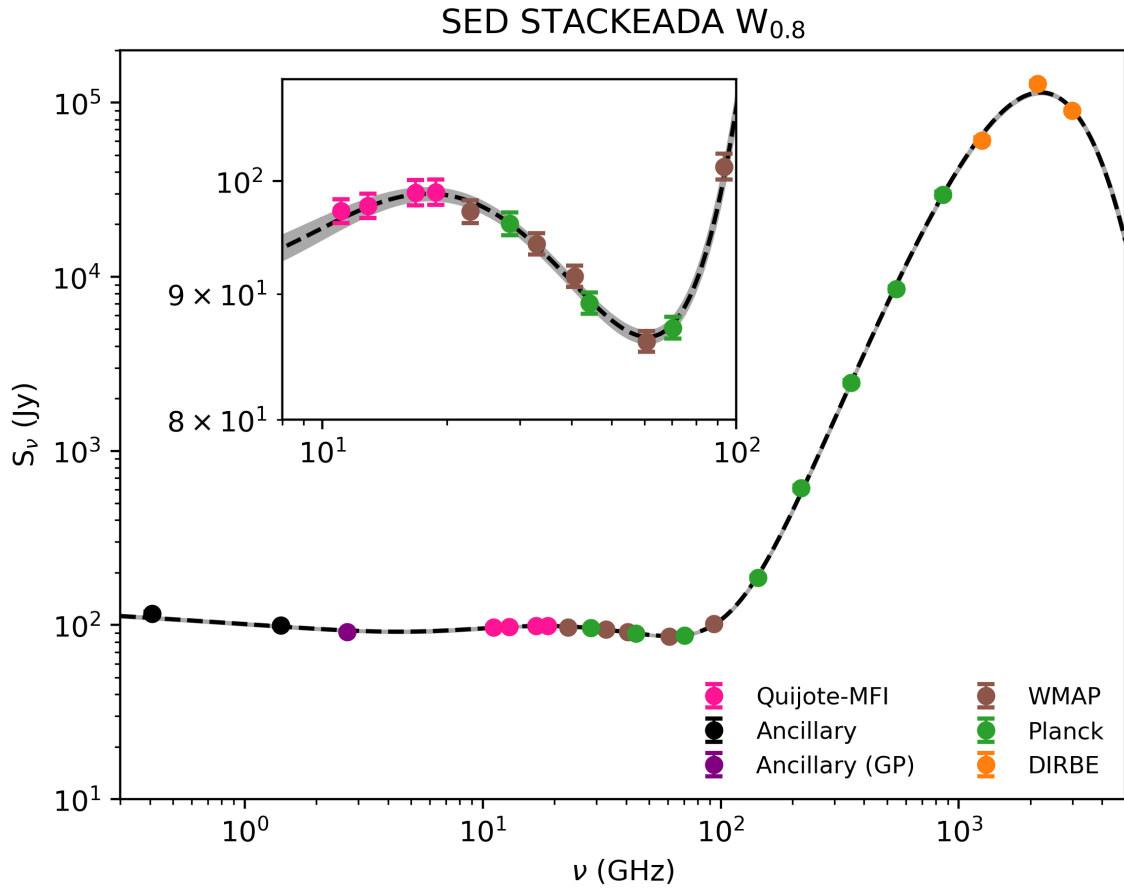


Figura C.1: SEDs de la muestra $W_{0.8}$. Los colores de los puntos representan los diferentes mapas utilizados y el error utilizado es el error del *stacking*.

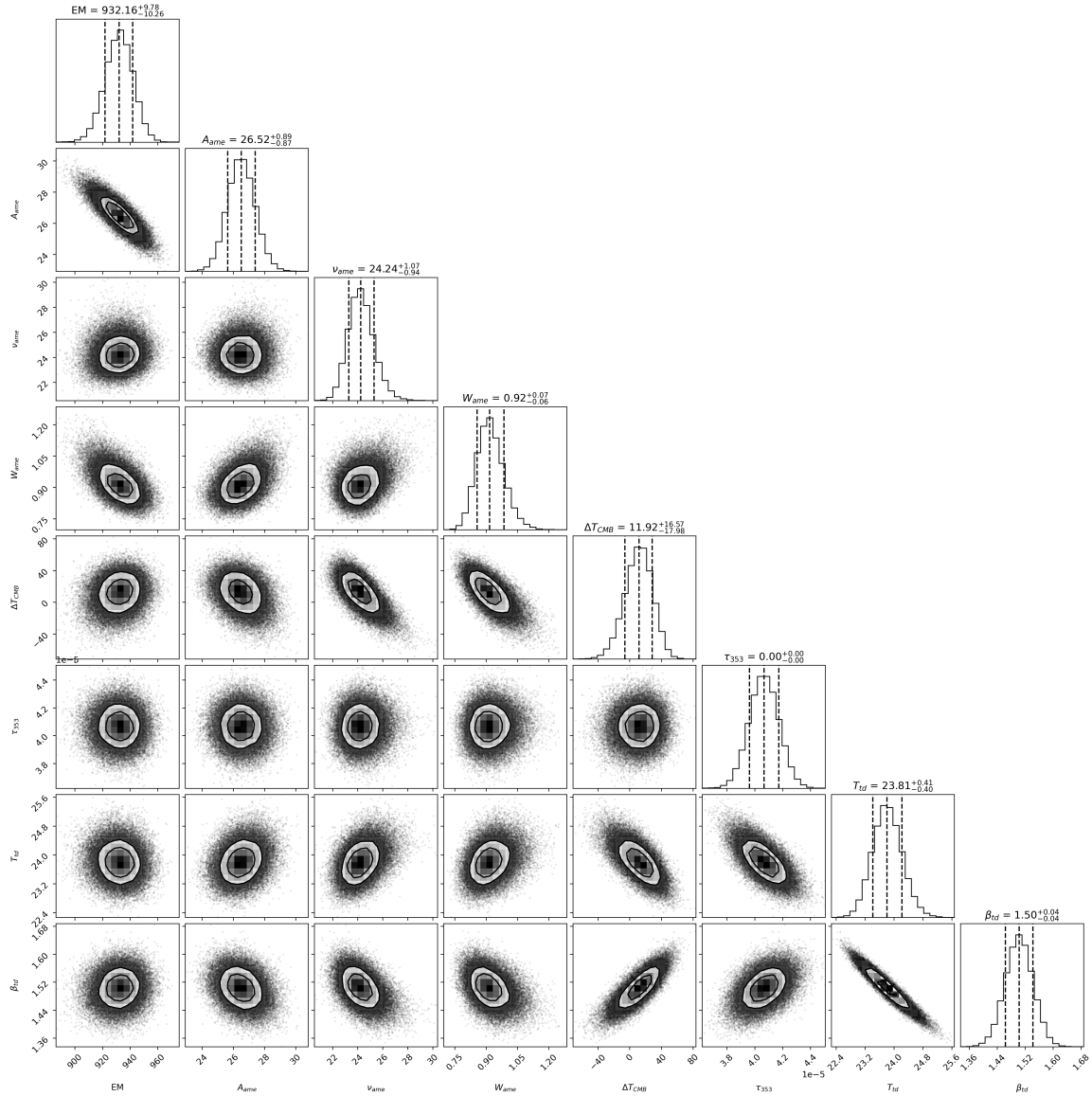


Figura C.2: Corner plot que contiene los valores marginales posteriores y los gráficos de correlación para los parámetros que describen la SED de la muestra $W_{0.8}$.

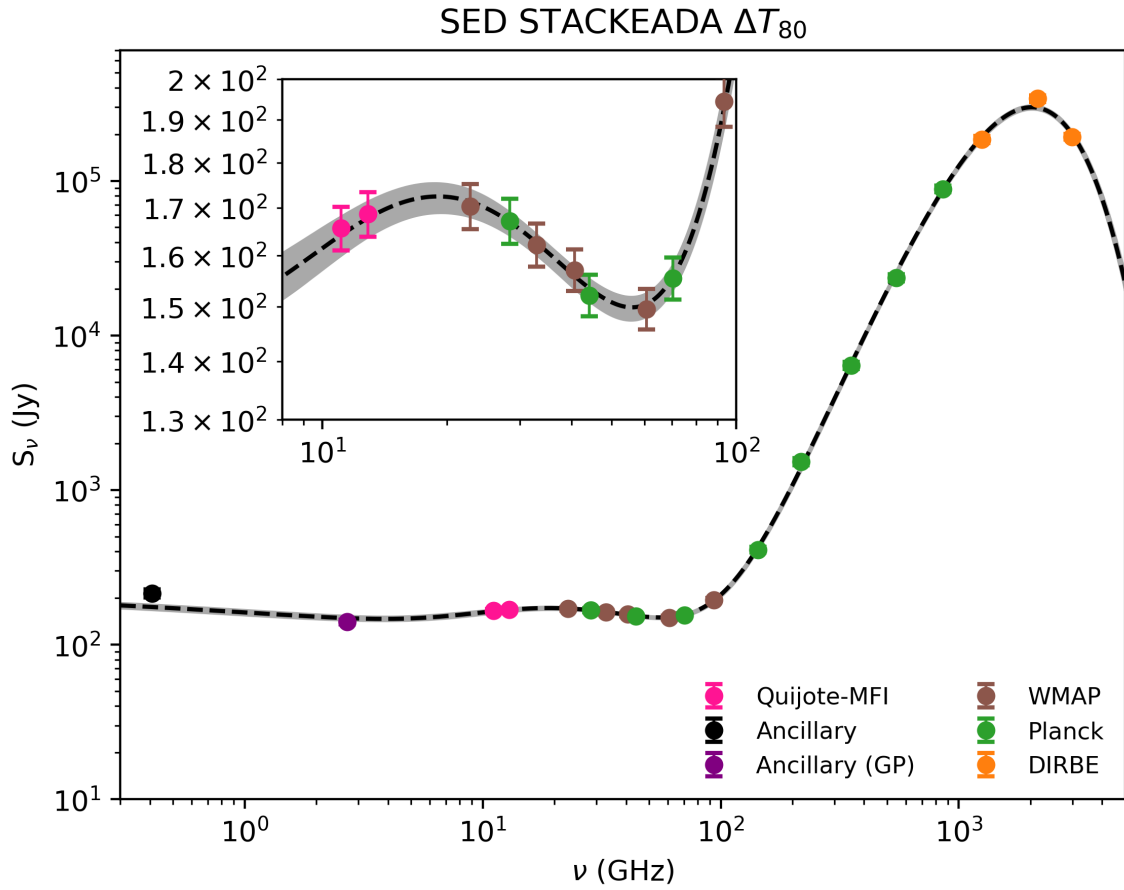


Figura C.3: SEDs de la muestra ΔT_{80} . Los colores y los errores representan lo mismo que en la Figura C.1.

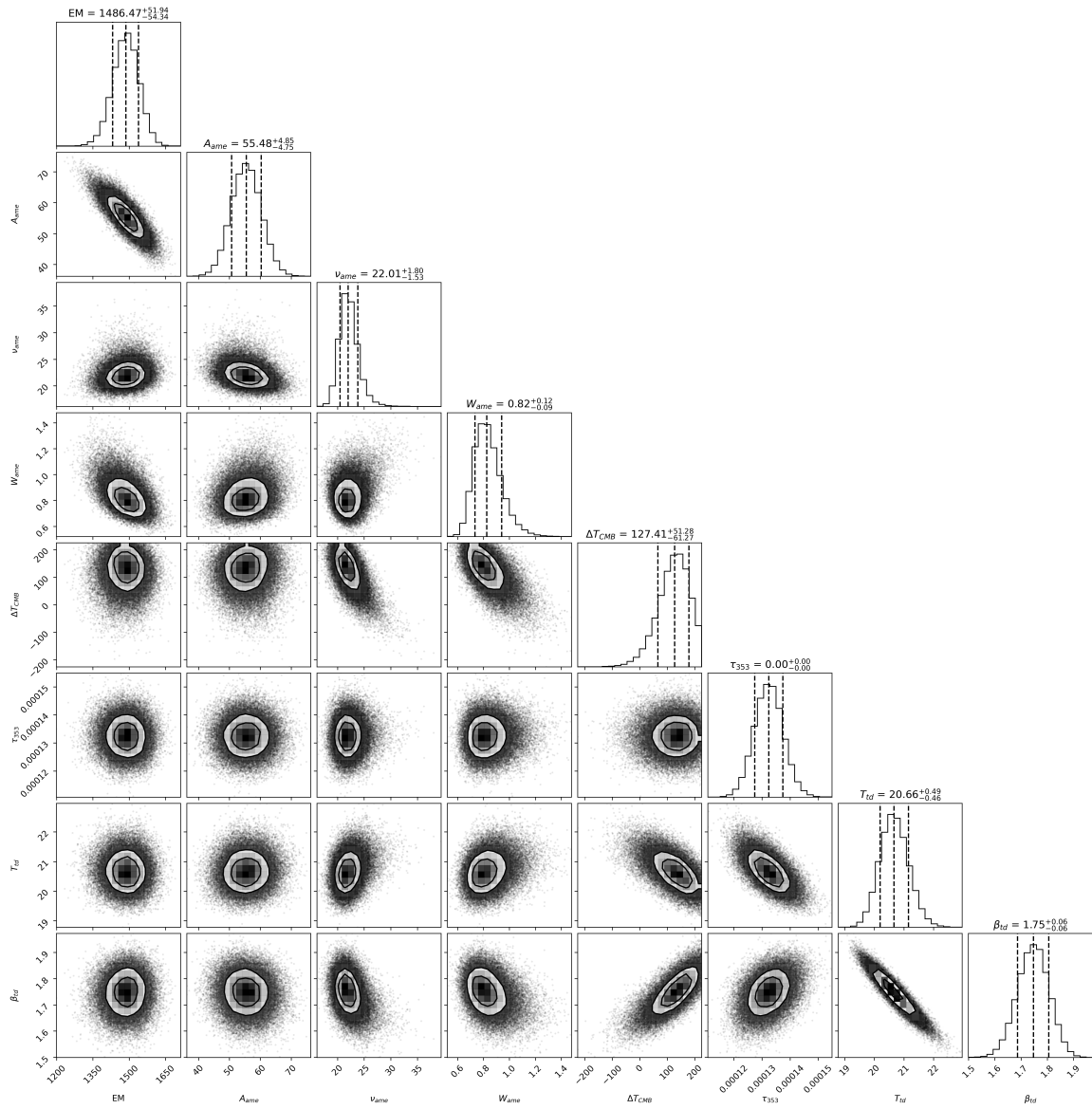


Figura C.4: Corner plot que contiene los valores marginales posteriores y los gráficos de correlación para los parámetros que describen la SED de la muestra ΔT_{80} .

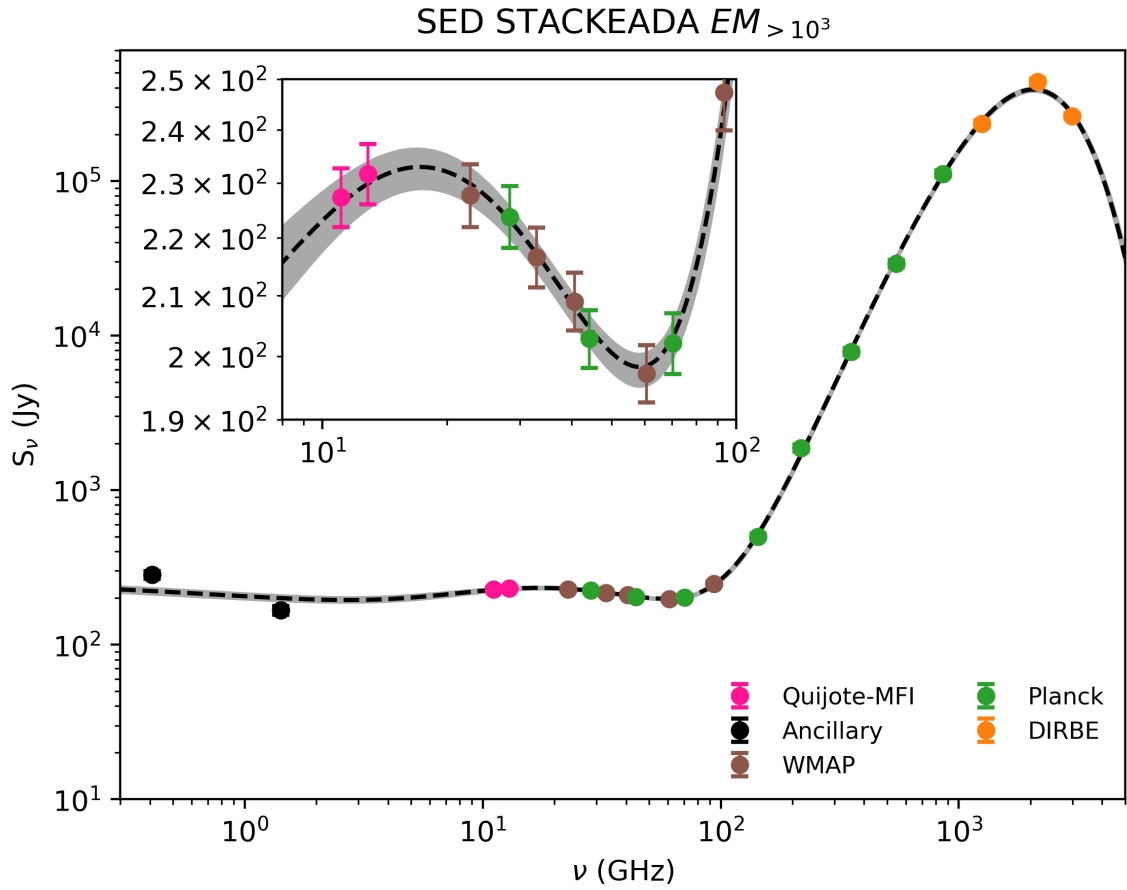


Figura C.5: SEDs de la muestra $EM_{>10^3}$. Los colores y los errores representan lo mismo que en la Figura C.1.

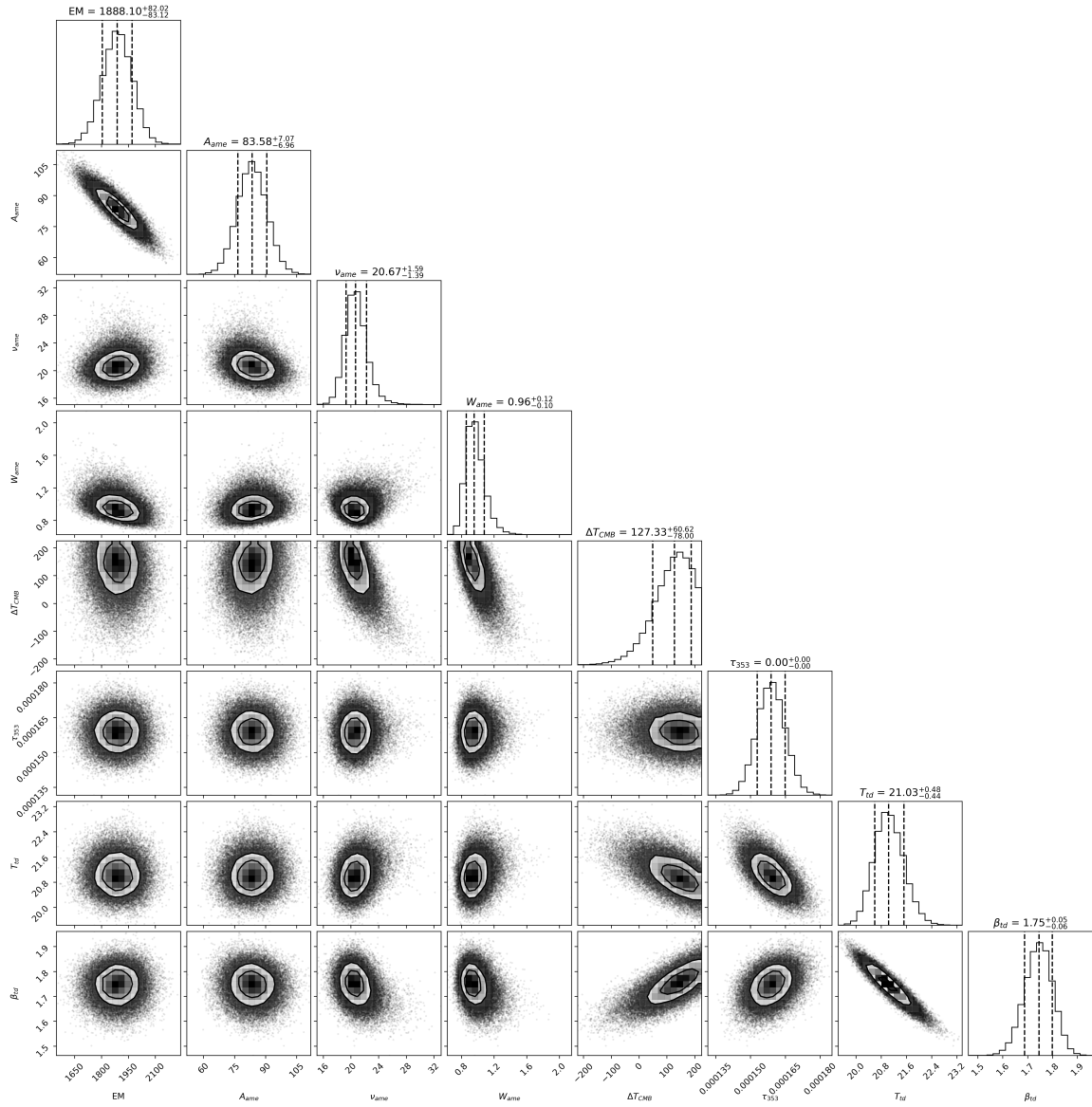


Figura C.6: Corner plot que contiene los valores marginales posteriores y los gráficos de correlación para los parámetros que describen la SED de la muestra $EM_{>10^3}$.

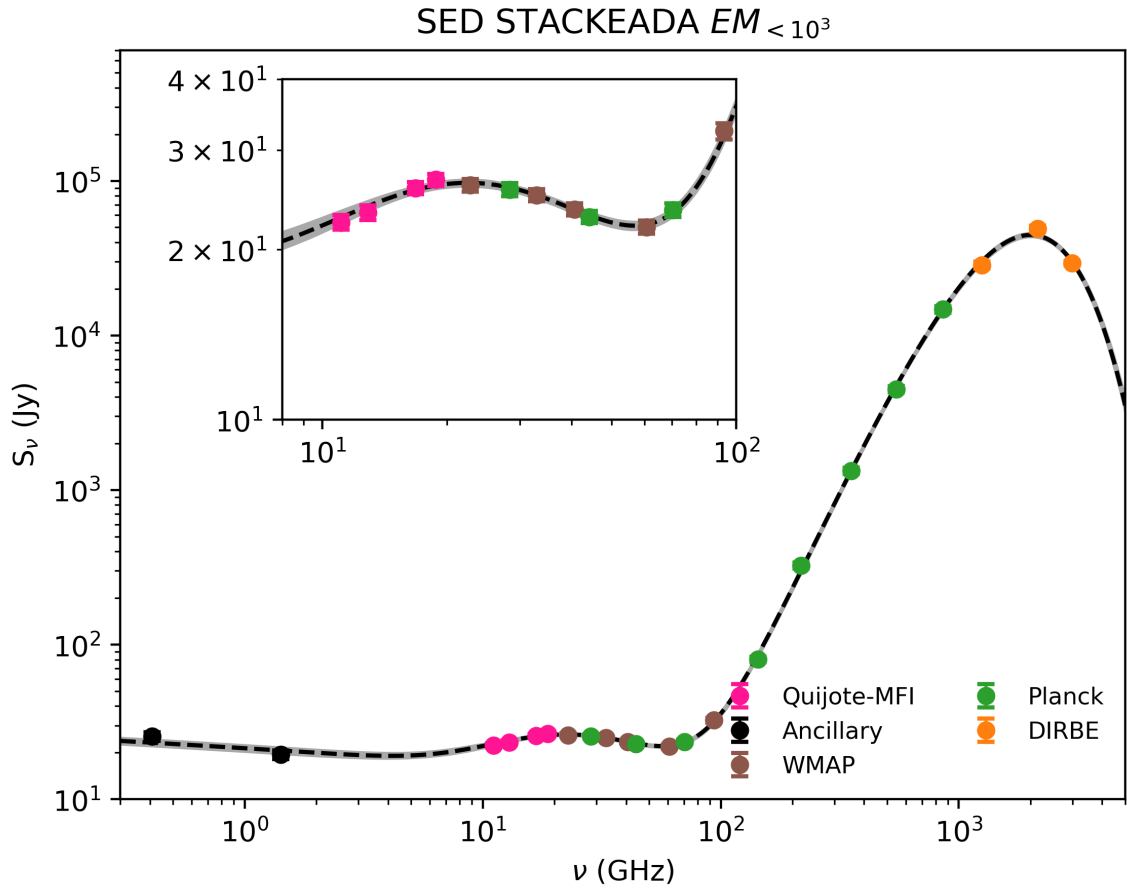


Figura C.7: SEDs de la muestra $EM_{<10^3}$. Los colores y los errores representan lo mismo que en la Figura C.1.

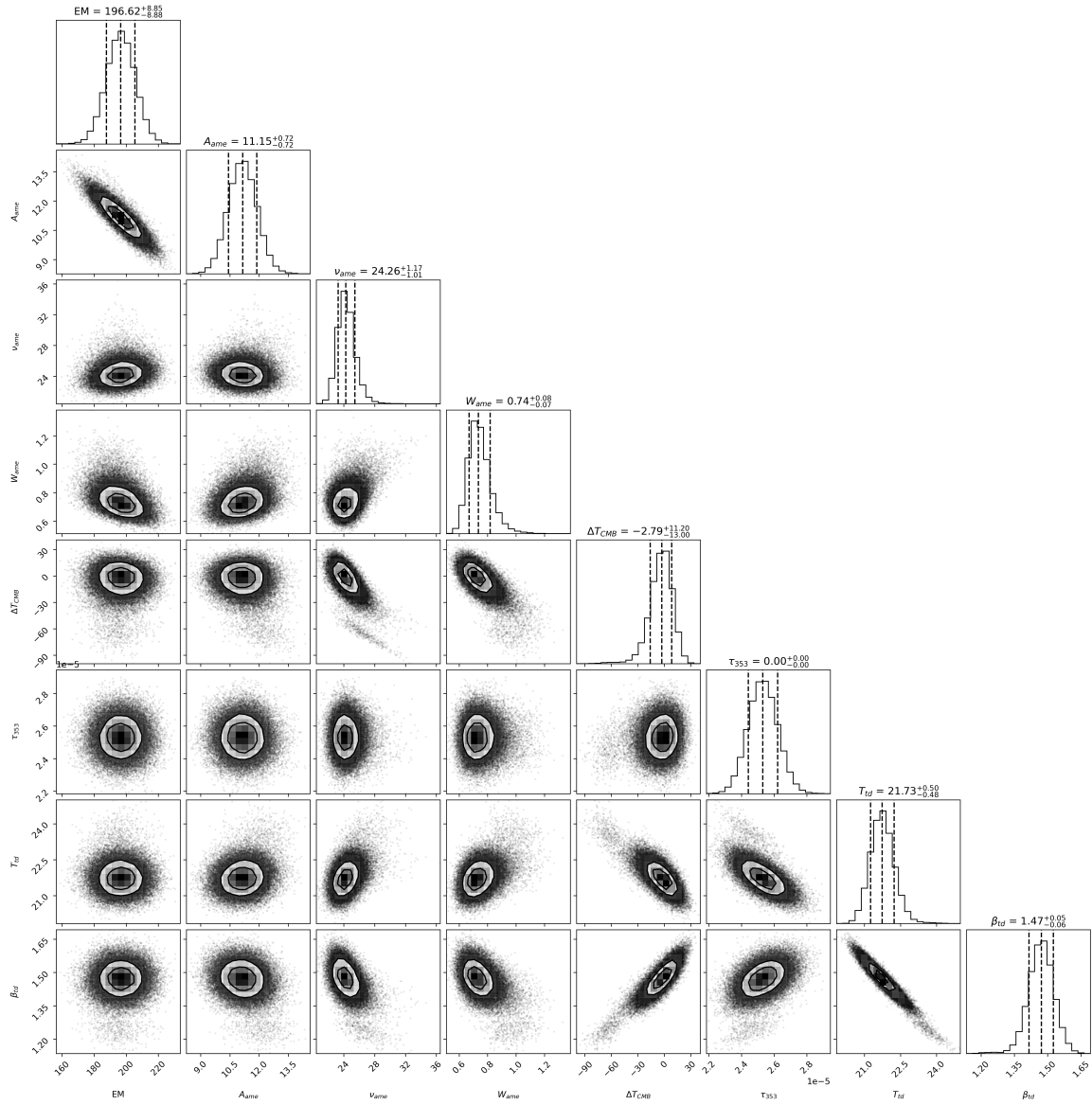


Figura C.8: Corner plot que contiene los valores marginales posteriores y los gráficos de correlación para los parámetros que describen la SED de la muestra $EM_{<10^3}$.