

Informe investigación tutelada: Galaxias activas en una muestra completa de galaxias aisladas.

José Sabater Montes

Índice

| | |
|---|-----------|
| 1. Introducción | 1 |
| 2. Proyecto AMIGA | 2 |
| 2.1. Motivación del proyecto | 2 |
| 2.2. Medio Interestelar | 4 |
| 2.3. Desarrollo del proyecto | 5 |
| 2.3.1. Compilación y estudio de datos multifrecuencia | 6 |
| 2.3.2. Revisión de la muestra | 7 |
| 3. Galaxias activas | 8 |
| 3.1. Propiedades y técnicas de selección. | 9 |
| 3.1.1. Continuo | 9 |
| 3.1.2. Colores ópticos | 9 |
| 3.1.3. Apariencia semi-estelar del núcleo | 9 |
| 3.1.4. Líneas de emisión | 11 |
| 3.1.5. Emisión a altas energías | 11 |
| 3.1.6. Emisión de radiocontinuo | 11 |
| 3.1.7. Emisión Infrarroja | 14 |
| 3.2. Modelo unificado | 14 |
| 4. Selección de AGNs | 15 |
| 4.1. Selección de la muestra | 15 |
| 4.2. Datos de la literatura | 17 |
| 4.3. Galaxias con exceso de radio | 19 |
| 4.3.1. Correlación radio-FIR | 19 |
| 4.3.2. Parámetro q | 23 |
| 4.4. Selección con colores IRAS | 25 |
| 4.4.1. Colores IRAS para las galaxias de la literatura | 28 |
| 4.4.2. Colores IRAS para las galaxias con exceso de radio | 32 |
| 4.5. Catálogo de AGNs | 33 |
| 5. Conclusiones | 38 |
| 6. Trabajo Futuro | 38 |

1. Introducción

Muchas de las propiedades de una galaxia pueden depender de la interacción con su entorno. Es importante poder distinguir entre las propiedades inducidas por interacciones de las intrínsecas a la evolución propia de la galaxia. Una de las más susceptibles de estudio es la actividad nuclear dado que la alimentación del agujero negro central del núcleo activo de una galaxia (Active Galactic Nuclei; AGN, por sus siglas en inglés) podría estar originada por interacciones. Éstas producen la pérdida de momento angular del gas haciéndolo caer hacia el centro galáctico (ver revisión de Wada 2004). De esta manera se puede esperar una mayor tasa de actividad (tanto actividad nuclear como formación estelar) en galaxias que sufren interacciones. Se han realizado diversos estudios de este tema en los que se obtienen resultados opuestos.

En trabajos previos (Petrosian 1982, Dahari 1985, MacKenty 1989, 1990, Rafanelli et al. 1995) se muestra como las galaxias con AGN tienen un mayor número de compañeros con los que interactúan con respecto a las galaxias que no son Seyfert. Sin embargo en otros estudios (Bushouse 1986, Fuentes-Williams & Stocke 1988, Laurikainen 1995) no se encuentra este exceso o sólo se encuentra marginalmente. Incluso en nuevos trabajos (Dultzin-Hacyan et al. 1999, Krongold 2003) se encuentra una diferencia dependiendo del tipo de galaxia Seyfert que tengamos. Así las Seyfert 2 sí presentan estadísticamente un exceso de compañeros mientras que las Seyfert 1 no.

Los resultados tan distintos que aparecen en los anteriores estudios pueden estar motivados por los diferentes criterios de selección de las muestras. Motivado por esta gran diferencia de criterios aparece el proyecto AMIGA (Análisis del Medio Interestelar de Galaxias Aisladas). La información relativa y los datos del proyecto se pueden encontrar en la siguiente página web: <http://www.iaa.csic.es/AMIGA.html>. Se ha creado una base de datos multifrecuencia, basada en el catálogo de galaxias aisladas (CIG, Catalogue of Isolated Galaxies) de Karachentseva (Karachentseva 1973), en las que la influencia del entorno es mínima (Verdes-Montenegro et al. 2005).

Uno de los aspectos fundamentales de las galaxias activas es su emisión en radio. Gran parte de la emisión de radiocontinuo del núcleo de las galaxias activas parece provenir de mecanismos no estelares originados en un núcleo compacto. También aparecen chorros de partículas relativistas, que emiten radiación sincrotrón, provenientes de la región nuclear. En galaxias que se encuentran sometidas a interacción se observa un exceso de emisión nuclear en radio (e.g., Hummel 1980, Heckman 1983, Hummel et al. 1990). Pero este incremento no se puede asociar claramente a la existencia de un núcleo activo pues puede deberse perfectamente al exceso de formación estelar que aparece en el proceso de interacción (Smith & Kassim 1993).

Una de las correlaciones más fuertes de la astrofísica es la de la luminosidad del radiocontinuo con la del infrarrojo lejano (FIR). Esta correlación proviene de los mecanismos de formación estelar. El papel del entorno en la correlación FIR-radio no está claro. Hay indicios de que en galaxias en cúmulos hay un ligero exceso de la emisión radio (Menon 1995, Niklas et al. 1995). Por otro lado, no hay indicios de que la interacción influya en la correlación (Niklas 1997). La desviación de la correlación puede deberse a los mecanismos de actividad nuclear.

En este trabajo de investigación se estudiará el fenómeno de los AGN en relación con la interacción dentro del marco del proyecto AMIGA, que ha construido una muestra multifrecuencia y bien caracterizada de galaxias aisladas como se explicará a continuación.

Se pondrá especial énfasis en el estudio de las propiedades de emisión en radiocontinuo y FIR, fundamentales para la caracterización de los AGNs y su relación con el entorno.

2. Proyecto AMIGA

Un problema clave en Astrofísica es el papel que juega el entorno en la formación y evolución de las galaxias. Para responder a esta pregunta es necesario caracterizar una muestra de referencia en la que la influencia del entorno sea mínima y cuya evolución esté por tanto completamente determinada por sus propiedades intrínsecas.

La finalidad del proyecto AMIGA es proporcionar dicha referencia, cuantificando las propiedades del medio interestelar (InterStellar Medium; ISM de sus siglas en inglés) de una muestra bien definida y estadísticamente significativa formada por 1050 galaxias aisladas. A partir de datos de luminosidad óptica, H_α e infrarroja, emisión de radiocontinuo, contenido de gas molecular e hidrógeno atómico (HI), obtenidos de la literatura o mediante observaciones propias, junto con imágenes digitalizadas del POSS-I y POSS-II (Palomar Observatory Sky Survey), hemos realizado una revisión de la muestra y un estudio estadístico de las propiedades del ISM, en función del grado de aislamiento y en conexión con la formación estelar, morfología y luminosidades, así como de la tasa de actividad nuclear. Esta muestra se diferencia con respecto a estudios anteriores en que cumple simultáneamente tres requisitos fundamentales:

1. definición estricta de aislamiento,
2. significación estadística,
3. información multifrecuencia completa concerniente al ISM.

Esto sirve para evaluar las propiedades de galaxias en interacción, lo cual es de particular interés para analizar la gran cantidad de datos que para galaxias a alto redshift se generarán en la próxima década con la puesta en funcionamiento de nuevos instrumentos como ALMA (Atacama Large Millimeter Array; <http://www.eso.org/projects/alma/>), SKA (Square Kilometre Array; <http://www.skatelescope.org/>), LOFAR (<http://www.lofar.org/>), etc.

Los datos se van haciendo públicos, a través de internet mediante una base de datos de libre acceso en <http://www.iaa.csic.es/AMIGA.html>. En un futuro próximo la base de datos se integrará en el Observatorio Virtual (VO) cumpliendo sus especificaciones.

2.1. Motivación del proyecto

La idea de que las interacciones entre galaxias es un factor importante en la evolución galáctica, afectando directamente a propiedades como el contenido estelar y gaseoso, cinemática, actividad de formación estelar o distribución de masa, surgió de un debate iniciado a mediados de los años 70 (e.g. Sulentic 1976, Larson & Tinsley 1978, Joseph & Wright 1985, Bushouse 1987). Ejemplos de estos efectos los constituyen la casi total destrucción sufrida por las galaxias pertenecientes a cúmulos por el medio intracúmulo o las enanas cerca de galaxias gigantes (Moore et al. 1996), la formación estelar inducida (ver revisión en Struck 1999), o la deficiencia de gas atómico en cúmulos (revisión por Van Gorkom,

1996) y grupos de galaxias (Verdes-Montenegro et al. 2001, Huchtmeier 1997, Williams & Rood 1987).

Para determinar su influencia es imprescindible disponer de una muestra de galaxias de referencia en las que el factor del entorno sea mínimo –galaxias aisladas–. La finalidad del proyecto AMIGA es proporcionar esa muestra, estudiar sus propiedades (morfología, medio interestelar, formación estelar y actividad nuclear) y poner los datos a disposición de la comunidad científica.

El estudio de las diversas propiedades de las galaxias requiere de una base de datos multifrecuencia que permita limitar los modelos que describen la evolución de las galaxias desde la fase gaseosa primordial, a través de la condensación y colapso de nubes moleculares, hasta la formación de estrellas. Esto incluiría como trazadores básicos:

- emisión óptica (en la banda azul) para trazar la emisión óptica de las estrellas y de este modo poder estimar el contenido estelar.
- lejano infrarrojo (FIR) que es la emisión térmica del polvo, calentado por las estrellas jóvenes.
- H_{α} , un buen trazador de la formación estelar reciente.
- gas atómico (HI) que es un ingrediente fundamental del ISM y un trazador muy sensible de interacciones.
- gas molecular, trazado por la emisión de CO, que constituye la materia prima para la formación estelar.
- radiocontinuo que es un indicador de la formación estelar que no sufre extinción y un indicador de actividad nuclear.

La muestra debe tener significación estadística y cumplir una definición estricta de aislamiento. En la literatura se pueden encontrar numerosas muestras de referencia para el estudio de las interacciones entre galaxias. Sin embargo algunas de ellas no cumplen una definición estricta de aislamiento, que es sustituido por el concepto de galaxia de campo (e.g. Kennicutt & Kent 1983) o por diferentes definiciones de normalidad (e.g. Boselli et al. 2001, en que se define galaxia normal como aquella que no tiene deficiencia de HI). Sin embargo, para cuantificar correctamente las desviaciones de la normalidad es necesario parametrizar una muestra de referencia formada por galaxias que no hayan sufrido interacciones a lo largo de su vida. La tendencia de las galaxias a agregarse en sistemas múltiples y cúmulos a todas las escalas que queremos trazar podría hacer pensar que encontrar tal muestra de galaxias aisladas no es factible. Sin embargo Karachentseva (1973) elaboró el llamado Catálogo de Galaxias Aisladas (en adelante CIG), que incluye todas las galaxias del catálogo de Zwicky (CGCG, 1961-1968) que no poseen vecinas con un tamaño dentro de un rango de un factor entre 4 y 1/4 de su diámetro, y a una distancia entre galaxias de 20 veces el diámetro de la galaxia vecina. El criterio de aislamiento escogido garantiza que estas galaxias representen una población cuya evolución ha permanecido presumiblemente intacta frente a las influencias del entorno.

Una segunda característica de la muestra CIG es su significación estadística, formada por 1050 galaxias¹. No existe ninguna otra muestra en la bibliografía con un número tan

¹Aunque el catálogo CIG original consta de 1051 galaxias una de ellas (CIG 781) es en realidad el cúmulo globular Pal 15.

elevado de miembros y con información multifrecuencia, que en la mayor parte de los casos suele oscilar entre 10 y 100 (e.g. Colbert, Mulchaey & Zabludoff 2001, Márquez et al. 1999, 2000, Young et al. 1996, Huchra & Thuan 1977, Varela et al. 2004).

2.2. Medio Interestelar

Existen numerosos trabajos que estudian el efecto de las interacciones en el ISM. La mayor parte de ellos no se han servido de muestras de comparación de galaxias estrictamente aisladas, y en los casos en que sí ha sucedido están usualmente concentrados en pocos (nunca más de tres) trazadores del ISM. Los principales resultados de trabajos anteriores referentes al efecto de las interacciones en el ISM son:

Emisión en infrarrojo lejano: La mayor parte de los estudios de la emisión FIR de las galaxias en interacción están sesgados hacia las brillantes, existiendo unanimidad en que éstas presentan un aumento en su luminosidad infrarroja (Young & Scoville 1991 y referencias incluidas; Sofue et al. 1993; Braine & Combes 1993; Young et al. 1996; Solomon et al. 1997). Xu & Sulentic (1991) seleccionan para el estudio 528 pares del Catálogo de Pares Aislados de Karachentsev que cubren un amplio rango de luminosidades, y 295 galaxias del CIG como muestra de referencia, encontrando que las galaxias de tipos tardíos (galaxias espirales e irregulares) en los pares presentan un aumento en la emisión infrarroja respecto a las aisladas, y que los pares formados por dos espirales tienen un mayor cociente L_{FIR}/L_B . Este estudio presenta dos problemas, como sus autores indican: (i) la muestra de pares es más profunda que la de aisladas, lo cual deja claro el exceso de nuevo sólo para las galaxias más brillantes, y (ii) existe la posibilidad de que entre las galaxias aisladas más brillantes hubiera pares no identificados, que podrían ser fusiones y estar afectando a la diferenciación entre ambas muestras.

Gas molecular: se ha atribuido a las interacciones un aumento en el contenido de gas molecular de las galaxias, con sesgos hacia las galaxias con mayores flujos a $60\mu m$ (Braine & Combes 1993; Combes et al. 1994). Aquí el cociente M_{H_2}/L_B depende de L_B , implicando un mayor cociente para las galaxias más brillantes. Cuando este efecto se elimina (Perea et al. 1997, Verdes-Montenegro et al. 1998) el contenido de gas molecular de todas las muestras fue indistinguible del de las galaxias aisladas. Tampoco encontraron desviación de la normalidad en las galaxias barradas. Este estudio puede por tanto beneficiarse de una muestra de control mayor, que acote con más precisión los rangos de normalidad.

Gas atómico: El gas atómico (HI) es una componente ligera del ISM que domina el gas en galaxias de tipos tardíos, extendiéndose hasta el doble del disco óptico (Cayatte et al. 1994). Ello hace que sea especialmente sensible a las interacciones. Haynes & Giovanelli (1984) caracterizan el contenido de HI de una muestra de 324 galaxias del CIG en función del tipo morfológico y la luminosidad o el diámetro óptico, muestra que servirá de referencia para posteriores estudios del contenido de HI de galaxias en diferentes entornos. Las galaxias espirales de los cúmulos presentan una deficiencia de HI, especialmente en las cercanías del centro del cúmulo, donde domina el medio intracúmulo caliente emisor en rayos-X (van Gorkom 1996). Del mismo modo en los grupos compactos de galaxias se observa un nivel de deficiencia de hasta el 90 %,

aunque gran parte de los grupos se encuentran inmersos en las barras de error de las relaciones encontradas por Haynes & Giovanelli (1984) que llegan hasta 0,5 mag (Verdes-Montenegro et al. 2001). Por el contrario, Zasov & Sulentic (1994) estudian 50 pares E+S y las comparan con la muestra CIG, y no encuentran desviación de la normalidad en las espirales de los pares, a pesar de haber un aumento en la formación estelar. La forma de los perfiles de HI es un medio importante de determinar la distribución de HI en una galaxia, y el nivel de perturbación existente. Esta fue usada por Sulentic & Arp (1983) como diagnóstico en una muestra de galaxias en pares, grupos y del mismo CIG, o por Richter & Sancisi (1994) conectando el predominio de un brazo espiral o modo $m=1$ ("lopsideness") con asimetrías en el perfil de la línea de 21cm.

Emisión H_α : La tasa de formación estelar derivada a partir de H_α que, en ausencia de actividad nuclear, está dominada por estrellas jóvenes ($t < 20$ Myr) y masivas ($>10 M_\odot$) es del orden de 2,5 veces mayor en galaxias en interacción que en las aisladas (Bushouse 1987). Kennicutt (1989) ha mostrado que dicha tasa, promediada sobre el disco, correlaciona mejor, en una muestra de galaxias normales, con la densidad superficial de HI con la H_2 , lo cual es un resultado sorprendente debido a las diferentes distribuciones del HI y H_α . Se han alcanzado conclusiones similares en otros estudios, basados en promedios globales (Deharveng et al. 1994, Boselli 1994, Casoli et al. 1996). Esto se ha achacado a variaciones en el factor de conversión CO/H_2 , como sugiere una mejor correlación entre H_2 y la tasa de formación estelar para galaxias luminosas (Kennicutt 1998) aunque argumentando que es la densidad superficial total de gas HI + H_2 la que muestra la mejor correlación (Kennicutt 1989, 1998).

Radiocontinuo: Se piensa que al ser principalmente radiación sincrotrón producida por electrones relativistas acelerados por explosiones de supernova (Lequeux, 1971) la luminosidad en radiocontinuo es directamente proporcional a la tasa de formación de supernovas (Xu et al. 1994). Esta idea se ve reforzada por la estrecha correlación entre la luminosidad en radio y FIR para galaxias espirales que indica que ambas están producidas por las mismas estrellas (e.g. Lisenfeld et al. 1996a). Al no sufrir extinción significativa, la emisión radio constituye de este modo una herramienta eficaz para determinar la tasa de formación estelar sobre un periodo mayor de tiempo (10^8 años). Esa relación es bastante robusta y válida en galaxias de muy diferente luminosidades, incluyendo galaxias starburst (Lisenfeld et al. 1996b). El papel del entorno en la relación radio-FIR no está bien entendido todavía. Hay indicaciones de que en galaxias en cúmulos hay un pequeño exceso de emisión en radio (Menon 1991, Niklas et al. 1995), aunque otros trabajos sugieren que no hay indicios de que la interacción influya en la correlación (Niklas 1997). La correlación solo se incumple en quásares "radio-loud" debido a la emisión del núcleo activo, produciéndose un exceso de la emisión radio de hasta dos ordenes de magnitud con respecto a la correlación normal (Sopp & Alexander 1991).

2.3. Desarrollo del proyecto

El proyecto AMIGA comenzó en 2002 encontrándose actualmente en una fase muy avanzada. La recopilación de los datos ha sido completada. Y el análisis de los datos está

en curso. El proyecto va a ser ampliado extendiendo el catálogo al rango milimétrico y submilimétrico del espectro.

A continuación se explicará brevemente el estado de compilación de datos y de revisión de la muestra.

2.3.1. Compilación y estudio de datos multifrecuencia

La compilación de datos multifrecuencia está completada, incluyendo la revisión de la bibliografía, observaciones propias y reprocesado de los datos de archivo. El análisis de los datos para las distintas longitudes de onda es el que describimos a continuación:

Luminosidad óptica: Se ha llevado a cabo un estudio detallado de la luminosidad óptica (Verdes-Montenegro et al. 2005) que sirve como artículo de referencia de la muestra del proyecto AMIGA. Se ha realizado un estudio de la homogeneidad de la muestra, su completitud y su función de luminosidad. Se explican las correcciones realizadas a las magnitudes del catálogo de Zwicky (CGCG) del que proviene la muestra CIG. También se ha hecho una comparación entre la función de luminosidad de nuestra muestra de galaxias aisladas y las de otras muestras en entornos distintos.

Emisión en infrarrojo lejano: Tenemos datos de infrarrojo lejano para 1031 galaxias de la muestra. Los datos proceden de la observación del satélite IRAS. Las galaxias para las que no hay datos son las que se encuentran en el "IRAS gap" que es la zona que no fue cubierta por el satélite. Han sido reprocesados usando la herramienta SCANPI con lo que se ha mejorado la tasa de detección y la relación señal-ruido (Lisenfeld et al. 2005). Estos nuevos datos han sido comparados con datos de la literatura y de los catálogos IRAS cogiendo en cada caso el valor más apropiado.

Radiocontinuo: Se han obtenido datos de radiocontinuo usando tres fuentes distintas. WENSS: Westerbork Northern Sky Survey a 325 y 352 MHz (90cm), NVSS: NRAO VLA Sky Survey a 1,4 GHz (20cm), GB6: Green Bank 6 a 4,85 GHz (6cm). Estas fuentes tienen catálogos y archivos de observaciones. Se han reprocesado los datos usando SExtractor (Bertin & Arnouts 1996) obteniéndose en general una mejora en la tasa de detección (Leon et al. 2005). Se ha realizado un análisis de la función de luminosidad en radiocontinuo y de la formación estelar.

HI: Hemos recopilado y obtenido datos de la literatura de más de 100 referencias. Se han hecho observaciones propias de 165 galaxias en el radiotelescopio de 100 m de Effelsberg en Alemania, 51 en el telescopio de 100x110 m de Green Bank en Massachusetts (EE.UU.), 196 en el radiotelescopio NRT de 200x40 m de Nançay en Francia y 34 en el radiotelescopio de 304 m de Arecibo en Puerto Rico. En total hay datos para 836 galaxias de la muestra que ya están calibrados y están siendo analizados.

Se ha realizado un estudio (Espada et al. 2005) para una de las galaxias (CIG 96) con un perfil de HI muy asimétrico, lo que indica la posibilidad de que exista una interacción. La asimetría en el perfil viene producida por una fuerte perturbación cinemática en la envoltura gaseosa de la galaxia. Aunque aparece una galaxia compañera cercana a unos 80 kpc no parece lo suficientemente grande como para haber provocado esta perturbación. En el artículo se analizan las posibles causas.

CO: Para el CO la recopilación de datos se ha concentrado en una submuestra más pequeña, ya que menos del 5 % de la muestra tiene datos en la bibliografía y el tiempo para realizar observaciones para todas las galaxias sería demasiado alto. Por lo tanto se ha seleccionado una submuestra limitada en velocidad entre 1500 y 5000 km/s tomando las galaxias independientemente de su tipo morfológico. Ésto resulta en una submuestra de 205 de las 1050 galaxias.

De esta muestra ya tenemos todas las observaciones que son las siguientes: en el radiotelescopio de Nobeyama se han observado 9 galaxias, en el IRAM 30 m 102 galaxias y en FCRAO 101 galaxias. Algunas de las galaxias tienen observaciones en más de un radiotelescopio. Actualmente los datos están siendo analizados.

H α : Al igual que para el CO, la recopilación de datos se ha realizado en H α sólo para una submuestra de la total. En este caso se han escogido las galaxias espirales con una velocidad de recesión entre 1500 y 5000 km/s, con lo que nos quedan unas 180 galaxias. Esta submuestra ya ha sido observada. Con estos datos se está estudiando la formación estelar reciente junto con la distribución de regiones HII de formación estelar.

2.3.2. Revisión de la muestra

Como primer paso en la caracterización de la muestra se ha realizado una revisión de las posiciones de las galaxias, de los datos de redshift y distancia de cada galaxia y de su morfología, así como un estudio detallado del nivel de aislamiento.

Posición Se han revisado las posiciones para las 1050 galaxias CIG (Leon & Verdes-Montenegro 2003), obteniendo las nuevas posiciones aplicando SExtractor a los campos del DSS (Digitized Sky Survey) de las galaxias CIG con una resolución de 1.2". Tras comprobar las nuevas posiciones hubo que recalcularlas para 118 galaxias debido a morfologías complejas o a la presencia de estrellas brillantes cercanas. Como resultado final se tienen nuevas posiciones precisas que se pueden encontrar en la página web del proyecto o en el CDS (Centre de Données astronomiques de Strasbourg)².

Redshift y distancia Se han obtenido la mejores velocidades para 989 galaxias de la muestra de diferentes recopilaciones bibliográficas. Se han incrementado de esta forma en 521 el número de galaxias aisladas con redshifts de artículos anteriores. Para las galaxias cercanas ($V_R < 1000 \text{ km s}^{-1}$) se han recopilado datos bibliográficos de distancia, estimada de forma independiente al redshift. De esta manera se evita la incertidumbre en la distancia, debido a la dispersión de velocidades local, que impide calcular la distancia usando el flujo de Hubble.

Morfología Se ha realizado una mejora de las clasificaciones morfológicas de la muestra (Sulentic et al. 2005). Se han usado las imágenes del POSS II, que tienen mayor rango dinámico, resolución y profundidad que las del POSS I, e imágenes obtenidas por nosotros en distintos telescopios. Se ha conseguido una mejora en la clasificación de la morfología con respecto a las morfologías disponibles anteriormente. De esta manera se ve como las galaxias del catálogo están dominadas por dos poblaciones: 1) 80 % espirales (Sa-Sd) y 2) 14 % de galaxias de tipo temprano (E-S0).

²Dirección web del CDS: <http://cdsweb.u-strasbg.fr/>

Aislamiento Es la propiedad fundamental de nuestra muestra. Está siendo revisado el aislamiento (Verley et al. 2005) usando las imágenes nuevas del POSS II (Palomar Observatory Sky Survey) que tienen una mejora en resolución y profundidad con respecto a las del POSS I, que fueron las originales usadas para la selección de la muestra CIG. Actualmente el trabajo se encuentra en una fase muy avanzada. La cuantificación del aislamiento se está realizando de manera estricta usando diferentes parámetros que reflejan el grado de aislamiento de manera distinta (densidad de galaxias, fuerzas de interacción...). De esta manera se podrá estudiar el grado de aislamiento en relación con otros parámetros.

3. Galaxias activas

En 1909 Edward A. Fath descubre líneas de emisión en un espectro de la "nebulosa espiral" NGC 1068. El espectro se componía de líneas de absorción junto con líneas de emisión como las que se veían en las nebulosas gaseosas. Carl K. Seyfert descubre en 1943 que algunas galaxias tienen un núcleo, en apariencia puntual, que es el originario de estas líneas de emisión. Este es el primer trabajo sistemático en busca de este tipo especial de galaxias. La emisión de estas galaxias era muy parecida a las líneas de emisión de una nebulosa planetaria sobreimpresas a un espectro típico de una estrella como el Sol (tipo G). La anchura de las líneas es atribuida por Seyfert al desplazamiento Doppler, de esta manera se obtienen velocidades de hasta 8500 km/s en la zona nuclear. Ésto se correspondería con un gas muy caliente que se mueve a alta velocidad, en contraste con los 300 km/s a los que se mueven como promedio las estrellas y el gas de una galaxia espiral normal. A este tipo de galaxias se les denomina galaxias Seyfert.

Pero no es hasta los años 50 y 60 cuando los AGNs toman una importancia clave en la astronomía hasta llegar a hoy día. Tras el desarrollo inicial de la radioastronomía por los pioneros en este área como Jansky y Reber se empiezan a realizar las primeras exploraciones en radio del cielo, buscando posiciones precisas de las fuentes y la identificación óptica de éstas. Smith (1951) obtiene posiciones precisas para Cyg A, Cas A y otras fuentes. Con estas posiciones Baade y Minkowski (1954) identifican ópticamente Cyg A y Cas A, pudiendo estimarse sus distancias a partir de sus espectros. Se observan galaxias muy distorsionadas como el origen de esta emisión. Estas fuentes presentaban luminosidades altísimas en radio, incluso más fuertes que en el óptico. Se descubren más tarde un tipo de galaxias con núcleos muy brillantes en longitudes de onda de radio, las radio estrellas, que, tras comprobar que eran fuentes extragalácticas pasan a denominarse quásares. Estos quásares son galaxias del tipo de Cyg A o Cas A situados a grandes distancias.

Sandage (1965) encuentra una gran población de objetos que, aún sin tener una emisión fuerte en radio, se asemeja en todos los demás aspectos a los quásares. Estos objetos presentan una gran emisión en ultravioleta (UV) con respecto al óptico y son conocidos como QSO (de Quasi-Stellar Objects). Se encuentra un paralelismo entre estos objetos, situados en núcleos de galaxias muy lejanas, con las galaxias Seyfert. Más tarde se encuentran galaxias emisoras de radio de un tipo denominado BL Lac, galaxias con regiones nucleares emisoras de baja ionización (LINERs) y otras galaxias con una fenomenología parecida. Todas las características comunes llevan a postular la idea de un origen común de todos estos diferentes objetos englobándolos dentro del concepto de AGN.

La emisión de los distintos tipos de AGN puede ser explicada por la existencia de un

objeto muy compacto y supermasivo en el núcleo de la galaxia activa. La hipótesis de que el origen de la actividad es un agujero negro supermasivo es ampliamente aceptada en la actualidad. Este agujero negro supermasivo central necesita un mecanismo de alimentación para producir los fenómenos de actividad. Esta alimentación de gas en general viene producido por un potencial asimétrico que hace que el gas pierda momento angular hasta llegar a la zona de influencia del agujero negro. Estos potenciales pueden estar provocados por barras y cierto tipo de inestabilidades. Estas inestabilidades se piensa que pueden estar provocadas por interacciones con galaxias del entorno.

3.1. Propiedades y técnicas de selección.

Los AGN emiten en todo el espectro electromagnético, a diferencia de las estrellas y las galaxias normales, presentando propiedades características a cada longitud de onda. Estas propiedades pueden usarse en ciertas ocasiones como un método de diagnóstico, más o menos fiable, de la presencia de un AGN.

3.1.1. Continuo

El continuo de emisión electromagnética que presentan los AGNs es muy distinto de un espectro típico de cuerpo negro, al que se parecen en general las galaxias normales debido a la composición de la emisión de las distintas poblaciones estelares. Tiene una forma bastante plana y puede ser representado por una ley de potencias con casi la misma energía por década de $10^{13} Hz$ a $10^{20} Hz$ (Elvis et al. 1994). La emisión es distinta entre un AGN "radio-loud" (emisión fuerte en longitudes de onda de radio) y un AGN "radio-quiet" (sin emisión fuerte en radio). Ambas clases presentan picos de emisión en el infrarrojo (IR bump) y en el óptico ("Big Blue Bump") que provienen de la emisión del disco de acreción en torno al agujero negro central. En la figura 1 se observan las distribuciones espectrales de energía para una galaxia "radio-loud" (4C 34.47) y otra "radio-quiet" (Mrk 586).

3.1.2. Colores ópticos

Los colores de una galaxia que contiene un núcleo activo se desvían sistemáticamente de los colores de las galaxias normales. Esta diferencia proviene de la emisión (tanto térmica como no-térmica) del núcleo activo. Si se dispone información multicolor de los objetos se puede emplear esta técnica para la búsqueda sistemática de objetos con colores "extraños". Actualmente se usa en exploraciones como la del SDSS (Sloan Digital Sky Survey; Richards et al. 2001)

3.1.3. Apariencia semi-estelar del núcleo

En muchas de las galaxias activas el núcleo tiene forma puntual y emite más luz que el resto de la galaxia. La búsqueda de núcleos galácticos de aspecto puntual ha sido usada para encontrar galaxias activas (Sarajedini 1999). Esta técnica presenta el problema de la resolución angular necesaria para detectar el núcleo puntual con respecto a la galaxia. En muchas ocasiones aparece la imposibilidad de distinguir entre distintos tipos de objetos compactos (cúmulos estelares muy brillantes, regiones compactas de formación estelar...).

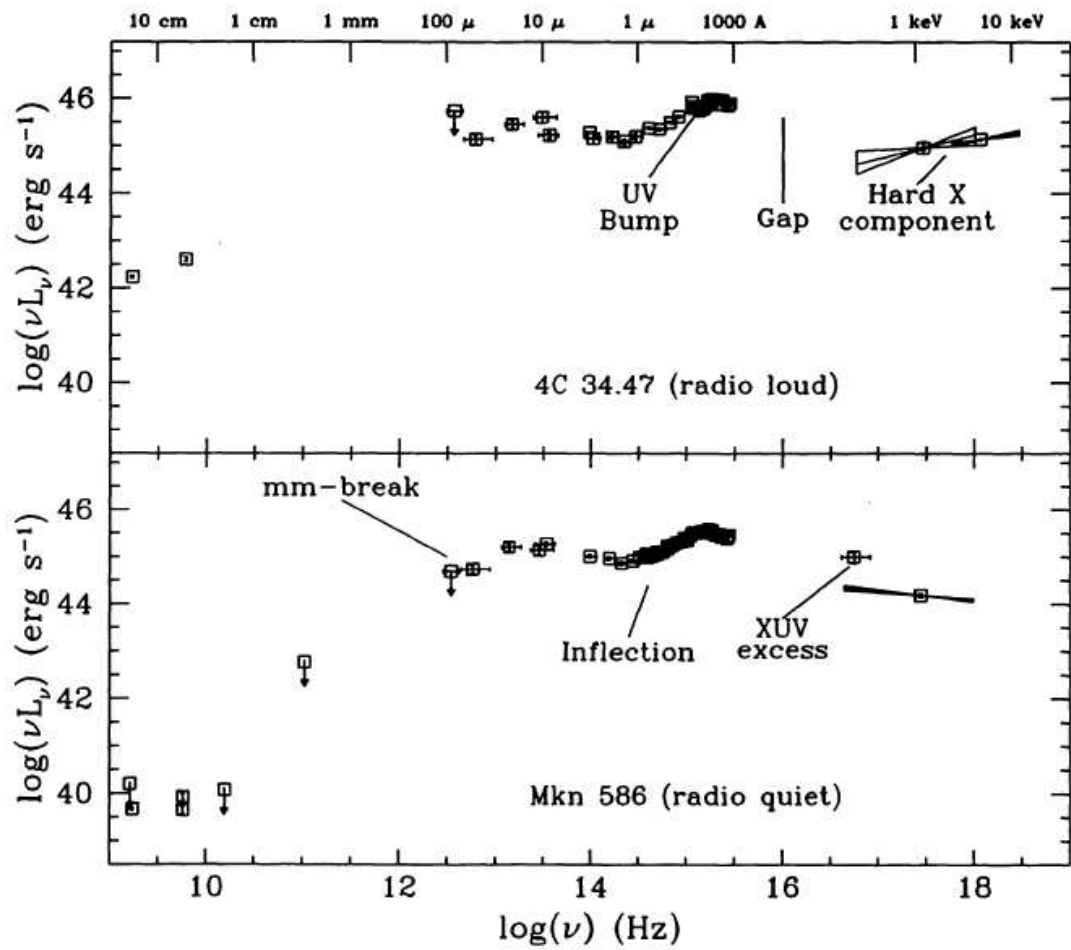


Figura 1: Distribuci3n espectral de energa (SED del ingl3s Spectral Energy Distribution) de un qu3asar "radio-loud" (4C 34.47) y uno "radio-quiet" (Mrk 586; Elvis et al. 1994).

3.1.4. Líneas de emisión

Las galaxias tipo Seyfert fueron rápidamente clasificadas en dos grupos. Un primer grupo lo forman las galaxias que presentan líneas de emisión permitidas anchas (H_α , H_β , etc.) junto con líneas prohibidas estrechas ([NII], [OIII], [OII], etc.). El segundo grupo lo formarían las galaxias en las que la emisión de las líneas permitidas y las prohibidas es estrecha. Las primeras se denominan Seyfert 1 y las segundas Seyfert 2. En las figuras 2 y 3 se muestran espectros típicos de galaxias Seyfert 1 y 2 respectivamente.

Estas distintas características aparecen también en las radio-galaxias. Existen dos tipos, las radiogalaxias de líneas de emisión anchas (BLRG de Broad Line Radio Galaxies) y las radiogalaxias de líneas de emisión estrechas (NLRG de Narrow Line Radio Galaxies). Aunque aparentemente hay un paralelismo entre estas galaxias y las Seyfert las morfologías de las galaxias albergadoras son totalmente distintas siendo las Seyfert, en general, espirales y las radio-galaxias elípticas.

Las líneas son un método infalible de diagnóstico, aunque presentan el problema de la dificultad de la identificación. Hacen falta espectros de gran resolución de los núcleos y una buena relación señal ruido, con lo que no es siempre posible su uso en cualquier muestra.

3.1.5. Emisión a altas energías

La emisión en rayos-X y rayos- γ es una característica de los AGNs. Al ser las altas energías relativamente independientes del oscurecimiento y la absorción, se pueden encontrar de esta manera AGNs que no pueden ser observados con otras técnicas. El mayor problema hasta ahora ha sido la baja resolución y sensibilidad de las exploraciones de altas energías, que, además, debían realizarse desde satélites. La emisión de rayos-X y rayos- γ proviene de la parte más central del disco de acreción. Ésto se puede comprobar, ya que la variabilidad de la emisión a estas frecuencias es muy rápida, con lo que el tamaño de la zona emisora debe ser muy pequeño.

3.1.6. Emisión de radiocontinuo

En general se pueden observar dos tipos de AGNs, los "radio-loud" que presentan una emisión fuerte en radio y los "radio-quiet" que, a pesar de su nombre, no quiere decir que no emitan en radio, sino que emiten con menos potencia. La distinción entre estos dos tipos de poblaciones depende de la potencia de la emisión en radio y es real, ya que al representar un histograma con los valores de L_B/L_{radio} aparece una población bimodal. Entre un 10 y un 15% de los AGNs son "radio-loud" (Kellermann et al. 1989, Hooper et al. 1995).

Parte de la emisión proviene directamente de la región central y tiene una forma de espectro plano, y el resto procede de los lóbulos y chorros de emisión, que tienen una forma del espectro escalonada. La primera componente parece ser emisión directa del AGN, mientras que la segunda es emisión sincrotrón de los chorros de partículas relativistas que salen de la zona central. La segunda componente suele ser la que le da más luminosidad a lo AGNs "radio-loud". En ciertos casos, debido a la resolución angular de las observaciones, es imposible distinguir entre las dos componentes por lo que se observa la emisión combinada de ambas.

La mayoría de las galaxias muy luminosas en radio son AGNs. Pero en rangos de luminosidades más normales no podemos distinguir entre la emisión del AGN y la de

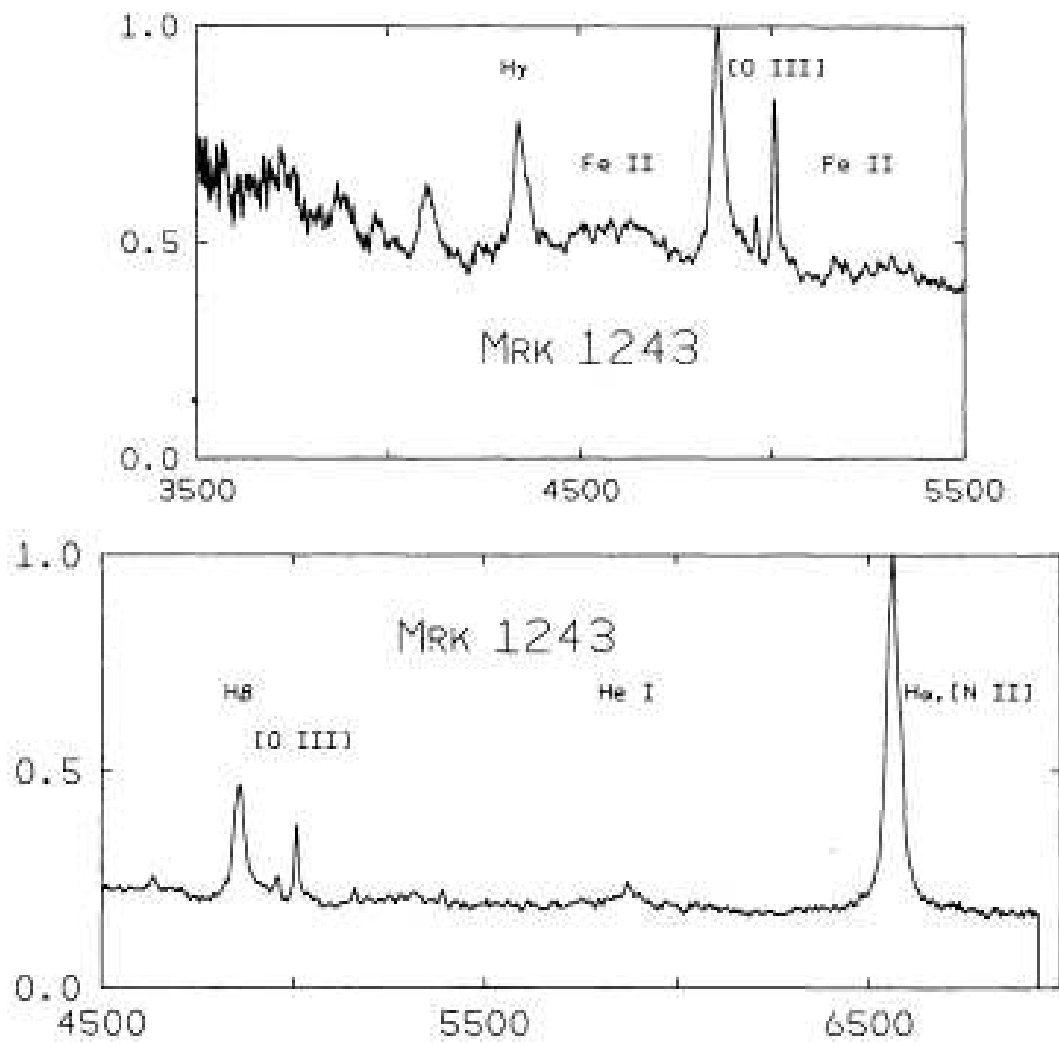


Figura 2: Espectro visible de una galaxia Seyfert 1 (Mrk 1243; Osterbrock 1984).

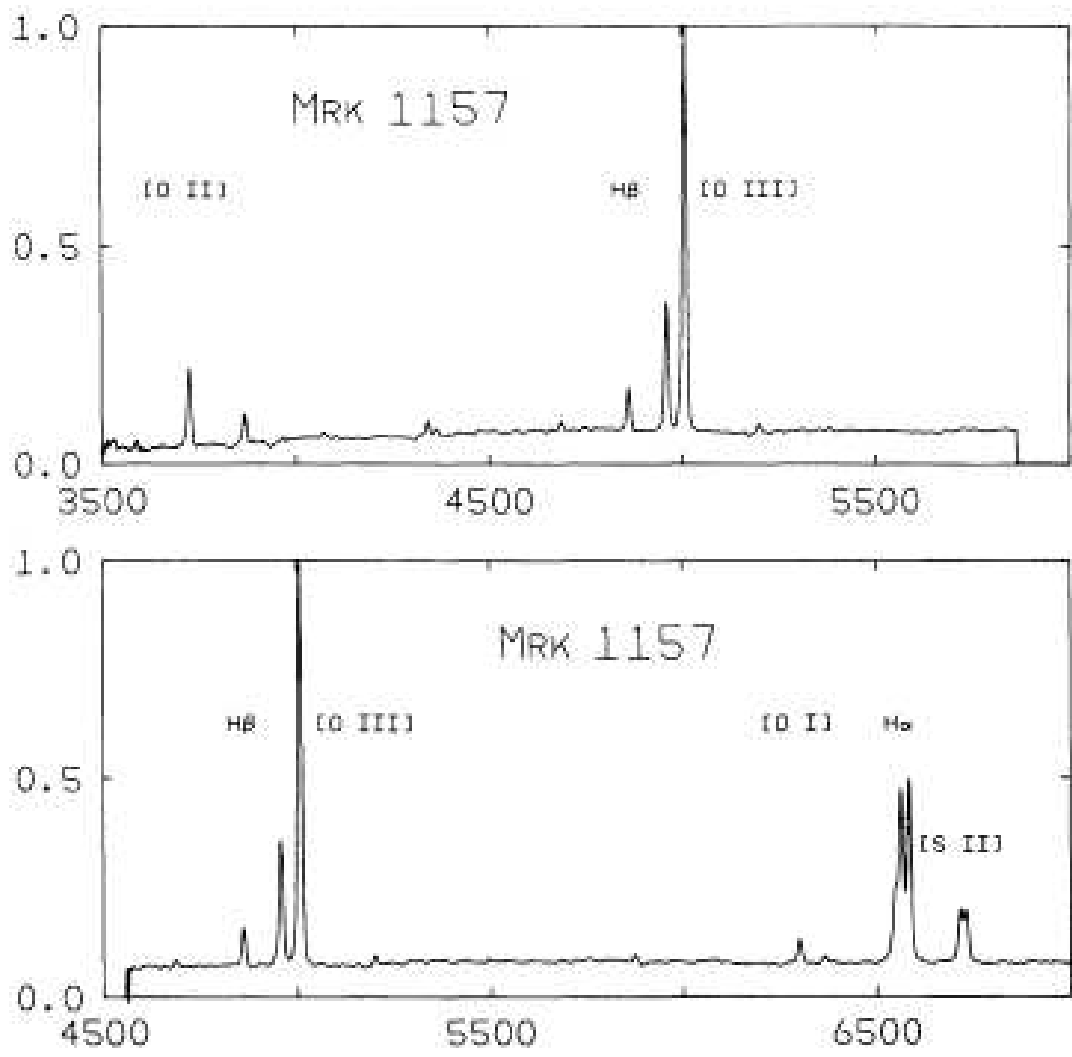


Figura 3: Espectro visible de una galaxia Seyfert 2 (Mrk 1157; Osterbrock 1984).

Tabla 1: Esquema simplificado de la taxonomía de los AGN.

| Emisión en radio | Propiedades de las líneas de emisión en óptico | | |
|------------------|--|---------------------------|---------------------|
| | tipo 2 (líneas estrechas) | tipo 1 (líneas anchas) | tipo 0 (inusual) |
| Radio-quiet | Seyfert 2 | Seyfert 1 QSO | |
| Radio-loud | NLRG | BLRG Quásares | Blázares |

regiones de formación estelar jóvenes. Tenemos que determinar si la emisión proviene de una región compacta y la forma del espectro, pues es más plano si existe un AGN que en las regiones de formación estelar. Si morfológicamente aparece una estructura de doble lóbulo o un chorro nos encontramos ante un AGN.

3.1.7. Emisión Infrarroja

La emisión en el infrarrojo proviene en su mayoría de polvo que reemite a distintas temperaturas. La parte más caliente estaría asociada directamente al AGN y la más fría tendría origen en la galaxia abergadora, pero en relación con el AGN. En algunos AGN oscurecidos el pico de emisión se encuentra en esta región del espectro. Los colores infrarrojos de las galaxias con AGN son sutilmente diferentes de los colores de las galaxias normales. Esta diferencias pueden ser usadas como método de diagnóstico de la existencia de un AGN con una tasa de acierto de un 60-70 % (de Grijp et al. 1985) como se verá más adelante en el estudio.

En esta longitud de onda también aparecen líneas de emisión de alta ionización junto con las bandas de emisión, debido a los hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH de polycyclic aromatic hydrocarbons) que serían señales de la presencia de un AGN. Pero debido a la ausencia de exploraciones espectroscópicas en estas frecuencias para buscar AGNs no es un método útil por el momento.

3.2. Modelo unificado

Como hemos podido comprobar hay un gran número de clases de AGNs. Se puede hacer una clasificación inicial simplificada fijándonos en dos parámetros: la anchura de las líneas de emisión y la potencia en radio. En la tabla 1 podemos observar la clasificación taxonómica simplificada de los AGNs.

Entonces surge la pregunta: Teniendo todo este tipo de objetos con una fenomenología similar pero diversa ¿Qué aspectos de esta diversidad provienen de la localización del observador con respecto al AGN? Lo primero fue la propuesta de que los objetos BL Lac eran radiogalaxias vistas desde el eje del chorro de partículas relativistas (Blandford & Rees 1978). Rowand-Robinson (1977) propuso que las líneas de emisión anchas estaban ausentes en las galaxias Seyfert 2, debido al oscurecimiento y no a una ausencia real. Antonucci & Miller (1985) vieron como el flujo polarizado de NGC 1068, prototipo de galaxia Seyfert 2, tenía el aspecto de una galaxia Seyfert 1. Esto se entendería con la presencia de un disco de

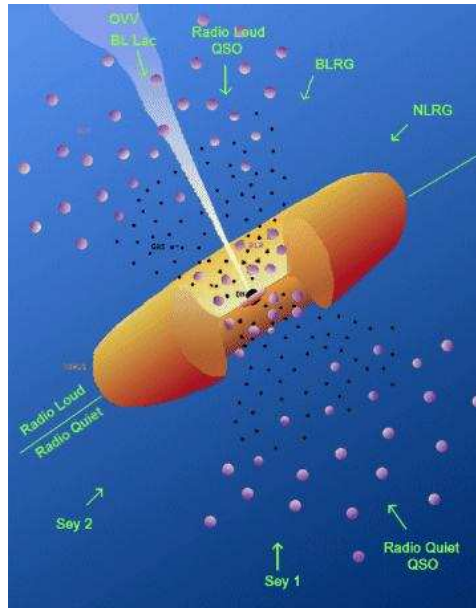


Figura 4: Modelo unificado para las galaxias activas.

polvo toroidal alrededor del agujero negro supermasivo y su disco de acreción. La emisión de líneas anchas que proviene de la zona central queda oscurecida por este toro, mientras que la emisión de líneas estrechas de fotoionización proviene de regiones externas a este toro.

De esta manera la emisión de líneas anchas que proviene de la zona central queda oscurecida por el toro de polvo, mientras que la emisión de líneas estrechas de fotoionización proviene de regiones externas a este toro. Dependiendo del ángulo con el que se miren tendremos una galaxia Seyfert 1 o una Seyfert 2. Si además presenta la emisión de chorros de radio relativistas tendremos la misma diferencia entre BLRG y NLRG. Y mirando perpendicularmente al chorro tendremos un blázar (objeto del tipo BL Lac). Todo esto aparece reflejado en la figura 4.

4. Selección de AGNs

4.1. Selección de la muestra

La muestra usada es la del catálogo del proyecto AMIGA en el cual se enmarca esta investigación. Esta muestra tiene datos para 1050 galaxias del Catálogo de Galaxias Aisladas de Karachentseva (1973). Originalmente el catálogo consta de 1051 objetos pero, como hemos dicho uno de ellos (CIG 781) es un cúmulo globular (Pal 15) y no una galaxia. En los análisis no será tenido en cuenta.

Hemos obtenido datos de infrarrojo lejano del satélite IRAS para 1031 galaxias (Lisenfeld et al. 2005). El resto caen en la zona que no cubrió el satélite conocida como "IRAS gap". Estos datos han sido reprocesados usando la herramienta SCANPI, obteniéndose una mayor tasa de detección y una mejor relación señal-ruido con respecto a los datos de los catálogos existentes de IRAS (PSC; Point Source Catalog y FSC; Faint Source Catalog).

Tabla 2: Observaciones en radiocontinuo.

| Fuente | WENSS | NVSS | GB6 |
|---|----------------------------------|---------|----------|
| Galaxias en el survey | 405 | 1051 | 1018 |
| Detecciones | 49 | 374 | 32 |
| Límites superiores | 356 | 677 | 986 |
| Densidad de flujo del límite superior (mJy) | 18 | 2 | 18 |
| Frecuencia | 325 MHz (352 MHz catálogo polar) | 1,4 GHz | 4,85 GHz |

Para radiocontinuo disponemos de datos obtenidos de tres fuentes de datos distintas: Westerbork Northern Sky Survey (WENSS), NRAO VLA Sky Survey (NVSS) y Green Bank 6 (GB6). Estas fuentes disponen tanto de catálogos como de imágenes. Todos estos datos han sido reprocesados usando SExtractor obteniéndose una mayor tasa de detecciones (Leon et al. 2005). En la tabla 2 se explican las características de las fuentes anteriores. La fuente elegida para nuestros cálculos es el NVSS. Ésto es debido a que dispone de una mayor tasa de detección y sensibilidad. El survey (exploración) cubre todas las galaxias de nuestra muestra y el flujo en radiocontinuo a 1,4 GHz es muy usado en distintas publicaciones facilitando así la comparación con otras muestras.

Para los cálculos que necesiten una significación estadística para comparar con otras muestras se usará una submuestra completa de la muestra general, como se explica en Verdes-Montenegro et al. (2005). Tomamos las galaxias que tienen una luminosidad óptica entre 11 y 15. El límite de 11 se debe a las pocas galaxias que hay en número por magnitud por debajo de este valor (esto haría la muestra incompleta al incluirlas) y el límite de 15 es el que escogemos para tener una muestra amplia suficientemente completa en base al test de completitud V/V_m . También se eliminan las galaxias con magnitudes absolutas muy altas o muy bajas (mayor de -16 y menor de -22.5) debido a la gran dispersión de estas galaxias en número por magnitud. Se escogen sólo las galaxias con distancias conocidas. De esta manera tenemos una muestra estadísticamente consistente y completa formada por 736 galaxias. A partir de ahora nos referiremos a esta muestra como la "muestra completa" y a la total con las 1050 galaxias como la "muestra total". Una vez obtenidos los parámetros, para la identificación de candidatos a galaxias activas, se aplicarán los criterios de selección sobre la muestra total. Para los estudios estadísticos y de comparación con otras muestras se usará la muestra completa.

Cuando usemos datos de infrarrojo lejano la muestra total queda reducida a 1031 galaxias y la muestra completa a 726 debido a las galaxias para las que no se dispone de datos IRAS. Suponemos que las zonas sin datos de IRAS (IRAS "gap") se distribuyen aleatoriamente en la esfera celeste y con respecto a la distribución de galaxias CIG, al ser esta homogénea en el cielo (Verdes-Montenegro et al. 2005). De esta manera ésto no influirá en la completitud de la muestra y por lo tanto en la estadística.

4.2. Datos de la literatura

Hemos realizado una búsqueda detallada en la bibliografía de los datos existentes sobre actividad nuclear en las galaxias de nuestra muestra. Se ha realizado una correlación cruzada con bases de datos existentes de galaxias activas. Hemos encontrado datos en la base de datos de NED y en el Catálogo Véron-Cetty de la manera que se explica a continuación.

NED (NASA Extragalactic Database) es una base de datos mantenida por el Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, contratado por la National Aeronautics and Space Administration (NASA). En esta base de datos hay multitud de información sobre objetos extragalácticos y sus características. Se puede acceder a ella en la siguiente página web: <http://nedwww.ipac.caltech.edu/>

En la base de datos NED hemos encontrado información de la actividad sólo para un número reducido de galaxias ($n=76$). Disponemos de la información sobre el tipo de actividad de la galaxia. Las diferentes clasificaciones encontradas son: LINER, HII, starburst (galaxias con un brote violento de formación estelar, DANS (Dwarf Amorphous Nuclear Starburst; Núcleo amorfo enano con formación estelar violenta), SBNG (Small, Bright Nucleus Galaxy; Galaxias con núcleo pequeño y brillante), NLAGN (Narrow Line AGN) y Seyfert. Las NLAGN son una mezcla de Seyfert 2, LINERs y composiciones starburst/AGN. Ya que HII y starburst no son formas de actividad de origen no estelar no serán tenidas en cuenta para los análisis posteriores. En algunos casos tenemos información sobre el tipo de actividad Seyfert que tenemos.

Las galaxias con actividad tipo LINER se pondrán en las tablas de recopilación de datos pero no se tendrán en cuenta en las estadísticas como tipo de AGN. Aunque muchos autores abogan por los LINERs como una forma de actividad nuclear, y esta postura va ganando posiciones, aún no es algo que sea totalmente aceptado.

El catálogo Véron-Cetty de quásares y núcleos activos (Véron-Cetty & Véron 2003) es un estudio completo de la literatura buscando galaxias activas y quásares. Incluye la posición y el corrimiento al rojo así como fotometría (U,B,V) y las densidades de flujo a 6 y 11 cm cuando están disponibles. Hemos encontrado información para 27 de nuestras galaxias. En algunos casos también tenemos el tipo de clasificación Seyfert. Hay tres galaxias como HII y una sin clasificar. La clasificación como Sy3 quiere decir que tiene actividad tipo LINER. La clasificación HII es para galaxias con una región de emisión HII nuclear que en un momento anterior fueron clasificadas como Seyfert pero actualmente no.

Mostramos en la tabla 3 las galaxias de la muestra encontradas en la literatura. En la primera columna aparece el número del catálogo CIG de la galaxia, en la segunda la actividad encontrada en NED y en la tercera la encontrada en el catálogo de Véron-Cetty.

Tabla 3: Galaxias con actividad obtenida en la literatura¹.

| CIG | NED ¹ | V-C |
|-----|------------------|-------|
| 33 | Sy? LINER | Sy? |
| 45 | HII | |
| 55 | LINER HII | |
| 56 | Sbrst | |
| 57 | Sy2 | Sy2 |
| 72 | Sy2 | Sy1.9 |
| 103 | | ? |
| 105 | HII | |

| CIG | NED ¹ | V-C |
|-----|------------------|-------|
| 116 | HII | Sy2 |
| 138 | | Sy2 |
| 143 | HII | |
| 197 | HII | |
| 214 | Sy1 Sbrst | Sy1.0 |
| 231 | NLAGN | |
| 250 | Sy1 | Sy1 |
| 302 | HII | |
| 324 | Sy1 LINER | Sy3 |
| 339 | Sbrst | |
| 347 | HII | |
| 349 | Sy1.5 LINER | Sy1 |
| 356 | DANS | |
| 359 | Sy3 | Sy3 |
| 383 | HII Sbrst | |
| 393 | HII | HII |
| 401 | NLAGN | |
| 410 | | Sy1 |
| 428 | HII | |
| 438 | HII | |
| 442 | HII | |
| 447 | LINER HII | |
| 461 | LINER | |
| 463 | HII | |
| 495 | HII | |
| 499 | NLAGN | |
| 503 | HII | |
| 508 | | Sy1 |
| 518 | HII | |
| 534 | HII | |
| 538 | HII | |
| 549 | LINER | |
| 553 | Sbrst | |
| 559 | Sy2 | Sy |
| 575 | SBNG | |
| 592 | NLAGN | |
| 604 | AGN | |
| 624 | HII | |
| 627 | HII | |
| 634 | LINER | |
| 671 | Sy1 | Sy1.5 |
| 692 | Sy2 | Sy2 |
| 710 | HII | |
| 712 | LINER | |
| 719 | Sy1 | Sy1n |

| CIG | NED ¹ | V-C |
|------|------------------|-------|
| 725 | | Sy1 |
| 733 | HII | |
| 745 | Sy1.5 | Sy1.0 |
| 766 | HII | |
| 795 | NLAGN | |
| 837 | LINER HII | |
| 866 | LINER HII | |
| 877 | | Sy2 |
| 940 | Sy1.9 | Sy1.9 |
| 943 | HII | |
| 947 | Sy LINER | Sy3 |
| 974 | Sbrst | |
| 976 | HII | |
| 985 | HII | |
| 993 | Sy2 Sbrst | HII |
| 1004 | Sy2 LINER | Sy1.9 |
| 1006 | HII | |
| 1008 | Sy1.2 | Sy1.2 |
| 1019 | Sbrst | |
| 1023 | Sy2 | Sy2 |
| 1038 | LINER | |
| 1039 | HII | |

¹ Sy = Seyfert; HII = Región nuclear HII; Sbrst= Starburst; SBNG = Small, Bright Nucleus Galaxy; NLAGN = Narrow Line Active Galaxies (mezcla de Seyfert 2's, LINERs, y composiciones starburst/AGN); DANS = Dwarf Amorphous Nuclei Starburst Galaxies

4.3. Galaxias con exceso de radio

4.3.1. Correlación radio-FIR

Una de las correlaciones más fuertes que existe dentro de la astrofísica es la correlación entre la emisión en infrarrojo lejano y el radiocontinuo. Esta correlación viene de la formación estelar (Condon, Anderson & Helou 1991): las estrellas masivas ($M \gtrsim 8M_{\odot}$) producen el calentamiento del gas y polvo a su alrededor que reemite en infrarrojo lejano y las supernovas de éstas estrellas emiten radiación sincrotrón de forma discreta y además aceleran los rayos cósmicos (electrones) confinados en el campo magnético galáctico que también emiten en radio. Cuando la galaxia presenta una emisión sincrotrón fuerte en radiocontinuo debido al núcleo activo (de origen no estelar) la correlación se ve alterada.

Al disponer de los datos en FIR y radio para nuestras galaxias podemos usar la desviación de la correlación para encontrar galaxias con núcleo activo. Cuando tenemos un AGN luminoso, su emisión en radio se une a la emisión debida a la formación estelar, con lo que se desvía de la correlación. Con este método solo encontraremos los AGN luminosos en radio que son más o menos un 10 % de los totales (Kellermann et al. 1989, Hooper et al. 1995).

Se han calculado las luminosidades en infrarrojo lejano y en radiocontinuo usando las siguientes relaciones:

$$\log L_{1,4GHz}(W Hz^{-1}) = 20,08 + 2 \log D + \log S_{1,4GHz}$$

$$\log L_{60\mu m}(L_{\odot}) = 6,014 + 2 \log D + \log S_{60\mu m}$$

donde D es la distancia en Mpc y $S_{1,4GHz}$ y $S_{60\mu m}$ las densidades de flujo en Jy. La luminosidad en infrarrojo (L_{FIR} ; Helou et al. 1988) esta relacionada con la $L_{60\mu m}$ según la siguiente formula

$$L_{FIR}(L_{\odot}) = \left(1 + \frac{S_{100\mu m}}{2,58 S_{60\mu m}}\right) L_{60\mu m}$$

Dada la cantidad de límites superiores que presenta nuestra muestra deberemos usar técnicas que nos permitan utilizarlos para hacer uso del máximo de información disponible. Para comprobar la correlación radio-FIR emplearemos técnicas de análisis de supervivencia. El método empleado es el de Schmitt (1985), que permite la obtención de una regresión lineal dado un conjunto de dos variables con una censura aleatoria. Este método ajusta los datos a una rejilla bidimensional creando una matriz de probabilidad que sigue una distribución de Kaplan-Meyer en cada uno de los ejes. Resolviendo el mejor ajuste a esta matriz de probabilidad obtenemos la recta de regresión. Dadas las características de este método es importante que la censura de las variables se distribuyan de forma aleatoria. Esta hipótesis se cumple al usar luminosidades, y no flujos, en radio y FIR de una muestra seleccionada en óptico. Al introducir la distancia en el calculo de la luminosidad los límites superiores de ésta se distribuyen de una manera practicamente aleatoria con respecto al flujo.

Se usará para calcular este ajuste la muestra completa, como se ha explicado en la sección 4.1. De esta manera podemos tener valores para la correlación que sean estadísticamente consistentes. Realizaremos el ajuste entre $\log L_{1,4GHz}$ y $\log L_{FIR}$. Algunos autores realizan el ajuste entre $L_{1,4GHz}$ y $L_{60\mu m}$, obteniéndose correlaciones similares debido a que en general L_{FIR} y $L_{60\mu m}$ son proporcionales. También realizaremos este ajuste mostrando los resultados. La elección de L_{FIR} se debe a que es una medida muy usada y útil para estudios estadísticos como el nuestro. Fue definida por Helou et al. (1988). Indica el flujo que se mediría con un filtro cuadrado de ancho de banda de $80\mu m$ centrado en $82,5\mu m$. Es válido para galaxias con una emisión térmica dominante en FIR con pico entre $50\mu m$ y $100\mu m$. Es una cantidad fotométrica adecuada para estudios estadísticos aunque no es un buen estimador del flujo total.

En la figura 5 se muestra la correlación entre la $L_{1,4GHz}(W Hz^{-1})$ y la $L_{FIR}(L_{\odot})$. Se muestra la recta de regresión obtenida usando el método de análisis de supervivencia y las rectas que indican un nivel de 5 veces más luminosidad en radio que en FIR y viceversa. Las galaxias con límites superiores aparecen en colores (azul, amarillo y verde) mientras que las detecciones en ambas bandas se muestran como cruces negras. El valor obtenido para la correlación es en siguiente:

$$\log L_{1,4GHz} = [1,03 \pm 0,03] \log L_{FIR} + [11,4 \pm 0,3]$$

Realizando la correlación de la misma manera pero usando $L_{60\mu m}$ en lugar de L_{FIR} se obtiene la siguiente relación:

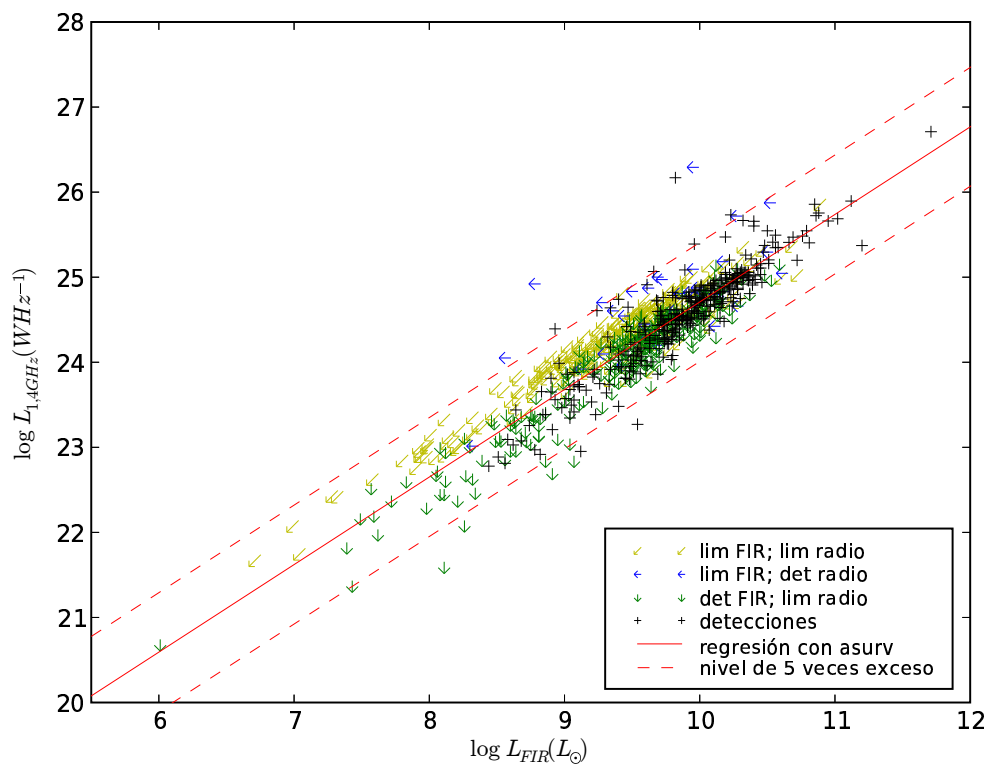


Figura 5: Correlación entre luminosidades en radio e infrarrojo. La recta mostrada se ha calculado usando técnicas de análisis de supervivencia. Las líneas de puntos muestran el nivel donde la luminosidad en radio es 5 veces mayor a la infrarroja y viceversa.

Tabla 4: Galaxias con exceso de radio usando la correlación radio-FIR.

| Número CIG | $\log L_{FIR}$ | límite ¹ en $\log L_{FIR}$ | $\log L_{1,4GHz}$ | tipo morfológico |
|------------|----------------|---------------------------------------|-------------------|------------------|
| 41 | 9.66 | 0 | 22.07 | Sc |
| 57 | 10.23 | 0 | 22.73 | Sb |
| 187 | 9.82 | 0 | 23.17 | Sc |
| 287 | 9.96 | 0 | 22.39 | SBbc |
| 488 | 10.27 | 1 | 22.72 | Sb |
| 571 | 8.93 | 0 | 21.39 | Sc |
| 591 | 9.28 | 1 | 21.70 | Sbc |
| 663 | 3.23 | 1 | 15.93 | E |
| 734 | 8.56 | 1 | 21.05 | S0a |
| 836 | 9.95 | 1 | 23.29 | E,S0 |
| 1045 | 8.78 | 1 | 21.92 | S0 |

¹ Código: 1 en el caso de límite superior y 0 en el caso de detección.

$$\log L_{1,4GHz} = [0,96 \pm 0,04] \log L_{60\mu m} + [12,5 \pm 0,4]$$

En ambos casos la pendiente es muy próxima a la unidad, como cabe esperar de la correlación. Se puede comprobar en la figura 5 como las galaxias con bajas luminosidades en infrarrojo tienden a separarse de la correlación teniendo mayores deficiencias de radio. Este efecto, que se puede ver en nuestra muestra, también se ve en la muestra de grupos compactos de Hickson de Menon (1991) y fue estudiado por Condon et al. (1991). Existen distintas explicaciones para este efecto. En una de ellas se postula que la emisión FIR no es exactamente proporcional a la formación estelar, sino que se forma como la suma de dos componentes, una depende de la formación estelar y la otra del campo de radiación interestelar (Fitt, Alexander & Cox 1988, Deveux & Eales 1989). Otra explicación es la pérdida de rayos cósmicos por difusión en galaxias de baja masa (y por lo tanto baja luminosidad). Esta pérdida hace que la emisión en radio disminuya (Chi & Wolfendale 1990).

Hemos identificado 11 galaxias por encima del nivel de exceso de radio para la muestra total. El nivel con el que se considera que una galaxia tiene exceso de radio es en el que la luminosidad en radio es 5 veces mayor que la luminosidad FIR (Yun, Reddy & Condon 2001). También se pueden definir un nivel arbitrario de exceso de radio, como tres veces más radio que FIR, como hacen otros autores. Nosotros los calcularemos pero usaremos preferentemente el de 5 veces más radio que FIR. En la tabla 4 se muestran los números de catálogo de estas galaxias junto con sus luminosidades en radio y en FIR. En la tabla 5 se muestra una compilación de los porcentajes de galaxias con exceso de radio. Se comparan el número de galaxias con exceso de radio usando la L_{FIR} y la $L_{60\mu m}$ con distintos niveles de exceso de radio (3, 4 y 5 veces más radio que FIR). En este caso sólo tendremos en cuenta la muestra completa.

Se puede observar como, en general, el porcentaje de galaxias con exceso de radio es muy bajo en comparación con el número de galaxias de la muestra. La diferencia entre usar la luminosidad L_{FIR} o $L_{60\mu m}$ se va haciendo menor conforme bajamos el nivel de

Tabla 5: Estadística de galaxias con exceso de radio para la muestra completa.

| Luminosidad usada | nivel 5 ¹ | nivel 4 ¹ | nivel 3 ¹ |
|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| L_{FIR} | 8 (1.1 %) | 14 (1,9 %) | 20 (2.8 %) |
| $L_{60\mu m}$ | 2 (0.3 %) | 12 (1,7 %) | 18 (2.5 %) |

¹ Número de galaxias por encima del nivel indicado de luminosidad radio con respecto a luminosidad FIR. Porcentaje con respecto a la muestra completa.

exceso de radio requerido. Aun así vemos que no alcanzamos el grueso de la distribución a niveles de 3 veces más radio que FIR, pues la correlación es muy estrecha. Estos valores son comparables con los de la muestra de galaxias de Yun, Reddy y Condon (2001). Seleccionan una muestra de galaxias en FIR con $S_{60\mu m} \geq 2Jy$ completa. Obtienen un 1,3% de galaxias con exceso de radio. Para la muestra de galaxias en cúmulos de galaxias de Reddy & Yun (2004) se encuentra una fracción de galaxias con exceso de radio del 11%. Esto nos indica que hay una mayor cantidad de galaxias activas "radio-loud" en entornos de alta densidad para galaxias de tipo temprano. Drake et al. (2003) encuentran para su muestra una fracción mucho mayor ($\sim 50\%$) de galaxias con exceso de radio aunque se trata de un efecto debido a la selección de la muestra, ya que escogen sólo galaxias detectadas en radio y con flujo en FIR, lo que introduce un sesgo hacia galaxias con actividad, tanto de formación estelar como nuclear, al ser éstas más brillantes en radio e infrarrojo. Hay que ser cuidadosos en la interpretación ya que las muestras están seleccionadas en longitudes de onda distintas con lo que las propiedades pueden variar entre unas y otras y no siempre pueden ser directamente comparables.

4.3.2. Parámetro q

El parámetro q (Helou, Soifer & Rowan-Robinson 1985) es un buen estimador de la desviación con respecto a la correlación radio-FIR. Es independiente de la fuerza de los brotes de formación estelar (Lisenfeld, Völk & Xu 1996b) y de la distancia a la galaxia (Yun, Reddy & Condon 2001). El parametro se define como:

$$q \equiv \log \left[\frac{FIR}{3,75 \cdot 10^{12} W m^{-2}} \right] - \log \left[\frac{S_{1,4GHz}}{W m^{-2} Hz^{-1}} \right]$$

donde $S_{1,4GHz}$ es la densidad de flujo observada a $1,4GHz$ con el NVSS en unidades de $W m^{-2} Hz^{-1}$ y FIR se define de la siguiente forma:

$$FIR \equiv 1,26 \cdot 10^{-14} (2,58S_{60\mu m} + S_{100\mu m}) W m^{-2}$$

donde $S_{60\mu m}$ y $S_{100\mu m}$ son las densidades de flujo de IRAS en las bandas de $60\mu m$ y $100\mu m$ dadas en Jy. Esta cantidad se define así de manera similar a la luminosidad FIR (Helou et al. 1988) usando sólo los flujos.

Denominaremos galaxias con exceso de radio a las que tienen una emisión de radio 5 veces superior a la emisión en infrarrojo al igual que con las luminosidades. En la figura del parámetro q (figuras 7 y 6) estas galaxias quedan debajo de la línea de 0.699 ($\log_{10}(5)$) puntos por debajo de la media de q. Estas galaxias se desvían fuertemente de la correlación

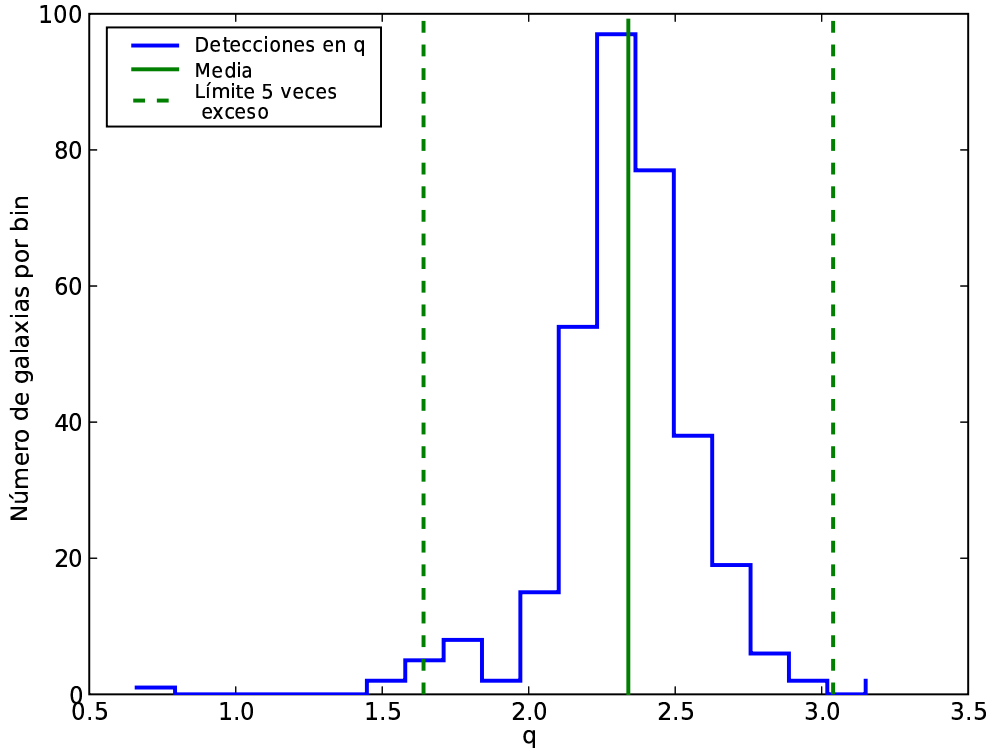


Figura 6: Histograma de distribución del parámetro q . Se muestra la media para la muestra completa y las líneas que indican un exceso de 5 veces radio sobre FIR y viceversa. Las galaxias con exceso de radio quedan en la cola izquierda del histograma.

radio-FIR presentando un exceso de radio con lo que son candidatos muy probables a contener un AGN en su interior.

Hemos calculado la media de q . En este caso no hemos podido usar técnicas de análisis de supervivencia. La distribución de los flujos de los límites superiores no se puede definir como aleatoria para usar el método de Schmitt como en el caso de las luminosidades. De esta manera la única opción posible ha sido usar los datos de galaxias con detecciones. La media obtenida es de $2,34 \pm 0,24$. En la figura 6 se muestra el histograma de q junto con los valores de la media y los límites de selección de exceso de radio y de FIR. La media coincide con la media de Yun, Reddy & Condon (2001) que era de $2,34 \pm 0,01$.

Teniendo los valores de la media para nuestra dispersión podremos encontrar las galaxias que se encuentran por debajo del nivel q con exceso de radio (5 veces más emisión radio que FIR). Para poder realizar una identificación positiva tenemos que tener la galaxia detectada en radio. Si tenemos una galaxia con límite superior en el flujo radio pueden pasar dos cosas, que tenga límite superior en FIR también y no sepamos dónde aparece en el diagrama, o que esté detectada en FIR, con lo que tendremos un límite inferior para q (flecha hacia arriba en la figura) y no podremos estar seguros de que cae en la zona de exceso de radio. Sin embargo las que están detectadas en radio están localizadas en el diagrama en el caso de que estén detectadas en FIR también o, en todo caso, tienen un límite

Tabla 6: Galaxias con exceso de radio usando el parametro q.

| Número CIG | q | tipo ¹ |
|------------|-------|-------------------|
| 41 | 1.607 | 0 |
| 57 | 1.512 | 0 |
| 187 | 0.662 | 0 |
| 287 | 1.583 | 0 |
| 488 | 1.564 | 1 |
| 571 | 1.543 | 0 |
| 591 | 1.594 | 1 |
| 663 | 1.314 | 1 |
| 734 | 1.518 | 1 |
| 836 | 0.666 | 1 |
| 1045 | 0.872 | 1 |

¹ Código: 1 en el caso de límite superior y 0 en el caso de detección.

superior en q cuando tienen un límite superior en FIR (flecha hacia abajo) asegurándonos de que se encuentran en la zona de exceso de radio.

Con estos valores tenemos 11 galaxias con exceso de radio en total. En la tabla 6 se muestran las galaxias seleccionadas con exceso de radio en la muestra total. Son exactamente las mismas que las seleccionadas con luminosidades. Esto indica dos cosas: la validez del parametro q como parámetro de diagnostico y la similitud de las medias halladas con la técnica de análisis de supervivencia y con la distribución de las detecciones en q.

En la figura 7 se muestra la distribución de q con respecto a la luminosidad infrarroja. En este caso se observa también cómo hay una pequeña tendencia en la zona de galaxias de baja luminosidad FIR a tener un q mayor lo que indica un exceso de FIR con respecto al radio tal y como se ha explicado en 4.3.1. Las galaxias con exceso de radio quedan en la zona de abajo del diagrama.

4.4. Selección con colores IRAS

De Grijp et al. (1985) mostró como con un diagrama de color en FIR se pueden encontrar AGNs con una tasa de acierto próxima al 70 %. Esto se debe a que en las galaxias con AGN el espectro en infrarrojo es más plano como norma general. El criterio de selección original fue el de escoger las galaxias con un índice espectral entre $25\mu m$ y $60\mu m$ de $-1,25 < \alpha_{25,60} < -0,5$. La elección de estas frecuencias en vez de la de $60\mu m$ y $100\mu m$ se debe a que son las más apropiadas ya que hay menos posibilidad de que la emisión fría del disco oculte a la componente nuclear.

El índice espectral indica la pendiente del flujo de energía a una frecuencia dada. Se define como:

$$S_\nu \propto \nu^{-\alpha}$$

donde α es el índice espectral, S es la densidad de flujo y ν la frecuencia. Hay que tener en cuenta que algunos autores definen el índice espectral con el signo contrario. En muchas

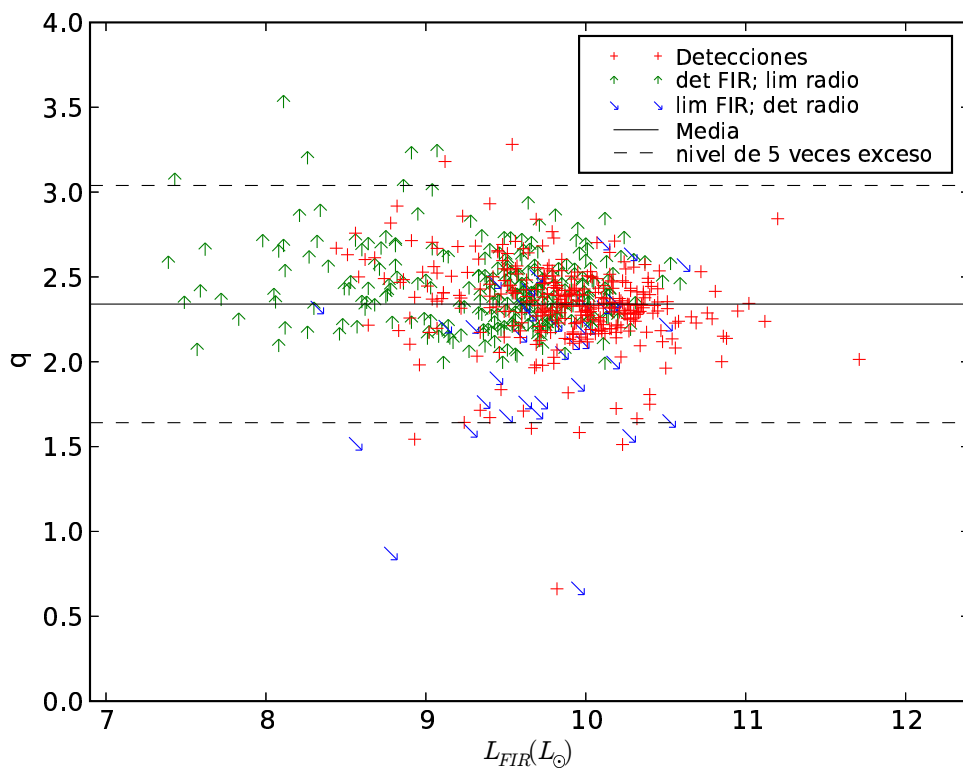


Figura 7: Parámetro q . Las detecciones con las que se calcula la media aparecen como cruces rojas, los límites superiores en alguna de las bandas como flechas o azules o verdes. La línea continua negra es la media de las detecciones. Las líneas discontinuas negras indican los límites de 5 veces exceso de radio o de FIR.

Tabla 7: Índice espectral límite en distintas publicaciones.

| Autores | Año | $\alpha_{25\mu m, 60\mu m}$ |
|-------------------------|------|-----------------------------|
| de Grigp et al. | 1985 | -1,25 |
| de Grigp et al. | 1987 | -1,5 |
| Keel, de Grigp & Miller | 1988 | -1,5 |
| Low et al. | 1988 | -1,58 |
| Sanders et al. | 1988 | -1,84 |
| Xu et al. | 1998 | -1,5 |
| Xu et al. | 2001 | -1,84 |
| Yun, Reddy & Condon | 2001 | -1,958 |
| Reddy & Yun | 2004 | -1,958 |

ocasiones se calcula el índice espectral entre dos frecuencias, siendo éste la pendiente del flujo de energía entre ambas frecuencias. En este caso:

$$\alpha_{1,2} = \frac{\log\left(\frac{S_1}{S_2}\right)}{\log\left(\frac{\nu_1}{\nu_2}\right)}$$

Más tarde ha habido muchos autores que han usado este método para seleccionar candidatos a AGNs. El criterio siempre es el de que el espectro es más plano pero los valores cambian. El límite superior a $\alpha_{25,60}$ se fija para poder distinguir las galaxias de las estrellas y otros objetos galácticos (nebulosas planetarias, etc) en muestras en las que no hay una preselección del tipo de objeto. Nosotros sabemos que todos nuestros objetos son galaxias, con lo que no usaremos este límite a la hora de seleccionar los candidatos. El límite inferior, que es el que realmente separa la población de candidatos a AGN, va cambiando según el autor. Oscila entre $\alpha_{25,60} = -1,25$ y $\alpha_{25,60} = -1,958$. En la tabla 7 se muestran distintas publicaciones de distintos autores con los índices espectrales que escogieron.

Representamos el $\log S_{25\mu m}$ frente a $\log S_{60\mu m}$ en un diagrama. En este diagrama las líneas para un cierto índice espectral aparecen como rectas de pendiente 1 a diferentes alturas. En la figura 8 se muestran los distintos índices espectrales con los criterios de los autores de la tabla 7. Las galaxias que aparezcan en la zona superior a las líneas serían los seleccionados con este criterio como candidatos a AGN. En la misma figura mostramos todos los datos para nuestras galaxias, incluidos los límites superiores como flechas y en distintos colores. Cuando tenemos límites superiores en ambas bandas la flecha será amarilla, cuando es en $S_{25\mu m}$ la flecha es verde y cuando el límite es en $S_{60\mu m}$ la flecha es azul. Las detecciones aparecen como cruces rojas.

Escogeremos como límite $\alpha_{25,60} = -1,958$, que es el que se usa en Yun, Reddy & Condon (2001) y Reddy & Yun (2004) pudiendo así comparar con estas muestras bien definidas. En la figura 9 se muestra la línea de separación para nuestro criterio junto con los datos. Los datos que son seleccionados con nuestro criterio como candidatos a AGN están en color rojo. Los datos que se encuentran seguro en la zona de galaxias normales están en color azul y para los que no podemos conocer su posición con respecto al criterio,

debido a la posición de los límites superiores, aparecen en amarillo.

De esta manera tenemos 110 (10,7%) candidatos a AGN y 218 (21,1%) en la zona de galaxias normales para la muestra total que tiene datos IRAS ($n = 1031$). Hay 703 (68,2%) galaxias para las que debido a la posición de los límites superiores no podemos conocer su localización con respecto a la línea de selección. Para la muestra completa con datos IRAS ($n = 726$) tenemos 191 (26,3%) galaxias en la zona de galaxias normales, 446 (61,4%) galaxias para las que no conocemos su posición con respecto a la línea y 89 candidatos a AGN. Estos candidatos suponen el 12,3% de la muestra completa. Esto es un límite inferior al número de candidatos en la muestra pues algunas de las galaxias no detectadas pueden encontrarse en esta zona. De esta manera los candidatos a AGN son el 31,8% de las 280 galaxias que han sido detectadas.

Como se explica en de Grijp et al. (1985), Véron (1985) y de Grijp et al. (1992) el uso del criterio de colores IRAS es una forma eficiente de detección de AGNs, aunque no todos los AGNs tienen índices espectrales planos (fuentes calientes en IRAS). En la zona de galaxias normales, la fracción de AGNs es pequeña pero significativa. En estudios anteriores (ver referencias anteriores) se comprueba que más o menos el 30% de los AGNs seleccionados en óptico no pasan el criterio de selección IRAS. De la misma forma hay galaxias sin actividad nuclear detectada que caen en la zona de candidatos a AGN. De esta manera la eficiencia en la selección con este criterio suele ser de entre el 60 y el 70%.

Una figura típica de diagnóstico de propiedades de galaxias es la que representa el color $\log(S_{60\mu m}/S_{100\mu m})$ frente a $\log(S_{25\mu m}/S_{60\mu m})$. Se muestra en la figura 10. El color $S_{60\mu m}/S_{100\mu m}$ se puede relacionar con la temperatura del polvo de la galaxia en un modelo muy simplificado (Helou et al. 1988). El $\log(S_{25\mu m}/S_{60\mu m})$, que se sitúa en el eje x, diferencia los candidatos a AGN. La línea vertical de separación se corresponde con un $S_{25\mu m}/S_{60\mu m} = 0,18$ y los candidatos a AGN quedan a la derecha. En colores azul y cian se muestran los datos que están en la zona de galaxias normales. En colores rojo y magenta los candidatos a AGN. En amarillo se encuentran las galaxias que, debido a los límites superiores, no se pueden localizar en una zona concreta con respecto a la línea de separación.

4.4.1. Colores IRAS para las galaxias de la literatura

Se ha comprobado la localización de las galaxias activas seleccionadas de la literatura, tanto de NED como de Véron-Cetty en el diagrama de selección de candidatos. En las figuras 11 y 12 se representan las galaxias con algún tipo de actividad sobre el diagrama de flujos IRAS ($S_{25\mu m}$ frente a $S_{60\mu m}$) usado para el diagnóstico. En la figura 11 se representan las galaxias con actividad en NED, tenemos cuatro diagramas distintos: a) Galaxias con actividad Seyfert y NLAGN, b) Galaxias con actividad tipo LINER, c) Galaxias starburst y d) Galaxias con regiones nucleares HII. En la figura 12 se representan las galaxias con actividad del catálogo Véron-Cetty, tenemos dos diagramas: a) Galaxias Seyfert y b) Galaxias LINER (Seyfert 3 en el catálogo). Mostramos también a un tamaño mayor los diagramas para las galaxias activas tanto en NED como en Véron-Cetty para que se pueda apreciar mejor su distribución.

Las galaxias activas encontradas en NED (figura 11:a) aparecen distribuidas tanto encima como debajo de la línea de selección. Tenemos 16 galaxias en la muestra completa que son activas en NED. Tres de ellas caen en la zona de galaxias normales, 6 en la de candidatos a AGN y 7 no se pueden localizar debido a los límites superiores. De esta

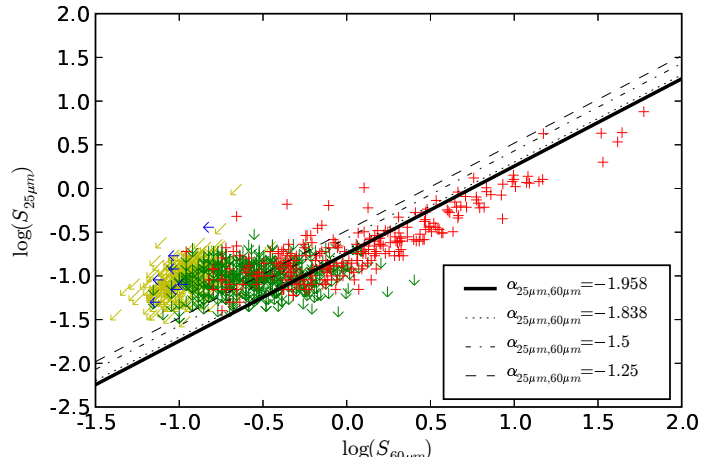


Figura 8: $S_{25\mu m}$ frente a $S_{60\mu m}$. Las distintas líneas indican los diferentes índices espectrales límite para diferentes autores (ver texto). Los puntos que quedan por encima de la línea son candidatos a AGN.

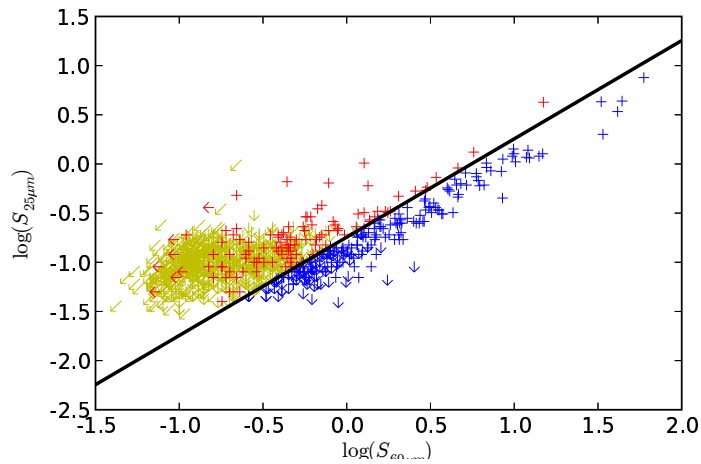


Figura 9: $S_{25\mu m}$ frente a $S_{60\mu m}$. La línea negra representa el índice espectral escogido de $\alpha_{25,60} = -1,958$. Los puntos de color rojo son candidatos a AGN. Los de color azul caen en la zona de galaxias normales. De los amarillos no podemos conocer su localización exacta con respecto al criterio de selección debido a la posición de los límites superiores.

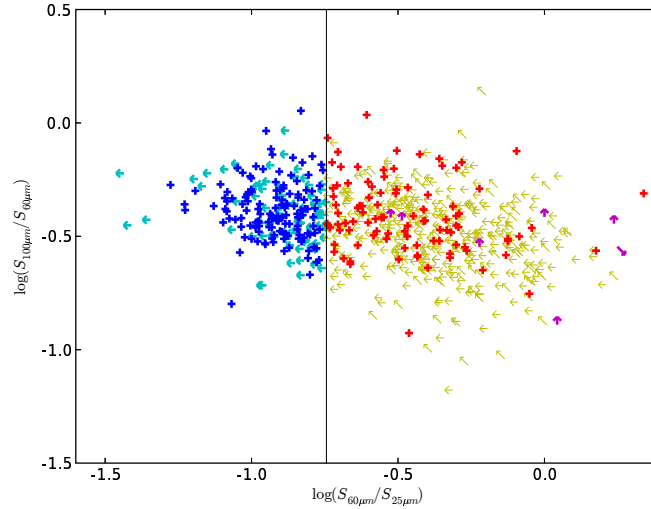


Figura 10: Diagrama de colores IRAS. $\log(S_{60\mu m}/S_{100\mu m})$ frente a $\log(S_{25\mu m}/S_{60\mu m})$. La línea vertical indica la separación para los candidatos a AGN. Los candidatos a AGN quedan a la derecha de la línea con colores rojo y magenta. Las galaxias starburst quedarían en la zona superior del diagrama debido a su mayor temperatura por la formación estelar intensa.

manera vemos como de las galaxias conocidas como AGNs localizadas en el diagrama, 2/3 están ubicadas en la zona correcta y 1/3 en la de galaxias normales. Aunque no tiene valor estadístico esto indica que el método clasifica moderadamente bien las galaxias pues a priori solo esperamos que ese porcentaje aparezca en la zona de candidatos a AGN. Las galaxias clasificadas como AGN representan el 6,7% de las galaxias que se encuentran clasificadas según el método como candidatos a AGN. Las que son AGN y se sitúan en la zona de galaxias normales suponen un 1,6% de esta población.

Para las galaxias LINER (figura 11) tenemos 4 por encima de la línea y 4 por debajo. Las starburst se sitúan preferentemente en la zona de galaxias normales teniendo 5 por debajo y tan solo 1 en la zona de candidatos a AGN. Las galaxias HII se sitúan preferentemente por debajo de la línea tenemos 15 por debajo, 3 por encima y 3 sin localizar. De esta manera vemos como las galaxias que no tienen una actividad nuclear de origen no estelar tienden a distribuirse en la zona de galaxias normales.

Las galaxias Seyfert del catálogo Véron-Cetty son 16 para la muestra completa (figura 12:a). Se distribuyen 4 por debajo de la línea en la zona de galaxias normales, 4 están sin localizar y 8 están en la zona de candidatos a AGN. De esta manera vemos como de nuevo tenemos 2/3 de las galaxias Seyfert en la zona de candidatos y 1/3 en la de galaxias normales. La única galaxia LINER (figura 12) de la muestra completa que está en este catálogo cae en la zona de candidatos a AGN.

Los resultados se resumen en la tabla 8. Las galaxias que no podemos localizar en el diagrama con respecto a la línea de selección aparecen como no clasificables. También aparece el porcentaje con respecto a las galaxias de las distintas submuestras. Como vemos, en general, la distribución de galaxias activas se realiza de una forma correcta dentro de la precisión que tiene nuestro método de diagnóstico. También se observa como las galaxias

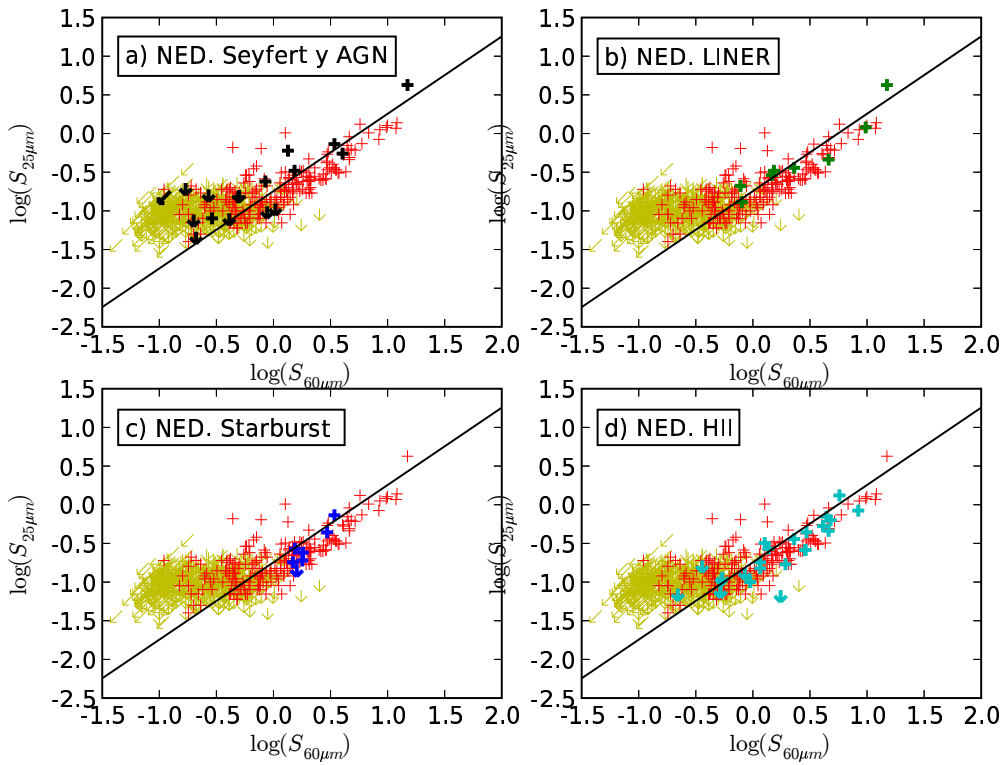


Figura 11: $S_{25\mu m}$ frente a $S_{60\mu m}$ con las galaxias seleccionadas en NED. Los datos con detecciones en ambas bandas son de color rojo, los que tienen límites superiores son amarillos, en negro está la línea de selección de candidatos a AGN ($\alpha_{25,60} = -1,958$). Los puntos que quedan por encima de la línea son candidatos a AGN. Las diferentes figuras se corresponden con: a) Posición de las Galaxias Seyfert (incluidas las NLAGN); b) Posición de las galaxias LINER; c) Posición de las galaxias starburst; d) Posición de las galaxias HII.

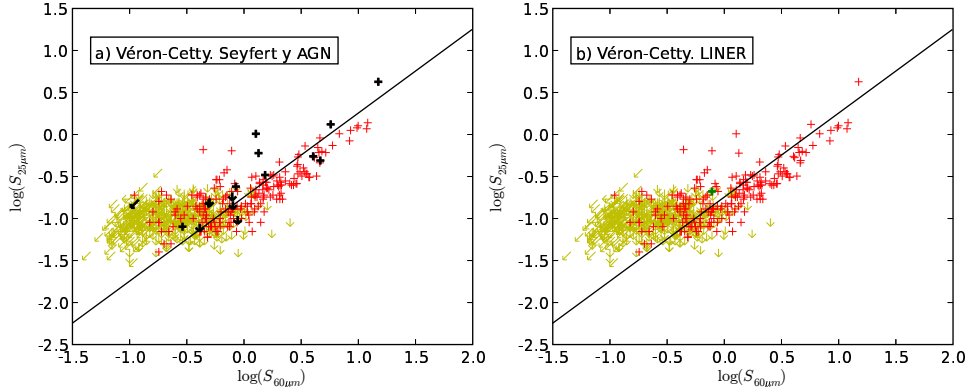


Figura 12: $S_{25\mu m}$ frente a $S_{60\mu m}$ con las galaxias seleccionadas en el catálogo Véron-Cetty. Los datos con detecciones en ambas bandas son de color rojo, los que tienen límites superiores son amarillos, en negro está la línea de selección de candidatos a AGN ($\alpha_{25,60} = -1,958$). Los puntos que quedan por encima de la línea son candidatos a AGN. Las diferentes figuras se corresponden con: a) Posición de las Galaxias Seyfert; b) Posición de las galaxias LINER.

Tabla 8: Galaxias de la literatura clasificadas con colores IRAS.

| Catálogo y tipo | Total | zona de candidatos a AGN | zona de galaxias normales | no clasificables |
|-----------------------|-------|--------------------------|---------------------------|------------------|
| NED. AGN. | 16 | 6 (37,5 %) | 3 (18,75 %) | 7 (43,75 %) |
| Véron-Cetty. Seyfert. | 16 | 8 (50 %) | 4 (25 %) | 4 (25 %) |
| NED. LINER. | 9 | 6 (50 %) | 3 (50 %) | 0 (0 %) |
| NED. Starburst. | 6 | 1 (20 %) | 5 (80 %) | 0 (0 %) |
| NED. HII | 21 | 3 (14,3 %) | 15 (71,4 %) | 3 (14,3 %) |

no clasificadas como activas que aparecen en los catálogos tienden a distribuirse en la zona de galaxias normales.

4.4.2. Colores IRAS para las galaxias con exceso de radio

También se ha comprobado la localización de las galaxias con exceso de radio seleccionadas en la sección 4.3. Aparecen en color negro en el diagrama de selección de la figura 13.

Como se puede comprobar, de las 11 galaxias con exceso de radio, casi ninguna de ellas dispone de datos simultáneos en las bandas de $25\mu m$ y $60\mu m$ de IRAS. Sólo una de ellas está detectada en ambas bandas, encontrándose en la zona de candidatos a AGN. El resto de galaxias, aún estando en la zona de candidatos a AGN, tiene siempre un límite superior en $S_{25\mu m}$ con lo que no podemos determinar su posición precisa con respecto a la línea de separación. De esta manera no tenemos prácticamente información sobre las galaxias con exceso de radio en relación con el color IRAS.

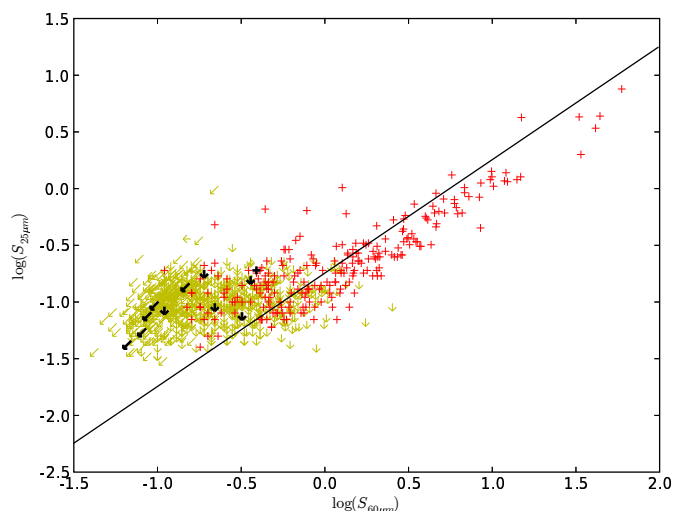


Figura 13: $S_{25\mu m}$ frente a $S_{60\mu m}$ con las galaxias con exceso de radio. Los datos con detecciones en ambas bandas son de color rojo, los que tienen límites superiores son amarillos, en negro está la línea de selección de candidatos a AGN ($\alpha_{25,60} = -1,958$). Los puntos que quedan por encima de la línea son candidatos a AGN. Las galaxias con exceso de radio se representan con simbolos de color negro.

4.5. Catálogo de AGNs

Finalmente hemos realizado un catálogo de galaxias candidatas a AGN para el catálogo CIG. Este catálogo incluye información sobre el método con el que ha sido incluida una galaxia como candidato. Según el método y sus características tendremos una fiabilidad mayor o menor, tal y como se ha explicado en las secciones anteriores.

- Introducimos las galaxias encontradas en la **literatura** que son consideradas AGN. De NED introducimos las galaxias Seyfert, la marcada como AGN y las NLAGN. Del catálogo de Véron-Cetty incorporamos las Seyfert. Las Seyfert 3 o LINER quedan excluidas por ahora del catálogo, como se explicó en 4.2. En general la determinación de estas galaxias como AGNs proviene de métodos muy fiables, como la determinación por líneas de emisión ópticas. Aún así no hay que olvidar como algunas de las galaxias señaladas como Seyfert con anterioridad en estos catálogos han sido reclasificadas como HII. De esta manera aunque la fiabilidad en la clasificación de estos datos es muy alta no se podrá considerar del todo concluyente.
- También incorporamos las galaxias seleccionadas con el criterio de **exceso de radio**. Incluimos las galaxias que tienen una luminosidad en radio 5 veces superior a la de FIR con respecto a la media, tal y como se ha definido.
- Por último introducimos las galaxias seleccionadas con el criterio del **color IRAS**. Para estas galaxias no existe una fiabilidad tan grande como con los otros dos métodos. Por eso al usar estos datos tendremos que tenerlo muy en cuenta dependiendo del tipo de estudio que vayamos a realizar. También hay que tener en cuenta que

debido al gran número de límites superiores estas galaxias suponen un límite inferior al número de galaxias que cumplen este criterio.

También incorporamos las galaxias seleccionadas con el criterio de exceso de radio. Incluimos las galaxias que tienen una luminosidad en radio 5 veces superior a la de FIR con respecto a la media como se ha definido.

Por último introducimos las galaxias seleccionadas con el criterio del color IRAS. Para estas galaxias no existe una fiabilidad tan grande como con los otros dos métodos. Por eso al usar estos datos tendremos que tenerlo muy en cuenta dependiendo del tipo de estudio que vayamos a realizar. También hay que tener en cuenta que debido al gran número de límites superiores estas galaxias suponen un límite inferior al número de galaxias que cumplen este criterio.

El catálogo final se muestra en la tabla 9. Los campos son el número del catálogo CIG, las coordenadas de la galaxia, su magnitud absoluta, su luminosidad en FIR, el código de determinación de la luminosidad en FIR, su luminosidad en radio, el código de determinación de la luminosidad en radio y el método o los métodos de selección con los que ha sido elegida. Los códigos de determinación de la luminosidad son 0 cuando se trata de una detección y 1 cuando es un límite superior. Para las galaxias para las que no hay datos de distancia se ponen guiones.

Tabla 9: Catálogo de candidatos a AGN para la muestra total¹.

| CIG | α (J2000) | δ (J2000) | Mb | $\log L_{FIR}$ (L_{\odot}) | cód. | $\log L_{1.4GHz}$ ($W Hz^{-1}$) | cód. | Método |
|-----|---------------------|---------------------|--------|-----------------------------------|------|--------------------------------------|------|--------|
| 5 | 1.97625 | 20.41230 | -20.48 | 9.74 | 0 | 21.38 | 1 | 4 |
| 8 | 3.03766 | 12.04550 | -20.33 | 9.57 | 0 | 21.19 | 1 | 4 |
| 25 | 7.74200 | 10.20830 | -20.21 | 9.34 | 0 | 21.18 | 0 | 4 |
| 26 | 7.97020 | 37.67860 | - | - | - | - | - | 4 |
| 33 | 10.86587 | -0.12410 | -20.39 | 9.94 | 0 | 21.72 | 0 | 1,2,4 |
| 39 | 13.67845 | 21.52280 | -18.26 | 8.76 | 0 | 20.37 | 1 | 4 |
| 41 | 14.59733 | 36.73060 | -20.31 | 9.66 | 0 | 22.07 | 0 | 3,4 |
| 42 | 16.07829 | 18.69620 | -19.40 | 9.33 | 0 | 21.05 | 1 | 4 |
| 44 | 16.64833 | 10.52160 | -19.79 | 9.87 | 0 | 21.54 | 0 | 4 |
| 46 | 17.55179 | 22.95550 | - | - | - | - | - | 4 |
| 49 | 19.53712 | 11.38170 | -20.25 | 9.60 | 0 | 21.01 | 1 | 4 |
| 57 | 24.45104 | 2.29090 | -21.46 | 10.23 | 0 | 22.73 | 0 | 1,2,3 |
| 69 | 28.42595 | 29.93370 | -21.16 | 10.22 | 0 | 22.20 | 0 | 4 |
| 72 | 28.84129 | 6.61070 | -20.09 | 9.61 | 0 | 21.91 | 0 | 1,2 |
| 86 | 31.36116 | 31.17530 | -20.66 | 10.04 | 0 | 21.55 | 0 | 4 |
| 108 | 37.66395 | 27.15840 | -19.68 | 9.67 | 0 | 21.31 | 0 | 4 |
| 116 | 40.64783 | 34.76390 | -20.40 | 10.36 | 0 | 21.97 | 0 | 2,4 |
| 126 | 51.00070 | 16.18280 | -22.11 | 10.88 | 0 | 22.75 | 0 | 4 |
| 135 | 58.62633 | 10.70710 | -19.98 | 9.64 | 1 | 21.22 | 0 | 4 |
| 138 | 60.70087 | 1.96530 | -20.50 | 10.35 | 0 | 22.02 | 0 | 2 |
| 166 | 94.00458 | 75.93650 | -21.05 | 9.53 | 0 | 21.04 | 1 | 4 |
| 171 | 98.15554 | 71.56100 | -20.22 | 9.43 | 1 | 20.97 | 0 | 4 |

| CIG | α (J2000) | δ (J2000) | Mb | $\log L_{FIR}$ (L_{\odot}) | cód. | $\log L_{1,4GHz}$ ($W Hz^{-1}$) | cód. | Método |
|-----|---------------------|---------------------|--------|-----------------------------------|------|--------------------------------------|------|--------|
| 181 | 109.21920 | 67.11130 | -20.11 | 9.70 | 0 | 21.16 | 0 | 4 |
| 185 | 110.27216 | 29.33850 | -21.54 | 10.30 | 0 | 22.06 | 0 | 4 |
| 187 | 110.88816 | 41.43480 | -20.37 | 9.82 | 0 | 23.17 | 0 | 3 |
| 198 | 114.45604 | 46.39780 | -20.72 | 10.18 | 0 | 21.88 | 0 | 4 |
| 200 | 115.68833 | 66.25820 | -19.90 | 9.60 | 0 | 21.30 | 1 | 4 |
| 214 | 118.85575 | 39.18650 | -20.55 | 9.92 | 1 | 21.66 | 1 | 1,2,4 |
| 217 | 119.25766 | 49.56720 | -19.72 | 9.56 | 0 | 20.86 | 0 | 4 |
| 218 | 119.90291 | 71.75280 | -18.74 | 9.45 | 0 | 21.09 | 1 | 4 |
| 231 | 122.36320 | 43.93480 | -20.43 | 9.54 | 0 | 21.33 | 1 | 1 |
| 232 | 122.56333 | 33.95620 | -21.80 | 10.69 | 0 | 22.47 | 0 | 4 |
| 248 | 126.05962 | 17.33200 | -21.26 | 10.40 | 0 | 22.60 | 0 | 4 |
| 250 | 126.51879 | 45.96830 | -19.22 | 9.16 | 0 | 20.67 | 0 | 1,2 |
| 251 | 126.89825 | 64.22820 | -21.21 | 9.97 | 0 | 21.84 | 0 | 4 |
| 252 | 126.57483 | 11.50310 | -20.99 | 10.11 | 1 | 21.61 | 1 | 4 |
| 265 | 129.42236 | 51.65290 | -16.86 | 8.12 | 0 | 19.60 | 1 | 4 |
| 273 | 129.78191 | 4.56770 | -21.35 | 10.81 | 0 | 22.40 | 0 | 4 |
| 285 | 132.29933 | 60.22110 | -19.82 | 8.64 | 0 | 19.95 | 1 | 4 |
| 287 | 132.59825 | 25.95400 | -20.72 | 9.96 | 0 | 22.39 | 0 | 3 |
| 296 | 135.81142 | 30.59110 | -20.39 | 9.63 | 0 | 21.26 | 0 | 4 |
| 298 | 136.49754 | 35.37730 | -20.78 | 10.01 | 0 | 21.36 | 1 | 4 |
| 309 | 137.58424 | 7.03750 | -21.13 | 9.51 | 0 | 20.89 | 0 | 4 |
| 312 | 137.75708 | 13.41400 | -21.51 | 10.24 | 0 | 21.95 | 0 | 4 |
| 324 | 140.50903 | 50.97580 | -21.42 | 9.46 | 0 | 21.42 | 0 | 1 |
| 325 | 140.65883 | 60.86540 | -20.48 | 9.80 | 0 | 21.43 | 1 | 4 |
| 332 | 141.66550 | 45.84720 | -19.88 | 9.57 | 0 | 21.02 | 0 | 4 |
| 335 | 141.97234 | 57.37590 | -20.45 | 9.48 | 0 | 20.90 | 0 | 4 |
| 338 | 142.05054 | 3.40790 | -19.35 | 8.78 | 1 | 20.80 | 1 | 4 |
| 340 | 142.53787 | 20.09000 | -20.90 | 9.64 | 0 | 21.00 | 0 | 4 |
| 346 | 143.65057 | 81.14530 | -20.52 | 9.61 | 0 | 21.21 | 1 | 4 |
| 349 | 143.96516 | 61.35310 | -21.00 | 11.71 | 0 | 23.71 | 0 | 1,2 |
| 359 | 145.15187 | 3.57690 | -21.58 | 9.87 | 0 | 21.62 | 0 | 4 |
| 393 | 150.96574 | 59.43620 | -18.71 | 9.45 | 0 | 20.81 | 0 | 4 |
| 400 | 152.08636 | 31.86300 | -22.04 | 9.76 | 0 | 21.22 | 0 | 4 |
| 401 | 152.13338 | -0.66580 | -20.92 | 9.70 | 0 | 21.29 | 1 | 1 |
| 405 | 153.46916 | 0.55080 | -19.98 | 9.45 | 0 | 21.27 | 1 | 4 |
| 410 | 155.60025 | 1.19860 | -20.90 | 10.10 | 0 | 21.92 | 0 | 2 |
| 423 | 157.87505 | 24.86940 | -21.61 | 10.12 | 0 | 21.76 | 0 | 4 |
| 446 | 163.10437 | 59.68580 | -20.75 | 10.07 | 0 | 21.59 | 0 | 4 |
| 455 | 165.31808 | 3.62850 | -19.97 | 9.40 | 0 | 20.48 | 0 | 4 |
| 459 | 166.21146 | 33.06560 | - | - | - | - | - | 4 |
| 488 | 173.92233 | 73.45180 | -21.21 | 10.27 | 1 | 22.72 | 0 | 3 |
| 499 | 176.93211 | 1.82610 | -21.12 | 9.76 | 0 | 21.53 | 1 | 1 |
| 504 | 177.89053 | 16.18510 | -20.01 | 9.70 | 0 | 21.38 | 0 | 4 |
| 508 | 178.18105 | 1.74080 | -20.64 | 10.00 | 0 | 21.85 | 0 | 2 |

| CIG | α (J2000) | δ (J2000) | Mb | $\log L_{FIR}$ (L_{\odot}) | cód. | $\log L_{1,4GHz}$ ($W Hz^{-1}$) | cód. | Método |
|-----|---------------------|---------------------|--------|-----------------------------------|------|--------------------------------------|------|--------|
| 515 | 179.65091 | 18.86320 | -20.44 | 9.90 | 0 | 21.49 | 0 | 4 |
| 522 | 183.91988 | 61.88960 | -19.82 | 9.91 | 0 | 21.52 | 0 | 4 |
| 524 | 184.39183 | 22.54040 | -15.58 | 7.39 | 0 | 18.81 | 1 | 4 |
| 546 | 190.34320 | 61.71170 | -21.37 | 10.37 | 0 | 21.79 | 1 | 4 |
| 547 | 190.66312 | 19.94520 | -18.26 | 8.75 | 0 | 20.03 | 1 | 4 |
| 548 | 190.72516 | 20.98980 | -20.39 | 9.28 | 1 | 21.30 | 1 | 4 |
| 551 | 191.50304 | 64.56990 | -18.67 | 8.46 | 1 | 20.39 | 1 | 4 |
| 558 | 193.93983 | 36.29340 | - | - | - | - | - | 4 |
| 559 | 194.18175 | 21.68280 | -19.68 | 9.04 | 0 | 20.34 | 0 | 1,2 |
| 568 | 196.06226 | 9.22380 | -21.43 | 10.25 | 0 | 21.80 | 0 | 4 |
| 571 | 196.35287 | 56.32350 | -19.24 | 8.93 | 0 | 21.39 | 0 | 3 |
| 582 | 200.82295 | -2.15110 | -20.40 | 9.74 | 1 | 21.69 | 1 | 4 |
| 591 | 203.01991 | 17.04880 | -20.59 | 9.28 | 1 | 21.70 | 0 | 3 |
| 592 | 203.10509 | 3.06130 | -19.60 | 9.88 | 0 | 21.32 | 1 | 1,4 |
| 604 | 209.06895 | 47.23530 | -19.92 | 9.20 | 0 | 20.53 | 0 | 1 |
| 628 | 216.04683 | 23.91310 | - | - | - | - | - | 4 |
| 641 | 219.88754 | 62.00290 | -20.28 | 9.65 | 0 | 21.30 | 1 | 4 |
| 645 | 221.45354 | 50.39400 | -19.67 | 9.44 | 0 | 21.13 | 0 | 4 |
| 651 | 222.43983 | 60.39950 | -18.63 | 8.57 | 0 | 20.37 | 1 | 4 |
| 652 | 223.03354 | -2.52990 | -18.88 | 9.51 | 0 | 21.07 | 0 | 4 |
| 663 | 227.29240 | 67.21430 | -6.53 | 3.23 | 1 | 15.93 | 0 | 3 |
| 669 | 230.23091 | -2.57800 | -19.29 | 9.53 | 0 | 21.08 | 0 | 4 |
| 671 | 230.38770 | 39.20110 | -20.50 | 10.06 | 0 | 21.90 | 0 | 1,2,4 |
| 673 | 230.48103 | 65.00600 | - | - | - | - | - | 4 |
| 678 | 232.01791 | 12.00330 | -18.56 | 9.60 | 0 | 20.90 | 1 | 4 |
| 691 | 234.40112 | 5.97340 | -18.03 | 9.04 | 0 | 20.03 | 1 | 4 |
| 692 | 233.94791 | 73.45060 | -20.99 | 10.32 | 0 | 22.67 | 0 | 1,2,4 |
| 708 | 237.08154 | 74.52550 | -20.55 | 9.81 | 0 | 21.62 | 1 | 4 |
| 712 | 238.55725 | 14.60190 | -19.89 | 9.33 | 0 | 20.74 | 0 | 4 |
| 715 | 239.29945 | -1.54100 | -22.44 | 10.76 | 0 | 22.48 | 0 | 4 |
| 716 | 239.36607 | 30.05960 | -21.02 | 9.83 | 0 | 21.62 | 1 | 4 |
| 719 | 239.78983 | 35.02970 | -20.79 | 10.35 | 0 | 22.03 | 0 | 1,2,4 |
| 725 | 242.27882 | 51.59700 | -20.68 | 10.27 | 0 | 22.10 | 0 | 2 |
| 734 | 244.33170 | 61.93910 | -19.68 | 8.56 | 1 | 21.05 | 0 | 3 |
| 736 | 245.45258 | -2.28410 | -20.27 | 9.54 | 0 | 20.27 | 0 | 4 |
| 745 | 247.45055 | 67.37840 | -20.20 | 9.73 | 0 | 21.39 | 1 | 1,2,4 |
| 747 | 248.01033 | 32.06090 | -21.54 | 10.66 | 0 | 22.41 | 0 | 4 |
| 772 | 251.74574 | 58.42310 | -21.06 | 9.85 | 0 | 21.26 | 0 | 4 |
| 778 | 254.31445 | 46.87410 | -20.60 | 10.16 | 0 | 21.69 | 0 | 4 |
| 780 | 254.84450 | 20.82980 | -21.59 | 10.07 | 1 | 21.90 | 1 | 4 |
| 783 | 256.04388 | 6.77460 | -21.78 | 10.02 | 0 | 21.65 | 1 | 4 |
| 787 | 256.58295 | 13.58640 | - | - | - | - | - | 4 |
| 795 | 258.53720 | 58.81840 | -20.82 | 9.73 | 0 | 21.52 | 1 | 1 |
| 804 | 260.64133 | 14.59750 | - | - | - | - | - | 4 |

| CIG | α (J2000) | δ (J2000) | Mb | $\log L_{FIR}$ (L_{\odot}) | cód. | $\log L_{1,4GHz}$ ($W Hz^{-1}$) | cód. | Método |
|------|---------------------|---------------------|--------|-----------------------------------|------|--------------------------------------|------|--------|
| 809 | 262.45575 | 23.32270 | -21.24 | 10.05 | 0 | 21.80 | 1 | 4 |
| 815 | 263.72974 | 20.59330 | -20.30 | 9.93 | 0 | 21.71 | 0 | 4 |
| 821 | 264.40167 | 43.52000 | - | - | - | - | - | 4 |
| 836 | 267.67178 | 39.94990 | -21.04 | 9.95 | 1 | 23.29 | 0 | 3 |
| 839 | 269.01508 | 49.02820 | -20.54 | 9.82 | 0 | 21.57 | 1 | 4 |
| 854 | 278.68912 | 47.03500 | -18.99 | 9.27 | 1 | 20.98 | 1 | 4 |
| 870 | 287.95126 | 83.90520 | -20.25 | 10.24 | 0 | 21.66 | 0 | 4 |
| 877 | 306.73260 | -2.27750 | -20.59 | 10.40 | 0 | 22.66 | 0 | 2,4 |
| 881 | 308.92224 | -0.00530 | -21.11 | 10.47 | 0 | 22.30 | 0 | 4 |
| 883 | 309.65857 | 1.73820 | -21.35 | 10.27 | 0 | 21.95 | 0 | 4 |
| 940 | 330.17261 | 10.55250 | -20.88 | 10.85 | 0 | 22.86 | 0 | 1,2 |
| 947 | 331.96826 | 31.35890 | -20.82 | 9.69 | 0 | 20.86 | 0 | 1 |
| 954 | 333.10867 | 27.20850 | -20.19 | 9.42 | 1 | 21.19 | 1 | 4 |
| 960 | 334.77603 | 24.59820 | -20.28 | 9.90 | 0 | 21.78 | 0 | 4 |
| 984 | 341.14413 | 3.64590 | -21.11 | 10.17 | 0 | 21.71 | 0 | 4 |
| 985 | 341.28604 | 6.43090 | -18.23 | 9.01 | 0 | 20.57 | 0 | 4 |
| 989 | 342.11594 | 9.45510 | -20.67 | 10.27 | 0 | 21.94 | 0 | 4 |
| 992 | 343.15958 | 6.09360 | -18.26 | 9.35 | 0 | 20.62 | 1 | 4 |
| 993 | 343.14426 | 24.73050 | -21.93 | 11.20 | 0 | 22.37 | 0 | 1,4 |
| 1004 | 346.23645 | 12.32240 | -21.11 | 10.26 | 0 | 21.93 | 0 | 1,2,4 |
| 1008 | 347.33453 | 0.75630 | -20.62 | 9.57 | 1 | 21.58 | 1 | 1,2 |
| 1011 | 348.71545 | 33.02290 | -19.66 | 9.49 | 0 | 20.99 | 1 | 4 |
| 1016 | 350.90466 | 25.19360 | -20.67 | 10.17 | 0 | 21.89 | 0 | 4 |
| 1023 | 352.91284 | 25.94530 | -21.06 | 9.92 | 0 | 21.75 | 0 | 1,2 |
| 1043 | 357.36786 | 33.14000 | -20.78 | 10.02 | 0 | 21.68 | 1 | 4 |
| 1045 | 358.83105 | 5.91710 | -20.62 | 8.78 | 1 | 21.92 | 0 | 3 |
| 1048 | 359.34995 | 30.99200 | -19.71 | 9.50 | 0 | 20.91 | 1 | 4 |
| 1050 | 359.63388 | 26.21480 | -17.65 | 8.66 | 1 | 20.56 | 1 | 4 |

¹ Campos:

- (1) Número de catálogo CIG
- (2) Ascensión recta (J2000)
- (3) Declinación (J2000)
- (4) Magnitud absoluta
- (5) Logaritmo decimal de la luminosidad FIR en (L_{\odot})
- (6) Código de detección: 0 para detección y 1 para límite superior
- (7) Logaritmo decimal de la luminosidad radio en ($W Hz^{-1}$)
- (8) Código de detección: 0 para detección y 1 para límite superior
- (9) Método de selección: 1 NED; 2 Véron-Cetty; 3 Exceso de radio; 4 color IRAS

Las galaxias para las que no hay datos de distancia aparecen con guiones en las magnitudes que la usan.

5. Conclusiones

En el estudio realizado se ha compilado un catálogo de galaxias candidatas a AGN dentro del catálogo de galaxias aisladas CIG. De esta manera se ha podido investigar la población de galaxias activas en una muestra completa de 1050 galaxias aisladas. Esta muestra servirá como base para futuros estudios que intenten esclarecer la relación entre la actividad nuclear y el entorno.

Las conclusiones del estudio que hemos realizado son las siguientes:

- Se ha realizado una búsqueda exhaustiva de la literatura, en NED y el catálogo Véron Cetty, encontrando 26 galaxias con actividad nuclear confirmada en la muestra CIG.
- Se han separado los candidatos a AGN "radio-loud" de la muestra usando los datos de radiocontinuo a 1,4 GHz (NVSS) y los datos IRAS para el infrarrojo lejano. Hemos comprobado que la relación radio-FIR es lineal.
- La población de AGN con exceso de radio en la muestra completa CIG es muy reducida. Tenemos un 1.1% de galaxias con exceso de radio en nuestra muestra completa ($n = 8$). Lo que es una tasa muy baja en comparación con otras muestras de galaxias en entornos más densos. Esto se debe a que las galaxias aisladas son más débiles en radiocontinuo en comparación con las de entornos más densos.
- La clasificación usando colores IRAS indica una tasa de más del 12% ($n=89$ para la muestra completa)(32% de las galaxias detectadas en ambas bandas IRAS) de galaxias con un índice espectral bajo, entre $S_{25\mu m}$ y $S_{60\mu m}$. Esto indica una temperatura más alta y una gran probabilidad de contener un AGN.
- El método de selección con colores IRAS se presenta como un método relativamente fiable para la selección de AGN ya que clasifica en la zona de candidatos a AGN a 2/3 de las galaxias activas de la literatura detectadas. Esto se corresponde con la tasa de acierto que cabe esperar para este método.
- Este estudio define una muestra de candidatos a AGN ($n=138$) de base para estudiar en detalle los mecanismos de actividad en galaxias aisladas en relación con el entorno como se describe a continuación para el trabajo futuro.
- Todos los datos de este catálogo van a estar disponibles para la comunidad científica en una base de datos pública del proyecto AMIGA en: <http://www.iaa.csic.es/AMIGA.html>

Por lo tanto el estudio de una muestra bien seleccionada de galaxias aisladas nos permite concluir que **el entorno es determinante para producir el fenómeno de actividad nuclear.**

6. Trabajo Futuro

Tras haber realizado una selección de los candidatos a AGN de la muestra completa de galaxias aisladas vamos a realizar los siguientes trabajos:

- *Determinación de la presencia de un núcleo compacto.* Como parte del trabajo se comprobará la presencia de un núcleo compacto en el survey FIRST (Faint Images of the Radio Sky at Twenty Centimeters; White et al. 1995) para nuestras galaxias. Este survey presenta una mejora en cuanto a resolución con respecto al NVSS, sin embargo su sensibilidad para objetos extensos es menor que la de éste. El flujo extendido de las galaxias se pierde rápidamente en las imágenes de FIRST. Las fuentes compactas puntuales lo suficientemente fuertes sí pueden ser observadas en FIRST. De esta manera si tenemos un núcleo de apariencia puntual que aparezca en FIRST para alguna de nuestras galaxias lo más seguro es que nos encontremos ante un AGN o un starburst.

Se ha realizado una propuesta de observación al radiointerferómetro Very Large Array (VLA) de Nuevo Mexico (EE.UU.) para observar las galaxias con mayor exceso de radio ($n=20$) y una muestra de control de galaxias sin exceso de radio ($n=20$). Se obtuvo el tiempo de observación. Las observaciones han sido realizadas, durante los meses de marzo y mayo de 2005, en configuración B con la que se obtiene una resolución de 0,7 segundos de arco a la longitud de onda elegida de 3,6 cm. A esta longitud de onda se consigue un RMS de 0,045 mJy en 10 minutos de tiempo de exposición.

- *Estudio de las relaciones entre otros parámetros de la muestra* como la morfología, el grado de aislamiento con respecto a las características de selección de AGNs, la relación radio-FIR y la presencia de un candidato a AGN.
- *Calibración del método de selección de AGNs por exceso de radio* Con las observaciones del VLA se podrá observar la presencia de un núcleo compacto que indicaría la presencia de un AGN. También se podrán ver en ciertos casos los chorros de partículas relativistas que salen del núcleo compacto. Esto es clave para estudiar la interacción de estos chorros con el medio interestelar y el papel que juegan en la retroalimentación del núcleo activo.
- *Estudio de la interacción del AGN y sus chorros con el ISM.* Se compararán las propiedades de los chorros encontrados en las galaxias anteriores con el gas molecular, observado a través de la línea de CO(1-0) a 115 GHz ya realizado dentro del proyecto AMIGA. Más adelante se realizarán observaciones en longitudes de onda milimétricas en el telescopio IRAM-30m del Veleta en Sierra Nevada y en el interferómetro del IRAM del Plateau de Bure (Francia) para obtener datos de las líneas de HCN y SiO que trazarán la física (choques, gas más denso, flujo de gas molecular, etc) de la interacción del AGN y sus chorros con el ISM.

Agradecimientos

JSM recibe una beca FPU de la Secretaría de Estado de Educación y Universidades. JSM está parcialmente financiado por el proyecto AYA 2002-03338 de la Dirección General de Investigación y el proyecto TIC114 de la Junta de Andalucía.

Este trabajo ha hecho uso de la NASA/IPAC Extragalactic Database (NED), operada por el Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology bajo contrato de la National Aeronautics and Space Administration.

Referencias

- [1] Antonucci, R. R. J., & Miller, J. S. 1985, ApJ, 297, 621
- [2] Baade, W., & Minkowski, R. 1954, ApJ, 119, 215
- [3] Becker, R. H., White, R. L., & Helfand, D. J. 1995, ApJ, 450, 559
- [4] Bertin, E., & Arnouts, S. 1996, A&AS, 117, 393
- [5] Blandford, R. D. & Rees, M. J. 1978, en "Pittsburgh Conference on BL Lac Objects" ed. A. M. Wolfe (Univ. of Pittsduirgh), p. 328
- [6] Boselli, A., Gavazzi, G., Donas, J., & Scodiggio, M. 2001, AJ, 121, 753
- [7] Boselli, A. 1994, A&A, 292, 1
- [8] Braine, J., & Combes, F. 1993, A&A, 269, 7
- [9] Bushouse, H. A. 1986, AJ, 91, 255
- [10] Bushouse, H. A. 1987, ApJ, 320, 49
- [11] Casoli, F., Dickey, J., Kazes, I., Boselli, A., Gavazzi, P., & Baumgardt, K. 1996, A&A, 309, 43
- [12] Cayatte, V., Kotanyi, C., Balkowski, C., & van Gorkom, J. H. 1994, AJ, 107, 1003
- [13] Chi, X., & Wolfendale, A. W. 1990, MNRAS, 245, 101
- [14] Colbert, J. W., Mulchaey, J. S., & Zabludoff, A. I. 2001, AJ, 121, 808
- [15] Combes, F., Prugniel, P., Rampazzo, R., & Sulentic, J. W. 1994, A&A, 281, 725
- [16] Condon, J. J., Anderson, M. L., & Helou, G. 1991, ApJ, 376, 95
- [17] Dahari, O. 1985, AJ, 90, 1772
- [18] de Grijp, M. H. K., Miley, G. K., Lub, J., & de Jong, T. 1985, Nature, 314, 240
- [19] de Grijp, M. H. K., Lub, J., & Miley, G. K. 1987, A&AS, 70, 95
- [20] de Grijp, M. H. K., Keel, W. C., Miley, G. K., Goudfrooij, P., & Lub, J. 1992, A&AS, 96, 389
- [21] Deharveng, J.-M., et al. 1994, A&A, 288, 413
- [22] Devereux, N. A., & Eales, S. A. 1989, ApJ, 340, 708
- [23] Dopita, M. A., Heisler, C., Lumsden, S., & Bailey, J. 1998, ApJ, 498, 570
- [24] Drake, C. L., McGregor, P. J., Dopita, M. A., & van Breugel, W. J. M. 2003, AJ, 126, 2237
- [25] Dultzin-Hacyan, D., Krongold, Y., Fuentes-Guridi, I., & Marziani, P. 1999, ApJ, 513, L111

- [26] Elvis, M., et al. 1994, *ApJS*, 95, 1
- [27] D. Espada, A. Bosma, L. Verdes-Montenegro, E. Athanassoula, S. Leon, J. Sulentic and M. S. Yun, arXiv:astro-ph/0506769.
- [28] Fath, E. A. 1909, *PASP*, 21, 138
- [29] Fitt, A. J., Alexander, P., & Cox, M. J. 1988, *MNRAS*, 233, 907
- [30] Fuentes-Williams, T., & Stocke, J. T. 1988, *AJ*, 96, 1235
- [31] Haynes, M. P., & Giovanelli, R. 1984, *AJ*, 89, 758
- [32] Heckman, T. M. 1983, *ApJ*, 268, 628
- [33] Helou, G., Soifer, B. T., & Rowan-Robinson, M. 1985, *ApJ*, 298, L7
- [34] Helou, G., Khan, I. R., Malek, L., & Boehmer, L. 1988, *ApJS*, 68, 151
- [35] Hooper, E. J., Impey, C. D., Foltz, C. B., & Hewett, P. C. 1995, *ApJ*, 445, 62
- [36] Huchra, J., & Thuan, T. X. 1977, *ApJ*, 216, 694
- [37] Huchtmeier, W. K. 1997, *A&A*, 325, 473
- [38] Hummel, E., van der Hulst, J. M., Kennicutt, R. C., & Keel, W. C. 1990, *A&A*, 236, 333
- [39] Hummel, E. 1980, *A&A*, 89, L1
- [40] Joseph, R. D., & Wright, G. S. 1985, *MNRAS*, 214, 87
- [41] Karachentseva, V. E. 1973, *Soobshcheniya Spetsial'noj Astrofizicheskoy Observatorii*, 8, 3
- [42] Karachentseva, V. E. 1980, *Soviet Astronomy*, 24, 665
- [43] Keel, W. C., de Grijp, M. H. K., & Miley, G. K. 1988, *A&A*, 203, 250
- [44] Kellermann, K. I., Sramek, R., Schmidt, M., Shaffer, D. B., & Green, R. 1989, *AJ*, 98, 1195
- [45] Kennicutt, R. C., & Kent, S. M. 1983, *AJ*, 88, 1094
- [46] Kennicutt, R. C. 1989, *ApJ*, 344, 685
- [47] Kennicutt, R. C. 1998, *ApJ*, 498, 541
- [48] Krongold, Y., Dultzin-Hacyan, D., Marziani, P., & de Diego, J. A. 2003, *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica*, 39, 225
- [49] Larson, R. B., & Tinsley, B. M. 1978, *ApJ*, 219, 46
- [50] Laurikainen, E., & Salo, H. 1995, *A&A*, 293, 683
- [51] Leon, S., & Verdes-Montenegro, L. 2003, *A&A*, 411, 391

- [52] Leon, S., et al. 2005, int. com.
- [53] Lequeux, J. 1971, A&A, 15, 42
- [54] Lisenfeld, U., Voelk, H. J., & Xu, C. 1996, A&A, 306, 677
- [55] Lisenfeld, U., Voelk, H. J., & Xu, C. 1996, A&A, 314, 745
- [56] Lisenfeld, U. et al. 2005 int. com.
- [57] Low, F. J., Cutri, R. M., Huchra, J. P., & Kleinmann, S. G. 1988, ApJ, 327, L41
- [58] Márquez, I., & Moles, M. 1999, A&A, 344, 421
- [59] Márquez, I., et al. 2000, A&A, 360, 431
- [60] MacKenty, J. W. 1989, ApJ, 343, 125
- [61] MacKenty, J. W. 1990, ApJS, 72, 231
- [62] Menon, T. K. 1991, ApJ, 372, 419
- [63] Menon, T. K. 1995, MNRAS, 274, 845
- [64] Moore, B., Katz, N., Lake, G., Dressler, A., & Oemler, A. 1996, Nature, 379, 613
- [65] Niklas, S., Klein, U., & Wielebinski, R. 1995, A&A, 293, 56
- [66] Niklas, S. 1997, A&A, 322, 29
- [67] Osterbrock, D. E. 1984, QJRAS, 25, 1
- [68] Perea, J., del Olmo, A., Verdes-Montenegro, L., & Yun, M. S. 1997, ApJ, 490, 166
- [69] Petrosian, A. R. 1982, Astrofizika, 18, 548
- [70] Rafanelli, P., Violato, M., & Baruffolo, A. 1995, AJ, 109, 1546
- [71] Reddy, N. A., & Yun, M. S. 2004, ApJ, 600, 695
- [72] Richards, G. T., et al. 2001, AJ, 122, 1151
- [73] Richter, O.-G., & Sancisi, R. 1994, A&A, 290, L9
- [74] Rowan-Robinson, M. 1977, ApJ, 213, 635
- [75] Sandage, A. 1965, ApJ, 141, 1560
- [76] Sanders, D. B., Soifer, B. T., Elias, J. H., Neugebauer, G., & Matthews, K. 1988, ApJ, 328, L35
- [77] Sarajedini, V. L., Green, R. F., Griffiths, R. E., & Ratnatunga, K. 1999, ApJS, 121, 417
- [78] Schmitt, J. H. M. M. 1985, ApJ, 293, 178

- [79] Seyfert, C. K. 1943, *ApJ*, 97, 28
- [80] Smith, E. P., & Kassim, N. E. 1993, *AJ*, 105, 46
- [81] Smith, F. G. *Nature*, 168, 555
- [82] Sofue, Y., Wakamatsu, K.-I., Taniguchi, Y., & Nakai, N. 1993, *PASJ*, 45, 43
- [83] Solomon, P. M., Downes, D., Radford, S. J. E., & Barrett, J. W. 1997, *ApJ*, 478, 144
- [84] Sopp, H. M., & Alexander, P. 1991, *MNRAS*, 251, 14P
- [85] Stocke, J. T., Tift, W. G., & Kaftan-Kassim, M. A. 1978, *AJ*, 83, 322
- [86] Struck, C. 1999, *Phys. Rep.*, 321, 1
- [87] Sulentic, J. W., & Arp, H. 1983, *AJ*, 88, 489
- [88] Sulentic, J. W. 1976, *ApJS*, 32, 171
- [89] Sulentic, J. W. et al. 2005, submitted to *A&A*
- [90] Véron-Cetty, M.-P., & Véron, P. 2003, *A&A*, 412, 399
- [91] van Gorkom, J. 1996, *ASP Conf. Ser. 106: The Minnesota Lectures on Extragalactic Neutral Hydrogen*, 106, 293
- [92] van Gorkom, J. 1996, *ASSL Vol. 206: Cold Gas at High Redshift*, 145
- [93] Varela, J., Moles, M., Márquez, I., Galletta, G., Masegosa, J., & Bettoni, D. 2004, *A&A*, 420, 873
- [94] Verley, S. et al. 2005 *int. com.*
- [95] Verdes-Montenegro, L., Yun, M. S., Perea, J., del Olmo, A., & Ho, P. T. P. 1998, *ApJ*, 497, 89
- [96] Verdes-Montenegro, L., Yun, M. S., Williams, B. A., Huchtmeier, W. K., Del Olmo, A., & Perea, J. 2001, *A&A*, 377, 812
- [97] Verdes-Montenegro, L., Sulentic, J., Lisenfeld, U., Leon, S., Espada, D., Garcia, E., Sabater, J., & Verley, S. 2005, *A&A*, 436, 443
- [98] Véron, P., 1985, in *Structure and Evolution of Active Galactic Nuclei*, publicado en Trieste April 1986, ed. by Giuricin et al., Reidel., 253 (1986)
- [99] Wada, K. 2004, *Coevolution of black holes and galaxies* / L. C. Ho (ed.) *Carnegie Observatories Astrophysics Series*, Vol. 1. Cambridge, Cambridge University Press, 2004, XXI+474 pp., ISBN 0-521-82449-4.
- [100] Williams, B. A., & Rood, H. J. 1987, *ApJS*, 63, 265
- [101] Xu, C., & Sulentic, J. W. 1991, *ApJ*, 374, 407
- [102] Xu, C., Lisenfeld, U., & Voelk, H. J. 1994, *A&A*, 285, 19

- [103] Xu, C., et al. 1998, *ApJ*, 508, 576
- [104] Xu, C., Lonsdale, C. J., Shupe, D. L., O'Linger, J., & Masci, F. 2001, *ApJ*, 562, 179
- [105] Young, J. S., & Scoville, N. Z. 1991, *ARA&A*, 29, 581
- [106] Young, J. S., Allen, L., Kenney, J. D. P., Lesser, A., & Rownd, B. 1996, *AJ*, 112, 1903
- [107] Yun, M. S., Reddy, N. A., & Condon, J. J. 2001, *ApJ*, 554, 803
- [108] Zasov, A. V., & Sulentic, J. W. 1994, *ApJ*, 430, 179
- [109] Zwicky, F., Herzog, E., & Wild, P. 1968, Pasadena: California Institute of Technology (CIT), 1961-1968,