

# CATÁLOGO DE VELOCIDADES RADIALES DE NEBULOSAS PLANETARIAS

Trabajo Especial de Licenciatura en  
Astronomía

**Autor:** Federico Ariel Cena

**Director:** Dr. Walter Weidmann

Facultad de Matemática, Astronomía, Física y  
Computación  
Universidad Nacional de Córdoba



Facultad de Matemática,  
Astronomía, Física y  
Computación



UNC  
Universidad  
Nacional  
de Córdoba

## Agradecimientos

A mi familia y a todos los hermanos y hermanas de otra madre que encontré durante este camino.

# Índice

Índice de Figuras	IV
Índice de Tablas	V
Resumen	VI
Abstract	VII
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Nebulosas Planetarias en el contexto galáctico	1
1.2. Catálogos en la literatura . . . . .	5
1.3. Observaciones . . . . .	8
1.3.1. Observatorios GEMINI . . . . .	8
1.3.2. Espectrógrafo GMOS . . . . .	9
<b>2. Metodología</b>	<b>11</b>
2.1. Reducción de datos . . . . .	11
2.1.1. Muestra inicial . . . . .	11
2.1.2. Proceso de reducción . . . . .	17
2.1.3. Muestra final . . . . .	18
2.2. Medición . . . . .	19
2.2.1. Catálogo de referencia . . . . .	19
2.2.2. Velocidades radiales observadas . . . . .	20
2.3. Cómputo de velocidades radiales heliocéntricas y LSR . . . . .	22
2.3.1. Definiciones . . . . .	22
2.3.2. Tarea rvcorr . . . . .	23
2.4. Errores . . . . .	23
2.4.1. El acto de medir . . . . .	24
2.4.2. Resolución del instrumental . . . . .	25
2.4.3. Relación SNR . . . . .	25

2.4.4.	Conversión de velocidades radiales . .	25
2.4.5.	Calibración por longitud de onda . .	26
2.4.6.	Incertidumbre del catálogo de líneas .	27
2.4.7.	Proceso de Reducción . . . . .	28
2.4.8.	Velocidad de expansión de la nebulosa	29
2.4.9.	Uso de coordenadas J2000 en rvcorrect	31
2.4.10.	Error final . . . . .	31
<b>3.</b>	<b>Resultados</b>	<b>34</b>
3.1.	Velocidades radiales heliocéntricas y LSR . .	34
3.2.	Velocidades de expansión . . . . .	40
<b>4.</b>	<b>Discusión</b>	<b>43</b>
4.1.	Distribución cinemática . . . . .	43
4.2.	NP con valores extremos en $V_r$ . . . . .	46
4.3.	Alto RMS . . . . .	47
4.4.	La peculiar nebulosa M 3-27 . . . . .	48
<b>5.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>50</b>

# Índice de Figuras

1.1.	El estadio de nebulosa planetaria en el contexto de la evolución estelar (Bennett et al., 2014) . . . . .	1
1.2.	Imágenes a color falso de GEMINI de una selección de Nebulosas Planetarias . . . . .	2
1.3.	Velocidad radial heliocéntrica vs longitud galáctica (Durand et al. (1998)) . . . . .	4
1.4.	Espectrogramas y espectros típicos de GMOS	10
2.1.	Metodología de uso para <i>splot</i> . . . . .	21
2.2.	Metodología de uso para <i>rvcorr</i> . . . . .	23
2.3.	Errores: Correlación entre $V_r$ y $\lambda$ para IC 5117	27
2.4.	Errores: NGC 6790 en distintos filtros de banda angosta (Osterbrock & Ferland, 2006)	29
2.5.	Errores: Longitud de onda vs Velocidad radial para la NP NGC 3918 (García-Rojas et al., 2015) . . . . .	31
2.6.	Errores: Error final de la muestra . . . . .	33
3.1.	Histograma de velocidades de expansión . . .	42
4.1.	Histograma de velocidades radiales heliocéntricas . . . . .	43
4.2.	Velocidad radial heliocéntrica vs longitud galáctica (Durand et al. (1998)) . . . . .	44
4.3.	Velocidad radial heliocéntrica vs longitud galáctica de la muestra . . . . .	45
4.4.	Velocidad radial heliocéntrica vs longitud galáctica con barras de error . . . . .	46

# Índice de Tablas

2.1.	Lista de objetos observados . . . . .	16
2.2.	Catálogo de referencia de longitudes de onda central . . . . .	20
2.3.	Errores: Acto de medición . . . . .	24
2.4.	Errores: Diferencias de longitudes de onda centrales entre los autores referenciados . . .	28
2.5.	Errores: Compilación de fuentes de error . .	32
3.1.	Velocidades radiales calculadas de la muestra	39
3.2.	Velocidades de expansión estimadas de la muestra . . . . .	41
4.1.	Objetos con valores extremos de velocidad radial . . . . .	47
4.2.	Objetos con RMS alto . . . . .	47
4.3.	Comparación entre velocidades heliocéntri- cas para objetos con alto RMS . . . . .	48
4.4.	Observaciones de PN M 3-27 . . . . .	49

# Resumen

Las Nebulosas Planetarias (NP) conforman una de las poblaciones galácticas más interesantes, no sólo por sus intrincadas morfologías, sino por constituir una invaluable fuente de información acerca de los últimos estadios evolutivos de una estrella de masa intermedia o baja. Sus marcadas líneas de emisión, producto de la ionización en la envoltura gaseosa que circunda a un objeto estelar compacto, permiten estudiar la cinemática galáctica a través de la velocidad radial.

Utilizando observaciones realizadas entre 2018 y 2022 en los Observatorios GEMINI, derivamos las velocidades radiales de 92 NP galácticas, de las cuales 36 son velocidades radiales originales. Además, presentamos estimaciones de velocidades de expansión para 49 de estos objetos.

# Abstract

Planetary Nebulae (PNe) are one of the most interesting galactic populations, not only for their intricate morphologies but also for constituting an invaluable source of information about the last evolutionary stages of low to intermediate mass stars. Their strong emission lines, product of nebular ionization, allow us to study with precision galaxy kinematics through the radial velocity.

Using observations conducted during 2018 to 2022 in the GEMINI Observatories, we derive new radial velocity measurements for 92 PNe, including 36 whose radial velocities had never been reported in the literature. We also present expansion velocity estimations for 49 of these objects.



# 1. Introducción

## 1.1. Nebulosas Planetarias en el contexto galáctico

Según la teoría de evolución estelar aceptada, las estrellas transcurren la mayor parte de su vida en la denominada “Secuencia principal”, donde la fusión de hidrógeno en el núcleo estelar es estable. El tiempo que transcurren en la secuencia principal es del orden de  $10^7$  a  $10^{10}$  años (Vassiliadis & Wood, 1993) para estrellas de masa baja a intermedia (entre  $0.8M_{\odot}$  y  $8.0M_{\odot}$ , Maciel et al., 2009). Una vez fusionada la mayor parte del hidrógeno disponible en helio, la estrella comienza un período de inestabilidad caracterizado por variaciones de luminosidad y tamaño. Al cabo de este período, la estrella comienza a perder su equilibrio entre auto-gravedad y presión gaseosa resultando en el desprendimiento de las capas gaseosas exteriores (Figura 1.1). Este proceso de expansión de las capas exteriores tiene una duración estimada de  $10^4$  años donde el gas alcanza velocidades del orden de 20 km/s (Schneider et al., 1983). Este estadio evolutivo se conoce como “Nebulosa Planetaria” (NP).

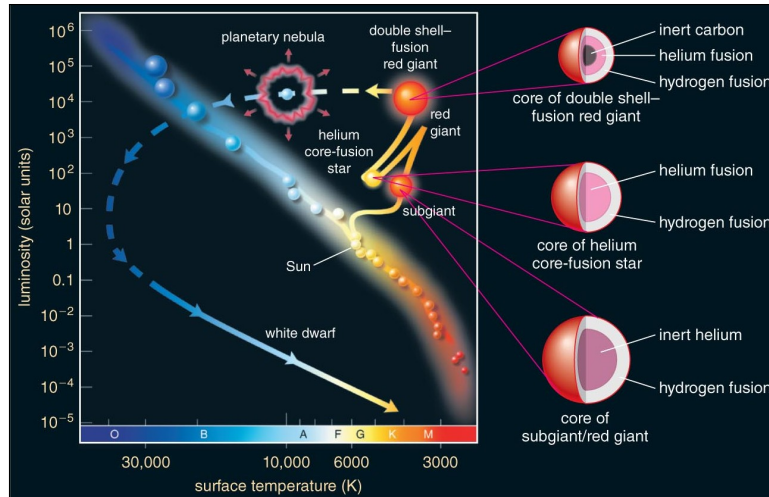


Figura 1.1: Proceso evolutivo de una estrella de masa baja a intermedia descrito en un diagrama Hertzsprung-Russell. En el mismo se observa la fase evolutiva de NP. Figura recopilada del libro “The Cosmic Perspective” (Bennett et al., 2014).

Las morfologías que estos objetos pueden adquirir son diversas y llamativas (Figura 1.2), sugiriendo que no existe un solo mecanismo de eyección y que su dinámica interna puede ser increíblemente compleja.

La primera NP en ser descubierta fue la nebulosa “Dumbbell” (M-27) por Charles Messier en julio de 1764 (Kwok, 2000) originalmente confundida con un objeto extragaláctico. La naturaleza de estos objetos no sería discernida hasta el advenimiento de las primeras observaciones espectroscópicas a mitad del siglo XIX, de la mano de William Huggins (Kwok, 2000). Exceptuando las NP clásicas y brillantes que son fácilmente observables debido a sus tamaños angulares, la gran mayoría de las NP son descubiertas por estudios espectrométricos o sondeos fotométricos de banda angosta centrados en las líneas de mayor emisión.



Figura 1.2: Imágenes a color falso de algunas NP notables. Crédito: GEMINI OBSERVATORY (NSF/NOIRLAB). **Arriba-izquierda:** PN M2-53 (GEMINI-NORTE). **Arriba-derecha:** NGC 246 (GEMINI-SUR). **Abajo-izquierda:** NGC 5189 (GEMINI-SUR). **Abajo-derecha:** SH 2-71 (GEMINI-NORTE).

Puesto que el tiempo de vida de las NP es muy corto en escalas

cósmicas, estos objetos no son muy numerosos. Se estima una población de 23000 NP en el disco galáctico sumadas a otras 2000 en el centro de nuestra Galaxia (Zijlstra & Pottasch, 1991). Al día de hoy hay unas 4000 NP catalogadas en la base de datos HASH<sup>1</sup> (Parker et al., 2016).

Las NP son objetos de interés por diversos motivos. En particular, podemos nombrar los siguientes:

- Contribuyen de forma significativa al enriquecimiento del medio interestelar al inyectar material en forma de gas y polvo.
- El cálculo de las abundancias químicas en NP ayuda a restringir la composición química de la estrella original, permitiendo que se pueda inferir acerca de los procesos de nucleosíntesis estelares.
- Sus marcadas líneas de emisión nebulares ayudan a inferir acerca del sistema dinámico al que se hallan sujetas. Debido al ensanchamiento propio de las líneas de absorción estelares, las velocidades radiales ( $V_r$ ) calculadas mediante líneas de emisión son, en general, notablemente más precisas.

La emisión de estos objetos se debe a la estrella (o estrellas) central, aquella que inyecta energía en forma de radiación al medio gaseoso que la circunda. Existen dos mecanismos principales de formación de líneas nebulares: Recombinación radiativa y desexcitación colisional.

Los electrones libres, producto de la fotoionización causada por la estrella central, se recombinan con los iones disponibles transformando la energía cinética en exceso de estos electrones en radiación. Este mecanismo de recombinación es aquel que da origen a las líneas permitidas observadas en NP como la serie de Balmer. La desexcitación colisional, por su lado, involucra la interacción de electrones libres con un electrón ligado al átomo. El choque entre estos produce una excitación colisional en el electrón ligado aumentando su energía. En condiciones como las que se observan en las NP, con densidades extremadamente bajas del orden 100 a  $10^4$  partículas por  $\text{cm}^3$ , la desexcitación natural de este electrón ligado se produce antes que el mismo vuelva a interactuar con otro electrón libre, emitiendo radiación. Debido a la imposibilidad de replicar estas condiciones en vacíos producidos en la Tierra, a estas líneas de emisión se las denomina “prohibidas”. Las líneas prohibidas son de suma importancia en NP e incluyen emisión de iones como OIII, NII y SII.

La presencia de múltiples elementos químicos tanto en la estrella central como en la nebulosa, da origen a numerosas líneas de emisión

---

<sup>1</sup><http://202.189.117.101:8999/gpne/index.php>

observables en todo el espectro. Particularmente, a nosotros nos interesan las líneas de emisión en el rango visible, las más intensas son:

- Serie de Balmer:  $H\alpha(6563\text{\AA})$ ,  $H\beta(4861\text{\AA})$ ,  $H\gamma(4341\text{\AA})$  &  $H\delta(4102\text{\AA})$
- [OIII](4959 $\text{\AA}$  & 5007 $\text{\AA}$ )
- [NII](6548 $\text{\AA}$  & 6584 $\text{\AA}$ )
- [SII](6717 $\text{\AA}$  & 6731 $\text{\AA}$ )

En particular, esta precisión para obtener parámetros cinemáticos contribuyó a que las NP se convirtieran en objetos predilectos a la hora de estudiar la cinemática de nuestra Galaxia (Maciel & Dutra, 1993; Hui, 1993) e incluso de otros sistemas galácticos (Hui, 1993).

Durand et al. (1998) compilaron todos los datos disponibles para la época y examinaron las estructuras cinemáticas de esta población en nuestra Galaxia (Figura 1.3). Nótese la concentración de objetos hacia el centro y el ecuador galáctico, tendencia que sería aún más notoria de no ser por la extinción interestelar que atenúa la luz de las NP más distantes.

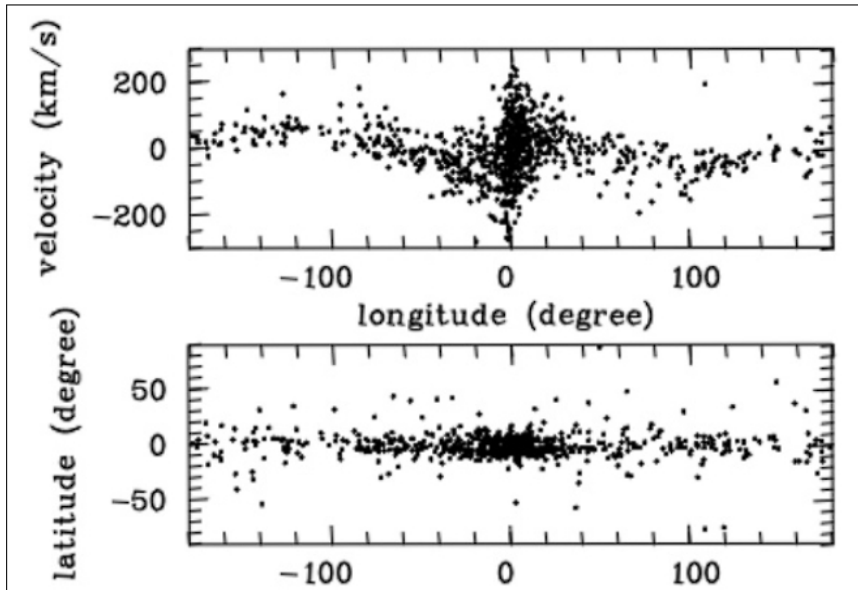


Figura 1.3: **Arriba:** Velocidad radial heliocéntrica vs longitud galáctica. Nótese la simetría en forma de S de la distribución. **Abajo:** Latitud vs longitud galáctica. Durand et al. (1998).

Se observa una dispersión importante en cuanto a las velocidades radiales, pero con una particular morfología. Una tendencia en  $l \approx 90^\circ$

a velocidades negativas y la tendencia opuesta en  $l \approx -90^\circ$ . Estas características indican que las nebulosas planetarias son objetos de “alta velocidad”, es decir, que pertenecen a un sistema con una velocidad rotacional respecto del centro galáctico menor que la del Sistema Local de Referencia, que incluye al Sol; por ende, parecen estar en movimiento respecto de nuestro sistema solar. Esta dispersión es aún más notable cerca del centro galáctico. Cabe destacar que la estadística se encuentra incompleta, ya que solo contempla objetos de la vecindad solar. Esto es debido a la ya mencionada extinción interestelar.

En el presente trabajo aportaremos nuevos datos de velocidades radiales ( $V_r$ ). Ya sea la determinación de  $V_r$  para objetos que no contaban con este parámetro determinado, como así también  $V_r$  con una menor incerteza para otros objetos.

## 1.2. Catálogos en la literatura

Son pocos los catálogos de velocidades radiales de NP en la literatura y no se realizaron esfuerzos en compilar los datos disponibles hasta Schneider et al. (1983). A partir de ese entonces, se despertó un interés por medir este parámetro para realizar estudios cinemáticos (Schneider & Terzian, 1983; Kinman et al., 1988). La mayoría de estos catálogos se realizaron durante la década de 1990. Cabe aclarar, además, que si bien la espectroscopía es, en general, el común denominador en estos trabajos, los instrumentos y técnicas utilizadas no siempre fueron los mismos:

- *Meatheringham et al. (1988)*: Presentó velocidades radiales y de expansión para 64 NP galácticas pertenecientes al hemisferio sur. El instrumental utilizado fue el telescopio de 1-m del Siding Spring Observatory (Australia) junto con un espectrógrafo Echelle de 79 líneas/mm con un dispersor cruzado de 316 líneas/mm, obteniendo una dispersión de 5 Å/mm.
- *Kohoutek & Pauls (1995)*: Reportó velocidades radiales para 76 NP en la dirección del centro galáctico. Los espectros fueron obtenidos utilizando, mayormente, el telescopio de 1,5 m de la ESO en Chile (La Silla, Chile) junto con un espectrógrafo de dispersión de 45-70 Å/mm. Una pequeña selección de los mismos fueron observados con el telescopio 2,2-m del Centro Germano-Español de Astronomía (Calar Alto, España) con un espectrógrafo de dispersión de 100 Å/mm.
- *Beaulieu (1996)*: Observó NP en la sección sur del centro galáctico utilizando el telescopio de 1,8 m del Mount Stromlo Observatory

(Australia) con un espectrógrafo usando una red de dispersión de 600 líneas/mm, CCD como detector y obteniendo una dispersión de 1 Å/px. Se re-determinaron velocidades para 317 NP y aportaron velocidades radiales originales para 56 NP.

- *Dopita & Hua (1997)*: Agregó nuevas mediciones de velocidad radial para 52 NP galácticas del hemisferio sur. Usó el Double Beam Spectrograph de 1200 líneas/mm del Telescopio 2,3 m del SSO (Australia), obteniendo una dispersión de 0,5 Å/mm.
- *Zijlstra et al. (1997)*: Presentó velocidades radiales para 71 NP hacia la dirección del centro galáctico utilizando observaciones de ranura larga con el telescopio de 1,4 m de la ESO. Las resoluciones que lograron alcanzar fueron de 30000 ( $\approx 6km/s$ ) en el azul y 60000 en la parte roja del espectro visible.
- *Manick et al. (2015)*: Reportó velocidades radiales para 6 NP que contienen estrellas Wolf-Rayet, utilizando principalmente líneas de la serie de Balmer. Se utilizó espectroscopía de ranura larga con el telescopio 1.9 m de SAAO (Sudáfrica) con redes de 1200 y 600 líneas/mm, alcanzando dispersiones de 0,49 y 1,00 Å/px respectivamente.
- *Ali et al. (2016)*: Un estudio completo de cuatro nebulosas planetarias (incluyendo mediciones originales de velocidad radial) del hemisferio sur. Los datos fueron obtenidos mediante espectroscopía IFU, usando el WiFeS del telescopio ANU 2,3 m del Side Spring Observatory (Australia), capaz de obtener una resolución  $R = 7000$ .
- *González-Santamaría et al. (2019)*: Recopiló datos para 211 NP incluyendo velocidades radiales.

A continuación, mencionamos aquellos trabajos que nos fueron de utilidad para comparar las velocidades radiales obtenidas para los objetos de nuestra muestra.

- **Wouterloot & Brand (1989)**: Obtuvieron la velocidad radial de 1302 fuentes de IRAS utilizando líneas de emisión del CO, de estas fuentes, 2 son NP y una de ellas fue observada en nuestro catálogo. Las observaciones se realizaron con los radio-telescopios SEST de 15 m (La Silla, Chile) y IRAM de 30-m (Pico Veleta, España).

- **Kraan-Korteweg et al. (1994)**: Realizaron estudios espectroscópicos de diversos objetos galácticos, entre ellos algunas NP presentes en nuestra muestra. Los autores usaron el telescopio de 1,9 m del Observatorio Astronómico de Sudáfrica. Este mismo telescopio sería utilizado años más tarde por Fairall et al. (1998) en otro estudio espectroscópico que terminaría confirmando un objeto como NP: WRAY 17-40.
- **Durand et al. (1998)**: Reconocido como el primer gran catálogo de velocidades radiales exclusivamente para NP. Incluye una compilación de 850 NP, de las cuales 338 tienen nuevas mediciones basadas en observaciones utilizando los telescopios de 1,42 m y 1,52 m de la ESO entre 1983 y 1995. Las nuevas velocidades radiales de este trabajo se dividen en 3 submuestras con procedimientos de observación distintos: *Alta resolución*: 117 objetos observados con el espectrógrafo Echelle CES en el telescopio de 1,42-m CAT, utilizando un CCD de 2048×2048 y consiguiendo resoluciones  $R \approx 30000 - 60000$ . *Resolución media*: 130 objetos utilizando el espectrógrafo Boller & Chivens en el telescopio de 1,52 m junto con un CCD de 2048×2048, alcanzando resolución  $R \approx 1500$ . *Baja resolución*: 247 objetos observados nuevamente con el espectrógrafo Boller & Chivens del telescopio de 1,52-m, esta vez utilizando un detector IDS hasta 1987 y un CCD de 512×1024 a partir de esa fecha. Este trabajo es el que mayormente hemos usado para comparar nuestras mediciones.
- **Karachentsev et al. (2004)**: Presentó una recopilación de objetos galácticos cercanos con parámetros como velocidad radial, distancia, diámetro angular y flujo integrado en la banda B. Un objeto de nuestra muestra, NGC 2242, fue desmentido como objeto extragaláctico e identificado como una NP. Las velocidades radiales de esta recopilación fueron obtenidas de diversas fuentes. En particular, la velocidad radial de NGC 2242 fue extraída de la base de datos NED<sup>2</sup> de la NASA.
- **Peña et al. (2013)**: Un reducido catálogo de 78 objetos que solo contempla NP con núcleos Wolf-Rayet. Fue utilizado tanto el telescopio 2,1 m del Observatorio Astronómico Nacional San Pedro Mártir (OAN-SPM) en México y el telescopio 6,5 m del Observatorio Las Campanas (LCO) en Chile. En ambos casos se usó espectroscopía Echelle. Las resoluciones alcanzadas para las observaciones en el OAN-SPM fueron de 0,2-0,3 Å/px, mientras

---

<sup>2</sup><https://ned.ipac.caltech.edu/>

que las alcanzadas en el LCO fueron de 0,17-0,23 Å/px.

- El Data Release 2 de la misión GAIA (Gaia Collaboration et al., 2016, 2018) de la ESA. Si bien no es un catálogo de velocidades radiales per se, pudimos encontrar un objeto de nuestro catálogo en el mismo.

### 1.3. Observaciones

Las observaciones de nuestra muestra para el presente trabajo fueron llevadas a cabo durante los años 2018 a 2022 por el Dr. Walter Weidmann haciendo uso del denominado tiempo “*poor weather*” (PW) de los observatorios gemelos GEMINI<sup>3</sup>. La modalidad PW hace uso del tiempo de observación del telescopio cuando las condiciones climáticas son pobres pero usables. Esto incluye un porcentaje de cobertura del cielo por nubes mayor al 70% y sin restricciones en lo que respecta a la calidad de imagen (seeing) ni al contenido de vapor de agua en la atmósfera.

Se observaron 98 objetos, 55 en GEMINI Norte y 43 en GEMINI Sur. Estas observaciones comprenden un total de 12 programas, cada uno con una duración aproximada de 3 a 4 meses. Cada objeto posee al menos un espectrograma, al menos un FLAT (de lámpara) y al menos una lámpara de comparación CuAr.

Los BIAS en GEMINI son obtenidos por programa de observación y sus fechas pueden corresponder o no a las fechas de observación de objetos dentro del mismo programa. Debido a la estabilidad de los CCD utilizados, la contribución del BIAS a la relación señal/ruido (SNR) se mantiene notablemente constante durante los períodos de observación.

Los FLATS disponibles varían según el observatorio. En GEMINI Norte es costumbre obtener un flat antes y después de la observación a diferencia de GEMINI Sur con un único flat disponible por objeto.

En general y salvo para una selección pequeña de objetos, sólo hubo disponible una sola lámpara de comparación CuAr para cada objeto.

#### 1.3.1. Observatorios GEMINI

GEMINI es un observatorio operado por la NSF y cuyo consorcio involucra EEUU, Canadá, Brasil, Corea del Sur, Chile y Argentina. Los telescopios disponibles son los telescopios gemelos Ritchey-Chretien Cassegrain de 8,1 m, ubicados en Maunakea, Hawai'i y Cerro Pachón, Chile. La multitud de periféricos disponibles facilitan la utilización de los instrumentos para múltiples fines científicos.

<sup>3</sup><https://www.gemini.edu/instrumentation/current-instruments>



Estos periféricos incluyen:

- *GMOS*: Espectrógrafo común tanto para GEMINI Norte como Sur. Dispone de redes de difracción de 150 hasta 1200 líneas/mm. Los modos de uso incluyen espectroscopía de ranura larga, de campo integral IFU y multi-objeto. Nosotros utilizamos el modo de ranura larga.
- *NIRI*: Generador de imágenes en 1-5  $\mu$ , el principal para observaciones en NIR (GEMINI Norte).
- *NIFS*: Espectrógrafo IFU para NIR, 1-2,5  $\mu$  (GEMINI Norte).
- *GNIRS*: Espectrógrafo con modos de ranura larga en 1-5  $\mu$  y dispersión cruzada en 0,9-2,5  $\mu$  (GEMINI Norte).
- *GSAOI*: Generador de imágenes para uso con sistemas de óptica adaptativa (GEMINI Sur).
- *FLAMINGOS*: Espectrógrafo con modos multi-objeto y ranura larga en 0,9-2,5  $\mu$ , también generador de imágenes de campo extenso en la región espectral mencionada.

### 1.3.2. Espectrógrafo GMOS

El periférico utilizado en las observaciones fue GMOS en su modalidad de ranura larga<sup>4</sup>. El espectrógrafo de GMOS cuenta con un ensamble de 3 CCD Hanamatsu de 2048  $\times$  4176 píxeles dispuestos en fila con huecos (Figura 1.4) entre los mismos de 4,88" (61 píxeles en modo sin binnear) y 5,4" (67 píxeles en modo sin binnear) para GMOS Sur y Norte respectivamente. La eficiencia cuántica de estos CCD está diseñada de forma que el detector central tenga un pico de eficiencia en 4500-6000 Å y los CCD adyacentes en longitudes de onda <4500 Å y >6000 Å respectivamente. En todos los programas se usó un *binneado* 2 $\times$ 2.

La red de dispersión utilizada fue la red B600+ G5307 en GEMINI Norte y B600+ G5323 en GEMINI Sur. Ambas comparten características similares listadas a continuación:

- 600 líneas/mm.
- Longitud de onda de *blaze* en 4610 Å.
- Resolución máxima en la longitud de onda de *blaze* de 1688.

---

<sup>4</sup><https://www.gemini.edu/instrumentation/gmos/components#GNHam>

- Dispersión de  $0,5 \text{ \AA}/\text{px}$ , reducida a  $1,0 \text{ \AA}/\text{px}$  con nuestra elección de binneado.

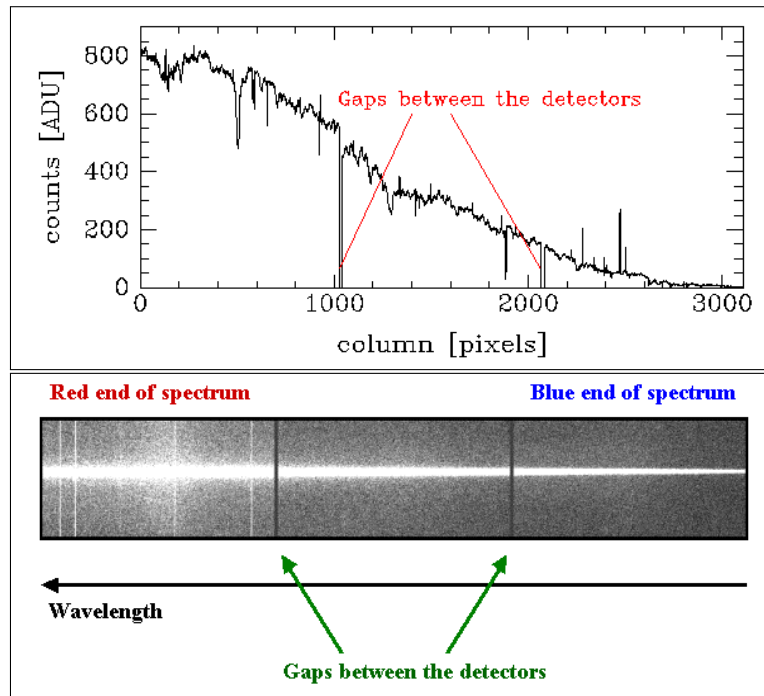


Figura 1.4: Espectrograma y espectros típicos que produce GMOS. Cortesía de GEMINI Observatory.

La ranura utilizada fue la de  $1,5''$  de ancho por  $330''$  de largo, cuyo posicionamiento se buscó que coincidiera con el ángulo paraláctico del objeto observado. El rango de cobertura espectral alcanzado fue de  $3500\text{-}6500 \text{ \AA}$  para algunos objetos y  $4000\text{-}7000 \text{ \AA}$  para otros, con longitudes centrales de  $4950 \text{ \AA}$  o  $5450 \text{ \AA}$  respectivamente.

## **2. Metodología**

### **2.1. Reducción de datos**

#### **2.1.1. Muestra inicial**

La selección de la muestra se realizó con el fin de la clasificación espectral de la estrella central de NP. Por ende, el criterio de selección fue que los objetos no tuvieran su estrella central clasificada o que su clasificación fuese ambigua. Además, se buscó que la estrella central fuera lo suficientemente brillante para ser observada con el instrumental de GEMINI. Estos datos fueron aprovechados para obtener la Vr. Las observaciones comprenden datos de 98 objetos (Tabla 2.1), 54 pertenecientes al hemisferio norte y 45 al hemisferio sur. Noventa y dos de estos objetos son nebulosas planetarias confirmadas, aproximadamente el 94 % de la muestra. El único objeto observado en dos programas distintos fue la NP M 3-27.

PROGRAMA	PN G	NOMBRE	$n \times t_{exp}$ [s]	ESTADO
GS-2021A-Q-407	000.7+08.0	MPA J1717-2356	4×1100	T
GS-2019A-Q-405	002.1-02.2	M 3-20	3×1100	T
GS-2020A-Q-406	008.2+06.8	SaSt 2-15	4×900	T
GS-2021A-Q-407	011.5+03.7	PTB 15	2×1100	T
GS-2021A-Q-407	013.3+32.7	Sn 1	4×700	T
GN-2019A-Q-405	037.8-06.3	NGC 6790	3×1100	T
GN-2020A-Q-402	038.4-03.3	K 4-19	4×900	T
GN-2020A-Q-402	042.9-06.9	NGC 6807	4×900	T
GN-2020A-Q-402	043.1+03.8	M 1-65	4×900	T
GN-2019A-Q-405	043.3+11.6	M 3-27	3×1100	T
GN-2020B-Q-403	043.3+11.6	M 3-27	4×1200	T
GN-2020B-Q-403	044.3+10.4	We 3-1	3×1100	T
GN-2020B-Q-403	045.7-04.5	NGC 6804	5×900	T
GN-2020A-Q-402	046.4-04.1	NGC 6803	4×900	T
GN-2020A-Q-402	047.1+04.1	K 3-21	5×900	T
GN-2019A-Q-405	052.2-04.0	M 1-74	4×1100	T
GN-2020A-Q-402	054.4-02.5	M 1-72	4×900	T
GN-2020A-Q-402	059.0-01.7	Hen 1-3	5×900	T
GN-2019A-Q-405	060.1-07.7	NGC 6886	4×1100	T
GN-2020A-Q-402	069.4-02.6	NGC 6894	5×900	T
GN-2020A-Q-402	082.5+11.3	NGC 6833	3×900	T
GN-2019A-Q-405	089.3-02.2	M 1-77	2×450	T
GN-2018B-Q-405	089.8-05.1	IC 5117	5×1200	T
GN-2020A-Q-402	093.4+05.4	NGC 7008	4×900	T

PROGRAMA	PN G	NOMBRE	$n \times t_{exp}$ [s]	ESTADO
GN-2019A-Q-405	095.2+00.7	K 3-62	4×1100	T
GN-2020B-Q-403	098.1+02.4	K 3-63	4×1200	T
GN-2018B-Q-405	103.7+00.4	M 2-52	3×900	T
GN-2018B-Q-405	104.4-01.6	M 2-53	3×900	T
GN-2020A-Q-402	104.8-06.7	M 2-54	3×900	Objeto de Transición
GN-2020B-Q-403	107.6-13.3	Vy 2-3	4×1200	T
GN-2020B-Q-403	107.8+02.3	NGC 7354	5×1200	T
GN-2019B-Q-402	112.9-10.2	A 84	5×900	T
GN-2020B-Q-403	114.0-04.6	A 82	4×1200	T
GN-2019B-Q-402	118.0-08.6	Vy 1-1	3×900	T
GN-2019B-Q-402	126.6+01.3	Príncipe de Asturias	3×900	T
GN-2021B-Q-402	127.6-01.1	(1)	5×1100	T
GN-2021B-Q-402	129.6+03.4	(2)	5×1100	T
GN-2021B-Q-402	130.3-11.7	M 1-1	5×1100	T
GN-2021B-Q-402	131.5+02.6	A 3	5×1100	T
GN-2018B-Q-405	138.8+02.8	IC 289	4×900	T
GN-2019B-Q-402	147.4-02.3	M 1-4	5×900	T
GN-2021B-Q-402	153.7+22.8	A 16	4×1100	T
GN-2021B-Q-402	157.1+04.4	(3)	4×1100	T
GN-2018B-Q-405	170.3+15.8	NGC 2242	3×900	T
GN-2019B-Q-417	171.3-25.8	Ba 1	5×920	T
GN-2021B-Q-402	173.7-05.8	K 2-1	4×1100	T
GN-2020B-Q-403	174.2-14.6	H 3-29	5×1200	T
GN-2019B-Q-402	183.0+00.0	IRAS 05495+2620	4×900	T

PROGRAMA	PN G	NOMBRE	$n \times t_{exp}$ [s]	ESTADO
GN-2019B-Q-417	189.8+07.7	M 1-7	5×900	T
GN-2019B-Q-402	194.2+02.5	J 900	3×900	T
GN-2021B-Q-402	195.4-04.0	(4)	5×1100	Candidato
GN-2019B-Q-402	196.6-10.9	NGC 2022	4×900	T
GN-2021B-Q-402	197.0+05.8	KLSS 1-6	5×1100	T
GN-2018B-Q-405	204.1+04.7	K 2-2	2×900	ISM Ionizado
GN-2021B-Q-402	204.3-01.6	(5)	5×1077	T
GN-2019B-Q-402	208.9-07.8	TaWe 1	3×900	T
GN-2019B-Q-402	212.6-00.0	PHR J0650+0013	4×900	T
GN-2018B-Q-405	214.9+07.8	A 20	4×1200	T
GS-2019B-Q-407	215.7-03.9	BMP J0642-0417	3×900	T
GN-2018B-Q-405	216.0+07.4	PHR 0723+0036	6×900	T
GN-2019B-Q-402	217.1+14.7	A 24	5×900	T
GS-2019B-Q-407	217.4+02.0	St 3-1	4×900	T
GN-2018B-Q-405	219.1+31.2	A 31	3×1000	T
GS-2019B-Q-407	225.5-02.5	MPA J0705-1224	4×900	Candidato
GS-2021B-Q-403	226.4-03.7	PB 1	6×1100	T
GS-2019B-Q-407	232.8-04.7	M 1-11	3×900	T
GS-2019B-Q-407	233.5-16.3	A 15	4×900	T
GS-2021A-Q-407	234.8+02.4	NGC 2440	4×450	T
GS-2021B-Q-403	235.3-03.9	M 1-12	3×1000	T
GS-2019B-Q-407	240.3+07.0	Y-C 2-5	4×900	T
GS-2021B-Q-403	240.8-19.6	KLSS 1-9	-	Nebulosa de Reflexión
GS-2019B-Q-407	241.0+02.3	M 3-4	4×900	T

PROGRAMA	PN G	NOMBRE	$n \times t_{exp}$ [s]	ESTADO
GS-2019B-Q-407	245.4+01.6	M 3-5	4×900	T
GS-2021A-Q-407	249.0+06.9	Hen 3-172	3×300	Candidato a SySt*
GS-2019B-Q-407	261.9+08.5	NGC 2818	6×900	T
GS-2019B-Q-407	263.0-05.5	PB 2	4×900	T
GS-2021B-Q-403	264.1-08.1	WRAY 16-16	5×1100	T
GS-2021B-Q-403	270.1+24.8	K 1-28	7×1100	T
GS-2019B-Q-407	275.0-04.1	PB 4	4×900	T
GS-2021B-Q-403	275.7-04.9	PHR J0914-5555	5×1100	T
GS-2021A-Q-407	276.1-11.9	MPA J0835-6039	4×1100	Candidato
GS-2021B-Q-403	277.1+03.3	MeWe 2-2	4×1100	T
GS-2021B-Q-403	286.2-06.9	WRAY 17-40	6×1100	T
GS-2019B-Q-407	291.3-26.2	Vo 1	4×900	Objeto de Transición
GS-2019A-Q-405	293.6+10.9	BIDz 1	3×1100	T
GS-2021B-Q-403	305.3+03.0	WRAY 17-58	6×1100	Candidato
GS-2019A-Q-405	308.4+00.4	WeKg 2	3×1100	T
GS-2019A-Q-405	308.6-12.2	He 2-105	3×1100	T
GS-2021B-Q-403	310.6+01.4	WeKg 3	4×1100	T
GS-2019A-Q-405	320.1-09.6	He 2-138	3×200	T
GS-2019A-Q-405	324.1+09.0	ESO 223-10	1×1100	T
GS-2021A-Q-407	327.8+10.0	NGC 5882	4×400	T
GS-2019A-Q-405	329.5-02.2	WRAY 17-75	3×1100	T
GS-2020A-Q-406	334.3-09.3	IC 4642	4×900	T
GS-2021A-Q-407	336.9+08.3	StWr 4-10	4×600	T
GS-2021A-Q-407	341.5-09.1	WRAY 16-290	4×900	T

PROGRAMA	PN G	NOMBRE	$n \times t_{exp}$ [s]	ESTADO
GS-2021A-Q-407	352.9-07.5	Fg 3	$3 \times 600$	T
GS-2019A-Q-405	356.2-04.4	Cn 2-1	$3 \times 1100$	T
GS-2019A-Q-405	357.6+01.7	H 1-23	$1 \times 900$	T

Tabla 2.1: Lista de objetos observados junto con programa correspondiente, PN G, nombre, número de espectros junto con su respectivo tiempo de integración y estado de confirmación de NP según la base de datos HASH. Los nombres completos de los objetos IPHASX son: (1) IPHASX J013108.9+612258, (2) IPHASX J015624.9+652830, (3) IPHASX J045627.6+501720, (4) IPHASX J060416.2+133250, (5) IPHASX J062937.8+065220. T = True PN (Confirmada como Nebulosa Planetaria), \*SySt = Estrella Simbiótica



y arcos, todo eso va en el apartado de observacion.

### 2.1.2. Proceso de reducción

Todo la reducción se realizó con IRAF (Tody, 1986) y haciendo uso de los paquetes de software específicos de GEMINI. En nuestra muestra, no se obtuvieron ni restaron DARKS debido a la estabilidad de los detectores de GEMINI durante las observaciones. Además, puesto que nuestro objetivo fue la medición de longitudes de onda centrales, no se llevó a cabo la calibración en flujo.

El procedimiento es descripto a continuación:

- Puesto que no hay BIAS asociado a cada objeto, se realizó una selección de 10 de los BIAS disponibles para cada programa. El criterio consistió en seleccionarlos de forma que los 10 cubrieran la duración completa del programa. De esta forma, el combinado final de estos 10 bias se realizó mediante la tarea *gbias* con parámetros por defecto. Esto sería representativo del programa en sí. Esta selección y combinación se realizó para los 12 programas y todos los objetos dentro de un mismo programa fueron corregidos con el mismo BIAS.
- Los FLATs disponibles se prepararon mediante la tarea *gsflat* utilizando los parámetros y funciones por defecto. En el caso de los objetos observados en GEMINI Norte, había disponibilidad de dos FLATs por objeto. No se observaron cambios en la SNR de los espectros si la reducción se hacía con uno, dos o un combinado de los FLATs disponibles y, por ende, se decidió combinar los FLATs. En los objetos de GEMINI Sur, hubo un único FLAT disponible por objeto.
- La aplicación de FLATs y BIAS a los espectrogramas de objeto de programa y lámpara de comparación, así como la corrección de overscan y recorte de imagen, se realizaron con la tarea *gsreduce*.
- El archivo para calibrar por longitud de onda se obtuvo aplicando la tarea *gswavelength* a la lámpara de comparación del objeto pertinente. Se indicó en la tarea que las líneas de emisión tienen un FWHM=7 px. La función utilizada para el ajuste fue un polinomio de Chebyshev de orden 4, se eliminaron de forma manual aquellas líneas identificadas que se encontraran en los huecos entre CCD (ver Sección 1.3.2). La cantidad de líneas identificadas, en promedio, fue de 70 con un RMS  $\approx 0,50 \text{ \AA}$ .

- Los rayos cósmicos fueron eliminados de los espectrogramas de objetos de programa a través de *gscrrrej* con *datares* = 5,0.
- La calibración por longitud de onda se llevó a cabo mediante la tarea *gstranspose* utilizando el archivo creado por *gswavelength*.
- La extracción del espectro se realizó de forma manual a través de la tarea *gsextract*. La ventana de extracción varió entre 10 px y 20 px dependiendo de la intensidad del continuo estelar y la emisión nebular. Se buscó restar el fondo de cielo utilizando un polinomio de Chebyshev de orden 2 o menor con el cuidado suficiente para no restar emisión nebular. La traza fue ajustada con un polinomio de Chebyshev de orden 4 con RMS oscilando entre 0,3-0,7 px según objeto.

Desafortunadamente, en seis objetos no fue posible obtener el espectro:

- **KLSS 1-9:** Espectrogramas no obtenidos en la noche de observación.
- **TaWe 1 y We 3-1:** Continuos estelares muy débiles, indistinguibles del fondo de cielo durante el proceso de extracción. Desafortunadamente, no se contaba con estrellas estándar en este programa para poder utilizarlas como referencia para la extracción.
- **M 2-54, NGC 6803 y NGC 7008:** Las líneas pertenecientes a la lámpara de comparación de estos tres objetos no pudieron ser reconocidas por IRAF a la hora de calibrar. La resolución de estos objetos imposibilitó el uso de otra lámpara CuAr en el mismo programa.

### 2.1.3. Muestra final

La muestra final incluyó 92 objetos, 50 en el hemisferio norte y 42 en el hemisferio sur. Treinta y seis de estos no poseen velocidad radial heliocéntrica reportada en la literatura. Nueve son objetos candidatos a NP y uno es clasificado como medio interestelar ionizado.

Una revisión de los espectros finales nos incentivó a dividir la muestra de objetos en tres categorías:

- *Verde:* Objetos cuyos espectros poseen líneas de emisión nebular con relación señal-ruido  $SNR > 3$ .
- *Rojo:* Objetos cuyos espectros poseen líneas de emisión nebular con relación señal-ruido  $SNR < 3$ .

- *Azul*: Objetos cuyos espectros poseen solamente líneas de absorción estelar susceptibles de ser medidas.

De los 92 objetos, 49 son verdes, 39 son rojos y 4 son azules (ver Tabla 3.1). La cantidad de objetos con espectros de baja SNR no debe sorprender ya que las observaciones se realizaron bajo condiciones climáticas pobres.

## 2.2. Medición

### 2.2.1. Catálogo de referencia

Para construir el catálogo de líneas de referencia (Tabla 2.2) usamos los trabajos de: Hajduk et al. (2014); Lee & Hyung (2013) y Sharpee et al. (2007). Además, se consultó la base de datos de NIST<sup>1</sup> y otros trabajos para obtener los potenciales de ionización. Se buscó tener un valor de referencia lo más actual posible.

---

<sup>1</sup><https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/ionEnergy.html>

$\lambda_{rest}$ [Å]	Ion	Ref	Pot. Ion. (Ref) [eV]	NIST [eV]
4101,74	H $\delta$	1	13,6 (6)	13,60
4340,46	H $\gamma$	1	13,6 (6)	13,60
4363,21	[OIII]	2	35,1 (5)	35,12
4471,50	HeI	1	24,6 (6)	24,59
4685,68	HeII	2	54,4 (4)	54,42
4861,33	H $\beta$	1	13,5 (4)	13,60
4958,91	[OIII]	1	35,1 (5)	35,12
5006,84	[OIII]	1	35,5 (4)	35,12
5197,90	[NI]	1	0 (4)	0
5411,52	HeII	2	—	54,42
5577,34	[OI]	2	0 (6)	0
5754,64	[NII]	1	14,5 (5)	14,53
5828,36	HeII	3	—	54,42
5875,66	HeI	1	24,6 (4)	24,59
6300,30	[OI]	1	0 (4)	0
6312,10	[SIII]	1	23,3 (5)	23,34
6363,78	[OI]	1	0 (6)	0
6548,10	[NII]	1	14,5 (4)	14,53
6562,77	H $\alpha$	1	13,6 (6)	13,60
6583,50	[NII]	1	14,5 (5)	14,53
6678,15	HeI	2	24,6 (6)	24,59
6716,47	[SII]	2	10,4 (4)	10,36
6730,85	[SII]	2	10,4 (5)	10,36

Tabla 2.2: Longitud de Onda, especie, referencia, potencial de ionización y los valores actuales obtenidos de la base de datos del NIST. Los iones indicados entre corchetes, son aquellos que se forman por el mecanismo de excitación colisional. Referencias: (1) Hajduk et al. (2014); (2) Lee & Hyung (2013); (3) Sharpee et al. (2007); (4) Otsuka et al. (2010); (5) Lee & Hyung (2013) y (6) Otsuka et al. (2017).

La lista incluye especies muy comunes en regiones HII y NP, tales como [OIII], [OI], HI, HeI, HeII, [NI], [NII], [SIII], [SII], dentro de un rango que cubre desde 4101,74 Å (HI) a 6730,85 Å ([SII]). Las líneas de absorción estelares que se midieron en algunos espectros son: la serie de Balmer y las líneas de HeII en 4685,46 Å y 5411,52 Å.

### 2.2.2. Velocidades radiales observadas

La medición de la velocidad radial involucró un ajuste gaussiano para cada línea, de cada espectro del objeto. Este ajuste se realizó con el subcomando *k* del visualizador de espectros de IRAF, *splot* (Figu-

ra 2.1). Los parámetros de este ajuste son escritos de forma automática en un archivo por el mismo IRAF. Nuestro interés se enfocó en las longitudes de onda centrales y el ancho a mitad de altura (FWHM).

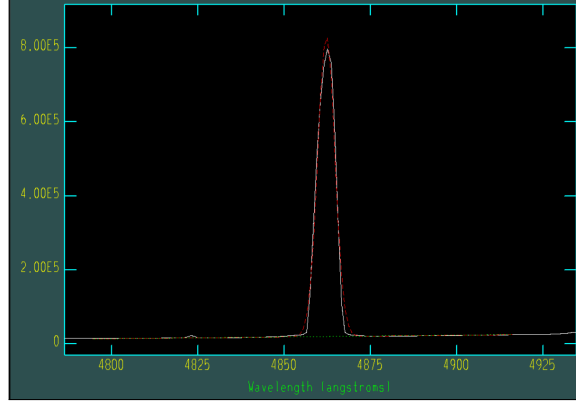


Figura 2.1: Captura de pantalla de *splot*. Se muestra un ajuste gaussiano a  $\lambda_{4861}$  ( $H\beta$ ).

Este procedimiento fue el mismo para todos los espectros de todos los objetos. Se buscó, además, utilizar solamente las líneas en común para todos los espectros de un mismo objeto e ignorando las líneas de absorción estelar siempre y cuando fuese posible. El objetivo fue reunir la información de la mayor cantidad posible de líneas de emisión nebulares (o absorción estelares según fuera el caso) para todos los objetos.

La recopilación de estos datos fue realizada en una hoja de cálculo. La misma en la cual se calcularon las velocidades radiales observadas usando la expresión mostrada en la Ecuación 2.1.

$$V_{obs} = c \times \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{rest}}{\lambda_{rest}} \quad (2.1)$$

Donde  $V_{obs}$  es la velocidad radial observada,  $c = 299792,458 \text{ km/s}$  (valor adoptado por el Sistema Internacional de Unidades para la velocidad de la luz),  $\lambda_{obs}$  es la longitud de onda central observada y  $\lambda_{rest}$  es la longitud de onda central observada en reposo (ver Tabla 2.2).

## 2.3. Cómputo de velocidades radiales heliocéntricas y LSR

Las velocidades radiales publicadas en la literatura, en general, son referidas a un sistema que no depende de la fecha de observación como es el caso de las velocidades radiales observadas ( $V_{obs}$ ). El sistema predilecto en la mayoría de los trabajos publicados es el heliocéntrico. El mismo será nuestro foco de atención más tarde cuando analicemos nuestros datos.

### 2.3.1. Definiciones

El traslado de la velocidad a un sistema de referencia heliocéntrico ( $V_{hel}$ ), involucra una serie de cálculos detallados en Barbieri & Bertini (2020) que consisten en corregir la velocidad observada  $V_{obs}$  por la proyección en la dirección de observación de la velocidad heliocéntrica de la Tierra  $V_{\oplus}$  y la velocidad de rotación de la Tierra  $V_{rot}$  (Ecuaciones 2.2, 2.3 y 2.4). Todas estas velocidades están en km/s.

$$V_{hel} = V_{obs} - V_{\oplus} - V_{rot} \quad (2.2)$$

$$V_{\oplus} = -Kc \cos \beta [\sin(\lambda - \lambda_{\odot}) + e \sin(\lambda_{\perp} - \lambda)] \quad (2.3)$$

$$V_{rot} = 0,465 \cos \phi' \cos \delta \sin HA \quad (2.4)$$

Donde  $\lambda$ ,  $\beta$ ,  $\delta$  y  $HA$  son las coordenadas eclípticas, la declinación y ángulo horario respectivamente de la NP.  $Kc = 29,79$  km/s es el promedio de la velocidad terrestre heliocéntrica alrededor del año (Barbieri & Bertini, 2020),  $\lambda_{\odot}$  es la longitud eclíptica del sol en la fecha de observación,  $\lambda_{\perp}$  la longitud del perigeo,  $e = 0,16751$  la excentricidad de la órbita terrestre<sup>2</sup>, el valor  $0,465$  km/s es la velocidad de rotación del observador en el ecuador (Barbieri & Bertini, 2020) y  $\phi'$  es la latitud geocéntrica del lugar de observación.

El otro sistema de referencia al que transformaremos nuestras velocidades es el referido al *Local Standard of Rest* (LSR). El LSR es un origen de coordenadas a la misma distancia galactocéntrica que el sol pero que sigue una órbita circular respecto del centro galáctico. La transformación a este sistema se hace directamente desde las coordenadas heliocéntricas siguiendo una serie simple de cálculos<sup>3</sup> (Ecuación 2.5)

<sup>2</sup><https://astro.uni-bonn.de/sysstw/lfa.html/iraf/noao.rv.rvcorrect.html>

<sup>3</sup>[https://www.atnf.csiro.au/people/Tobias.Westmeier/tools\\_hihelpers.php#restframes](https://www.atnf.csiro.au/people/Tobias.Westmeier/tools_hihelpers.php#restframes)

que restan el movimiento particular del sol alrededor del baricentro galáctico:

$$V_{LSR} = V_{hel} + 9 \cos l \cos b + 12 \sin l \cos b + 7 \sin b \quad (2.5)$$

Donde  $l$  y  $b$  son las coordenadas galácticas de la NP.

### 2.3.2. Tarea *rvcorr*

El traslado a estos sistemas de referencia fue realizado por la tarea *rvcorr* (Figura 2.2) del paquete *noao* de IRAF. El único parámetro de la misma que fue modificado fue el lugar de observación por GEMINI norte o sur según correspondiere. *rvcorr* permite el uso de listas como entrada y devuelve una lista con las velocidades heliocéntricas y LSR ya calculadas. La Fig. 2.2 muestra un ejemplo de la lista de entrada.

1	2018	10	05	08:53:55.7	323:08:46	44:29:42	0	52.16603637
2	2018	10	10	04:50:22.9	323:08:46	44:29:42	0	38.78683162
3	2018	10	10	05:10:54.9	323:08:46	44:29:42	0	36.54565456
4	2018	10	10	05:32:24.9	323:08:46	44:29:42	0	41.96934547
5	2018	10	10	05:52:56.9	323:08:46	44:29:42	0	40.43666171
##	HJD	VOBS	VHELIO	VLSR	VDIURNAL	VLUNAR	VANNUAL	VSOLAR
	2458396.86737	52.17	69.16	73.19	0.026	-0.001	16.971	4.032
	2458401.69853	38.79	56.93	60.96	-0.244	0.009	18.378	4.032
	2458401.71279	36.55	54.71	58.74	-0.225	0.009	18.381	4.032
	2458401.72772	41.97	60.16	64.19	-0.204	0.009	18.386	4.032
	2458401.74198	40.44	58.65	62.69	-0.182	0.009	18.390	4.032

Figura 2.2: **Arriba:** Lista de entrada para *rvcorr* conteniendo fecha, promedio de la hora de comienzo y fin de observación, coordenadas ecuatoriales J2000 y velocidad radial observada por línea. **Abajo:** Velocidades heliocéntricas y LSR calculadas por *rvcorr*.

El resultado fue una lista de velocidades radiales heliocéntricas y LSR por objeto que promediamos para obtener un valor final.

## 2.4. Errores

Contemplamos las siguientes fuentes de error para nuestros datos:

- El acto de medir.
- Resolución espectral del instrumental.
- Relación señal-ruido de las líneas medidas.
- Conversión al sistema heliocéntrico.
- Calibración por longitud de onda.

- Incertidumbre del catálogo de líneas de referencia.
- El proceso de reducción.
- Uso de coordenadas J2000 en *rvcorr*.
- Velocidad de expansión de la nebulosa .

Las cuales analizaremos de forma particular en las siguientes subsecciones.

### 2.4.1. El acto de medir

Se espera una diferencia para la longitud de onda central medida dependiendo de quien realice el ajuste gaussiano de la línea. En *splot*, el perfil gaussiano es ajustado marcando los extremos izquierdo y derecho del continuo alrededor de la línea en cuestión. Estos extremos varían de usuario a usuario.

A fin de estimar el error asociado a la medición en sí, solicitamos a siete investigadores distintos que ajustaran dos líneas de emisión en un mismo espectro de la NP IPHAS PN-1 (NP Príncipes de Asturias) :  $\lambda 5007$  [OIII] y  $\lambda 4686$  HeII.  $\lambda 5007$  es una línea de emisión nebulosa de alta SNR en los espectros disponibles de este objeto mientras que  $\lambda 4686$  es una línea de emisión de baja SNR. Los resultados se compilaron en la Tabla 2.3.

Inv.	$\lambda 5007$	$\lambda 4686$
1	5005,32	4684,22
2	5005,32	4684,22
3	5005,32	4684,22
4	5005,36	4684,07
5	5005,30	4684,10
6	5005,32	4684,22
7	5005,33	4684,17

Tabla 2.3: Datos recopilados para siete investigadores distintos. Se listan: Número de investigador, longitud de onda central medida para  $\lambda 5007$  y para  $\lambda 4686$ .

Pudimos observar que la línea de alta SNR ( $\lambda 5007$ ), la diferencia en promedio fue de  $\Delta\lambda \approx 0,03\text{\AA}$  y para líneas de baja SNR la diferencia se estimó en  $\Delta\lambda \approx 0,07\text{\AA}$ . Ambos valores se traducen en errores  $\Delta V_{rad} < 1 \text{ km/s}$ .



### 2.4.2. Resolución del instrumental

La dispersión de la red B600 de GMOS es de  $0,5 \text{ \AA}/\text{px}^4$ . Los espectros de nuestra muestra poseen un *binneado* de  $2 \times 2$ , por ende, la dispersión efectiva para nuestra muestra es el doble:  $1,0 \text{ \AA}/\text{px}$ . Suponiendo que somos capaces de medir el baricentro de la línea con una precisión de  $\frac{1}{5}$  de pixel entonces, podemos estimar el error asociado a la dispersión de forma simple a través de la Ecuación 2.6.

$$\Delta V_{rad} \approx 0,2 \text{ px} \times 1,0 \text{ \AA}/\text{px} \approx 0,2 \text{ \AA} \approx 4 \text{ km/s} \quad (2.6)$$

### 2.4.3. Relación SNR

La incidencia de la SNR en la incerteza en la medición de una línea de emisión puede ser estimada a través de la Ecuación 2.7. La cual fue presentada en el trabajo de Keel (1996).

$$\sigma = \frac{\sigma_{cont} c \Delta \lambda^{1,5}}{I \lambda d^{0,5}} \quad (2.7)$$

Donde  $\sigma_{cont}$  es el RMS del continuo,  $c$  es la velocidad de la luz,  $I$  es la intensidad de la línea en ADU,  $\lambda$  es la longitud de onda central de la línea,  $\Delta \lambda$  su FWHM y  $d$  la dispersión del espectrógrafo. Notar que  $I/\sigma_{cont}$  es la relación señal ruido de la línea.

Estimamos el valor de este error para espectros cuyas líneas de emisión nebular tuvieran  $\text{SNR} > 3$  alrededor de  $\sigma \approx 0,01 \text{ km/s}$  y alrededor de  $\sigma \approx 0,1 \text{ km/s}$  para los espectros de menor SNR.

### 2.4.4. Conversión de velocidades radiales

El mismo procedimiento de convertir las velocidades radiales observadas a velocidades radiales heliocéntricas conlleva un error. Utilizando dispersión de error en la Ecuación 2.2, obtenemos un estimativo del error por conversión (Ecuación 2.8).

$$\Delta V_{hel} = \sqrt{(1 \cdot \Delta V_{obs})^2 + (-1 \cdot \Delta V_{\oplus})^2 + (-1 \cdot \Delta V_{rot})^2} \quad (2.8)$$

Asumiendo errores extremos para  $V_{\oplus}$  y  $V_{rot}$ , del orden de la variabilidad que llegan a presentar según las expresiones que los definen (Ecuaciones 2.3 y 2.4).  $V_{\oplus}$  varía entre  $29,3 \text{ km/s}$  y  $30,3 \text{ km/s}$  en el afelio y perihelio respectivamente. Por ende, si asumimos un valor promedio de  $29,8 \text{ km/s}$ , la variación asociada sería del orden  $\Delta V_{\oplus} = 0,5 \text{ km/s}$ .

<sup>4</sup><https://www.gemini.edu/instrumentation/gmos/components#GNHam>

En cuanto a  $V_{rot}$ , su variación es máxima en el ecuador y oscila entre  $0,465 \text{ km/s}$  y  $-0,465 \text{ km/s}$ , por ende podemos asignar un error similar a  $\Delta V_{\oplus}$ ,  $\Delta V_{rot} = 0,465 \text{ km/s}$ .

Despreciando el error asociado a la velocidad radial observada, nos encontramos que la contribución de la conversión debe ser del orden  $\Delta V_{hel} \approx 1 \text{ km/s}$ .

#### 2.4.5. Calibración por longitud de onda

La función que relaciona coordenadas con longitud de onda, calculada durante el proceso de calibración, no necesariamente es lineal. De hecho, variaciones en esta linealización pueden resultar en corrimientos sistemáticos de los baricentros de las líneas. Efecto apreciable cuando uno posee más de un espectro por objeto.

Este fenómeno no pudo ser apreciado de forma consistente y universal en nuestra muestra salvo un caso puntual. El objeto WRAY 17-17 presenta este corrimiento sistemático de espectro a espectro. El mismo se estimó en  $\Delta V_{hel} \approx 2 \text{ km/s}$ .

También se notó un efecto en la linealización de algunos espectros. En la Figura 2.3 se ve que existe una correlación entre la longitud de onda y la velocidad radial obtenida para el objeto IC 5117. Esta correlación no debería existir. Sugiere que hay algún problema en la linealización del espectro.

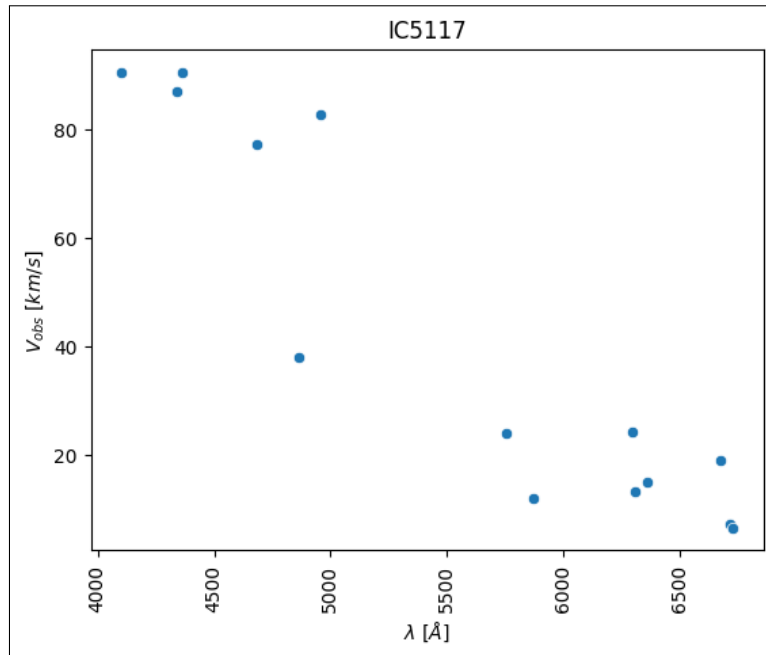


Figura 2.3: Correlación entre  $V_r$  y longitud de onda para IC 5117.

#### 2.4.6. Incertidumbre del catálogo de líneas

Las discrepancias entre los trabajos que usamos para construir el catálogo de longitudes de onda de referencia son mínimas (Tabla 2.4). No obstante, representa una fuente de error en los cálculos finales. Sobrestimando el error podemos asumir que  $\Delta\lambda \approx 0,05 \text{ \AA}$  y esto se traduce en un error del orden de  $\Delta V_{hel} \approx 1 \text{ km/s}$ .

Ion	$\lambda$	(1)	(2)	(3)
H $\delta$	4101,74	4101,74	4101,76	4101,73
H $\gamma$	4340,46	4340,46	4340,47	4340,46
[OIII]	4363,21	-	4363,21	4363,21
HeI	4471,50	4471,50	4471,48	4471,47
HeII	4685,68	-	4685,68	4685,71
H $\beta$	4861,33	4861,33	4861,33	4861,33
[OIII]	4958,91	4958,91	4958,92	4958,91
[OIII]	5006,84	5006,84	5006,84	5006,84
[NI]	5197,90	5197,90	5197,90	5197,90
HeII	5411,52	-	5411,52	5411,52
[OI]	5577,34	-	5577,34	5577,34
[NII]	5754,64	5754,64	5754,64	5754,64
HeII	5828,36	-	-	5828,36
HeI	5875,66	5875,66	5875,67	5875,60
[OI]	6300,30	6300,30	6300,30	6300,30
[SIII]	6312,10	6312,10	6312,10	6312,10
[OI]	6363,78	6363,78	6363,78	6363,78
[NII]	6548,10	6548,10	6548,03	6548,04
H $\alpha$	6562,77	6562,77	6562,82	6562,80
[NII]	6583,50	6583,50	6583,45	6583,46
HeI	6678,15	-	6678,15	6678,15
[SII]	6716,47	-	6716,47	6716,44
[SII]	6730,85	-	6730,85	6730,81

Tabla 2.4: Ion, su correspondiente longitud de onda central adoptada en nuestro trabajo y los diferentes valores disponibles en las referencias: (1) Hajduk et al. (2014) (2) Lee & Hyung (2013) (3) Sharpee et al. (2007). En todos los casos las longitudes de onda están expresadas en A.

#### 2.4.7. Proceso de Reducción

Hubo ciertos objetos que disponían de múltiples lámparas de comparación CuAr para calibrar. A partir de esta situación, se experimentó para encontrar si la decisión de usar una o múltiples CuAr repercutía en la longitud de onda central medida. Mediciones de las líneas [OIII] 4959 A, 5007 Å y H $\beta$  4861 A en espectros reducidos con todos los CuAr o uno solo resultaron en diferencias del orden de  $\Delta\lambda \approx 0,05$  A.

Además, no fue extraño encontrar objetos cuyas observaciones se habían llevado a cabo en una determinada fecha y el CuAr disponible para calibrar se había obtenido hasta dos meses antes o después. En aquellos objetos, la elección de si aplicar el flat del día de la observación del objeto o del día de obtención del CuAr también podra repercutir en la longitud de onda central. Se procedió, entonces, a reducir un CuAr

con las dos opciones y estimar si había diferencias en las longitudes de onda centrales de las líneas observadas. El resultado final fue de una desviación del orden, nuevamente, de  $\Delta\lambda \approx 0,05 \text{ \AA}$ .

Por ende, el error asociado a dichas elecciones es del orden de  $\Delta V_{hel} \approx 1 \text{ km/s}$ .

#### 2.4.8. Velocidad de expansión de la nebulosa

La envoltura gaseosa de una NP posee una determinada velocidad de expansión. La componente de esta velocidad en la dirección del observador no es necesariamente homogénea en toda la extensión del objeto. Es esta inhomogeneidad y asimetría la principal culpable de que las contribuciones hacia el observador del vector velocidad de expansión de la nebulosa no se cancelen mutuamente.

Además, al observar diferentes especies, estamos observando distintas regiones de la NP con diferentes valores de esta velocidad de expansión. En la Figura 2.4 se puede observar el efecto de la ionización estratificada. Por ende, las emisiones de iones con mayor potencial de ionización mapean, en general, regiones más cercanas a la estrella central y las de menor potencial regiones más alejadas de la misma.

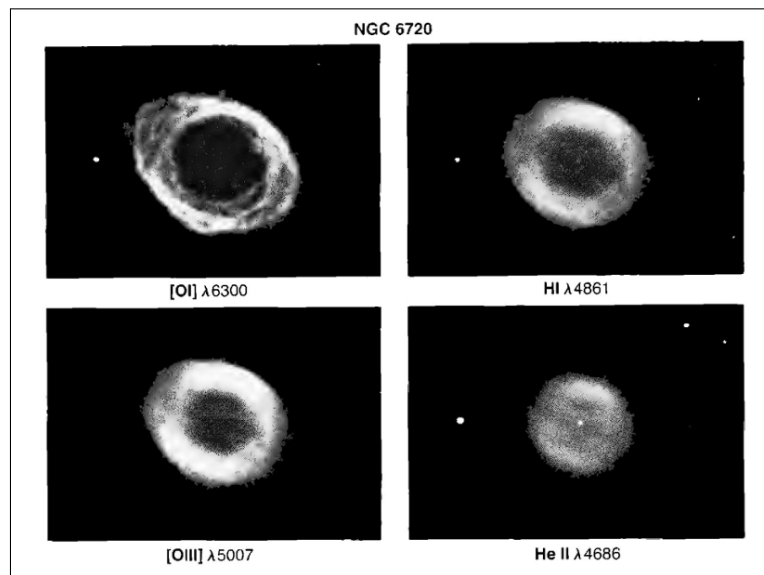


Figura 2.4: Imágenes de la NP NGC 6720 en filtros de banda angosta centrados en:  $\lambda 6300$  [OI],  $\lambda 4861$  HI,  $\lambda 5007$  [OIII] y  $\lambda 4686$  HeII. Figura 10.9 del libro “Astrophysics Of Gas Nebulae and Active Galactic Nuclei” de Osterbrock & Ferland (2006).

Para examinar la repercusión de esta velocidad de expansión, recopilamos las velocidades radiales observadas correspondientes a  $\lambda 4686$  HeII y  $\lambda 4861$  H $\beta$  para todos los objetos donde se pudieran observar ambas líneas de emisión. Se eligieron estos dos iones ya que presentan una gran diferencia entre sus potenciales de ionización (Tabla 2.2). La selección fue de 21 objetos y el promedio de la diferencia entre las velocidades radiales observadas de cada línea fue  $\Delta V_{hel} \approx 20 \text{ km/s}$ , valor que concuerda con lo sugerido por Schneider et al. (1983).

Es de destacar que sistemáticamente, en estos 21 objetos, se cumplió que  $V_r(4686) > V_r(4861)$ . El hecho de que una velocidad sea sistemáticamente superior a la otra hace pensar que no se trata de una cuestión de incerteza en las mediciones. Si bien Schneider et al. (1983) abordan el problema, su tratamiento es muy superficial. Un tratamiento más detallado (aunque aplicado a regiones HII) de la correlación de la  $V_r$  con los potenciales de ionización puede verse en Esteban & Peimbert (1999). No obstante, no hemos encontrado en la literatura que se trate el tema de la variación de la velocidad radial con el potencial de ionización, específicamente en NP. La Fig. 2.5 muestra que el efecto aparece en los datos de García-Rojas et al. (2015), sin que los autores discutan el fenómeno.

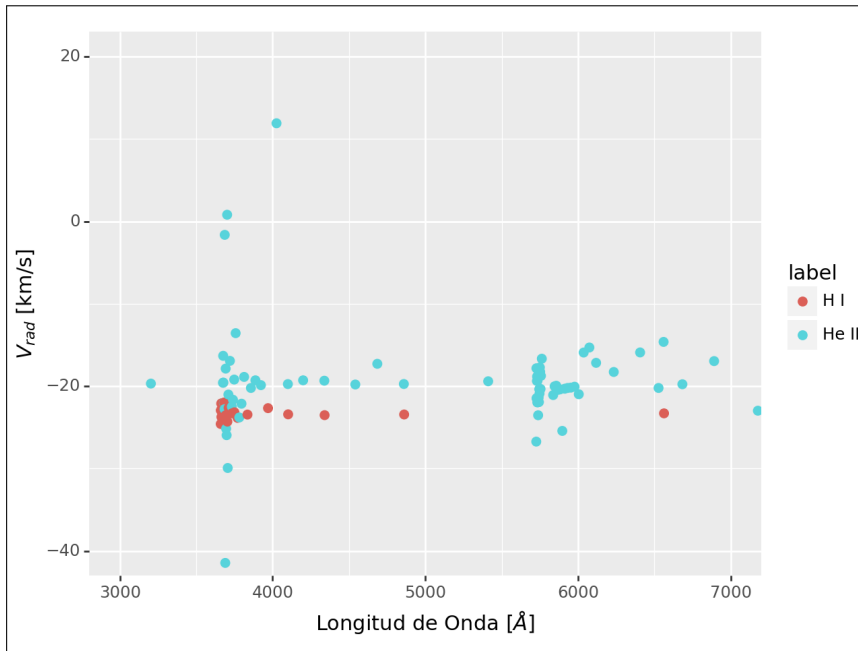


Figura 2.5: Longitud de onda vs Velocidad radial para la NP NGC 3918. Los valores fueron obtenidos con alta precisión mediante espectroscopía Echelle. Aquí solo se muestran las  $V_r$  derivadas de las líneas del HeII y Balmer. Los datos fueron obtenidos de García-Rojas et al. (2015). No obstante este gráfico es de nuestra autoría.

#### 2.4.9. Uso de coordenadas J2000 en *rvcorrect*

*rvcorrect* utiliza las coordenadas de entrada para calcular las velocidades radiales heliocéntricas y LSR, así como la fecha de observación del mismo. Debido a que las coordenadas disponibles en los encabezados de los espectros eran coordenadas J2000, fueron esas las que se utilizaron de entrada para *rvcorr*. En el instructivo de la tarea no se especifica si la fecha es utilizada para computar la respectiva precesión de las coordenadas y, por ende, se sugirió observar cuál era la diferencia final entre las velocidades radiales computadas con coordenadas J2000 o respectivas a la fecha de observación. El resultado dio una diferencia de  $\Delta V_{hel} \approx 0,1 \text{ km/s}$ .

#### 2.4.10. Error final

En la Tabla 2.5 se resumen los valores estimados para cada fuente de error.

Fuente	$\Delta V_r$ [km/s]
Medición	< 1
Resolución	4
SNR	0, 1
Conversión	1
Calibración	2
Catálogo de Líneas	1
Reducción	1
Expansión de la NP	20
Coord. J2000	0, 1

Tabla 2.5: Compilación de los valores estimados de  $\Delta V_r$  para cada fuente de error.

Siguiendo el ejemplo de Peña et al. (2013), el error asumido en nuestro trabajo para todas las mediciones fue el **error cuadrático medio** obtenido del promedio de la velocidad radial asociada a cada línea medida. Se lo juzgó como el valor más representativo de la incertidumbre en la medición y aquel que contemplaba todos las fuentes de error anteriormente mencionadas.

Estimamos, también, que nuestro error mínimo debido a la resolución del instrumental (Sección 2.4.2) fuera  $\Delta V_{rad}^{min} = 4 \text{ km/s}$ . Este valor mínimo fue el asumido para los objetos cuyo RMS fuese menor a  $4 \text{ km/s}$ .

En la Figura 2.6 presentamos un histograma por capas de la muestra dividida según el criterio de calidad mencionado en la Sección 2.1.3. La mayoría de la muestra tiene errores  $4 \text{ km/s} < \Delta V_{rad} < 35 \text{ km/s}$ . Cabe mencionar que estos errores son aceptables para la  $V_r$  de una NP según Durand et al. (1998).

Por otra parte es de destacar que la distribución de las incertidumbres para objetos verdes y rojos es semajante. En este sentido, consideramos que la calidad de las mediciones para los objetos rojos no es necesariamente inferior a la de los verdes.



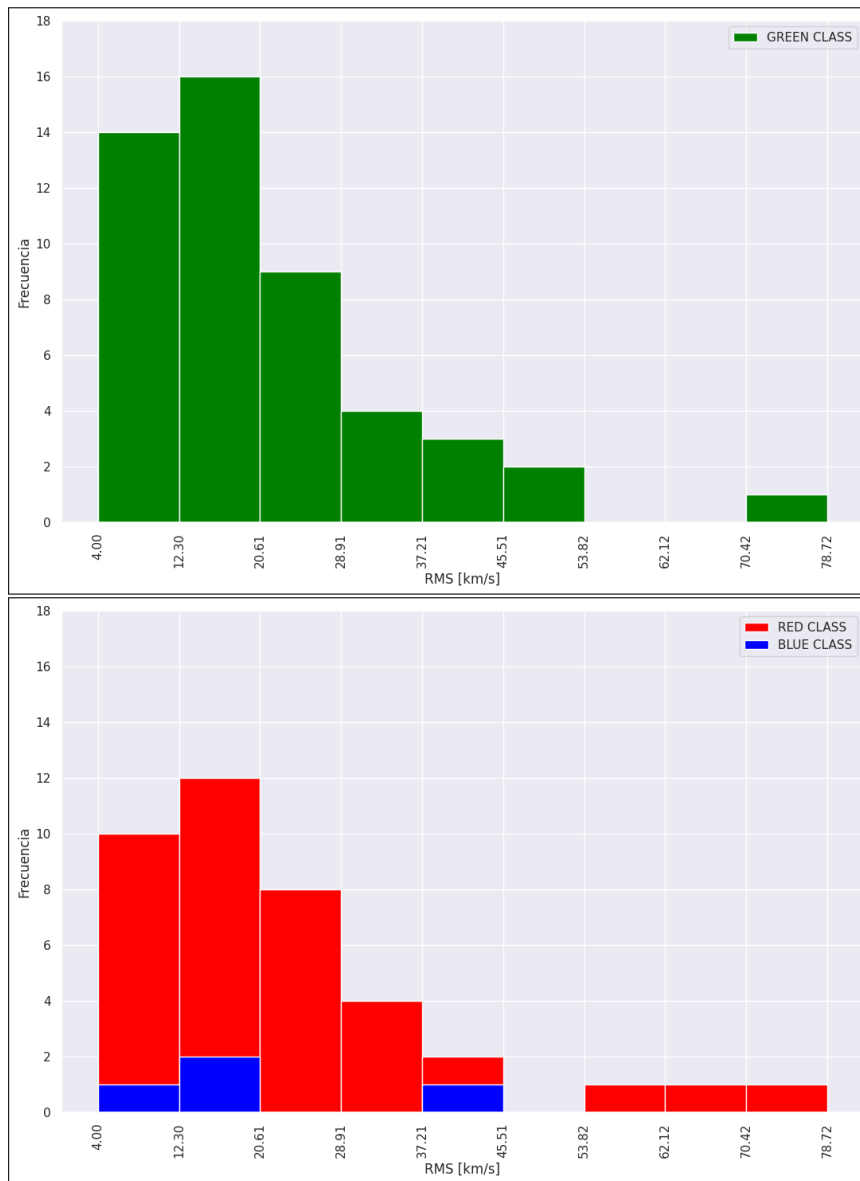


Figura 2.6: Histograma de los errores asignados a nuestras mediciones. **Arriba:** Distribución de RMS de espectros verdes. **Abajo:** Distribución de RMS de espectros rojos y azules.

Esta similitud observada entre las distribuciones de las clases con mayor y menor SNR sugiere que la SNR no tiene una fuerte incidencia sobre el error final. Posiblemente, este hecho se deba a que se midieron varias líneas en varios espectros. Nos encontramos, además, con una serie de objetos con alto error que analizaremos más adelante.

## **3. Resultados**

### **3.1. Velocidades radiales heliocéntricas y LSR**

En la Tabla 3.1 se muestran los resultados finales del cálculo de velocidades radiales. En la misma se incluyeron el error, las referencias disponibles en la literatura y la cantidad de líneas por cada espectro que se pudieron medir. Además, se indica el “color” (Sección 2.1.3) que se le asignó a cada objeto.

PN G	Nombre	$V_{hel}$ [km/s]	RMS	$V_{hel}^{lit}$ [km/s]	Error	$V_{LSR}$ [km/s]	# × espectro
000.7+08.0	MPA J1717-2356	+28	58	(...)	(...)	+52	2
002.1-02.2	M 3-20	-74	29	+24,3 [1]	2	-94	13
008.2+06.8	SaSt 2-15	-39	19	+21,7 [1]	0,2	-45	3
011.5+03.7	PTB 15	-85	30	(...)	(...)	-104	7
013.3+32.7	Sn 1	-68	25	-125,5 [1]	38,5	-85	4
037.8-06.3	NGC 6790	+91	14	+40,4 [1]	1,7	+80	11
038.4-03.3	K 4-19	+1	19	(...)	(...)	+0	3
042.9-06.9	NGC 6807	-77	10	-67,7 [1]	3,3	-94	7
043.1+03.8	M 1-65	+57	14	+3,7 [1]	15	+56	9
043.3+11.6	M 3-27 *	-180	15	-6 [1]	40	-173	11
043.3+11.6	M 3-27 **	-103	23	-6 [1]	40	-96	13
045.7-04.5	NGC 6804	-39	14	-12 [1]	3,8	-54	7
047.1+04.1	K 3-21	+17	28	(...)	(...)	+30	5
052.2-04.0	M 1-74	+5	6	+32,4 [1]	17,9	-8	13
054.4-02.5	M 1-72	+85	15	(...)	(...)	+73	6
059.0-01.7	Hen 1-3	-10	11	(...)	(...)	-17	3
060.1-07.7	NGC 6886	-73	17	-35,8 [1]	21,1	-58	15
069.4-02.6	NGC 6894	-21	41	-58 [1]	6	-3	5
082.5+11.3	NGC 6833	-110	10	-108,8 [1]	1,7	-110	9
089.3-02.2	M 1-77	-130	16	(...)	(...)	-133	4
089.8-05.1	IC 5117	+58	35	-32,1 [2]	1,7	+62	14
095.2+00.7	K 3-62	-102	13	-53 [1]	4	-97	11
098.1+02.4	K 3-63	-6	14	(...)	(...)	+4	4
103.7+00.4	M 2-52	-94	25	-74,7 [2]	2	-84	7

PN G	Nombre	$V_{hel}$ [km/s]	RMS	$V_{hel}^{lit}$ [km/s]	Error	$V_{LSR}$ [km/s]	# × espectro
104.4-01.6	M 2-53	-82	38	-81,8 [2]	1,9	-78	5
107.6-13.3	Vy 2-3	-19	13	-49,5 [1]	3,8	-4	5
107.8+02.3	NGC 7354	-43	28	-41,8 [1]	1	-42	5
112.9-10.2	A 84	-20	32	(...)	(...)	-4	5
114.0-04.6	A 82	-40	30	-30,5 [1]	3,3	-24	2
118.0-08.6	Vy 1-1	-41	11	-47,4 [2]	5,1	-3	3
126.6+01.3	Príncipe de Asturias	-25	47	(...)	(...)	-19	3
127.6-01.1	(1)	-4	23	(...)	(...)	+7	3
129.6+03.4	(2)	+3	7	(...)	(...)	+5	3
130.3-11.7	M 1-1	-14	10	-59,3 [2]	5	-7	7
131.5+02.6	A 3	+29	12	(...)	(...)	+33	2
138.8+02.8	IC 289	-71	45	-13,4 [1]	4	-54	4
147.4-02.3	M 1-4	-9	28	-33 [1]	4	-11	5
153.7+22.8	A 16	+16	21	(...)	(...)	+17	3
157.1+04.4	(3)	+15	11	(...)	(...)	+17	2
170.3+15.8	NGC 2242	-37	15	+38 [3]	(...)	-37	7
171.3-25.8	Ba 1	+22	9	-17 [1]	0,1	+18	4
173.7-05.8	K 2-1	+25	4	+19,2 [1]	4,5	+16	3
174.2-14.6	H 3-29	+14	20	-19,9 [1]	2	+28	6
183.0+00.0	IRAS 05495+2620	+10	10	(...)	(...)	+28	5
189.8+07.7	M 1-7	-17	21	+2,1 [1]	9,2	-24	10
194.2+02.5	J 900	+23	14	+26,7 [2]	2,4	+24	10
195.4-04.0	(4)	+0	15	(...)	(...)	+18	3
196.6-10.9	NGC 2022	+25	23	+14 [1]	1,5	+33	6

PN G	Nombre	$V_{hel}$ [km/s]	RMS	$V_{hel}^{lit}$ [km/s]	Error	$V_{LSR}$ [km/s]	# × espectro
197.0+05.8	KLSS 1-6	+12	7	(...)	(...)	-1	2
204.1+04.7	K 2-2	+70	21	+28 [1]	30	+55	6
204.3-01.6	(5)	+25	8	(...)	(...)	+20	2
212.6-00.0	PHR J0650+0013	+48	23	(...)	(...)	+31	5
214.9+07.8	A 20	+38	34	(...)	(...)	+50	4
215.7-03.9	BMP J0642-0417	+20	16	(...)	(...)	+4	2
216.0+07.4	PHR J0723+0036	+41	4	(...)	(...)	+53	2
217.1+14.7	A 24	-39	12	+12,7 [1]	4	-29	3
217.4+02.0	St 3-1	+105	43	+54,5 [1]	0,5	+99	7
219.1+31.2	A 31	-10	14	+41 [1]	30	-2	2
225.5-02.5	MPA J0705-1224	+122	62	(...)	(...)	+112	4
226.4-03.7	PB 1	+79	5	(...)	(...)	+67	4
232.8-04.7	M 1-11	+86	79	+16,3 [1]	14,1	+56	6
233.5-16.3	A 15	+114	36	+35 [1]	3	+107	3
234.8+02.4	NGC 2440	+176	22	+62,7 [1]	0,4	+188	11
235.3-03.9	M 1-12	+180	33	+95,8 [1]	4	+184	6
240.3+07.0	Y-C 2-5	+42	5	(...)	(...)	+28	3
241.0+02.3	M 3-4	+64	15	+74 [1]	40	+66	5
245.4+01.6	M 3-5	+39	31	+64 [1]	40	+32	9
249.0+06.9	Hen 3-172	+174	28	+24,18 [4]	1,3	+156	3
261.9+08.5	NGC 2818	+25	18	-0,9 [1]	2,9	+33	11
263.0-05.5	PB 2	+75	51	(...)	(...)	+49	9
264.1-08.1	WRAY 16-16	+112	9	+88 [1]	4	+97	7
270.1+24.8	K 1-28	+104	33	(...)	(...)	+108	5

PN G	Nombre	$V_{hel}$ [km/s]	RMS	$V_{hel}^{lit}$ [km/s]	Error	$V_{LSR}$ [km/s]	# × espectro
275.0-04.1	PB 4	+82	22	(...)	(...)	+83	5
275.7-04.9	PHR J0914-5555	+2	15	(...)	(...)	+3	5
276.1-11.9	MPAJ0835-6039	+132	40	(...)	(...)	+117	2
277.1+03.3	MeWe 2-2	+20	19	(...)	(...)	+1	3
286.2-06.9	WRAY 17-40	+88	4	+57 [5]	58	+72	2
291.3-26.2	Vo 1	+188	4	-14,4 [2]	0,5	+175	1
293.6+10.9	BIDz 1	-65	25	-10 [1]	8	-78	5
305.3+03.0	WRAY 17-58	+38	4	+28 [6]	50	+21	4
308.4+00.4	WeKg 2	+21	25	(...)	(...)	+14	3
308.6-12.2	He 2-105	-42	23	(...)	(...)	-49	5
310.6+01.4	WeKg 3	+11	10	(...)	(...)	+10	3
320.1-09.6	He 2-138	-21	17	-56,9 [1]	0,3	-29	6
324.1+09.0	ESO 223-10	-106	23	-55 [1]	19	-121	3
327.8+10.0	NGC 5882	+15	13	+9,7 [1]	4,6	+12	3
329.5-02.2	WRAY 17-75	-125	59	(...)	(...)	-178	5
334.3-09.3	IC 4642	+92	15	+43,9 [1]	2,9	+94	4
336.9+08.3	StWr 4-10	-125	4	-159 [1]	15	-133	3
341.5-09.1	WRAY 16-290	-27	17	-25 [1]	15	-34	3
352.9-07.5	Fg 3	+22	20	+4 [1]	1,8	+2	7
356.2-04.4	Cn 2-1	-136	14	-184,5 [2]	2,3	-155	12
357.6+01.7	H 1-23	-169	38	-72,5 [1]	3,9	-170	7

PN G	Nombre	$V_{hel}$ [km/s]	RMS	$V_{hel}^{lit}$ [km/s]	Error	$V_{LSR}$ [km/s]	# × espectro
------	--------	------------------	-----	------------------------	-------	------------------	--------------

Tabla 3.1: Lista de PNG, nombre, velocidad radial heliocéntrica, RMS, velocidad radial en la literatura, error en la literatura, velocidad radial LSR y número de líneas medidas por espectro por objeto. El color de las columnas se corresponde con la clasificación discutida en la sección 2.1.3 \* Mediciones de PN M 3-27 en 6 de junio de 2019 \*\* Mediciones de PN M 3-27 en 26 de agosto de 2020. Los nombres completos de los objetos IPHASX: (1) IPHASX J013108.9+612258, (2) IPHASX J015624.9+652830, (3) IPHASX J045627.6+501720, (4) IPHASX J060416.2+133250, (5) IPHASX J062937.8+065220. Referencias: [1] Durand et al. (1998) [2] Peña et al. (2013) [3] Karachentsev et al. (2004) [4] Gaia Collaboration et al. (2018) [5] Kraan-Korteweg et al. (1994) [6] Fairall et al. (1998).

### 3.2. Velocidades de expansión

Debido a que los FWHM de líneas de emisión observadas se encontraban, en su mayoría, muy cerca del ancho instrumental ( $FWHM_{instr} \approx 7$  px), el cálculo de velocidades de expansión no se pudo realizar en la muestra completa y los resultados siguientes se interpretan como estimativos.

La velocidad de expansión se calculó mediante la expresión (Ecuación 3.1) propuesta por Saurer (1997) con los FWHM de las líneas más comunes observadas en los objetos: [OIII]  $\lambda 4959$ ,  $\lambda 5007$  y [OI]  $\lambda 6300$ . Se asumió una temperatura electrónica estándar para estos objetos  $T_e = 10^4$  K y se promediaron las velocidades de expansión obtenidas para cada línea de emisión.

$$V_{exp} = \frac{1}{2} \left( FWHM_{obs}^2 - FWHM_{instr}^2 - 8(\ln 2) \frac{kT_e}{m} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.1)$$

Donde  $FWHM_{obs}$  es el FWHM observado,  $FWHM_{instr}$  el FWHM instrumental,  $k$  es la constante de Boltzmann,  $T_e$  la temperatura electrónica y  $m$  la masa atómica del ion medido.

Los resultados se encuentran en la Tabla 3.2 junto con los valores de referencia extraídos del catálogo de velocidades de expansión publicado más actual (Weinberger, 1989).

PN G	Nombre	$V_{exp}$ [km/s]	$V_{exp}^{lit}$ [km/s]
000.7+08.0	MPA J1717-2356	39	(...)
047.1+04.1	K 3-21	95	(...)
059.0-01.7	Hen 1-3	63	(...)
060.1-07.7	NGC 6886	44	40
069.4-02.6	NGC 6894	53	86
089.8-05.1	IC 5117	27	33
095.2+00.7	K 3-62	34	32
098.1+02.4	K 3-63	49	(...)
103.7+00.4	M 2-52	62	15
104.4-01.6	M 2-53	91	22
107.8+02.3	NGC 7354	37	50
112.9-10.2	A 84	85	32
114.0-04.6	A 82	58	50
126.6+01.3	Príncipe de Asturias	36	(...)
127.6-01.1	(1)	64	(...)
129.6+03.4	(2)	89	(...)
130.3-11.7	M 1-1	70	78
138.8+02.8	IC 289	55	51



PN G	Nombre	$V_{exp}$ [km/s]	$V_{exp}^{lit}$ [km/s]
153.7+22.8	A 16	86	(...)
157.1+04.4	(3)	104	(...)
170.3+15.8	NGC 2242	59	(...)
171.3-25.8	Ba 1	38	71
173.7-05.8	K 2-1	24	(...)
174.2-14.6	H 3-29	65	(...)
183.0+00.0	IRAS 05495+2620	58	(...)
189.8+07.7	M 1-7	54	24
196.6-10.9	NGC 2022	64	52
197.0+05.8	KLSS 1-6	81	(...)
214.9+07.8	A 20	84	(...)
217.1+14.7	A 24	37	28
217.4+02.0	St 3-1	28	(...)
219.1+31.2	A 31	50	20
225.5-02.5	MPAJ0705-1224	84	(...)
226.4-03.7	PB 1	48	(...)
233.5-16.3	A 15	63	(...)
240.3+07.0	Y-C 2-5	17	(...)
241.0+02.3	M 3-4	61	(...)
245.4+01.6	M 3-5	44	(...)
263.0-05.5	PB 2	78	(...)
264.1-08.1	WRAY 16-16	86	31
275.0-04.1	PB 4	51	(...)
275.7-04.9	PHR J0914-5555	103	(...)
277.1+03.3	MeWe 2-2	99	(...)
286.2-06.9	WRAY 17-40	35	(...)
293.6+10.9	BIDz 1	33	(...)
305.3+03.0	WRAY 17-58	49	(...)
310.6+01.4	WeKG 3	45	(...)
334.3-09.3	IC 4642	72	69
336.9+08.3	StWr 4-10	34	(...)
356.2-04.4	Cn 2-1	33	-

Tabla 3.2: Lista de PN G, nombre, velocidad de expansión obtenida y velocidad de expansión  $V_{exp}^{lit}$  publicada por Weinberger (1989). Los nombres completos de los objetos IPHASX: (1) IPHASX J013108.9+612258, (2) IPHASX J015624.9+652830, (3) IPHASX J045627.6+501720.

La distribución general de las velocidades de expansión (Figura 3.1) concuerda con los límites de velocidades de expansión en el catálogo de Weinberger (1989), del orden entre  $20 \text{ km/s} < V_{exp} < 100 \text{ km/s}$ .

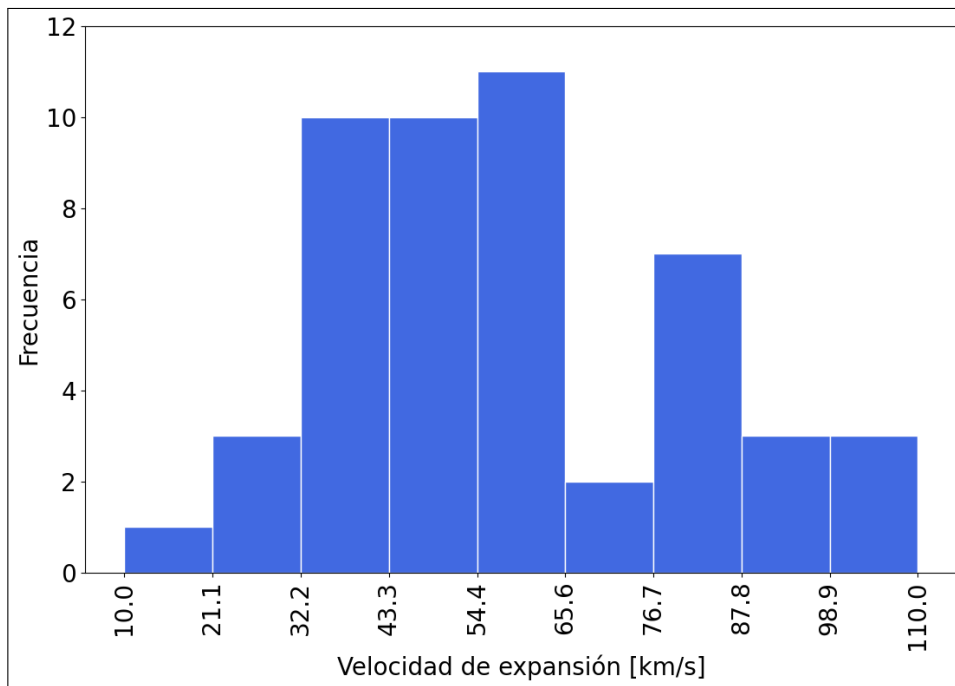


Figura 3.1: Histograma de velocidades de expansión.

## 4. Discusión

### 4.1. Distribución cinemática

Nuestra muestra presenta el pico de velocidades radiales (Figura 4.1) en el intervalo  $-50 \text{ km/s} < V_{hel} < 60 \text{ km/s}$ . Un resultado concordante con el rango de velocidades generalmente reportado en catálogos como el de Durand et al. (1998). Podemos observar 6 objetos con velocidades radiales extremadamente altas,  $|V_{hel}| > 150 \text{ km/s}$ . A estos seis objetos en particular se los tratará en la Sección 4.2.

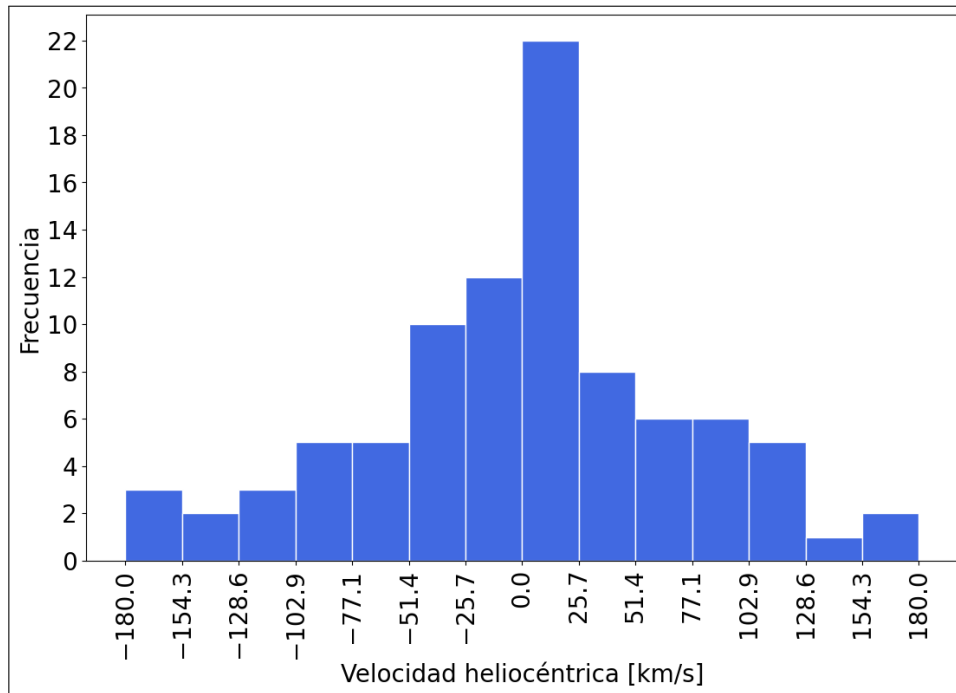


Figura 4.1: Histograma de velocidades radiales heliocéntricas de la muestra.

Observando la distribución de velocidad radial y longitud galáctica (Figura 4.3), nos encontramos con tendencias similares a las observadas por Durand et al. (1998), que ya mencionamos en la Sección 1 y que reproducimos otra vez en la Figura 4.2.

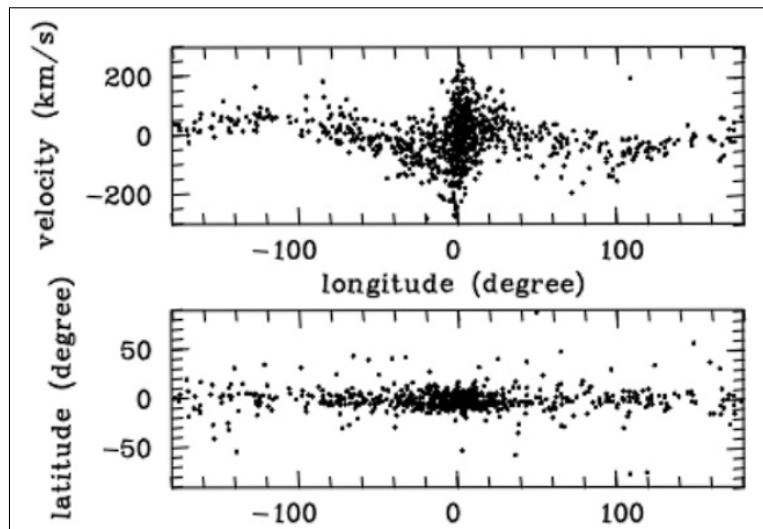


Figura 4.2: **Arriba:** Velocidad radial heliocéntrica vs longitud galáctica. Nótese la simetría en forma de S de la distribución. **Abajo:** Latitud vs longitud galáctica. Durand et al. (1998).

La mayoría de las velocidades altas y positivas se concentran alrededor de  $l \approx -90^\circ$  y ocurre un caso similar para las velocidades negativas cerca de  $l \approx 90^\circ$ . Si bien la tendencia a observar velocidades cercanas a 0 cerca de  $l \approx 180^\circ$  se mantiene en el lado positivo del eje X, se observa un grupo de objetos con velocidades altas en el lado negativo del mismo.

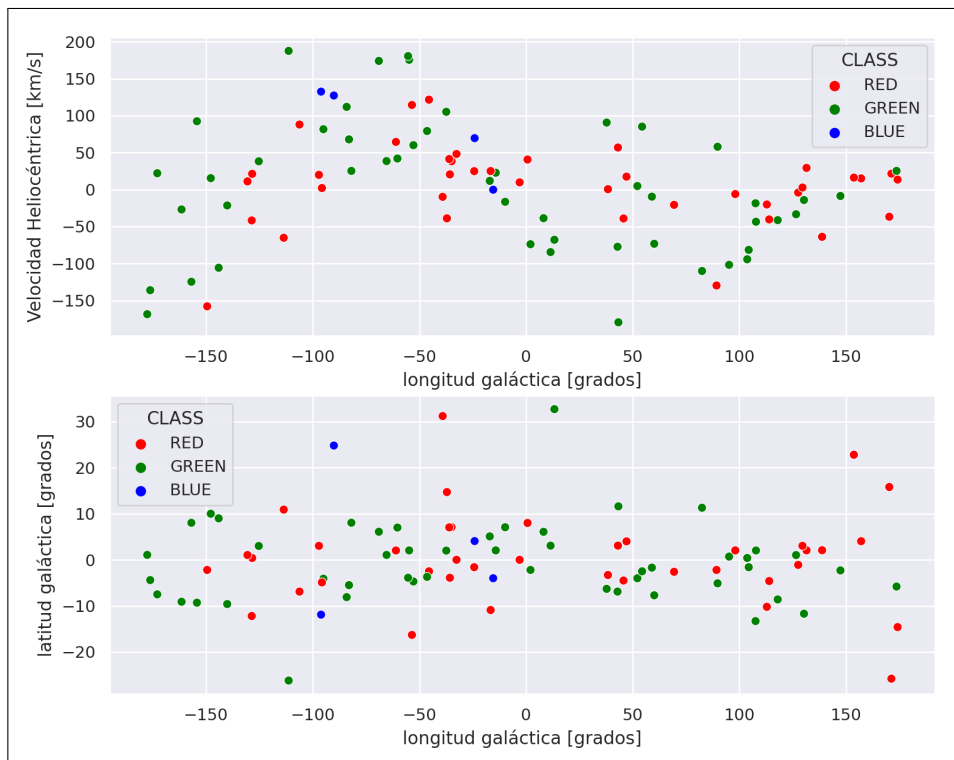


Figura 4.3: **Arriba:** Velocidad radial heliocéntrica vs Longitud galáctica. **Abajo:** Distribución en coordenadas galácticas. Las subclases en color se relacionan a la SNR de los espectros, clasificación mencionada en la Sección 2.1.3.

A diferencia de la extensa muestra que utilizaron Durand et al. (1998), la nuestra carece de ese abultamiento de NP hacia el centro galáctico. Por este motivo, no se puede observar de forma clara la alta dispersión de velocidades que se espera en torno al centro galáctico.

En la Figura 4.4, podemos observar que los errores para la gran mayoría de los objetos del catálogo son aceptables. No se ve que exista una tendencia entre el error y el color de la NP. Los objetos con barras de error notoriamente grandes serán analizados en la Sección 4.3.

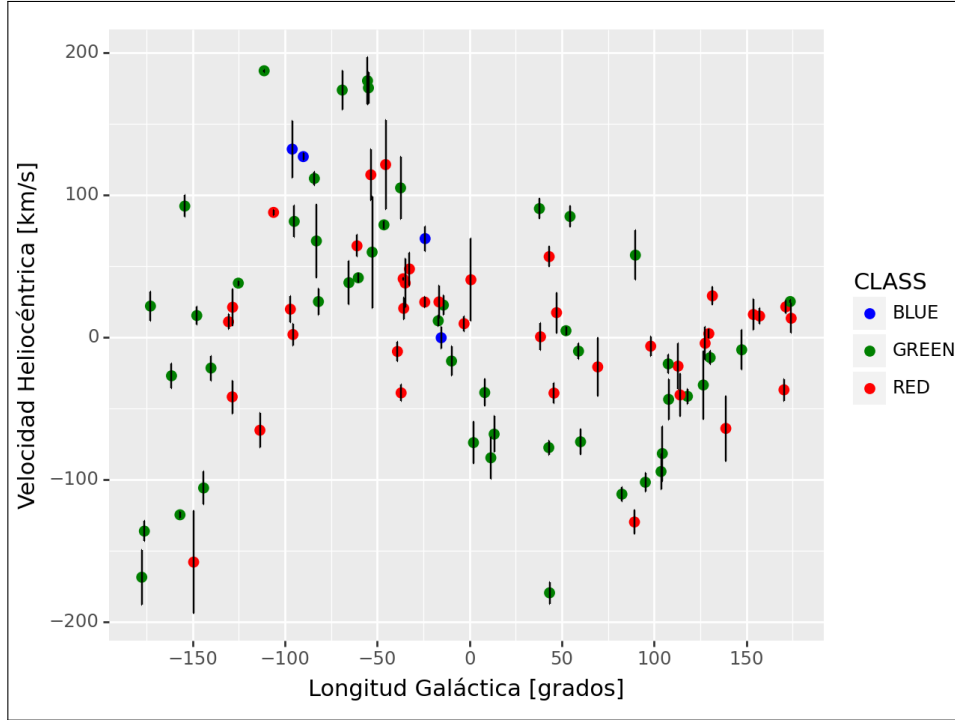


Figura 4.4: Velocidad radial heliocéntrica vs Longitud galáctica con barras de error.

## 4.2. NP con valores extremos en $V_r$

La Tabla 4.1 muestra seis objetos con valores de velocidad radial  $|V_{hel}| > 150 \text{ km/s}$ . Estos objetos tienen un RMS aceptable y calidad de espectro es “verde”. Existe, además, una diferencia sustancial con las velocidades radiales publicadas en la literatura.

Es difícil encontrar una explicación. Las velocidades radiales de las NP obtenidas a través de sus líneas de emisión no tienen por qué ser variables en el tiempo, a diferencia de las  $V_r$  de las estrellas centrales de las NP; algunas de éstas, por ejemplo, pueden ser binarias que presenten variaciones en la  $V_r$ . Una explicación es que se trate de objetos extragalácticos, sin embargo, todos están clasificados como NP verdaderas.

Hen 3-172 es una posible estrella simbiótica (Zamanov et al., 2008), por lo que en este caso posiblemente estemos viendo las variaciones en  $V_r$  de la estrella central. NGC 2440 es una NP multipolar caracterizada por una altísima velocidad de expansión,  $\approx 200 \text{ km/s}$  y una estrella central con temperatura del orden de  $170,000 - 200,000 \text{ K}$  (Wang et al.,

2008). Ciertamente, se trata de un objeto peculiar. Por su parte, Vo 1 tampoco es una NP confirmada, y M 3-27 es un objeto peculiar que será tratado en más detalle en la Sección 4.4. Sin lugar a dudas, los objetos de la Tabla 4.1 tienen que ser observados nuevamente.

PNG	Nombre	$V_{hel}$ [km/s]	RMS	$V_{hel}^{lit}$ [km/s]
043.3+11.6	M 3-27	-180	15	-6,0
234.8+02.4	NGC 2440	+176	22	+62,7
235.3-03.9	M 1-12	+180	33	+95,8
249.0+06.9	Hen 3-172	+174	28	+24,18
291.3-26.2	Vo 1	+188	4	-14,4
357.6+01.7	H 1-23	-169	38	-72,5

Tabla 4.1: Objetos con valores extremos en  $V_r$ .

### 4.3. Alto RMS

Como fue mencionado en la Sección 2.4.10, Durand et al. (1998) estima a  $\Delta V_{rad} \approx 40 \text{ km/s}$  como un error aceptable para la velocidad radial de una NP. En la Tabla 4.2 se compilaron los 8 objetos con RMS considerablemente mayor a 40 km/s. Notablemente, la mitad son espectros “verdes” y la otra “rojos”. Solamente 3 de estos 8 objetos poseen reportes de velocidad radial en la literatura. Y en ninguno de los tres casos, obtenemos velocidades comparables, aun con nuestras altas incertezas.

De acuerdo a las fuentes de incerteza que contemplamos (ver Sección 2.4.8), la referida a la nebulosa en sí es la más importante, por lo que evaluamos la posible correlación entre los potenciales e ionización y la velocidad radial. No encontramos en esto el origen de tan alto RMS.

PNG	Nombre	$V_{hel}$ [km/s]	RMS	$V_{hel}^{lit}$ [km/s]	$Err^{lit}$
000.7+08.0	(1)	+28	58	(...)	(...)
126.6+01.3	(2)	-25	47	(...)	(...)
138.8+02.8	IC 289	-71	45	-13,4	4,0
217.4+02.0	St 3-1	+105	43	+54,5	0,5
225.5-02.5	(3)	+122	62	(...)	(...)
232.8-04.7	M 1-11	+86	79	+16,3	14,1
263.0-05.5	PB 2	+75	51	(...)	(...)
329.5-02.2	WRAY 17-75	-125	59	(...)	(...)

Tabla 4.2: Compilación de objetos de alto RMS. (1) MPA J1717-2356 (2) Príncipe de Asturias (3) MPA J0705-1224.

El historial de velocidades reportadas en la literatura para IC 289, St 3-1 y M 1-11 no evidencia grandes cambios en el valor de este parámetro. Sin embargo, hay que contemplar que son pocas las mediciones reportadas.

- **PN M 1-11:**  $(16, 3 \pm 14, 1) \text{ km/s}$  (Durand et al., 1998) y  $(28, 9 \pm 16, 1) \text{ km/s}$  (Acker et al., 1992).
- **IC 289:**  $(-13,4 \pm 4,0) \text{ km/s}$  (Durand et al., 1998) y  $(-20,0 \pm 4,0) \text{ km/s}$  (Acker et al., 1992).
- **St 3-1:**  $(54,5 \pm 0,5) \text{ km/s}$  (Durand et al., 1998).

Con el fin de evaluar si esta diferencia es algo intrínseco de la nebulosa y no un producto de las mediciones, medimos la velocidad radial heliocéntrica espectro por espectro para aquellos objetos sin referencia en la literatura (Tabla 4.3).

PNG	Nombre	$V_{hel\# 1}$	$V_{hel\# 2}$	$V_{hel\# 3}$	$V_{hel\# 4}$
000.7+08.0	(1)	+19	+26	+30	+28
126.6+01.3	(2)	-23	-26	-26	-26
138.8+02.8	IC 289	-72	-72	-71	(...)
217.4+02.0	St 3-1	+103	+107	+107	(...)
225.5-02.5	(3)	+126	+125	+128	(...)
232.8-04.7	M 1-11	+87	+84	+80	(...)
263.0-05.5	PB 2	+72	+74	+80	(...)
329.5-02.2	WRAY 17-75	-134	-120	-121	(...)

Tabla 4.3: Velocidad heliocéntrica de cada uno de los espectros de cada uno de los objetos. (1) MPA J1717-2356 (2) Príncipe de Asturias (3) MPA J0705-1224.

Salvo WRAY 17-75 y MPA J1717-2356, las velocidades entre espectros tienen una consistencia aceptable sugiriendo que esta variación es una propiedad intrínseca. Estas NP tienen que ser observadas nuevamente, no sólo para obtener  $V_r$  con, quizás, una menor incerteza, sino porque pueden tratarse de objetos peculiares que ameriten atención.

#### 4.4. La peculiar nebulosa M 3-27

M 3-27 se caracteriza por ser el único objeto en toda la muestra que fue observado en dos noches de observación distintas. Las mediciones (Tabla 4.4) para su correspondiente velocidad radial heliocéntrica dan una alta discrepancia con tan sólo un año de diferencia entre las observaciones:



PN G	Nombre	$V_{hel}$ [km/s]	RMS	Fecha
043.3+11.6	M 3-27	-180	15	06/06/19
043.3+11.6	M 3-27	-103	23	26/08/20

Tabla 4.4: Observaciones de PN M 3-27 con RMS y fecha de observación.

La NP M 3-27 es un objeto muy compacto, cuyo diámetro ronda  $\approx 1''$ , perteneciente a un grupo particular de nebulosas planetarias denominadas “Nebulosas de auto-absorción” (Kohoutek, 1968). Kohoutek teoriza que debe tratarse de un objeto muy joven, de aproximadamente unos 200 años, que podría contener una binaria en su núcleo (teoría aún no confirmada). Al tratarse de un objeto tan joven, el observador prácticamente está observando la estrella en el proceso de eyección de sus capas exteriores y formación de la nube gaseosa. Adams (1975), en su estudio de M 3-27 junto con el objeto de porte similar VV 8 (PN G133.1–08.6), aportó evidencia observacional para ayudar a solidificar la teoría de una binaria en el núcleo de M 3-27. Es más, Barker (1978) vaticinó cambios en el espectro de la misma a corto plazo.

El entorno variable y denso de los objetos como M 3-27 dificultan la estimación de sus parámetros físicos como densidad y temperatura electrónica (Feibelman, 1985). Esto, a su vez, culmina en un limitado conocimiento acerca de la naturaleza de estos objetos.

Cabe mencionar que, debido a la naturaleza compacta de M 3-27, existe la posibilidad de que las líneas de emisión medidas estén combinadas con las líneas de absorción (o emisión) propias de la estrella (o estrellas) centrales. No obstante, se observan diferencias importantes incluso en líneas de emisión exclusivamente nebulares como [OIII]  $\lambda 5007$  y  $\lambda 4959$ , por lo tanto, es posible que haya otros fenómenos en juego.

Es de destacar que la propuesta de un monitoreo continuo, propuesto por varios de estos autores, nunca se realizó.

## 5. Conclusiones

En este trabajo especial pudimos determinar, con errores aceptables, las velocidades radiales heliocéntricas de 92 objetos. En 36 de estos objetos, nuestra determinación de velocidad radial es original. Pudimos corroborar de que nuestros datos se correspondían con las tendencias cinemáticas observadas por autores anteriores, una vez más aportando pruebas de que el sistema cinemático al que pertenecen las NP posee una velocidad rotacional menor que la del Sol. Además, hemos podido estimar la velocidad de expansión para 50 NP, de las cuales 32 son determinaciones originales. Por otra parte, pudimos añadir una curiosidad más al historial del objeto M 3-27. Estudios más exhaustivos se deberían realizar del mismo para confirmar si definitivamente es un objeto tan joven y/o binario. En el caso que lo fuese, sería de particular interés su estudio al ser una oportunidad única de entender más sobre el proceso de formación de una NP.

Inesperadamente nos hemos encontrado con un posible fenómeno del que no encontramos registros en la literatura. Y es la posible correlación entre  $V_r$  y potencial de ionización. Por ahora esto es una hipótesis a explorar en un futuro cercano.

Finalmente, queremos resaltar algunos objetos que nos llamaron la atención. Observamos 6 objetos con valores extremos de velocidad radial heliocéntrica (M 3-27, NGC 2440, M 1-12, Hen 3-172, Vo 1 y H 1-23) que merecerían observaciones adicionales, así como 8 objetos (MPA J1717-2356, Príncipe de Asturias, IC 289, St 3-1, MPA J0705-1224, M 1-11, PB 2 y WRAY 17-75) con valores alto de RMS. Estos objetos necesariamente requieren ser observados nuevamente, no sólo para corroborar su alta  $V_r$  o disminuir, eventualmente, su incerteza, sino también porque podemos estar ante la presencia de algún objeto peculiar. Y son justamente los objetos peculiares los que realizan aportes importantes a la comprensión de la evolución estelar.

## Bibliografía

- Acker, A., Marcout, J., Ochsenbein, F., Stenholm, B., Tylanda, R., & Schohn, C. (1992). *The Strasbourg-ESO Catalogue of Galactic Planetary Nebulae. Parts I, II.*
- Adams, T. F. (1975). A study of the compact nebulae VV8 and M3-27.1. *Astrophysical Journal*, 202, 114.
- Ali, A., Dopita, M. A., Basurah, H. M., Amer, M. A., Alsulami, R., & Alruhaili, A. (2016). IFU spectroscopy of southern planetary nebulae - III. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 462(2), 1393–1404.
- Barbieri, C., & Bertini, I. (2020). *Fundamentals of astronomy*. CRC Press.
- Barker, T. (1978). Spectrophotometry of planetary nebulae. i-physical conditions. *Astrophysical Journal, Part 1, vol. 219, Feb. 1, 1978, p. 914-930.*, 219, 914–930.
- Beaulieu, S. F. (1996). *Dynamics of the Galactic bulge using planetary nebulae*. Ph.D. thesis, -.
- Bennett, J. O., Donahue, M., Schneider, N., & Voit, M. (2014). *The cosmic perspective*. Pearson.
- Dopita, M. A., & Hua, C. T. (1997). Southern Emission-Line Flux Standards. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 108(2), 515–527.
- Durand, S., Acker, A., & Zijlstra, A. (1998). The kinematics of 867 galactic planetary nebulae. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 132(1), 13–20.
- Esteban, C., & Peimbert, M. (1999). Radial velocities of optical lines in three bright Galactic HII regions. *Astronomy and Astrophysics*, 349, 276–282.
- Fairall, A. P., Woudt, P. A., & Kraan-Korteweg, R. C. (1998). Extragalactic large-scale structures behind the Southern Milky Way. II. Redshifts obtained at the SAAO in the Crux region. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 127, 463–470.

- Feibelman, W. A. (1985). The ultraviolet spectrum of the planetary nebula m 3-27. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 97(591), 404.
- Gaia Collaboration, Brown, A. G. A., Vallenari, & et al. (2018). Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties. *Astronomy and Astrophysics*, 616, A1.
- Gaia Collaboration, Prusti, T., de Bruijne, & et al. (2016). The Gaia mission. *Astronomy and Astrophysics*, 595, A1.
- García-Rojas, J., Madonna, S., Luridiana, V., Sterling, N. C., Morisset, C., Delgado-Inglada, G., & Toribio San Cipriano, L. (2015). s-process enrichment in the planetary nebula NGC 3918. Results from deep echelle spectrophotometry. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 452(3), 2606–2640.
- González-Santamaría, I., Manteiga, M., Manchado, A., Ulla, A., & Dafonte, C. (2019). Properties of central stars of planetary nebulae with distances in Gaia DR2. *Astronomy and Astrophysics*, 630, A150.
- Hajduk, M., van Hoof, P. A. M., Gesicki, K., Zijlstra, A. A., Gó rny, S. K., & Gładkowski, M. (2014). The evolving spectrum of the planetary nebula hen 2-260. *Astronomy and Astrophysics*, 567, A15.  
URL <https://doi.org/10.1051/2F0004-6361/2F201322742>
- Hui, X. (1993). Planetary Nebulae and Halo Dynamics in Early Type Galaxies. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 105, 1011.
- Karachentsev, I. D., Karachentseva, V. E., Huchtmeier, W. K., & Makarov, D. I. (2004). A Catalog of Neighboring Galaxies. *Astronomical Journal*, 127(4), 2031–2068.
- Keel, W. C. (1996). Rotation Curves and Velocity Measures for Spiral Galaxies in Pairs. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 106, 27.
- Kinman, T. D., Feast, M. W., & Lasker, B. M. (1988). New Planetary Nebulae in the Galactic Bulge. *Astronomical Journal*, 95, 804.
- Kohoutek, L. (1968). Spectrophotometry of a super-dense planetary nebula m 3-27. *Bulletin of the Astronomical Institute of Czechoslovakia*, vol. 19, p. 371, 19, 371.
- Kohoutek, L., & Pauls, R. (1995). Planetary nebulae in the direction of the galactic bulge. I. New radial velocities based on image-tube spectra. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 111, 493.

- Kraan-Korteweg, R. C., Fairall, A. P., & Balkowski, C. (1994). VizieR Online Data Catalog: Hydra/Antlia extension redshifts (Kraan-Korteweg+, 1995). *VizieR Online Data Catalog*, (pp. J/A+A/297/617).
- Kwok, S. (2000). The origin and evolution of planetary nebulae. *The origin and evolution of planetary nebulae/Sun Kwok*. Cambridge; New York: Cambridge University Press.
- Lee, S. J., & Hyung, S. (2013). High-resolution spectra of the planetary nebula NGC 6803. *Astronomy and Astrophysics*, 549, A65.
- Maciel, W. J., Costa, R., & Idiart, T. E. P. (2009). Planetary nebulae and the chemical evolution of the magellanic clouds. *Revista mexicana de astronomía y astrofísica*, 45(2), 127–137.
- Maciel, W. J., & Dutra, C. M. (1993). Kinematics of Disk Planetary Nebulae. In R. Weinberger, & A. Acker (Eds.) *Planetary Nebulae*, vol. 155, (p. 568).
- Manick, R., Miszalski, B., & McBride, V. (2015). A radial velocity survey for post-common-envelope Wolf-Rayet central stars of planetary nebulae: first results and discovery of the close binary nucleus of NGC 5189. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 448(2), 1789–1806.
- Meatheringham, S. J., Wood, P. R., & Faulkner, D. J. (1988). A Study of Some Southern Planetary Nebulae. *Astrophysical Journal*, 334, 862.
- Osterbrock, D. E., & Ferland, G. J. (2006). *Astrophysics Of Gas Nebulae and Active Galactic Nuclei*. University science books.
- Otsuka, M., Parthasarathy, M., Tajitsu, A., & Hubrig, S. (2017). Physical Properties of the Very Young PN Hen3-1357 (Stingray Nebula) Based on Multiwavelength Observations. *Astrophysical Journal*, 838(1), 71.
- Otsuka, M., Tajitsu, A., Hyung, S., & Izumiura, H. (2010). The Origin and Evolution of the Halo PN BoBn 1: From a Viewpoint of Chemical Abundances Based on Multiwavelength Spectra. *Astrophysical Journal*, 723(1), 658–683.
- Parker, Q. A., Bojičić, I. S., & Frew, D. J. (2016). Hash: the hong kong/aao/strasbourg H $\alpha$  planetary nebula database. In *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 728, (p. 032008). IOP Publishing.

- Peña, M., Rechy-García, J. S., & García-Rojas, J. (2013). Galactic kinematics of planetary nebulae with [wc] central star. *Revista mexicana de astronomía y astrofísica*, 49(1), 87–99.
- Saurer, W. (1997). Morphology and expansion characteristics of the planetary nebula m 1-79. *Astronomy and Astrophysics*, v. 326, p. 1187-1194, 326, 1187–1194.
- Schneider, S. E., & Terzian, Y. (1983). Planetary nebulae and the galactic rotation curve. *Astrophysical Journal Letters*, 274, L61–L64.
- Schneider, S. E., Terzian, Y., Purgathofer, A., & Perinotto, M. (1983). Radial velocities of planetary nebulae. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 52, 399–423.
- Sharpee, B., Zhang, Y., Williams, R., Pellegrini, E., Cavagnolo, K., Baldwin, J. A., Phillips, M., & Liu, X.-W. (2007). s-Process Abundances in Planetary Nebulae. *Astrophysical Journal*, 659(2), 1265–1290.
- Tody, D. (1986). The IRAF Data Reduction and Analysis System. In D. L. Crawford (Ed.) *Instrumentation in astronomy VI*, vol. 627 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, (p. 733).
- Vassiliadis, E., & Wood, P. (1993). Evolution of low-and intermediate-mass stars to the end of the asymptotic giant branch with mass loss. *Astrophysical Journal, Part 1 (ISSN 0004-637X)*, vol. 413, no. 2, p. 641-657., 413, 641–657.
- Wang, M.-Y., Hasegawa, T. I., & Kwok, S. (2008). The Detection of a Molecular Bipolar Flow in the Multipolar Planetary Nebula NGC 2440. *Astrophysical Journal*, 673(1), 264–270.
- Weinberger, R. (1989). A catalogue of expansion velocities of galactic planetary nebulae. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 78, 301–324.
- Wouterloot, J. G. A., & Brand, J. (1989). IRAS sources beyond the solar circle. I. CO observations. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 80, 149–187.
- Zamanov, R. K., Bode, M. F., Melo, C. H. F., Stateva, I. K., Bachev, R., Gomboc, A., Konstantinova-Antova, R., & Stoyanov, K. A. (2008). Rotational velocities of the giants in symbiotic stars - III. Evidence

of fast rotation in S-type symbiotics. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 390(1), 377–382.

Zijlstra, A. A., Acker, A., & Walsh, J. R. (1997). Radial velocities of planetary nebulae towards the Galactic bulge. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 125, 289–292.

Zijlstra, A. A., & Pottasch, S. R. (1991). On the scale height of planetary nebulae. *Astronomy and Astrophysics*, 243, 478.