

Artículo original

## Densidad electrónica en regiones H II gigantes

### Electron density in giant H II regions

Hernando Efrain Caicedo-Ortiz<sup>1,2,\*</sup>, Hector Osvaldo Castañeda-Fernández<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, Popayán, Colombia.

<sup>2</sup> Instituto de Educación Media Superior de la Ciudad de México, México.

<sup>3</sup> Escuela Superior de Física y Matemáticas, Instituto Politécnico Nacional, México.

### Resumen

Se estudió la densidad electrónica a escala global y punto a punto de las regiones H II gigantes Hubble V y Hubble X, localizadas en la galaxia NGC 6822, utilizando espectroscopia de rendija larga en el espectro visible. Los resultados obtenidos presentan por primera vez una medida de la variación espacial de la densidad electrónica de estas dos regiones H II gigantes, demostrando que poseen un comportamiento no homogéneo en su densidad a nivel local así como un régimen de baja densidad a nivel global y comprobando que la temperatura electrónica tienen una baja incidencia en su determinación.

**Palabras clave:** Densidad Electrónica; Regiones H II Gigantes; NGC 6822; Hubble V; Hubble X.

### Abstract

The electron density on a global and point-to-point scale of Hubble V and Hubble X giant H II regions, located in the galaxy NGC 6822, was studied using long-slit spectroscopy in the visible spectrum. The results obtained present for the first time a measure of the spatial variation of the electron density of these two giant H II regions, showing that they have an inhomogeneous behavior in their density at the local level as well as a low-density regime at the global level, and verifying that the electronic temperature has a low incidence in its determination.

**Keywords:** Electron density; Giant H II Regions; NGC 6822; Hubble V; Hubble X.

### Introduction

En los años 30 del siglo XX, **Struve y Elvey** (1934) encontraron que grandes regiones de la Vía Láctea tenían espectros de líneas de emisión, en particular, las líneas de Balmer del

**Citación:** Caicedo-Ortiz HE, Castañeda-Fernández HO. Densidad electrónica en regiones H II gigantes. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(177):989-1010, octubre-diciembre de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1464>

**Editor:** Jairo Roa Rojas

**\*Correspondencia:** Hernando Efrain Caicedo Ortiz; [hernando.caicedo@uniautonomo.edu.co](mailto:hernando.caicedo@uniautonomo.edu.co)

**Recibido:** 6 de mayo de 2021

**Aceptado:** 15 de agosto de 2021

**Publicado:** 15 de diciembre de 2021



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

<sup>1</sup> Correspondencia: [hernando.caicedo@uniautonomo.edu.co](mailto:hernando.caicedo@uniautonomo.edu.co)

<sup>2</sup> Fallecido en 2020.

hidrógeno. Este descubrimiento proporcionó un indicio claro de que una fracción considerable del hidrógeno -*el elemento más abundante en el medio interestelar*- debía estar ionizado. Un ejemplo de objetos astronómicos compuestos fundamentalmente por hidrógeno ionizado son las regiones H II (**Osterbrock y Ferland, 2006**), que son un tipo particular de nebulosas gaseosas, e incluye a otros objetos como las nebulosas planetarias y los remanentes de supernova.

**Strömgren (1939)** creó el primer modelo teórico de regiones H II, en el cual una estrella masiva y caliente (de tipo espectral O o B temprano) se encuentra inmersa en un medio interestelar de densidad constante. Strömgren descubrió que bajo estas circunstancias, la radiación estelar ultravioleta ioniza la mayor parte del hidrógeno, formando una zona esférica concéntrica con la estrella, alrededor de la cual se encuentra una segunda zona con hidrógeno neutro, por lo que un observador debe percibir un borde bien definido. Este modelo es conocido como la esfera de Strömgren (**Strömgren, 1939**). En la actualidad, la visión de la estructura de las regiones H II ha cambiado radicalmente en los últimos 80 años, pasando de ser objetos con una simetría esférica simple a estructuras asimétricas complejas (**Osterbrock y Ferland, 2006; Caicedo-Ortiz, 2011; Geen et al., 2017; Haworth et al., 2018; Campbell-White et al., 2020; Pellegrini et al., 2020; Fleming, 2021**) y donde se ha propuesto el uso de métricas alternas como la dimensión fractal (**Caicedo-Ortiz et al., 2015; Caicedo-Ortiz et al., 2017**) para la clasificación morfológica de estas regiones de formación estelar.

Debido a las grandes distancias a las cuales se encuentran, las regiones H II con tamaño y brillo similares a las de la nebulosa de Orión son intrínsecamente débiles, lo cual las hace difíciles de detectar desde observatorios terrestres, por este motivo, las que se observan en otras galaxias deben ser de gran tamaño, del orden de cientos de parsec y mucho más brillantes que la mayoría de las que se pueden ver en la Vía Láctea. A estos objetos se les denomina regiones H II Gigantes (**Osterbrock y Ferland, 2006**) y presentan una masa ionizada del orden de  $10^3 - 10^6 M_{\odot}$ . La gran diferencia con las regiones H II normales es que están ionizadas por grandes conglomerados o cúmulos de estrellas calientes, los cuales son del orden de  $10^5$  estrellas ionizantes.

La densidad electrónica ( $N_e$ ) y temperatura electrónica ( $T_e$ ) son los dos parámetros fundamentales que permiten caracterizar las regiones H II. A través de ellos es posible calcular la masa del gas ionizado, la estructura de ionización, interpretar el espectro de emisión y calcular su composición química. Diferentes modelos para la distribución del gas en las regiones H II dan como resultado distintos espectros teóricos (**Stasińska, 1980**). **Rubin (1968)** demostró que los métodos empíricos empleados para determinar las propiedades físicas del gas ionizado (densidad, abundancias químicas) basados en propiedades integrales a través de la nebulosa, están sujetos a errores debido a las variaciones de la densidad electrónica interna. Los modelos teóricos asumen generalmente que la densidad es homogénea y uniforme en la nebulosa, con una simetría esférica (**Evans y Dopita, 1985**). Los valores de densidad reportados en la literatura corresponden en su mayoría a la luz integrada de la nebulosa o a las zonas de mayor brillo.

Para construir un modelo realista de una región H II, es fundamental conocer la estructura del gas ionizado que lo constituye. Los estudios de la variación de la densidad con respecto a la posición (**Castañeda et al., 1992; Caicedo-Ortiz, 2011**) son escasos y altamente complejos de realizar debido a la baja señal-ruido (S/N) de las líneas de emisión del doblete de azufre y a su bajo brillo superficial. La mayoría de estudios sobre regiones H II se concentran en analizar el aspecto morfológico (**Maíz-Apellániz et al., 2004b; A. Peimbert et al., 2005; Osterbrock y Ferland, 2006; Caicedo-Ortiz et al., 2015**) y determinar otras características como su composición ó metalicidad (**Maíz-Apellániz et al., 2004b; A. Peimbert et al., 2005; Osterbrock y Ferland, 2006; Relaño et al., 2010; Pérez Oregón et al., 2014; Caicedo-Ortiz y Castañeda Fernández, 2019**). En este artículo se presenta el primer

estudio a alta resolución espacial que describe la estructura de la densidad punto a punto y la densidad integrada de las dos regiones H II gigantes extra galácticas más cercanas a nuestra galaxia, que son Hubble V y Hubble X.

## Objetos de estudio

### 0.1. NGC 6822

La Galaxia de Bernard o NGC 6822 (DDO 209), es una galaxia irregular que pertenece al Grupo Local (Figura 1). En su artículo histórico, **Hubble** (1925) presentó su descubrimiento de las cefeidas en esta galaxia, lo que que convirtió a NGC 6822 en el primer objeto reconocido como verdaderamente extragaláctico fuera de la Vía Láctea. Esta galaxia se encuentra ubicada a una distancia de  $490 \pm 40$  kpc (**Mateo**, 1998). En la Tabla 1 se presentan las características más relevantes de esta galaxia irregular.



**Figura 1.** Galaxia irregular NGC 6822, localizada en el Grupo Local. Composición formada por observaciones realizadas con el instrumento Wide Field Imager, del Telescopio MPG/ESO de 2.2 metros en el Observatorio La Silla de ESO y los datos recogidos por ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array). Créditos: ESO, ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/A. Schrubba, VLA (NRAO)/Y. Bagetakos/Little THINGS.

En el óptico, NGC 6822 tiene una barra dominante (**de Vaucouleurs et al.**, 1991), con una distribución irregular de asociaciones OB (**Wilson**, 1992) y regiones H II (**Hodge et al.**, 1988). La magnitud absoluta es  $m_b = -15.1$  (**Lee et al.**, 2006) y su radio en el óptico es de  $2.9 \text{ kpc} \times 2.9 \text{ kpc}$  (**Mateo**, 1998). La población estelar de esta galaxia, así como su historia de formación estelar han sido reportados por (**Gallart et al.**, 1996a, 1996b; **Hutchings et al.**, 1999; **Tolstoy et al.**, 2001; **Wyder**, 2001; **Clementini et al.**, 2003).

NGC 6822 ha sido observada en otras longitudes de onda diferentes al óptico, con el fin de estudiar el medio interestelar (ISM), su dinámica y localizar los lugares con alta formación estelar. Cabe resaltar los estudios de esta galaxia en radio (**Gottesman y Weliachew**, 1977; **Israel**, 1997), infrarrojo (**Gallagher et al.**, 1991), UV (**Longo y Ceriello**, 1991) y rayos X (**Eskridge y White**, 1997). Recientes observaciones con Spitzer en el infrarrojo han sido realizadas por **Cannon et al.** (2006), así como estudios con Chandra para la detección de fuentes de rayos X (**Tennant**, 2006). De igual forma, existen trabajos en los cuales ha sido cartografiado el gas atómico (**de Blok y Walter**, 2000; **Weldrake et al.**, 2003), el gas molecular (**Israel et al.**, 2003) así como el CO sobre NGC 6822 (**Gratier et al.**, 2010).

Propiedad	Valor	Referencias
Tipo morfológico	IB(s)m IV-V	The NASA/IPAC Extragalactic Database (NED)
Nombres Alternos	DDO 209, IC 4895	The NASA/IPAC Extragalactic Database (NED)
RA(J2000)	19 <sup>h</sup> 44 <sup>m</sup> 56 <sup>s</sup> .4	(Brandenburg y Skillman, 1998)
DEC((J2000)a)	-14 48 04.5	(Brandenburg y Skillman, 1998)
Ángulo de Posición (deg)	120	(Brandenburg y Skillman, 1998)
Inclinación (deg)	50.1	(Brandenburg y Skillman, 1998)
Distancia	0.47–0.50 Mpc	(Pietrzyński et al., 2004)
Escala lineal angular en esta distancia	2.3–2.4 pc seg arc <sup>-1</sup>	(Lee et al., 2006)
Velocidad Heliocentrica	-54 km s <sup>-1</sup>	(Mateo, 1998)
Longitud de escala del disco, $r_{exp}$ , (min arc)	3.0 ± 0.1	(Letarte et al., 2002)
$D_{25}$ (arcmin)	15.5	(Karachentsev et al., 2004)
$B_T$	9.32	(Karachentsev et al., 2004)
$E(B - V)$	0.236	(Karachentsev et al., 2004)
$M_B$	-15.1	(Lee et al., 2006)
Flujo integral en 21 cm, $F_{21}$	2339 (Jy km s <sup>-1</sup> )	(Karachentsev et al., 2004)
$\langle 12 + \log(O/H) \rangle$ , A-sg <sup>3</sup>	8.36 ± 0.19	(Venn et al., 2001)
$\langle 12 + \log(O/H) \rangle$ , H II <sup>4</sup>	8.11 ± 0.10; 8.10	(Lee et al., 2006; Hidalgo-Gómez et al., 2001)

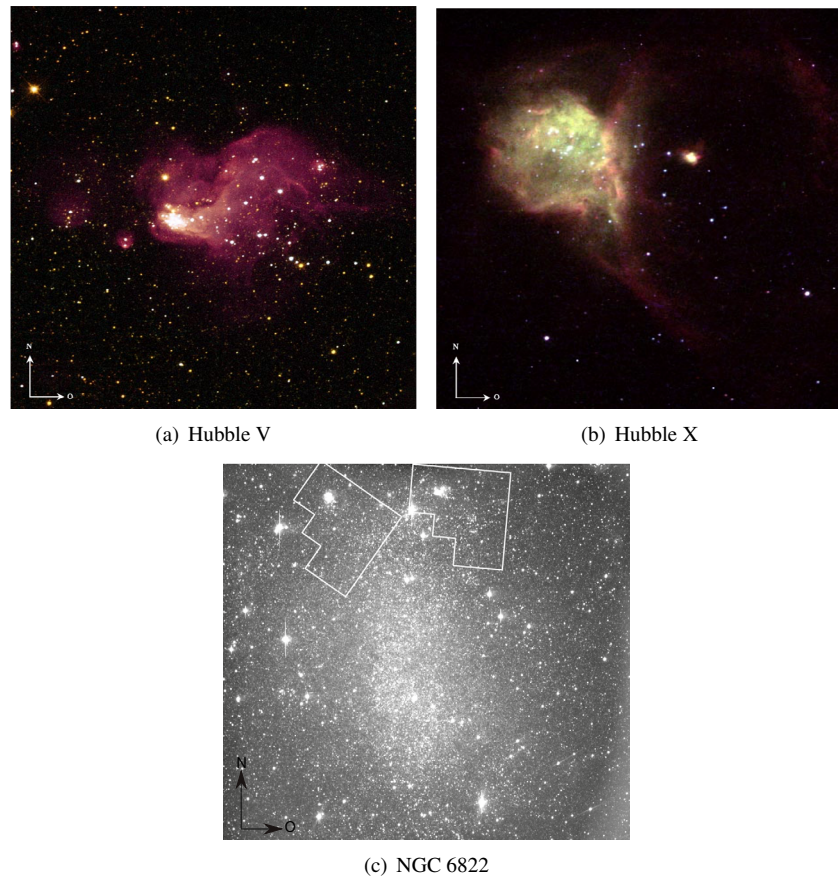
**Tabla 1.** Datos Básicos de NGC 6822.

## 0.2. Hubble V y Hubble X

Hubble V y Hubble X forman parte del gran complejo de regiones H II que se encuentra ubicados al norte de la barra de la Galaxia de Bernard (NGC 6822), donde también están las regiones Hubble I y II (Hubble, 1925; Hodge et al., 1988), así como varias asociaciones OB relativamente luminosas (Wilson, 1992; Hodge et al., 1989).

En la Figura 2(c) se aprecia la ubicación de Hubble V y Hubble X en NGC 6822. Cada recuadro abarca una región H II. Hubble V se encuentra en la parte derecha de la imagen, mientras que Hubble X se ubica en la parte izquierda. Hubble V (Figura 2(a)) y Hubble X (Figura 2(b)) tienen un tamaño en el óptico de 112 pc y 143 pc respectivamente (Hodge et al., 1989; Tomita et al., 1993) y son las dos regiones H II más luminosas de NGC 6822, separadas entre sí por una distancia de 320 pc.

Estudios en el rango del espectro visible han permitido describir la morfología de estas regiones. Un particular interés ha tenido la fotometría de regiones H II, debido al uso potencial que tiene el utilizar regiones H II gigantes extragalácticas en la determinación de distancias a escala extragaláctica (Roy y Arsenault, 1986; Shields, 1990; De Grijs, 2011; Relano et al., 2005). Kennicutt (1979) obtuvo flujos fotoeléctricos en H $\alpha$  para Hubble V y Hubble X, mientras que Hodge et al. (1989); Collier y Hodge (1994) empleando tecnologías con CCD, determinaron el flujo de H $\alpha$  para 145 regiones. Los mapas de flujos de emisión en H $\alpha$  de Hubble V y Hubble X fueron presentados por Collier y Hodge (1994) como mapas de isocontornos del brillo de estas regiones. Estudios posteriores reportados por O'Dell et al. (1999) y Bianchi et al. (2001) hicieron uso del Telescopio Espacial Hubble (HST) y presentaron una luminosidad en H $\alpha$  de  $4.8 \times 10^{-12}$  erg cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> para Hubble V y  $3.8 \times 10^{-12}$  erg cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> para Hubble X. O'Dell et al. (1999) concluyó que estas regiones son ópticamente gruesas y propuso que el brillo de las regiones H II en H $\alpha$  puede ser una herramienta útil para cuantificar la radiación ultravioleta y la tasa de formación estelar. Utilizando datos obtenidos del VLT, A. Peimbert et al. (2005) obtuvieron la temperatura, densidad y abundancias para Hubble V y Hubble X. Estudios sobre la densidad electrónica



**Figura 2.** (a) Hubble V. (b) Hubble X. (c) Imagen de 68'' x 630'' de NGC 6822 centrada a 19h 44m 54s, 14°47'39'' (E2000) obtenida con un filtro V [29]. La región que comprende a Hubble V se observa en la parte superior derecha de la imagen ("oeste"), mientras que Hubble X se ubica en la parte superior izquierda ("este"). Créditos: NASA, ESA y el Hubble Heritage Team (STScI / AURA) (O'Dell et al., 1999).

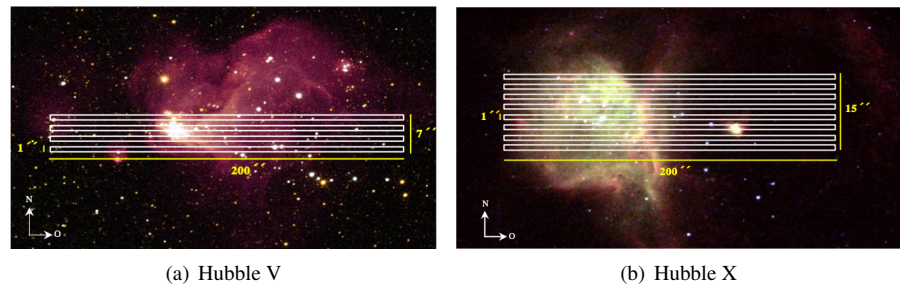
de Hubble V y Hubble X se han realizado considerando espectros integrados que abarcan a cada una de estas regiones (Castañeda et al., 1992; A. Peimbert et al., 2005), pero no punto a punto con una alta resolución, tal como se presenta en este trabajo.

## Observaciones y reducción de datos

Los espectros utilizados fueron obtenidos del Centro de Datos adscrito al *Cambridge Astronomical Survey Unit (CASU)* en el Instituto de Astronomía de la Universidad de Cambridge. Las observaciones se realizaron entre el 18 y 19 de agosto de 1992, con el espectrógrafo ISIS<sup>5</sup> del Telescopio William Herschel de 4.2 metros, en Islas Canarias, España, empleando la técnica de rendija larga. Para Hubble V se obtuvieron 4 espectros y para Hubble X 8 espectros (las observaciones se realizaron cambiando la posición de la rendija en la dirección norte a sur). Cada espectro corresponde a una diferente posición de la rendija, sobre cada una de las regiones H II. En la figura 3 se presenta las posiciones de las rendija en la dirección norte-sur (eje y) para cada una de las observaciones realizadas.

<sup>5</sup><http://www.ing.iac.es/Astronomy/instruments/isis/index.html>





**Figura 3.** Posiciones de la rendijas durante las observaciones en (a) Hubble V y (b) Hubble X. Imágenes adaptadas de Hubble Heritage Team (STScI / AURA) (O'Dell et al., 1999) O'Dell et al. (1999).

Todas las observaciones se realizaron a P.A. de  $90^\circ$ , con un ancho efectivo para cada observación de  $1''$  con una separación de  $2''$  entre los centros de cada dos posiciones consecutivas de la rendija. Se tomaron dos espectros de forma simultánea para cada posición, una para el brazo rojo, en el rango comprendido entre  $6390 \text{ \AA}$  y  $6849 \text{ \AA}$  y otra en el brazo azul entre  $4665 \text{ \AA}$  y  $5065 \text{ \AA}$  (estos no fueron utilizados en el presente trabajo), con una dispersión aproximada de  $0.4 \text{ \AA/pixel}$ . El tiempo de exposición para cada espectro obtenido en cada posición de la rendija fue de  $1000 \text{ s}$  para Hubble V y de  $1200 \text{ s}$  para Hubble X. La rendija tenía una longitud de  $200''$ , con un muestreo espacial a lo largo de la rendija de  $0.34''/\text{pixel}$  en el brazo rojo (Chip EEV3) y  $0.36''/\text{pixel}$  en el brazo azul (Chip TEK1).

Los datos fueron reducidos utilizando las técnicas estándar (sustracción de bias, corrección de campo de flat) y calibración en longitud de onda, usando el software **IRAF** (Image Reduction and Analysis Facility)<sup>6</sup>.

Para determinar la densidad de las regiones H II, es fundamental medir con alta precisión las líneas de emisión de [S II]  $\lambda\lambda 6717, 6731$ . Para ello, se fijó y ajustó la diferencia de longitud de onda de  $14.38 \text{ \AA}$  entre estas dos líneas, imponiendo que ellas tengan el mismo ancho y dejando libre la razón de flujos, ya que tal razón aritmética es un indicador de la densidad electrónica presente en el medio. Las medidas de los flujos de las dos líneas de emisión del azufre doblemente ionizado [S II], con los parámetros antes mencionados, se realizaron con el paquete DIPSO dentro del entorno Starlink<sup>7</sup> (Currie et al., 2014). Por la forma como se obtuvieron los espectros para este estudio y debido a la naturaleza adimensional de la razón  $R$  de [S II] no fue necesario realizar una calibración por flujo a los espectros.

## Cálculo de la densidad electrónica de regiones H II gigantes

El azufre doblemente ionizado [S II] es un ión que posee una configuración electrónica  $p^3$ . Considerando una aproximación de primer orden de los niveles superiores, el cociente entre la intensidad de las transiciones  $^2D_{5/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$  ( $6717.4$ ) y  $^2D_{3/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$  ( $6730.8$ ) resulta ser una función de la densidad electrónica. Para el caso del límite de baja densidad,  $N_e \rightarrow 0$  y cada excitación colisional es seguida por la emisión de un fotón, por lo tanto :

<sup>6</sup>El software de reducción de datos astronómicos **IRAF** se distribuye por el National Optical Astronomy Observatories (NOAO), operado por la Association of Universities for Research in Astronomy, Inc. (AURA) bajo el acuerdo de cooperación con la National Science Foundation. Disponible en <http://iraf.noao.edu/>

<sup>7</sup>Software disponible en <http://star-www.rl.ac.uk/>

$$\frac{S_{31}}{S_{32}} = \frac{A_{31}}{A_{32} + \frac{\Omega_{12}}{\Omega_{13}}(A_{31} + A_{32})e^{\Delta-E_{23}/kT}}, \quad (1)$$

donde  $S_{31}$  y  $S_{32}$  es el número de fotones emitidos por unidad de tiempo y de volumen para las transiciones  $3 \rightarrow 1$  y  $3 \rightarrow 2$  y  $A_{31}$  y  $A_{32}$  son los coeficientes de emisión espontánea de Einstein, en unidades de  $s^{-1}$  para las mismas transiciones (**López Sánchez, 2006**). No se considera el valor de la exponencial  $E_{23}$  debido a que es muy pequeño y hemos asumido que  $A_{31} \gg A_{32}$  debido a que la transición 3-2 tiene tiempos característicos más elevados que la transición 3-1 (**Osterbrock y Ferland, 2006; López Sánchez, 2006**). Empleando las fuerzas de colisión para el ion  $S^+$ , encontramos que  $S_{31}/S_{32} = 1.42$  en el rango del límite de baja densidad. Para el límite de alta densidad,  $N_e \rightarrow \infty$ , predominando las excitaciones y desexcitaciones colisionales, donde el cociente de poblaciones (de Boltzmann) es:

$$\frac{S_{31}}{S_{32}} = \frac{A_{31} g_3}{A_{32} g_2} e^{\Delta-E_{23}/kT} \approx \frac{A_{31} g_3}{A_{32} g_2}, \quad (2)$$

donde  $g_3$  y  $g_2$  son los pesos estadísticos de los niveles 3 y 2. Para el ion  $S^+$ , el valor de este cociente en el límite de alta densidad es  $S_{31}/S_{32} = 0.44$ . En el caso real, el cociente  $S_{31}/S_{32}$  posee valores comprendidos entre estos dos límites. Así, la densidad es una función monótona del cociente de intensidades, que depende débilmente de  $T_e$ . La gran mayoría de regiones H II se encuentran en el límite de baja densidad y para los casos en los cuales se desconoce o bien no se puede medir, se considera generalmente que su densidad es  $N_e \leq 100 \text{ cm}^{-3}$ .

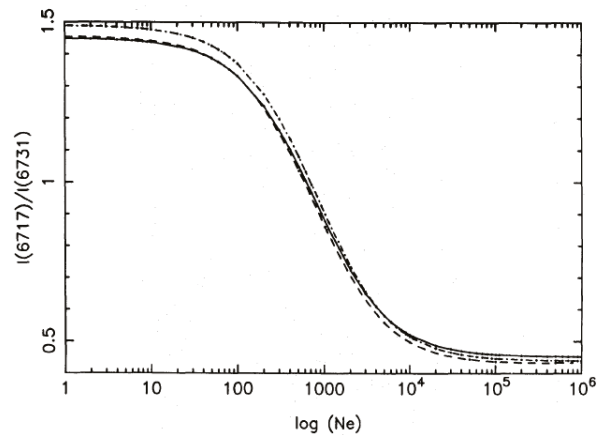
Para densidades intermedias, es necesario solucionar el átomo de cinco niveles. En la literatura se encuentran soluciones numéricas (**Stanghellini y Kaler, 1989**), programas que permiten realizar dicho cálculo (**De Robertis et al., 1987**) y soluciones analíticas para un tratamiento más simplificado, considerando el modelo de átomo de tres niveles (**Aller, 1984; McCall, 1984**).

Una solución analítica que considera el modelo del átomo de cinco niveles es propuesto por **Castañeda et al. (1992)**, donde se incluyen las posibles transiciones de radiación, excitación colisional, desexcitación colisional del [S II] en la configuración  $2p^3$  entre los niveles  $^4S$ ,  $^2D$  y  $^2P$ , a partir del esquema propuesto por **Seaton y Osterbrock (1957)**, sin considerar las transiciones  $^2P_{1/2} - ^2P_{3/2}$  y  $^2D_{3/2} - ^2D_{5/2}$ . En este modelo no se consideran los niveles  $^2P$  cuando se calculan las poblaciones en  $^2D$ . Esta aproximación es válida para  $N_e \leq 10^4 \text{ cm}^{-3}$ , es decir, los valores de densidad deben ser menores que la densidad crítica cuando la razón de desexcitación colisional es igual a la razón de radiación espontánea para el [S II] (**Zheng, 1988; López Sánchez, 2006**). La solución analítica de primer orden de  $x$  (donde  $x = N_e 10^{-4} t^{1/2}$  y  $t = 10^{-4} T_e$ ) queda definida como (**Castañeda et al., 1992**):

$$R = \frac{S_{31}}{S_{32}} = \frac{I(\lambda 6717)}{I(\lambda 6731)} = 1.45 \frac{1 + 4.18x}{1 + 13.42x}. \quad (3)$$

Computacionalmente, la densidad de las regiones H II se calcula a partir del valor de  $R$ , utilizando la rutina **TEM DEN** de IRAF (**Shaw y Dufour, 1995**), la cual incorpora el programa **FIVEL** (**De Robertis et al., 1987**) que reproduce el comportamiento de un átomo con cinco niveles.

En la Figura 4 se presenta la solución analítica propuesta por **Castañeda et al. (1992)**, la solución para el átomo de tres niveles de **McCall (1984)** y los resultados numéricos obtenidos para la solución del átomo de cinco niveles, obtenidos usando el programa **FIVEL**



**Figure 4.** Comparación entre las solución numérica obtenida con el programa FIVEL (De Robertis et al., 1987) (—), el átomo de tres niveles (McCall, 1984) (-.-) y la solución aproximada del átomo de 5 niveles (Castañeda et al., 1992) (-.-), todas para  $T_e = 10^4$  K. Imagen adaptada de Castañeda et al. (1992).

(De Robertis et al., 1987), incorporado actualmente en la tarea *temden* del paquete **Nebular** de **IRAF** (Shaw y Dufour, 1995). Existe una alta concordancia entre los valores de densidad obtenidos por la solución numérica del átomo de 5 niveles y los calculados con la ecuación 3 para  $N_e = 100 \text{ cm}^{-3}$ , siendo su discrepancia del 4%, mientras que para densidades electrónicas del orden de  $N_e = 7 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ , la discrepancia aumenta hasta el 20% (Castañeda et al., 1992).

### 0.3. Cálculo de la densidad electrónica a partir de las observaciones

Los flujos de las líneas de [S II] fueron medidos con la rutina DIPS0<sup>8</sup>. Esta herramienta ofrece la ventaja de calcular los errores asociados a cada una de las cantidades determinadas por el mismo. El error de [S II] ha sido cuantificado usando la relación dada por Oliveira (2009):

$$\Delta R = \frac{I_{6717}}{I_{6731}} \sqrt{\frac{\Delta I_{6717}}{(I_{6717})^2} + \frac{\Delta I_{6731}}{(I_{6731})^2}}, \quad (4)$$

donde  $\Delta R$  es el error calculado para la razón  $R$  de [S II],  $I_{6717}$  e  $\Delta I_{6717}$  son la intensidad y el error asociado a la medida de la línea [S II] $\lambda 6717$ ,  $I_{6731}$  e  $\Delta I_{6731}$  son la intensidad y el error asociado a la medida de la línea [S II] $\lambda 6731$ .

Para determinar la densidad electrónica de Hubble V y Hubble X, se utilizó la tarea *temden* del paquete **Nebular** de **IRAF**, la cual converge a una solución a partir de la razón  $R$  de flujo de las líneas de [S II] que se encuentran en el intervalo de 0.46 a 1.42, donde es posible obtener valores de densidad positivos.

El proceso de creación de los espectros unidimensionales se realizó para los 4 espectros de Hubble V y los 8 espectros de Hubble X. Con los espectros unidimensionales, se seleccionó únicamente aquellos para los cuales la S/N de la emisión de [S II]  $\lambda\lambda 6717, 6731$

<sup>8</sup>DIPS0 es una herramienta de análisis espectral del proyecto Starlink y se encuentra disponible en <http://starlink.jach.hawaii.edu/starlink/>



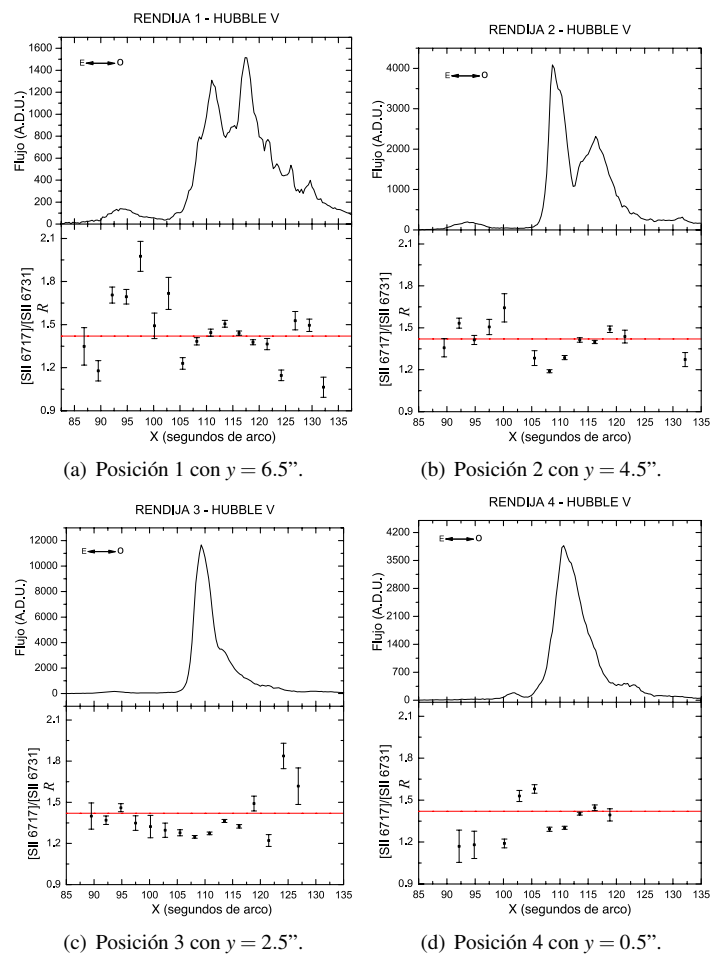
existiera, fuera claramente identificable y que pudiera ser cuantificado con el programa DIPSO.

## Resultados

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos a partir de las observaciones espectroscópicas de las regiones H II gigantes Hubble V y Hubble X.

### 0.4. Hubble V

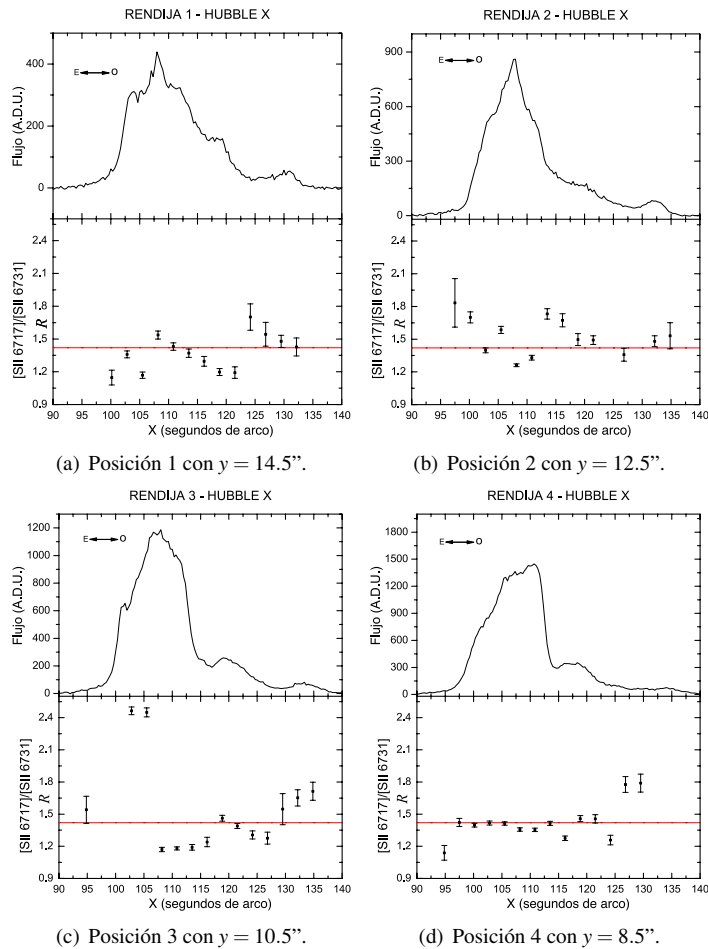
En las Figuras 5(a) - 5(d) se observan los perfiles de emisión en  $H\alpha$  y la razón  $R$  de las líneas de emisión de  $[S II] \lambda\lambda 6717, 6731$  para las 4 posiciones de la rendija sobre Hubble V. En las observaciones, la primera rendija fue ubicada en la sección norte de la zona central de Hubble V, con P.A. =  $90^\circ$ . Para las subsiguientes posiciones, se desplazó la rendija en la dirección norte-sur (eje  $y$ ) cada  $2''$  respecto a su centro, manteniendo P.A. =  $90^\circ$ . La línea roja en 1.42 es la cota máxima de  $R$  para la cual es posible obtener un valor positivo de densidad, tal como se mencionó en la sección 0.3.



**Figura 5.** Perfil espacial del flujo en  $H\alpha$  (en A.D.U) y la razón  $R$  de  $[S II]\lambda 6717/\lambda 6731$  para cada una de las diferentes 4 posiciones en Hubble V. a P.A. =  $90^\circ$ . La línea roja en  $R = 1.42$  representa la cota superior para la cual la densidad es positiva.

### 0.5. Hubble X

En las Figuras 6(a) a 7(d) se presentan los perfiles de emisión en  $H\alpha$ , la razón de flujo ( $R$ ) de las líneas  $[S II] \lambda\lambda 6717, 6731$ . De forma similar a Hubble V, las observaciones en Hubble X se realizaron ubicando la primera rendija en la sección norte de la zona central de Hubble X, con P.A. =  $90^\circ$ . Las subsecuentes observaciones se obtuvieron al desplazar la rendija en la dirección norte-sur manteniendo P.A. =  $90^\circ$ . De forma similar a Hubble V, en las figuras de Hubble X la línea roja representa el máximo valor de  $R$  para el cual es posible determinar un valor de densidad electrónica positivo.

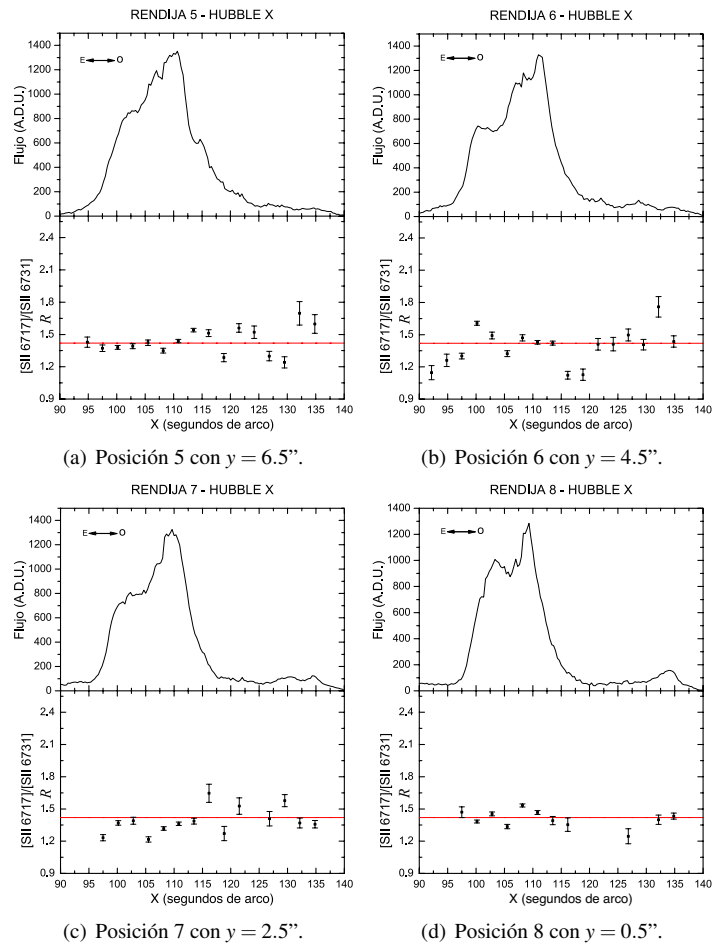


**Figura 6.** Perfil espacial del flujo en  $H\alpha$  en A.D.U. y la razón  $R$  de  $[S II] \lambda\lambda 6717 / \lambda 6731$  para las posiciones 1-4 en Hubble X a P.A. =  $90^\circ$ . La línea roja en  $R = 1.42$  representa la cota superior para la cual la densidad es positiva.

## Discusión

### 0.6. Espectros punto a punto

Los gráficos en la parte superior de las figuras 5(a) - 5(d) y 6(a) - 7(d) presentan el flujo en  $H\alpha$  punto a punto a lo largo de la rendija para cada una de las distintas posiciones en Hubble V y Hubble X. Los resultados asociados a la variación espacial de la razón  $R$  en



**Figura 7.** Perfil espacial del flujo en H $\alpha$  en A.D.U. y la razón  $R$  de  $[S II]\lambda 6717/\lambda 6731$  para las posiciones 5-8 en Hubble X a P.A. =  $90^\circ$ . La línea roja en  $R = 1.42$  representa la cota superior para la cual la densidad es positiva.

Hubble V y Hubble X se presentan en las gráficas inferiores de las figuras 5(a) - 5(d) y 6(a) - 7(d). La razón  $R$  entre las líneas de emisión de  $[S II]\lambda 6717/\lambda 6731$  es un fuerte indicador de la densidad electrónica y en los resultados que se reportan en este trabajo se pone en evidencia la variación espacial de esta propiedad en Hubble V como en Hubble X.

En Hubble V se observó que la razón de flujo del doblete de azufre está en el intervalo  $1.06 \leq R \leq 2.0$ , es decir,  $N_e \leq 495 \text{ cm}^{-3}$ , lo que corresponde a un régimen de baja densidad (Castañeda et al., 1992). Se detectó en esta región una variación espacial sistemática de la razón de  $[S II]$  en la zona correspondiente al núcleo principal de esta región H II. Aunque en las observaciones realizadas sobre la zona de la primera rendija (Figura 5(a)) no se identificó una variación sistemática de la densidad (gradiente de densidad), este comportamiento si es visible en las otras tres posiciones restantes de las rendija (Figuras 5(b) - 5(d)) y que conforman nuestro conjunto total de observaciones para Hubble V. En esta región H II es visible un patrón común en el comportamiento de la densidad electrónica y es el hecho de que para el punto de máximo brillo superficial se encuentra asociado un bajo valor de  $R$ , o lo que es equivalente, un alto valor de la densidad electrónica, la cual disminuye a medida que nos alejamos de este punto. Castañeda et al. (1992) y Copetti et al. (2000) afirmaron que una característica distintiva en regiones H II con gradiente de

densidad es presentar un pico de densidad electrónica en la zona de máximo brillo superficial, siendo esta una propiedad visible en Hubble V. **Castañeda et al.** (1992) proponen una metodología para la construcción de un modelo matemático que reproduzcan la variación del brillo superficial de la región H II en función de su densidad electrónica y considerando que en la región se identifican gradientes de densidad. Este modelo considera que la densidad varía radialmente, desde el centro de la región H II, con un punto de máxima densidad. Debido al poco número de puntos disponibles en nuestras observaciones en Hubble V para los cuales  $R \leq 1.42$  y tomando en cuenta que el gradiente de densidad identificado en esta región abarca una zona de poca extensión en comparación con el tamaño total de Hubble V, no es posible construir un modelo de este tipo, pero es posible discutir semejanzas con los resultados previos. Una característica relevante identificada en Hubble V, es el hecho que en las regiones con gradientes de densidad se tienen zonas de alto brillo o núcleos en las cuales se detecta una gran cantidad puntos con altos valores de densidad, mientras que en las zonas restantes el comportamiento de  $N_e$  en general está en el límite convencional de baja densidad ( $N_e \leq 100 \text{ cm}^{-3}$ ).

Para Hubble X, el comportamiento de la razón  $R$  es completamente diferente al observado en Hubble V. En esta región H II no son visibles las variaciones o cambios sistemáticos de la densidad electrónica en función de la posición, donde  $R$  describe un comportamiento más plano, a excepción de algunos puntos aislados que aleatoriamente presentan altos valores de densidad. La razón de flujo del doblete de azufre está en el intervalo  $1.10 \leq R \leq 2.5$ , es decir, que la densidad electrónica es menor a  $N_e \leq 412 \text{ cm}^{-3}$ , lo que corresponde a un régimen de baja densidad. Estos resultados concuerdan con lo reportado por **Castañeda et al.** (1992) para esta región H II, el cual se realizó observando 6 puntos a lo largo de Hubble X, en los cuales se determinó la razón  $R$ , donde solo tres de ellos están por debajo de 1.4 y muy cercanos entre sí. En nuestro estudio, el análisis de la densidad de Hubble X se sustenta en observaciones que arrojan un conjunto de 115 puntos con una alta S/N, donde se detectó y midió el doblete de azufre. Un estudio similar para un gran conjunto de regiones H II (S 255, S 257, S 271, S 285, S 301, S 305, NGC 3372 e IC 1275) presentó que no fue posible identificar variaciones espaciales sistemáticas en la densidad (**Copetti et al.**, 2000).

La existencia de distintos estudios que contienen información sobre las variaciones punto a punto de la densidad electrónica  $N_e$  en otras regiones H II gigantes concuerdan cuantitativamente con los resultados obtenidos en este trabajo. **White** (1981) presentó un estudio de la variación espacial de la densidad electrónica sobre el núcleo de 30 Doradus (NGC 2070), utilizando el doblete de [O II] $\lambda\lambda 3726, 3729$ . La densidad para esta región está en el intervalo de  $500 - 700 \text{ cm}^{-3}$  para las posiciones en las cuales fue posible medir las dos líneas, encontrando que el valor máximo de  $N_e$  se localiza en el punto más brillante de esta región. **Cantó et al.** (1980) miden la línea de separación del doblete de [O II] en 30 Doradus, obteniendo valores de densidad electrónica que fluctúan en el orden de  $200 \text{ cm}^{-3}$  a  $1000 \text{ cm}^{-3}$ . **Rosa y Solf** (1984) presentaron mediciones de  $N_e$  para NGC 604 en su zona de alto brillo superficial, obteniendo un rango de valores de  $50-200 \text{ cm}^{-3}$ . Un estudio reciente para H II (NGC 604) fue realizado por **Maíz-Apellániz et al.** (2004a), empleando la misma técnica y configuración en sus observaciones que las utilizadas en este trabajo. Para 10 posiciones diferentes de la región sobre NGC 604, **Maíz-Apellániz et al.** (2004a) construyó mapas de la razón  $R$  en los cuales para la mayor cantidad de puntos obtiene valores de  $[S II]\lambda 6717/\lambda 6731 \geq 1.30$ , lo que corresponde a un régimen de baja densidad. Tan solo algunos puntos en esta región presentan valores de  $[S II]\lambda 6717/\lambda 6731 \approx 1.30$ . No se observa una alta discrepancia en sus resultados y en ambos estudios se describe un comportamiento de la densidad electrónica dentro del régimen de baja densidad. **Relaño et al.** (2010) reportó determinó la densidad punto a punto de NGC 595 utilizando la técnica de Espectroscopía de Campo Integral (IFS). El rango de la razón de las líneas de azufre  $R$  es de 1.2 a 1.8 ( $N_e \leq 220 \text{ cm}^{-3}$ ), lo cual muestra que esta región H II tiene baja densidad, corroborando lo encontrado en estudios anteriores por **Esteban et al.** (2009) y **Vílchez et**

al. (1988). Según **Relaño et al.** (2010), la distribución de la densidad de electrones en NGC 595 no presenta fuertes variaciones ni una tendencia con la distribución de emisión en H $\alpha$ . Sin embargo, en la figura 7 de **Relaño et al.** (2010) sí se identifica que las altas emisiones en la distribución de emisión están acompañadas de altos valores de densidad, lo que contradice este último resultado. **Lagrois y Joncas** (2009) realizan un estudio similar de esta región H II empleando la técnica de espectroscopía de Fabry-Perot. En sus resultados presentan un mapa bidimensional de densidad de NGC 595 que se extiende en un campo más amplio que el de **Relaño et al.** (2010). En la zona de emisión de H $\alpha$  no se observan fuertes variaciones en la densidad fluctuando de 60 cm<sup>-3</sup> a 150 cm<sup>-3</sup>. En términos generales estos trabajos confirman que en los estudios de alta resolución de densidad en regiones H II, es común encontrar puntos o zonas con altos valores de densidad, i.e.  $N_e > 300$  cm<sup>3</sup>. Asociamos estos altos valores a puntos en las regiones H II como pequeños grumos de gas o filamentos altamente densos. Sin embargo los efectos de estas zonas son muy pequeños en comparación con el comportamiento global de la región H II, el cual para todos los casos reportados en este estudio se encuentran en el régimen de baja densidad, tal como era esperado.

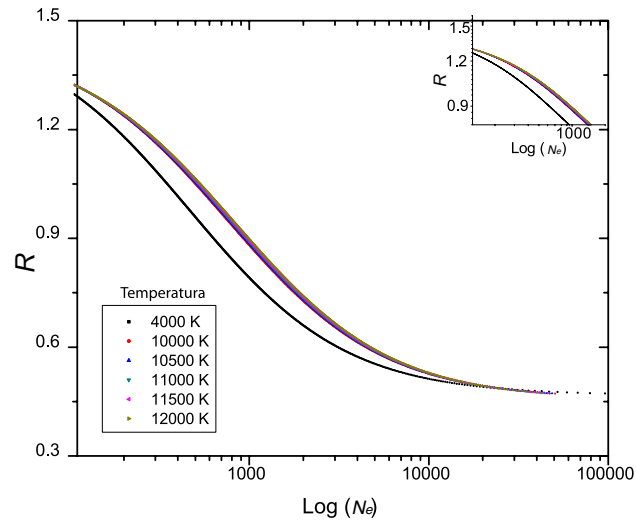
Resulta fundamental comprobar el grado de validez de estos resultados y conocer que factores son las fuentes de error asociadas el proceso de cuantificar la densidad electrónica. La dependencia de la razón en función de la temperatura electrónica no es tan fuerte en el rango de temperaturas consideradas para estas regiones H II. La temperatura electrónica típica para regiones H II han sido estimadas en el rango 8000 K a 15000 K (**Pagel et al.**, 1980; **Rayo et al.**, 1982; **Shields**, 1990), aunque existen casos especiales de regiones H II, como M51, donde su temperatura es del orden  $T_e < 4000$  K (**Diaz et al.**, 1991). Con la finalidad de minimizar los efectos asociados al uso de un valor de la temperatura en el cálculo de la densidad, se recurrió a consultar los distintos estudios previos sobre Hubble V y Hubble X en los cuales se cuantifica  $T_e$  (Tabla 2), encontrando que el rango de temperaturas para Hubble V está entre 11000 K y 12000 K mientras que para Hubble X está entre 10500 K y 12000 K.

$T_e$ de Hubble V (K)	$T_e$ de Hubble X (K)	Referencia
11100 $\pm$ 800/600	-	( <b>M. Peimbert y Spinrad</b> , 1970)
11100	-	( <b>Smith</b> , 1975)
11200	10700	( <b>Lequeux et al.</b> , 1979)
11000 $\pm$ 900	11500 $\pm$ 1500	( <b>Pagel et al.</b> , 1980)
11500 $\pm$ 1000	-	( <b>Skillman et al.</b> , 1989)
11800 $\pm$ 50	11950 $\pm$ 600	( <b>Hidalgo-Gómez et al.</b> , 2001)
11860 $\pm$ 540	-	( <b>Lee et al.</b> , 2006)
11000	11500	( <b>Roy y Arsenault</b> , 1986)
11500 $\pm$ 2000	-	( <b>A. Peimbert et al.</b> , 2005)

**Tabla 2.** Valores de la temperatura electrónica de Hubble V y Hubble X reportados en la literatura.

En la Figura 8 se presenta la densidad calculada con la tarea **temden** de IRAF, para diferentes valores de la razón  $R$  de [S II]  $\lambda\lambda 6717, 6731$  a distintas temperaturas electrónicas ( $T_{e1} = 10000$  K,  $T_{e2} = 10500$  K,  $T_{e3} = 11000$  K,  $T_{e4} = 11500$  K,  $T_{e5} = 12000$  K). En





**Figura 8.** Comportamiento de la densidad electrónica vs razón  $R$  de [S II] para distintas temperaturas electrónicas, el cual es indistinguible para el rango de 10000 K a 12000 K.

el intervalo de temperaturas de 10000 K a 12000 K no se observan grandes diferencias en los valores de la densidad. Al considerar el caso extremo reportado por (Díaz et al., 1991) para M51 en el cual su temperatura electrónica es del orden de 4000 K, si se observa una discrepancia en los valores de la densidad en comparación a los obtenidos dentro del rango de 10000 K a 12000 K. Para el rango de temperaturas medidas en las regiones H II estudiadas en este trabajo, la incertidumbre asociada a la elección de la temperatura electrónica para Hubble V y Hubble X no afecta de forma representativa el resultado en el cálculo de la densidad.

En este estudio se consideró que la temperatura electrónica es de 11500 K, siendo este un valor característico para estas dos regiones H II gigantes (Tabla 2). La incertidumbre asociadas a la temperatura electrónica genera un error en el cálculo de la densidad electrónica. Phillips (1998), empleando el modelo de Keenan et al. (1996), determinó que un error en la temperatura electrónica del orden de  $\Delta T_e / T_e \sim 0.1$  genera en la densidad un error del orden de  $\Delta \log(N_e) \sim 0.02$ .

Otra fuente de error a considerar en el cálculo de la densidad resulta del hecho que al estar cerca del límite de baja densidad, esta es una zona prácticamente plana de la relación  $R$  vs.  $N_e$ . Como consecuencia, un pequeño error en la razón de [S II] se traduce en un gran error en el cálculo de la densidad. Keenan et al. (1996) estiman que una incertidumbre en la razón  $R$  de  $\Delta R/R \sim 0.2$  puede verse traducida en un error típico de  $\Delta \log(N_e) \sim 0.1$ . Una forma de minimizar este último error es considerar espectros con una alta S/N, por este motivo, los cálculos de la densidad electrónica que se muestran en las figuras 5(a) - 5(d) y 6(a) - 7(d) fueron realizados a partir de mediciones en espectros unidimensionales obtenidos del promedio de 4 líneas de azufre.

### 0.7. Espectros integrados

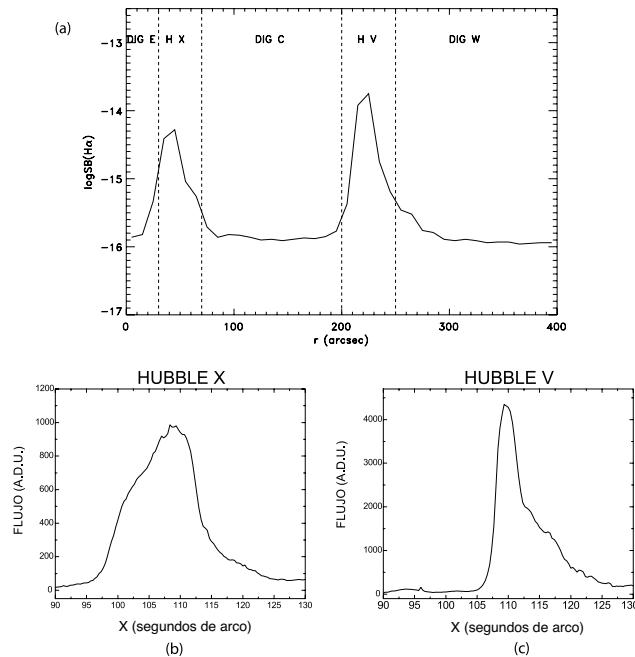
A partir de nuestras observaciones se obtuvo el espectro integrado total para Hubble V y Hubble X. El procedimiento empleado para determinar el espectro integrado es similar al usado para crear cada uno de los espectros unidimensionales. En este caso, se promedian las distintas zonas de todos los espectros (4 para Hubble V y 8 para Hubble X) en los cuales existe emisión del doblete [S II], empleando para ello la tarea *imcombine* de IRAF y creando

para cada región H II un espectro unidimensional. En la tabla 3 se presentan los resultados de la densidad electrónica  $N_e$  utilizando el espectro unidimensional integrado de Hubble V y Hubble X, así como los valores de temperatura electrónica  $T_e$ (K) reportados en la literatura.

Hubble V		Hubble X		Referencia
$N_e$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$T_e$ (K)	$N_e$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$T_e$ (K)	
< 100	11200	< 100	10700	(Lequeux et al., 1979)
		$66^{+84}_{-66}$	10000	(Castañeda et al., 1992)
$90 \pm 75$	$11500 \pm 2000$	< 100	-	(A. Peimbert et al., 2005)
< 100	10000 - 12000	< 100	10000 - 12000	(Hidalgo-Gómez y Peimbert, 2007)
$140^{+29}_{-27}$	11500	< 100	11500	<b>Este estudio</b>

**Tabla 3.** Densidades y temperaturas electrónicas de Hubble V y Hubble X para espectros integrados.

Hubble V describe una estructura en su perfil de emisión constituido inicialmente por dos máximos de emisión, uno de los cuales se atenúa a medida que se desplaza la rendija hacia el sur en esta región H II. En la zona sur, se observa un perfil con un único pico de emisión (rendija 3 y 4). Hubble X presenta un comportamiento similar. Estos resultados en  $H\alpha$  concuerda con los mapas de emisión reportados por Collier y Hodge (1994). El perfil de emisión en  $H\alpha$  asociado a Hubble V presenta la misma estructura, aunque con una menor intensidad que las observadas en Hidalgo-Gómez y Peimbert (2007), como se aprecia en la Figura 9.

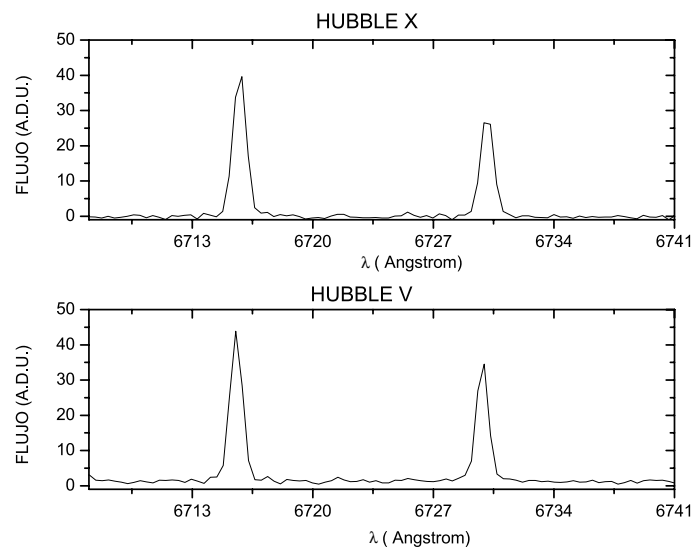


**Figura 9.** Flujo en  $H\alpha$  a lo largo de la posición de la rendija. (a) Flujo de Hubble V y Hubble X presentado por (Hidalgo-Gómez et al., 2001). (b), (c) Flujos integrados de Hubble V y Hubble X reportados en este trabajo. El “este” en todas las figuras se ubica al lado izquierdo.

Para Hubble X, se observó una diferencia en la estructura del perfil de emisión entre el perfil presentado en este trabajo y el reportado por Hidalgo-Gómez y Peimbert (2007).

Esta aparente discrepancia se explica si se considera que a pesar de que las observaciones se realizaron con el mismo ángulo de posición, existe una diferencia en el ancho de la zona observada. **Hidalgo-Gómez y Peimbert (2007)** abarcan una zona de Hubble X en la dirección norte-sur con un ancho de 0.5 segundos de arco, mientras que para el perfil reportado en este trabajo, el ancho observado en la misma dirección corresponde a las 8 posiciones de la rendija, cada una con un ancho de 1 segundo de arco y separadas por dos segundos de arco entre los centros de las rendijas. Aunque la técnica empleada en los dos trabajos fueron observaciones con espectroscopía de rendija larga, la principal causa de la diferencia en el tamaño de las zonas de emisión radica en que las observaciones reportadas por Hidalgo se realizaron en un telescopio de 8.2 metros, 4 veces más grande que el telescopio William Herschel con el cual se realizaron las observaciones de este trabajo.

En Hubble V, el perfil de emisión coinciden con el reportado por **Hidalgo-Gómez y Peimbert (2007)** a pesar de que el área de la región observada es diferente. Esto se debe a que en la zona abarcada por la rendija en la tercera posición presenta un muy alta emisión en  $H\alpha$ , con un pico de emisión de un orden de magnitud mayor que el medido en las otras tres posiciones de la rendija y con una forma muy similar a la observada por **Hidalgo-Gómez y Peimbert (2007)**. Al medir el espectro integrado, el perfil de máxima emisión atenúa los efectos de las observaciones restantes, de ahí que coincidan los perfiles de los dos estudios.



**Figura 10.** Espectro integrado de emisión del doblete de azufre para Hubble V y Hubble X.

En la Figura 10 se presentan los espectros integrados de Hubble V y Hubble X del doblete de azufre. Es visible un comportamiento dentro del régimen de baja densidad, el cual se corrobora con las medidas de la densidad reportadas en la literatura (**Lequeux et al., 1979; Castañeda et al., 1992; A. Peimbert et al., 2005; Hidalgo-Gómez y Peimbert, 2007**). La causa de la diferencia en el valor de la densidad obtenido por **A. Peimbert et al. (2005)** se debe al uso de rendijas que cubren una mayor área de observación en comparación a las observaciones utilizadas en este trabajo.

## Conclusiones

En este trabajo se determinó la densidad electrónica de Hubble V y Hubble X punto a punto, así como también para sus espectros integrado, usando la razón de las líneas de

emisión [S II] ( $\lambda 6717/\lambda 6731$ ), medido a partir de observaciones en el visible realizadas con la técnica de rendija larga con una alta S/N.

La densidad a alta resolución muestra en las dos regiones H II un comportamiento no homogéneo de la densidad, con la presencia de gradientes, siendo más pronunciados en Hubble V que en Hubble X. El comportamiento de la densidad en las dos regiones corrobora la tendencia de un régimen de baja densidad.

Se comprobó que el intervalo de temperatura electrónica del gas al interior de las dos regiones H II estudiadas no es un factor que afecte el cálculo de la densidad de Hubble V y Hubble X. No se observa una relación explícita entre la densidad electrónica y el flujo de emisión en  $H\alpha$ , lo cual es un resultado nuevo y relevante en este tipo de estudios.

La densidad electrónica para los espectros integrados de Hubble V y Hubble X corresponde a un régimen de baja densidad y coinciden con lo reportado en estudios previos a la misma temperatura electrónica, de modo que la desexcitación por colisión desempeña un papel de poca relevancia en estos procesos.

Las regiones H II se encuentran localizadas a grandes distancias, lo que dificulta realizar observaciones a alta resolución que posibiliten llevar a cabo este tipo de análisis. El estudio que aquí se presentó es el primero en alta resolución y punto a punto que se reporta en la literatura para Hubble V y Hubble X.

Una línea de trabajo a desarrollar consiste en construir mapas bidimensionales de densidad de estas dos regiones H II, empleando técnicas de interpolación bidimensional y reconstrucción de imágenes (Caicedo-Ortiz, 2011), pero para ello es necesario utilizar el doblete de [O II], el cual ofrece una mayor sensibilidad a las condiciones de baja densidad y resulta ser más adecuado para estas condiciones que el doblete de [S II]. Para llevar a cabo mediciones de estas líneas de emisión, es necesario el uso de telescopios más potentes que posean espectrógrafos de alta resolución, así como la asignación de un alto tiempo de observación, una combinación a la cual no es tan sencillo acceder.

## Contribución de los autores

H.O. Castañeda-Fernández realizó las observaciones, supervisó la reducción de datos, la obtención de resultados y revisó parcialmente la redacción del artículo. H.E. Caicedo-Ortiz realizó la reducción de datos, proceso los espectros, realizó las medidas de la densidad, verificó la validez de los resultados y escribió el artículo. Todos los autores propusieron en conjunto la metodología de trabajo, analizaron, discutieron y aprobaron los resultados.

## Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses con respecto al contenido de este artículo.

## Agradecimientos

H.E. Caicedo-Ortiz agradece a los tres evaluadores la respetuosa y detallada revisión de este manuscrito, así como sus acertados comentarios y sugerencias que permitieron mejorar considerablemente el presente artículo.

## Referencias

- Aller, L. H. (1984). *Physics of thermal gaseous nebulae* (Vol. 112). Springer; 1 edición.
- Bianchi, L., Scuderi, S., Massey, P., y Romaniello, M. (2001). The Massive Star Content of NGC 6822: Ground-Based, Hubble Space Telescope Photometry. *AJ*, **121**, 2020-2031. doi: 10.1086/319969
- Brandenburg, H. J., y Skillman, E. D. (1998). The Neutral Hydrogen in NGC 6822. En *American astronomical society meeting abstracts* (Vol. 30, p. 1354).
- Caicedo-Ortiz, H. E., Santiago-Cortes, E., López-Bonilla, J., y Castañeda, H. O. (2015). Fractal dimension and turbulence in Giant HII Regions. *Journal of Physics Conference Series*, **582**, 012049. doi: 10.1088/1742-6596/582/1/012049
- Caicedo-Ortiz, H. E. (2011). *Estudio de Regiones HII Gigantes* (Tesis de Master no publicada). Instituto Politécnico Nacional (IPN), México.
- Caicedo-Ortiz, H. E., Castañeda, H. O., y Santiago-Cortés, E. (2017). Fractalidad en regiones de Formación Estelar. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, **39** 3, e3308-1 - e3308-8. doi: 10.1590/1806-9126-rbef-2017-0006
- Caicedo-Ortiz, H. E., y Castañeda Fernández, H. O. (2019). Relationship Between the Ionization Energy and the Radial Velocity of the Ionized Gas in Gaseous Nebulae. *Astrophysics*, **62** (1), 57-68. doi: 10.1007/s10511-019-09564-9
- Campbell-White, J., Ali, A. A., Froebrich, D., y Kume, A. (2020). Shape analysis of h ii regions—ii. synthetic observations. *MNRAS*, **496** 4, 4311–4329.
- Cannon, J. M., Walter, F., Armus, L., Bendo, G. J., Calzetti, D., Draine, B. T., ... Thornley, M. D. (2006). The Nature of Infrared Emission in the Local Group Dwarf Galaxy NGC 6822 as Revealed by Spitzer. *ApJ*, **652**, 1170-1187. doi: 10.1086/508341
- Cantó, J., Elliott, K. H., Meaburn, J., y Theokas, A. C. (1980, 12). On the derivation of electron density and temperature from [S II] and [O II] line intensity ratios. *MNRAS*, **193** 4, 911-919. doi: 10.1093/mnras/193.4.911
- Castañeda, H. O., Vilchez, J. M., y Copetti, M. V. F. (1992). Density studies on giant extragalactic H II regions. *A&A*, **260**, 370-380.
- Clementini, G., Held, E. V., Baldacci, L., y Rizzi, L. (2003). RR Lyrae, Short-Period Variable Stars in the Dwarf Irregular Galaxy NGC 6822. *ApJ*, **588**, L85-L88. doi: 10.1086/375633
- Collier, J., y Hodge, P. (1994). The H II regions of NGC 6822. 3: A photometric atlas. *ApJS*, **92**, 119-123. doi: 10.1086/191961
- Copetti, M. V. F., Mallmann, J. A. H., Schmidt, A. A., y Castañeda, H. O. (2000). Internal variation of electron density in galactic HII regions. *A&A*, **357**, 621-636.
- Currie, M. J., Berry, D. S., Jenness, T., Gibb, A. G., Bell, G. S., y Draper, P. W. (2014, mayo). Starlink Software in 2013. En N. Manset y P. Forshay (Eds.), *Astronomical data analysis software and systems xxiii* (Vol. 485, p. 391).
- de Blok, W. J. G., y Walter, F. (2000). Evidence for Tidal Interaction, a Supergiant H I Shell in the Local Group Dwarf Galaxy NGC 6822. *ApJ*, **537**, L95-L98. doi: 10.1086/312777
- De Robertis, M. M., Dufour, R. J., y Hunt, R. W. (1987). A five-level program for ions of astrophysical interest. *JRASC*, **81**, 195-220.
- de Vaucouleurs, G., de Vaucouleurs, A., Corwin, H. G., Jr., Buta, R. J., Paturel, G., y Fouque, P. (1991). *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies* (G. de Vaucouleurs, A. de Vaucouleurs, H. G. Corwin Jr., R. J. Buta, G. Paturel, y P. Fouque, Eds.).
- De Grijs, R. (2011). *An introduction to distance measurement in astronomy*. John Wiley & Sons.
- Diaz, A. I., Terlevich, E., Vilchez, J. M., Pagel, B. E. J., y Edmunds, M. G. (1991). Abundance analysis of giant H II regions in M51. *MNRAS*, **253**, 245-255.



- Eskridge, P. B., y White, R. E., III.** (1997). The nature of the X-ray point source in the bar of NGC 6822. *AJ*, **114**, 988-996. doi: 10.1086/118529
- Esteban, C., Bresolin, F., Peimbert, M., García-Rojas, J., Peimbert, A., y Mesa-Delgado, A.** (2009). Keck HIRES Spectroscopy of Extragalactic H II Regions: C and O Abundances from Recombination Lines. *ApJ*, **700**, 654-678. doi: 10.1088/0004-637X/700/1/654
- Evans, I. N., y Dopita, M. A.** (1985). Theoretical models for H II regions. I - Diagnostic diagrams. *ApJS*, **58**, 125-142. doi: 10.1086/191032
- Fleming, L.** (2021). *Synthetic observations of line emission from simulated hii regions* (Tesis de Master no publicada).
- Gallagher, J. S., III, Hunter, D. A., Gillett, F. C., y Rice, W. L.** (1991). Far-infrared properties of NGC 6822. *ApJ*, **371**, 142-147. doi: 10.1086/169878
- Gallart, C., Aparicio, A., Bertelli, G., y Chiosi, C.** (1996a). The Local Group Dwarf Irregular Galaxy NGC 6822.III. The Recent Star Formation History. *AJ*, **112**, 2596. doi: 10.1086/118205
- Gallart, C., Aparicio, A., Bertelli, G., y Chiosi, C.** (1996b). The Local Group Dwarf Irregular Galaxy NGC 6822.II. The Old, Intermediate -Age Star Formation History. *AJ*, **112**, 1950. doi: 10.1086/118154
- Geen, S., Soler, J. D., y Hennebelle, P.** (2017). Interpreting the star formation efficiency of nearby molecular clouds with ionizing radiation. *MNRAS*, **471** 4, 4844–4855.
- Gottesman, S. T., y Welichew, L.** (1977). An interferometer study of the neutral hydrogen associated with the optical core of the irregular galaxy NGC 6822. *A&A*, **61**, 523-530.
- Gratier, P., Braine, J., Rodriguez-Fernandez, N. J., Israel, F. P., Schuster, K. F., Brouillet, N., y Gardan, E.** (2010). The molecular interstellar medium of the Local Group dwarf NGC 6822. The molecular ISM of NGC 6822. *A&A*, **512**, A68. doi: 10.1051/0004-6361/200911722
- Haworth, T. J., Glover, S. C., Koepferl, C. M., Bisbas, T. G., y Dale, J. E.** (2018). Synthetic observations of star formation and the interstellar medium. *New Astronomy Reviews*, **82**, 1–58.
- Hidalgo-Gómez, A. M., Olofsson, K., y Masegosa, J.** (2001). The chemical abundances in a sample of dwarf irregular galaxies. I. Small scale variations within NGC 6822? *A&A*, **367**, 388-404. doi: 10.1051/0004-6361:20010063
- Hidalgo-Gómez, A. M., y Peimbert, A.** (2007). Diffuse Ionized Gas inside the Dwarf Irregular Galaxy NGC 6822. *AJ*, **133**, 1874-1882. doi: 10.1086/511267
- Hodge, P., Lee, M. G., y Kennicutt, R. C., Jr.** (1988). The H II regions of NGC 6822. I - an atlas of 157 H II regions. *PASP*, **100**, 917-934. doi: 10.1086/132254
- Hodge, P., Lee, M. G., y Kennicutt, R. C., Jr.** (1989). The H II regions of NGC 6822. II - The luminosity function, size distribution. *PASP*, **101**, 32-39. doi: 10.1086/132401
- Hubble, E.** (1925). *Ngc 6822: A remote stellar system* (no 304).
- Hubble, E. P.** (1925). NGC 6822, a remote stellar system. *ApJ*, **62**, 409-433. doi: 10.1086/142943
- Hutchings, J. B., Cavanagh, B., y Bianchi, L.** (1999). The Resolved Outer Population of NGC 6822 with WFPC2. *PASP*, **111**, 559-565. doi: 10.1086/316366
- Israel, F. P.** (1997). Dust, molecules in the Local Group galaxy NGC 6822. II. CO, molecular hydrogen. *A&A*, **317**, 65-72.
- Israel, F. P., Baas, F., Rudy, R. J., Skillman, E. D., y Woodward, C. E.** (2003). Dust, molecules in the Local Group galaxy NGC 6822. III. The first-ranked HII region complex Hubble V. *A&A*, **397**, 87-97. doi: 10.1051/0004-6361:20021464
- Karachentsev, I. D., Karachentseva, V. E., Huchtmeier, W. K., y Makarov, D. I.** (2004). A Catalog of Neighboring Galaxies. *AJ*, **127**, 2031-2068. doi: 10.1086/382905
- Keenan, F. P., Aller, L. H., Bell, K. L., Hyung, S., McKenna, F. C., y Ramsbottom, C. A.** (1996). Auroral and nebular emission lines of [SII] in the optical spectra of

- planetary nebulae. *MNRAS*, **281**, 1073-1080.
- Kennicutt, R. C., Jr.** (1979). H II Regions as Extragalactic Distance Indicators. III. Application of H II Region Fluxes, Galaxy Diameters. *ApJ*, **228**, 704-711. doi: 10.1086/156895
- Lagrois, D., y Joncas, G.** (2009). A Multi-ionic Kinematic Investigation of NGC 595, a Giant Extragalactic H II Region in M33. *ApJ*, **700**, 1847-1877. doi: 10.1088/0004-637X/700/2/1847
- Lee, H., Skillman, E. D., y Venn, K. A.** (2006). The Spatial Homogeneity of Nebular, Stellar Oxygen Abundances in the Local Group Dwarf Irregular Galaxy NGC 6822. *ApJ*, **642**, 813-833. doi: 10.1086/500568
- Lequeux, J., Peimbert, M., Rayo, J. F., Serrano, A., y Torres-Peimbert, S.** (1979). Chemical composition, evolution of irregular, blue compact galaxies. *A&A*, **80**, 155-166.
- Letarte, B., Demers, S., Battinelli, P., y Kunkel, W. E.** (2002). The Extent of NGC 6822 Revealed by Its C Star Population. *AJ*, **123**, 832-839. doi: 10.1086/338319
- Longo, G., y Ceriello, M., A. and Capaccioli.** (1991). The UV properties of normal galaxies. I - The IUE data. *A&AS*, **90**, 375-386.
- López Sánchez, A.** (2006). *Formación de estrellas masivas en galaxias Wolf-Rayet enanas* (Tesis Doctoral no publicada). Departamento de Astrofísica, Universidad de la Laguna.
- Maíz-Apellániz, J., Pérez, E., y Mas-Hesse, J. M.** (2004a). NGC 604, the Scaled OB Association (SOBA) Prototype. I. Spatial Distribution of the Different Gas Phases and Attenuation by Dust. *AJ*, **128**, 1196-1218. doi: 10.1086/422925
- Maíz-Apellániz, J., Pérez, E., y Mas-Hesse, J. M.** (2004b). NGC 604, the Scaled OB Association (SOBA) Prototype. I. Spatial Distribution of the Different Gas Phases, Attenuation by Dust. *AJ*, **128**, 1196-1218. doi: 10.1086/422925
- Mateo, M. L.** (1998). Dwarf Galaxies of the Local Group. *ARA&A*, **36**, 435-506. doi: 10.1146/annurev.astro.36.1.435
- McCall, M. L.** (1984). Emission coefficients for gaseous nebulae - Three-level atom approximations. *MNRAS*, **208**, 253-259.
- O'Dell, C. R., Hodge, P. W., y Kennicutt, R. C., Jr.** (1999). A Hubble Space Telescope Study of Two HII Regions in NGC 6822. *PASP*, **111**, 1382-1391. doi: 10.1086/316452
- Oliveira, V. A.** (2009). *A spectrophotometric study of HII regions in chemically young galaxies* (Tesis Doctoral no publicada). Universidade Federal de Santa maria., Santa Maria, RS, Brasil.
- Osterbrock, D. E., y Ferland, G. J.** (2006). *Astrophysics of Gaseous Nebulae, Active Galactic Nuclei*. University Science Books; 2 edición.
- Pagel, B. E. J., Edmunds, M. G., y Smith, G.** (1980). On the composition of H II regions in southern galaxies. II - NGC 6822, 1313. *MNRAS*, **193**, 219-230.
- Peimbert, A., Peimbert, M., y Ruiz, M. T.** (2005). Chemical Composition of Two H II Regions in NGC 6822 based on VLT Spectroscopy. *ApJ*, **634**, 1056-1066. doi: 10.1086/444557
- Peimbert, M., y Spinrad, H.** (1970). On the Chemical Abundance of NGC 6822. *A&A*, **7**, 311.
- Pellegrini, E. W., Rahner, D., Reissl, S., Glover, S. C., Klessen, R. S., Rousseau-Nepton, L., y Herrera-Camus, R.** (2020). warpfild-emp: The self-consistent prediction of emission lines from evolving h ii regions in dense molecular clouds. *MNRAS*, **496** 1, 339-363.
- Pérez Oregón, J., Caicedo-Ortiz, H. E., Castañeda Fernández, H. O., y Hidalgo-Gómez, A. M.** (2014). La estructura interna de regiones HII gigantes. *Jou. Cie. Ing.*, **6** (1), 16-20. doi: 10.46571/JCI.2014.1.4

- Phillips, J. P.** (1998). Electron densities in planetary nebulae, and the unusual characteristics of the [s ii] emission zone. *A&A*, **340**, 527-542.
- Pietrzyński, G., Gieren, W., Udalski, A., Bresolin, F., Kudritzki, R.-P., ... Kubiak, M.** (2004). The Araucaria Project: The Distance to the Local Group Galaxy NGC 6822 from Cepheid Variables Discovered in a Wide-Field Imaging Survey. *AJ*, **128**, 2815-2825. doi: 10.1086/425531
- Rayo, J. F., Peimbert, M., y Torres-Peimbert, S.** (1982). Gradients in the physical conditions of M101, the pregalactic helium abundance. *ApJ*, **255**, 1-10. doi: 10.1086/159796
- Relaño, M., Monreal-Ibero, A., Vílchez, J. M., y Kennicutt, R. C.** (2010). Spatially resolved study of the physical properties of the ionized gas in NGC 595. *MNRAS*, **402**, 1635-1648. doi: 10.1111/j.1365-2966.2009.16036.x
- Relano, M., Beckman, J., Zurita, A., Rozas, M., y Giammanco, C.** (2005). The internal dynamical equilibrium of h ii regions: A statistical study. *Astronomy & Astrophysics*, **431** 1, 235-251.
- Rosa, M., y Solf, J.** (1984). The internal kinematics of the giant extragalactic H II complex NGC 604. *A&A*, **130**, 29-38.
- Roy, J. R., y Arsenault, R.** (1986). The H-alpha velocity widths of giant H II regions as distance indicators. *ApJ*, **302**, 579-584. doi: 10.1086/164016
- Rubin, R. H.** (1968). The Structure, Properties of H II Regions. *ApJ*, **153**, 761. doi: 10.1086/149704
- Seaton, M. J., y Osterbrock, D. E.** (1957). Relative [OII] Intensities in Gaseous Nebulae. *ApJ*, **125**, 66. doi: 10.1086/146282
- Shaw, R. A., y Dufour, R. J.** (1995). Software for the Analysis of Emission Line Nebulae. *PASP*, **107**, 896. doi: 10.1086/133637
- Shields, G. A.** (1990). Extragalactic H II regions. *ARA&A*, **28**, 525-560. doi: 10.1146/annurev.aa.28.090190.002521
- Skillman, E. D., Terlevich, R., y Melnick, J.** (1989). Abundances in southern Local Group dwarf irregular galaxies. *MNRAS*, **240**, 563-572.
- Smith, H. E.** (1975). Spectrophotometric observations of ionized hydrogen regions in nearby spiral, irregular galaxies. *ApJ*, **199**, 591-610. doi: 10.1086/153727
- Stanghellini, L., y Kaler, J. B.** (1989). Electron densities in planetary nebulae. *ApJ*, **343**, 811-827. doi: 10.1086/167751
- Stasińska, G.** (1980). Some comments on the analysis of extragalactic H II regions spectra. *A&A*, **84**, 320-328.
- Strömgren, B.** (1939). The Physical State of Interstellar Hydrogen. *ApJ*, **89**, 526. doi: 10.1086/144074
- Struve, O., y Elvey, C. T.** (1934, mayo). The Intensities of Stellar Absorption Lines. *ApJ*, **79**, 409. doi: 10.1086/143551
- Tennant, A. F.** (2006). Chandra Observation of NGC 6822. *AJ*, **132**, 1372-1383. doi: 10.1086/506511
- Tolstoy, E., Irwin, M. J., Cole, A. A., Pasquini, L., Gilmozzi, R., y Gallagher, J. S.** (2001). Using the CaII triplet to trace abundance variations in individual red giant branch stars in three nearby galaxies. *MNRAS*, **327**, 918-938. doi: 10.1046/j.1365-8711.2001.04785.x
- Tomita, A., Ohta, K., y Saito, M.** (1993). H-alpha velocity fields of giant H II regions in four nearby dwarf irregular galaxies. *PASJ*, **45**, 693-705.
- Venn, K. A., Lennon, D. J., Kaufer, A., McCarthy, J. K., Przybilla, N., Kudritzki, R. P., ... Smartt, S. J.** (2001). First Stellar Abundances in NGC 6822 from VLT-UVES, Keck-HIRES Spectroscopy. *ApJ*, **547**, 765-776. doi: 10.1086/318424
- Vílchez, J. M., Pagel, B. E. J., Diaz, A. I., Terlevich, E., y Edmunds, M. G.** (1988). The chemical composition gradient across M 33. *MNRAS*, **235**, 633-653.

- 
- Weldrake, D. T. F., de Blok, W. J. G., y Walter, F.** (2003). A high-resolution rotation curve of NGC 6822: a test-case for cold dark matter. *MNRAS*, **340**, 12-28. doi: 10.1046/j.1365-8711.2003.06170.x
- White, N. J.** (1981). The dynamics and structure of the ionized and neutral gas in the 30 Doradus nebula. *Ap&SS*, **78**, 443-461. doi: 10.1007/BF00648950
- Wilson, C. D.** (1992). The stellar populations of NGC 6822. *AJ*, **104**, 1374-1394. doi: 10.1086/116327
- Wyder, T. K.** (2001). The Star Formation History of NGC 6822. *AJ*, **122**, 2490-2523. doi: 10.1086/323706
- Zheng, W.** (1988). The critical densities for some emission lines. *Astrophysical Letters Communications*, **27**, 275-279.