



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

MAESTRÍA EN CIENCIAS (ASTROFÍSICA)  
INSTITUTO DE ASTRONOMÍA

## FACTORES DE CORRECCIÓN POR IONIZACIÓN PARA REGIONES H II EXTRAGALÁCTICAS

Tesis para optar por el grado de  
MAESTRA EN CIENCIAS (ASTROFÍSICA)

PRESENTA:

**Alexia Nailee Medina Amayo**

Tutoras:

Dra. Gloria I. Delgado Inglada. INSTITUTO DE ASTRONOMÍA UNAM

Dra. Grażyna Stasińska. PROGRAMA MAESTRÍA EN CIENCIAS (ASTROFÍSICA)

Ciudad de México, Enero 2019



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



# CONTENIDO

<b>Resumen</b>	<b>3</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>5</b>
1.1 Las regiones H II extragalácticas . . . . .	5
1.2 Los factores de corrección por ionización . . . . .	6
1.3 Objetivo de la tesis . . . . .	8
<b>2 Muestra Observacional</b>	<b>9</b>
<b>3 Modelos de Fotoionización</b>	<b>13</b>
3.1 Modelos de fotoionización: ¿Por qué y cómo? . . . . .	13
3.2 Muestra inicial de modelos de fotoionización . . . . .	14
3.3 Selección preliminar de modelos . . . . .	15
3.4 Segunda selección . . . . .	16
3.5 Tercera selección: Refinamiento . . . . .	18
<b>4 Cálculo de los factores de corrección por ionización</b>	<b>23</b>
4.1 Procedimiento general . . . . .	23
4.2 Oxígeno . . . . .	26
4.3 Carbono . . . . .	28
4.3.1 Factores de corrección por ionización previos . . . . .	28
4.3.2 Cálculo del ICF(C <sup>++</sup> ) . . . . .	32
4.4 Nitrógeno . . . . .	36
4.4.1 Factores de corrección por ionización previos . . . . .	36
4.4.2 Cálculo del ICF(N <sup>+</sup> ) . . . . .	38
4.5 Neón . . . . .	42
4.5.1 Factores de corrección por ionización previos . . . . .	42
4.5.2 Cálculo del ICF(Ne <sup>++</sup> ) . . . . .	48
4.6 Azufre . . . . .	52

## 2 CONTENIDO

---

4.6.1	Factores de corrección por ionización previos . . . . .	52
4.6.2	Cálculo de ICF(S <sup>+</sup> ) . . . . .	60
4.6.3	Cálculo del ICF(S <sup>+</sup> +S <sup>++</sup> ) . . . . .	64
4.7	Cloro . . . . .	67
4.7.1	Factores de corrección por ionización previos . . . . .	67
4.7.2	Cálculo del ICF(Cl <sup>++</sup> ) . . . . .	72
4.8	Argón . . . . .	76
4.8.1	Factores de corrección por ionización previos . . . . .	76
4.8.2	Cálculo del ICF(Ar <sup>++</sup> ) . . . . .	86
4.8.3	Cálculo del ICF(Ar <sup>++</sup> +Ar <sup>+3</sup> ) . . . . .	90
<b>5</b>	<b>Cálculo de abundancias químicas con nuestros ICFs</b>	<b>95</b>
5.1	Condiciones físicas . . . . .	95
5.2	Abundancias iónicas . . . . .	97
5.3	Abundancias totales . . . . .	99
5.3.1	Oxígeno . . . . .	99
5.3.2	Nitrógeno . . . . .	101
5.3.3	Neón . . . . .	103
5.3.4	Azufre . . . . .	104
5.3.5	Argón . . . . .	106
<b>6</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>111</b>
<b>7</b>	<b>Apéndice</b>	<b>115</b>
7.1	Diagrama BPT . . . . .	115

# RESUMEN

En esta tesis se calcularon nuevos Factores de Corrección por Ionización (ICFs) para la determinación de las abundancias de carbono, nitrógeno, neón, azufre, cloro y argón en regiones H II extragalácticas. Para ello, se utilizó un subconjunto de los modelos de fotoionización calculados por Vale Asari et al. (2016) con el código CLOUDY (Ferland et al. 2013). La muestra de modelos utilizada aquí abarca una amplia gama de parámetros físicos de regiones H II gigantes y es representativa de las regiones H II observadas.

Se utilizaron los ICFs propuestos en este trabajo para determinar las abundancias químicas en un conjunto de observaciones de galaxias azules compactas y regiones H II gigantes, utilizando el código PYNEB (Luridiana et al. 2015). La mayoría de las abundancias calculadas con nuestros ICFs no muestran ninguna tendencia obvia con el grado de ionización, lo que indica que son adecuados para el cálculo de abundancias.

En el futuro, se repetirá el cálculo de los ICFs incluyendo modelos de fotoionización con una geometría de esfera hueca (no considerados aquí). Además, se buscará una mejor determinación de los ICFs introduciendo otro parámetro en el ajuste: la abundancia de oxígeno. También se explorará si se pueden obtener mejores ICFs en función de iones distintos a los de oxígeno utilizados aquí. Por último, se realizará una determinación más robusta de las incertidumbres asociadas a los ICFs y se utilizará una muestra observacional más amplia para revisar el funcionamiento de los ICFs propuestos.



# 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Las regiones H II extragalácticas

Las regiones H II son estructuras fotoionizadas asociadas a formación estelar reciente ( $< 15$  Myr), donde la fuente de radiación corresponde a estrellas masivas de tipo O o B, con una tasa de fotones ionizantes típica de  $\sim 10^{48}$  fot  $s^{-1}$  y una temperatura efectiva de 35000 a 50000 K. La densidad de hidrógeno típica en estos objetos ( $n_H$ ) es de  $10^3$  a  $10^4$   $cm^{-3}$ , aunque en regiones H II gigantes puede llegar a ser mucho menor, hasta menos de  $50$   $cm^{-3}$  (Osterbrock 1989; Stasińska 2002).

Como estos objetos son debidos a formación estelar reciente, el estudio de sus abundancias químicas provee información sobre la composición del medio interestelar en el presente (contrario a las nebulosas planetarias que brindan información sobre el medio cuando se formó la estrella progenitora). Conocer las abundancias químicas en regiones H II de galaxias espirales nos permite estudiar los gradientes químicos y, a su vez, el gradiente químico de una galaxia espiral nos permite tener una idea sobre el escenario de formación que ésta ha tenido. Por ejemplo, si su gradiente de metalicidad es negativo (es decir, la metalicidad en la región central de la galaxia es mayor que en las partes externas) el escenario más probable es el de formación de dentro hacia afuera (Kepner 1999; González Delgado et al. 2014). De esta manera, el estudio de las abundancias químicas en regiones H II permite, entre otras cosas, restringir los modelos de evolución química galáctica (ver por ejemplo Pagel (2009), Carigi & Peimbert (2011)) Con una buena determinación de las abundancias químicas en regiones H II, es posible estudiar además, las relaciones empíricas de luminosidad-metalicidad y masa-metalicidad en galaxias (ver por ejemplo Kobulnicky

& Kewley 2004, Tremonti et al. 2004).

## 1.2 Los factores de corrección por ionización

Para lograr algunos de estos objetivos, es necesaria una determinación fiable de las abundancias químicas de los distintos elementos presentes en las regiones H II. La abundancia de un elemento  $X$  en una región fotoionizada se puede calcular simplemente como la suma de las abundancias iónicas de cada uno de sus iones:

$$\frac{X}{H} = \frac{X^+ + X^{++} + X^{+3} + X^{+4} + \dots}{H^+} = \frac{\sum_i X^{+i}}{H^+}, \quad (1.1)$$

donde  $\sum_i X^{+i}/H^+$  representa la suma de las abundancias iónicas de todos los iones del elemento  $X$ . Sin embargo, en la realidad únicamente se pueden observar líneas de algunos de los iones del elemento, ya sea porque los otros iones tienen líneas de emisión en un intervalo espectral distinto al que se observa o porque éstos emiten líneas muy débiles y de difícil detección. Por ejemplo, en el intervalo visible del espectro únicamente se observan líneas del ion  $Ne^{++}$  (siendo la más intensa  $[Ne III] \lambda 3869$ ) debido a que los demás iones de neón emiten en el IR o en el UV. Por ello, surge la necesidad de considerar los llamados *Factores de Corrección por Ionización* (o ICFs por sus siglas en inglés), los cuales corrigen por la contribución a la abundancia total de los iones que no se observan. De esta manera, la abundancia del elemento  $X$  se calcula como la suma de las abundancias iónicas de los iones observados y esta suma se multiplica por el ICF. Por ejemplo, si al observar una región H II en un rango espectral específico sólo se observan líneas de los iones  $X^+$  y  $X^{++}$  (como ocurre en el caso del oxígeno cuando tenemos observaciones en el intervalo visible), la abundancia del elemento  $X$  se calcula como:

$$\frac{X}{H} = \frac{X^+ + X^{++}}{H^+} \times ICF(X^+ + X^{++}), \quad (1.2)$$

donde el  $ICF(X^+ + X^{++})$  es el factor de corrección para el cálculo de la abundancia de  $X/H$  cuando se observan líneas de los iones  $X^+$  y  $X^{++}$ .

Los primeros ICFs para el cálculo de abundancias químicas en regiones H II fueron propuestos en Peimbert & Costero (1969) y Peimbert & Torres-Peimbert (1977) y estaban basados en la similitud de los potenciales de ionización de distintos iones. Por ejemplo, proponían calcular la abundancia de nitrógeno como:  $N/O = N^+/O^+$ , dado que los iones  $N^+$  y  $O^+$  tienen potenciales de ionización muy parecidos (14.5 eV y 13.6 eV, respectivamente). Estos ICFs suponen que los iones con potenciales de ionización similares se encuentran en la misma zona de la región H II pero no toman en cuenta que la estructura de ionización depende de otros procesos.

Debido a esto, surgió la necesidad de calcular ICFs utilizando modelos de fotoionización, los cuales toman en cuenta todos los procesos físicos (además de la fotoionización consideran captura electrónica, intercambio de cargas, etc.) que determinan la estructura

de ionización de una región ionizada. Hay que notar que los modelos deberían representar bien a las regiones H II observadas y utilizar datos atómicos acertados.

Stasińska (1978) calculó ICFs para N, Ne y S basándose en un conjunto de 39 modelos de regiones H II en los que utilizó atmósferas estelares fuera del equilibrio termodinámico local (NLTE por las siglas en inglés) de Mihalas (1972). También basados en modelos de fotoionización, Mathis (1985) propuso ICFs para C, Cl, N y S en función de la fracción iónica  $O^+/O$  y del cociente de iones  $S^+/S^{++}$ , en cuyos modelos consideran las atmósferas estelares en equilibrio termodinámico local (LTE) de Kurucz (1979) y atmósferas en NLTE de Mihalas (1972). Más adelante, Mathis & Rosa (1991) propusieron otros ICFs basados en un nuevo conjunto de modelos de fotoionización, en los cuales consideran únicamente las atmósferas de Kurucz (1979).<sup>1</sup>

Garnett (1989) propuso otros ICFs utilizando los mismos modelos de atmósferas pero un conjunto distinto de modelos de fotoionización.

Recientemente, los modelos de atmósferas estelares han mejorado –incluyendo más elementos y más líneas (Tlusty; Lanz & Hubeny 2003) o vientos estelares (WMbasic; Pauldrach et al. 2001). Otra mejora para el cálculo de los ICFs es que los modelos de regiones H II gigantes consideran ionización por brotes de formación estelar en lugar de estrellas individuales como los modelos previos. Cabe señalar que de los trabajos mencionados hasta aquí, en ninguno se calculó el conjunto de modelos de fotoionización con base en regiones H II observadas, sino que los modelos se calcularon a priori.

Izotov et al. (2006) calcularon ICFs para N, Ne, S, Cl, Ar y Fe basados en modelos de fotoionización donde la fuente de radiación ionizante es la de un brote de formación estelar, calculada por Smith et al. (2002) a partir de modelos de atmósferas modernos. Un punto importante es que Izotov et al. (2006) se basan en observaciones de regiones H II gigantes para escoger los modelos a utilizar, cosa que no se había hecho hasta el momento. Finalmente, proponen ICFs que dependen de la abundancia de oxígeno de la región H II y encuentran que sus ICFs para N, Ne y Fe son válidos para cualesquiera valores de los cocientes  $O^{++}/(O^+ + O^{++})$  mientras que los ICFs para S, Cl y Ar son válidos sólo en objetos con  $O^+/(O^+ + O^{++}) \leq 0.8$ .

Pérez-Montero et al. (2007) calcularon 80 modelos de fotoionización para proponer ICFs para Ne y Ar, pero las fuentes de ionización son estrellas individuales (WMbasic; Pauldrach et al. 2001) y, a diferencia de Izotov et al. (2006), su conjunto de modelos es definido a priori como en trabajos anteriores.

---

<sup>1</sup>En el caso de los ICFs de Mathis & Rosa (1991), además de que las atmósferas estelares utilizadas se consideran ya obsoletas, la expresión analítica de los ICFs que se proponen es compleja ya que todos corresponden a funciones de series de potencias con términos cuadráticos.

### **1.3 Objetivo de la tesis**

El objetivo del presente trabajo es proponer mejores factores de corrección por ionización (ICFs) para el cálculo de abundancias químicas en regiones HII extragalácticas. Para su cálculo se utilizó un extenso conjunto de modelos de fotoionización calculados a priori que abarca un amplio intervalo de parámetros de las regiones H II y en los cuales se consideran brotes de formación estelar basados en modelos de atmósferas estelares recientes. De este conjunto de modelos, se seleccionaron aquellos cuyos cocientes de líneas sean consistentes con los de regiones H II reales, utilizando una amplia muestra de observaciones.

Estos ICFs se compararon con los ICFs previos, y se utilizaron para recalculiar las abundancias químicas en un conjunto de observaciones, con el fin de ponerlos a prueba.

En el Capítulo 2 de esta tesis, se presenta la muestra observacional. En el Capítulo 3, se explica qué es un modelo de fotoionización y se presentan las características del conjunto de modelos utilizados en este trabajo para el cálculo de ICFs. Se describen además los criterios de selección aplicados a estos modelos con el fin de obtener un conjunto representativo de regiones H II extragalácticas. En el Capítulo 4 se presenta el cálculo de los ICFs con los modelos seleccionados y se muestran los ICFs obtenidos, con sus incertidumbres asociadas. En el Capítulo 5 se utilizan los ICFs calculados para la determinación de las abundancias químicas en un conjunto de observaciones, y se comparan nuestras abundancias con las obtenidas con ICFs previos. Se discute la validez de nuestros ICFs. También, se exploran las abundancias relativas calculadas con nuestros ICFs en el conjunto de observaciones analizado. En el Capítulo 6, se resumen las conclusiones y se presenta el trabajo a futuro.

# 2

## MUESTRA OBSERVACIONAL

La muestra observacional utilizada en este trabajo contiene tres tipos de objetos: galaxias azules compactas (BCG), regiones H II gigantes (GHR) y galaxias del *main galaxy sample* del DR7 del Sloan Digital Sky Survey (SDSS) (Abazajian et al. 2009).

La muestra de regiones H II gigantes (GHR) consta de 694 objetos cuyas observaciones se presentan en la Tabla 2.1. De los 694 objetos de esta muestra, únicamente 23 presentan líneas de [O III]  $\lambda\lambda 4363,4959$  y [S II]  $\lambda\lambda 6731,6716$ , las cuales utilizaremos para estimar su densidad y temperatura electrónica. La resolución espectral de los datos en esta muestra es de  $2.4 \text{ \AA}$  a  $11.0 \text{ \AA}$ .

La muestra de galaxias azules compactas BCG consta de 140 observaciones, de las que 108 se han tomado de Izotov et al. (2007) y las 32 restantes son objetos que ha recopilado el Dr. Yuri I. Izotov a lo largo del tiempo y a las que se tiene acceso. A su vez, de la muestra de observaciones de Izotov et al. (2007), 93 son parte de la muestra HeBCD presentada previamente en Izotov & Thuan (2004) y 15 son galaxias del DR5 del Sloan Digital Sky Survey (muestra DR5).

La muestra HeBCD consiste en 93 observaciones de 86 regiones H II extragalácticas en más de 77 galaxias de baja metalicidad, realizadas con el telescopio Kitt Peak de 4m. La observación de estos objetos, además, se realizó con el espectrógrafo Ritchey-Chrétien, el cual abarca un rango espectral de  $3500\text{-}7500 \text{ \AA}$  y tiene una resolución espectral de  $\sim 7 \text{ \AA}$  (FWHM). La muestra BCG del DR5 contiene espectros en el rango espectral de  $\sim 3800 - 9200 \text{ \AA}$  con resolución espectral de  $1.9$  a  $4.6 \text{ \AA}$ , seleccionados utilizando tres criterios de

selección: (1) que la línea [O III]  $\lambda 4363$  tuviera una señal  $> 2\sigma$  por arriba del ruido, (2) que el ancho equivalente de la línea de emisión de  $H\beta$  ( $EW(H\beta)$ ) fuera  $EW(H\beta) \geq 50\text{\AA}$  y (3) que el flujo de  $H\beta$  fuera  $F(H\beta) \geq 10^{-14} \text{ ergs s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ .

Nuestra muestra "SDSS" consta de 133436 galaxias con líneas de emisión que pertenecen al *Main Galaxy Sample* (MGS) del DR7 del SDSS. El MGS son galaxias seleccionadas utilizando dos criterios: magnitudes Petrosian <sup>1</sup> en la banda  $r$  de  $m_r \leq 17.77$  y brillos superficiales Petrosian al radio  $R_{50}$  <sup>2</sup> en la banda  $r$  de  $\mu_{50} \leq 24.5 \text{ mag arcsec}^{-2}$  (Strauss et al. 2002).

La espectroscopía está hecha con fibras de 3 arcseg de diámetro, en el rango espectral de 3800 — 9200  $\text{\AA}$  y con una resolución espectral de 1.9 a 4.6  $\text{\AA}$ .

Específicamente para este trabajo, se utilizaron objetos con  $S/N > 5$  para las líneas [O II]  $\lambda 3727$ ,  $H\beta \lambda 4861$ , [O III]  $\lambda 5007$ , [N II]  $\lambda 6563$  y [N II]  $\lambda 6584$ , (posteriormente corregidas por enrojecimiento) y cuya fuente de ionización sean estrellas masivas, basados en la línea de Kauffmann et al. (2003) (explicada en la Sección 3.4) del diagrama de [O III]  $\lambda 5007/H\beta$  con respecto a [N II]  $\lambda 6584/H_\alpha$ .

Estos objetos fueron considerados en la muestra observacional con el fin de que ésta abarcara un amplio intervalo de metalicidades lo cual no era posible utilizando únicamente objetos BCG cuyas metalicidades son bajas.

El conjunto final de observaciones se utilizó primero para restringir el conjunto de modelos de fotoionización que se utilizaría en el cálculo de los ICFs y posteriormente para la determinación de abundancias químicas utilizando los ICFs propuestos (Capítulo 5). En la Tabla 2.1 se muestran algunas de las características de las observaciones de cada artículo utilizadas en este trabajo: se muestra el número de regiones H II que se observan originalmente en la referencia, el telescopio y espectrógrafo con los que se observaron y la resolución espectral en  $\text{\AA}$ .

---

<sup>1</sup>Magnitudes asociadas al flujo al *radio Petrosian*  $r_P$ , el cual es el radio que tiene un anillo cuyo brillo superficial promedio es equivalente al 20% del brillo superficial promedio contenido a radios menores.

<sup>2</sup>Brillo superficial del anillo al radio  $R_{50}$ , el cual, contiene el 50% del flujo asociado a  $2r_P$

Muestra	No. de Objetos	Objetos con líneas para T, y n <sub>e</sub> <sup>1</sup>	Telescopio (tamaño)	Espectrógrafo	Resolución (λAA)	Referencia
GHR	694	23	VLT (8 m)	FORS	5.0 – 11.0	Bresolin et al. (2005)
				FORS2	2.4 – 5.5	Bresolin et al. (2009a), Bresolin et al. (2009b), Bresolin et al. (2012)
			Keck (10 m)	LRIS	3.5 – 5.6	Bresolin et al. (2004), Bresolin (2007), Zurita & Bresolin (2012)
				FOCAS	4.0 – 5.5	Bresolin et al. (2010)
			Palomar (5 m)	Espectrógrafo doble	7.8 – 9.2	van Zee et al. (1998)
			MMT (4.5 m)	Blue Channel Spectrograph	2.4 – 6.0	Kennicutt et al. (2003)
			Subaru (8.2 m)	FOCAS	5.5	Goddard et al. (2011)
			Gémini	GMOS	5.5	Bresolin (2011a), Bresolin (2011b)
			Kitt Peak (4 m)	R-C Spectrograph	7.5	Li et al. (2013)
			MMT/Gémini	BCS/GMOS	6.0	Berg et al. (2013)
BCG	140	0 <sup>2</sup>	Kitt Peak (4m)	R-C Spectrograph	7.5	Izotov et al. (2007)
			SDSS DR5	Espectrógrafo de fibra	1.9 – 4.6	Strauss et al. (2002)
SDSS	133436	324	SDSS DR7	Espectrógrafo de fibra	1.9 – 4.6	Strauss et al. (2002)

TABLA 2.1: Muestra observacional utilizada en este trabajo. Esta muestra es igual a la utilizada en Vale Asari et al. (2016), pero en este trabajo se incluyen las observaciones realizadas por Berg et al. (2013), Bresolin (2011b) y Bresolin (2011a).

1) [O III]λλ 4363, 4959 y [S II]λλ 6716, 6731

2) En esta muestra ningún objeto tiene las líneas de azufre [S II]λλ 6716, 6731 para calcular la densidad electrónica por lo que en el cálculo de abundancia fue necesario suponer un valor de  $100 \text{ cm}^{-3}$ .



# 3

## MODELOS DE FOTOIONIZACIÓN

### 3.1 Modelos de fotoionización: ¿Por qué y cómo?

Al observar una región H II no se conocen las abundancias iónicas de cada ión, únicamente se conocen los flujos de las líneas de emisión. Sin embargo, como se conocen los procesos físicos que ionizan el gas y que producen estas líneas, es posible incluirlos en un código numérico que contenga toda la información sobre los procesos físicos que ocurren en la interacción del gas y del polvo con la radiación (principalmente los procesos de ionización y de recombinación y los procesos de excitación y desexcitación). Estos códigos resuelven las ecuaciones de ionización y de equilibrio térmico para el gas y para el polvo, permitiendo así determinar las fracciones iónicas, la temperatura electrónica y el flujo esperado de cada línea.

Para generar el modelo de una región fotoionizada (como son una nebulosa planetaria o una región H II, por ejemplo) se deben especificar parámetros de entrada que describan el campo de radiación ionizante y las propiedades del gas y del polvo presentes en la región ionizada. Para caracterizar la energía de la radiación ionizante, se define la temperatura efectiva de la fuente y su luminosidad, tomando un modelo para la atmósfera de la estrella (o estrellas).

Por otro lado, las propiedades del gas que deben especificarse son la densidad del gas y las abundancias químicas y de forma opcional, la abundancia del polvo y el tipo de granos. El código de fotoionización utiliza un conjunto de datos atómicos para cada ion de cada elemento. Estos datos son la sección transversal de fotoionización, los coeficientes de recombinación, de intercambio de carga, y los coeficientes de excitación y desexcitación,

así como las propiedades ópticas del polvo dependiendo de su composición.

Al utilizar un código de fotoionización para crear un modelo de fotoionización, los resultados que se obtienen son la temperatura electrónica, las fracciones iónicas y la densidad electrónica a lo largo de la nebulosa, así como las emisiones del continuo nebuloso y de cada línea, entre otras cosas.

### 3.2 Muestra inicial de modelos de fotoionización

En este trabajo, se utiliza el conjunto de modelos de fotoionización de Vale Asari et al. (2016), el cual fue construido con el objetivo principal de definir un método para el cálculo de abundancias en regiones H II gigantes utilizando solamente líneas fuertes y semi-fuertes (es decir, para los casos cuando no es posible determinar la temperatura electrónica). Este conjunto de modelos abarca una amplia gama de parámetros físicos adecuada para el proyecto de este trabajo, y está calculado con parámetros atómicos y redes de modelos de atmósferas estelares recientes. Estos modelos se calcularon utilizando la versión 13.03 del código de fotoionización CLOUDY (Ferland et al. 2013) utilizando los parámetros de entrada descritos a continuación.

Para la fuente de radiación, se considera a las regiones H II gigantes como una nebulosa de gas y polvo ionizada por un brote instantáneo de formación estelar. Para modelar el campo de radiación de esta población estelar emergente, Vale Asari et al. (2016) consideran seis edades distintas del brote estelar, de 1 Myr a 6 Myr, mientras que la distribución de energía espectral (o SED por sus siglas en inglés) la obtuvieron utilizando el código de síntesis de población POPSTAR (Mollá et al. 2009a), con una función de masa inicial de Chabrier (2003). Todos los modelos, además, fueron calculados desde el radio interno  $R_{in}$ , hasta que la fracción de hidrógeno ionizado con respecto a la densidad total de hidrógeno es menor que 0.02, es decir, todos los modelos fueron calculados como limitados en radiación.

Para cada SED, se calculan dos tipos de modelos en función a la distribución del gas en la nebulosa. La geometría de cada modelo está determinada por el factor geométrico definido como  $f_s = R_{in}/R_S$ , donde  $R_{in}$  corresponde al radio interno de la nebulosa y  $R_S$  es el radio de una esfera de Strömgren con  $R_{in} = 0$ . De esta manera, los modelos con un factor geométrico de  $f_s = 0.03$  equivalen a una nebulosa esférica llena, y aquellos con  $f_s = 3$  se tratan de una nebulosa esférica hueca. Para los modelos, Vale Asari et al. (2016) consideraron una densidad constante de  $n = 100 \text{ cm}^{-3}$ , sin importar su geometría.

Otro parámetro de entrada, es el parámetro de ionización promedio  $U$ , presentado en la ecuación 3.1 de Stasińska et al. (2015). Este parámetro relaciona el número de fotones por segundo emitidos por la fuente ( $Q(H^0)$ ) con este factor geométrico  $f_s$  y con la densidad del gas  $n$ , por medio de la expresión:

$$U = \left( \frac{3}{4\pi} \right)^{1/3} \frac{\alpha_B^{2/3}}{c} \left( (Q(H^0)n\epsilon^2) \right)^{1/3} \left( (1 + f_s^3)^{1/3} - f_s \right), \quad (3.1)$$

donde  $\alpha_B$  es el coeficiente de recombinación de hidrógeno para el caso B,  $\epsilon$  es el factor de llenado volumétrico y  $c$  es la velocidad de la luz. En los modelos de Vale Asari et al. (2016),

el logaritmo de este parámetro  $U$  toma valores de -1 a -4 de 0.5 dex como tamaño de paso. Para la composición química del gas, se consideraron los siguientes parámetros de entrada:

- La abundancia de oxígeno, expresada en  $12 + \log(\text{O}/\text{H})$ , va de 6.6 a 9.4 con un paso de 0.2 dex.
- El valor de  $\log(\text{N}/\text{O})$  va de -2 a 0 con un paso de 0.5 dex.
- La abundancia de carbono  $\log(\text{C}/\text{H})$  está escalada con la de nitrógeno mediante la relación:  $\log(\text{C}/\text{H}) = 0.48 + \log(\text{N}/\text{H})$  (Vale Asari et al. 2016).
- Las abundancias del resto de los metales con respecto a oxígeno son: O:Ne:S:Cl:Ar:Fe = 1:0.1854:0.0219:0.00029:0.0048:0.0148 (de la misma manera que en Stasińska et al. 2015).
- En los modelos se incluye polvo, considerando el cociente de polvo a gas del comando ISM en CLOUDY, pero aplicando a este cociente un factor de  $2/3 \times 10^{2.21-y}$ , siguiendo también el mismo proceso de Stasińska et al. (2015). El 2/3 de este factor proviene de lo sugerido por Draine (2011), mientras que la  $y$  corresponde al cociente gas a polvo (G/D) de la forma  $y = \log(\text{G}/\text{D})$ , propuesto por Rémy-Ruyer et al. (2014), quienes proponen este cociente como una ley de potencias discontinua para dos intervalos de la abundancia de oxígeno como:

$$\begin{aligned} \log(\text{G}/\text{D}) &= 2.21 + (x_{\odot} - 12 + \log(\text{O}/\text{H})) \text{ para } 12 + \log(\text{O}/\text{H}) > 7.96 \pm 0.47, \\ \log(\text{G}/\text{D}) &= 2.21 + (3.08_{-1.76}^{+1.76})(x_{\odot} - 12 + \log(\text{O}/\text{H})) \\ &\text{ para } 12 + \log(\text{O}/\text{H}) \leq 7.96 \pm 0.47, \end{aligned} \tag{3.2}$$

donde  $x_{\odot}$  corresponde al valor solar de la abundancia de oxígeno  $12 + \log(\text{O}/\text{H})_{\odot}$  de 8.69, dado por Asplund et al. (2009). Debe notarse que los factores que más influyen en la estructura de ionización son la SED (que depende de la edad y de la metalicidad) y el parámetro de ionización  $U$ . Las abundancias relativas de los metales tienen un efecto mucho menor.

Utilizando estos parámetros de entrada, Vale Asari et al. (2016) obtuvieron un conjunto total de 6300 de modelos representativo de regiones H II extragalácticas.

### 3.3 Selección preliminar de modelos

Con el fin de obtener un conjunto de modelos lo más representativo posible de las regiones H II extragalácticas, se aplicaron una serie de filtros a la muestra inicial de modelos de Vale Asari et al. (2016).

En primer lugar, se excluyeron los modelos con edad de brote estelar de 6 Myr, ya que a este tiempo la cantidad de fotones ionizantes ha disminuido por un factor  $\sim 10$  (Mollá

et al. 2009b), implicando que las regiones H II sean poco brillantes y sus espectros no sean adecuados para el uso de los ICFs.

En este trabajo se consideraron únicamente los modelos con geometría esfera llena (con  $f_s = 0.03$ ) para reducir el tiempo de cálculo, aunque en un trabajo a futuro se incluirán los modelos con una geometría de esfera hueca (con  $f_s = 3.0$ ). Considerando estos dos criterios adicionales, el conjunto original de 6300 modelos se redujo a 2625 modelos.

### 3.4 Segunda selección

La segunda selección sigue los criterios utilizados por Vale Asari et al. (2016) para construir un conjunto más realista de regiones H II. Estos criterios están basados en relaciones observadas en regiones H II entre varios parámetros: la relación entre N/O y O/H, la relación entre O/H y el parámetro de ionización U, y el comportamiento de las regiones H II gigantes en el diagrama de [O III]  $\lambda 5007/H\beta$  con respecto a [N II]  $\lambda 6584/H\alpha$  (mejor conocido como diagrama BPT por Baldwin et al. 1981, quienes lo propusieron como un diagrama para distinguir galaxias activas de galaxias con formación estelar).

Para la relación entre N/O y O/H, Pilyugin et al. (2012) proponen una expresión analítica dada como:

$$\begin{aligned} \log(N/O) &= -1.493, \text{ para } 12 + \log(O/H) < 8.14 \\ \log(N/O) &= 1.489 \times (12 + \log(O/H)) - 13.613, \text{ para } 12 + \log(O/H) > 8.14. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Esta relación se muestra en la la Figura 3.1a, donde la línea continua representa esta expresión analítica. En esta figura, los círculos llenos son las regiones H II utilizadas por los autores para proponer este ajuste, mientras que los círculos huecos corresponden a los objetos no considerados.

Para la relación entre el parámetro de ionización U y O/H, Pérez-Montero (2014) proponen unos límites de forma escalonada (aunque en su artículo no se especifica la expresión analítica), mostrados con la línea roja en la Figura 3.1b.

Finalmente a partir de modelos de fotoionización, Stasińska et al. (2006) determinó la envolvente en el diagrama BPT de galaxias cuyo espectro se debe únicamente a brotes de formación estelar. Una expresión simple de esta curva fue dada por Cid Fernandes et al. (2010), quienes la parametrizaron como:

$$\log([\text{OIII}]\lambda 5007/H\beta) = 0.96 + (0.29/([\text{NII}]\lambda 6584/H\alpha) + 0.20) \quad (3.4)$$

Las tres relaciones propuestas por Pilyugin et al. (2012), Pérez-Montero (2014) y Stasińska et al. (2006) se muestran en los paneles superiores de la Figura 3.1, donde las Figuras 3.1a y 3.1b de esta fila fueron tomadas directamente de los artículos de Pilyugin et al. (2012) y Pérez-Montero (2014), respectivamente. En la Figura 3.1c se muestra la curva propuesta por Stasińska et al. (2006) con nuestro conjunto de modelos.

Para construir un conjunto de modelos representativo de regiones H II gigantes observadas, Vale Asari et al. (2016) proponen un intervalo que englobara las tres relaciones mencionadas arriba.

Para la relación de  $\log(N/O)$  con respecto a  $12+\log(O/H)$ , Vale Asari et al. (2016) proponen el intervalo entre las curvas:

$$\begin{aligned} \log(N/O)_{\text{low}} &= -1.093 \text{ para } 12 + \log(O/H) < 7.93 \\ \log(N/O)_{\text{low}} &= 1.489 \times (12 + \log(O/H)) - 12.896 \text{ para } 12 + \log(O/H) > 7.93, \\ \log(N/O)_{\text{up}} &= -1.693 \text{ para } 12 + \log(O/H) < 8.25 \\ \log(N/O)_{\text{up}} &= 1.489 \times (12 + \log(O/H)) - 12.896 \text{ para } 12 + \log(O/H) > 7.93. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Este intervalo se muestra con líneas punteadas en la Figura 3.1d y con una línea continua se muestra la expresión original propuesta por Pilyugin et al. (2012). En esta figura, los modelos de nuestro conjunto que quedan fuera del intervalo se muestran en rojo, y en azul se muestran aquellos que se encuentran dentro del intervalo.

Para la relación de  $U$  y  $12+\log(O/H)$ , proponen el intervalo siguiente:

$$\begin{aligned} \log(U)_{\text{low}} &= 6.625 - 1.25 \times (12 + \log(O/H)) \\ \log(U)_{\text{up}} &= 8.625 - 1.25 \times (12 + \log(O/H)) \end{aligned} \quad (3.6)$$

Estas expresiones se muestran con líneas continuas en la Figura 3.1e. Los modelos tienen los mismos colores que en la Figura 3.1d.

Finalmente, para el diagrama BPT (ecuación 3.4), el intervalo propuesto por Vale Asari et al. (2016) es el siguiente:

$$\begin{aligned} \log([\text{OIII}]\lambda 5007/H\beta) &= ([-30.787 + 1.1358Z_{\text{low}} + 0.27297Z_{\text{low}}^2] \times \tanh(5.709Z_{\text{low}}) - 31.093] - 0.7, \\ \log([\text{OIII}]\lambda 5007/H\beta) &= ([-30.787 + 1.1358Z_{\text{up}} + 0.27297Z_{\text{up}}^2] \times \tanh(5.709Z_{\text{up}}) - 31.093] + 0.1, \end{aligned} \quad (3.7)$$

donde  $Z_{\text{low}} = Z + 0.6$  y  $Z_{\text{up}} = Z - 0.3$ . Estas expresiones se muestran con líneas continuas en la Figura 3.1f. Los modelos tienen los mismos colores que en la Figura 3.1e. Utilizando estos tres intervalos se seleccionó un conjunto de 191 modelos que representa razonablemente a las regiones H II observadas.

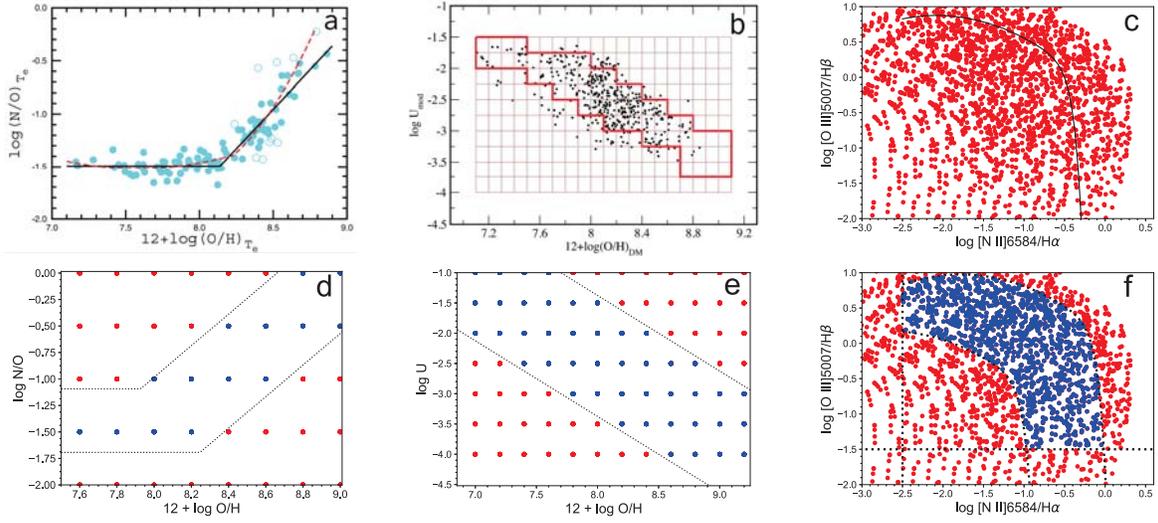


FIGURA 3.1: Filtros utilizados para seleccionar los modelos. Las figuras a y b muestran las relaciones encontradas por Pilyugin et al. (2012) y Pérez-Montero (2014), respectivamente, y fueron tomadas directamente de sus artículos. En rojo se muestran los modelos de la primera selección, en azul los modelos de la segunda selección basada en las ecuaciones 3.5, 3.6 y 3.7. Las líneas punteadas representan los límites de los intervalos seleccionados.

### 3.5 Tercera selección: Refinamiento

Al comparar con las observaciones los 191 modelos seleccionados en la sección anterior, fue necesario ampliar algunos de los criterios para que los modelos cubrieran de la mejor manera posible nuestra muestra observacional.

En la Figura 3.2 se muestra el  $\log ([\text{O III}] \lambda 5007/\text{H}\beta)$  en función de  $\log ([\text{N II}] \lambda 6584/\text{H}\alpha)$  para los 191 modelos. En negro se muestra el conjunto de observaciones: los triángulos representan las regiones H II gigantes, las estrellas representan las galaxias azules compactas y los puntos representan los objetos del SDSS. Se puede ver que los modelos cubren gran parte de las observaciones pero algunas quedan fuera (especialmente aquellas con  $\log ([\text{O III}] \lambda 5007/\text{H}\beta) < -0.25$ ). Para remediar esto, se modificaron un poco los intervalos propuestos por Vale Asari et al. (2016). Las expresiones de nuestros nuevos intervalos son:

$$\log(\text{N}/\text{O}) = 1.489 \times (12 + \log(\text{O}/\text{H})) - 14.9, \text{ para } 12 + \log(\text{O}/\text{H}) > 7.93 \quad (3.8)$$

y

$$\begin{aligned} \log(\text{U})_{\text{low}} &= 5 - 1.25 \times (12 + \log(\text{O}/\text{H})) \\ \log(\text{U})_{\text{up}} &= 10 - 1.25 \times (12 + \log(\text{O}/\text{H})) \end{aligned} \quad (3.9)$$

Estos nuevos intervalos se muestran en la Figura 3.3, donde se muestran las ecuaciones 3.8 y 3.9 con líneas punteadas.

Una vez que se seleccionaron los modelos contenidos en los nuevos intervalos propuestos,

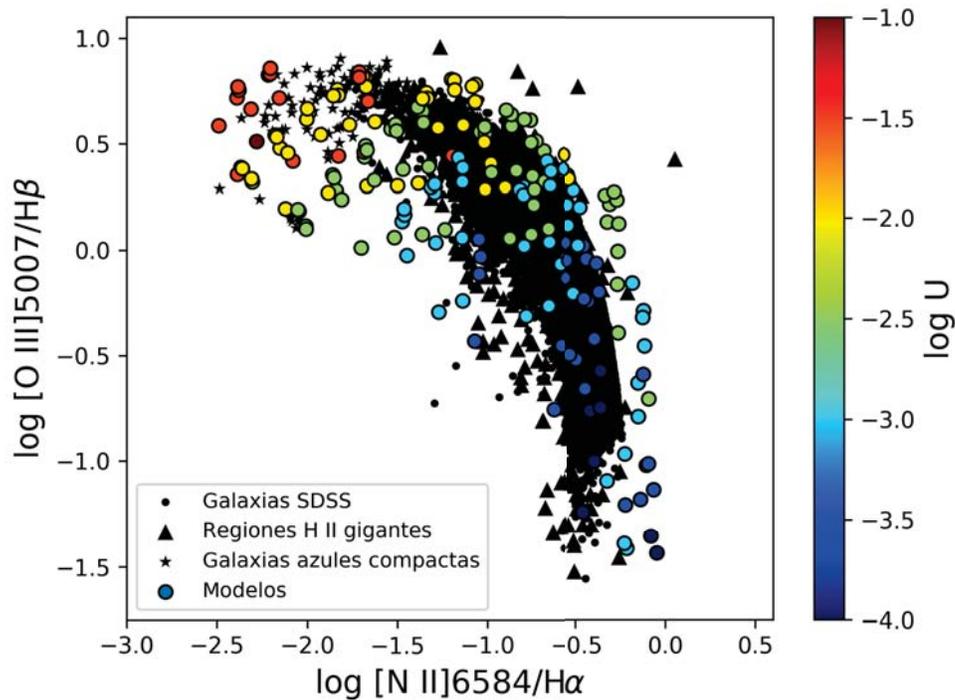


FIGURA 3.2: Valores de  $I([\text{O III}] \lambda 5007)/I(\text{H}\beta)$  en función de  $I([\text{N II}] \lambda 6584)/I(\text{H}\alpha)$  para el conjunto de modelos de fotoionización inicial (círculos de colores) que cumplen con los criterios de selección propuestos por Vale Asari et al. (2016). En la barra de color se muestran los valores del logaritmo del parámetro de ionización para los modelos. En negro, se muestra el conjunto de observaciones con distintos símbolos para regiones H II gigantes (triángulos), galaxias azules compactas (estrellas) y objetos del SDSS (puntos).

resultó un conjunto de 499 modelos de fotoionización, los cuales cubren mejor la región ocupada por la muestra observacional. Esto puede verse en la Figura 3.4, pero se puede notar que aún existen algunos objetos que no están cubiertos por los modelos (en esta figura, se muestran en magenta las cinco observaciones más alejadas de los modelos de fotoionización y del resto de las observaciones). Estos objetos son: NGC 300 7, NGC 0598 B90, NGC 4395 -003-003, NGC 5236 p5 y NGC 5236 p36 (de izquierda a derecha en la Figura 3.4), observados por Bresolin et al. (2009a), Bresolin et al. (2010), van Zee et al. (1998) y Bresolin et al. (2009b) respectivamente. Se encuentran por encima de las líneas propuestas por Kewley et al. (2001) y Kauffmann et al. (2003) para el diagrama BPT (explicado más a detalle en el Apéndice 7.1), lo cual implica que tienen una fuente de ionización distinta a la de estrellas masivas. Como se busca calcular los ICFs para regiones H II típicas, no consideramos estos objetos en nuestra muestra observacional a partir de este punto. Por lo tanto, los resultados que se obtengan en este trabajo no serán válidos para objetos similares a los que hemos descartado. Una vez descartados estos objetos, consideramos que los 499

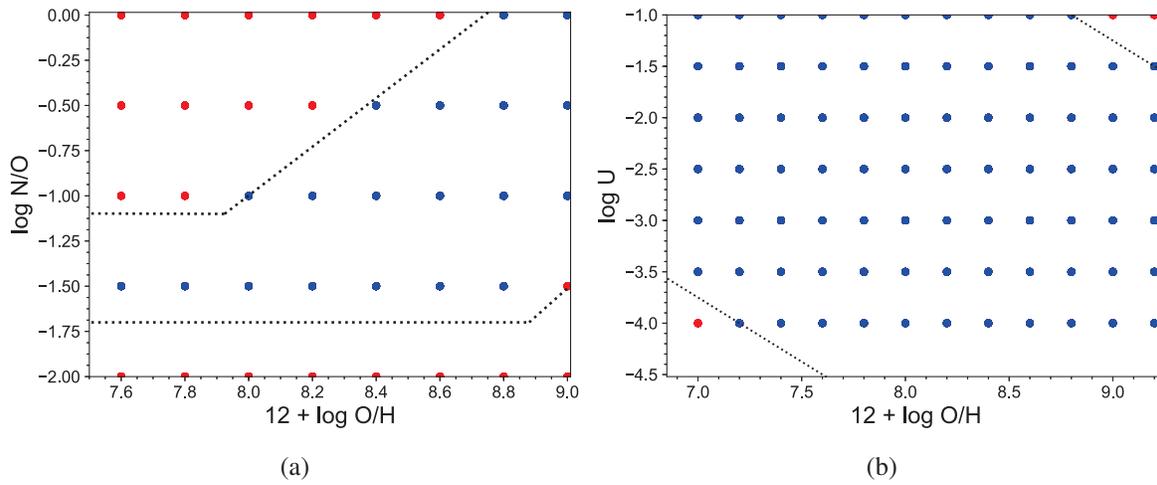


FIGURA 3.3: Filtros modificados a partir de las expresiones utilizadas por Vale Asari et al. (2016). En rojo se muestran los modelos de la segunda selección y en azul los modelos que caen dentro de los intervalos propuestos en este trabajo. Las líneas punteadas representan las ecuaciones 3.8 y 3.9 que definen estos intervalos.

modelos de fotoionización seleccionados son representativos de regiones H II gigantes y por tanto, se utilizarán en el cálculo de los ICFs.

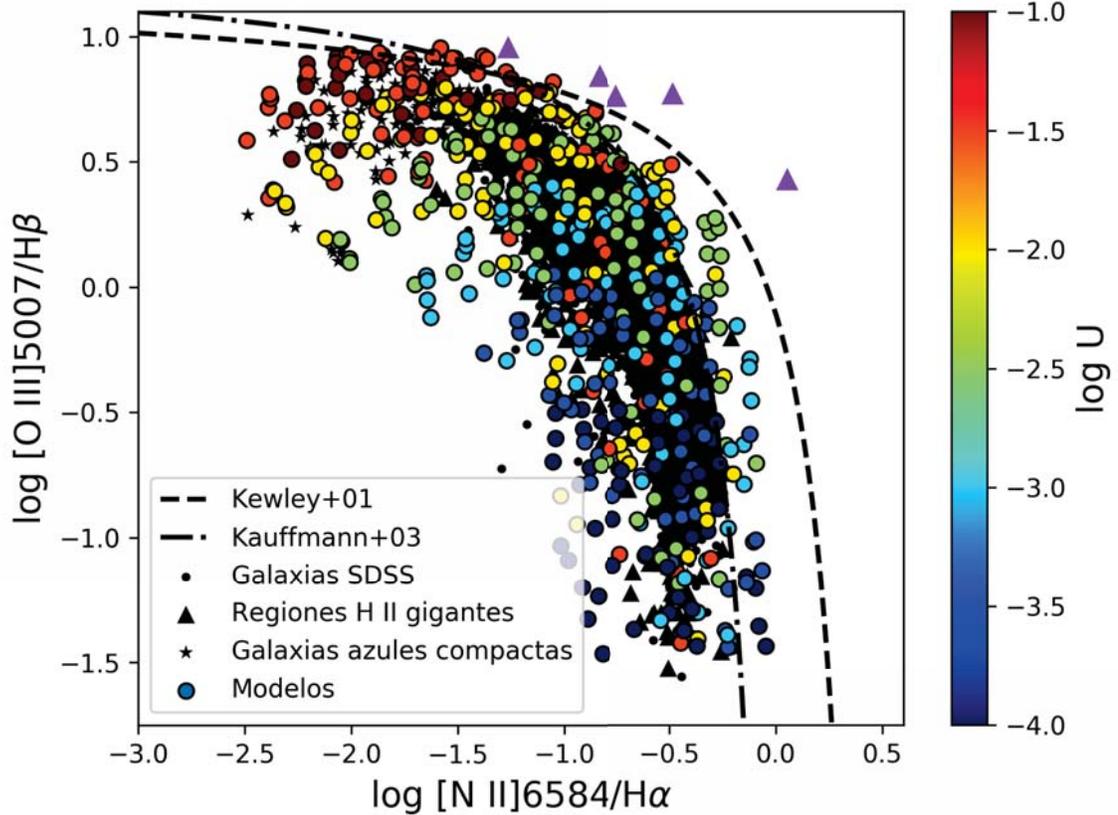


FIGURA 3.4: Valores de  $I([\text{O III}] \lambda 5007)/I(\text{H}\beta)$  en función de  $I([\text{N II}] \lambda 6584)/I(\text{H}\alpha)$  para el conjunto de modelos de fotoionización seleccionados con los intervalos propuestos en las ecuaciones 3.8 y 3.9 (círculos de colores). En la barra de color se muestran los valores del logaritmo del parámetro de ionización para los modelos. En negro, se muestra el conjunto de observaciones con distintos símbolos para regiones H II gigantes (triángulos), galaxias azules compactas (estrellas) y objetos del SDSS (puntos). Se muestran las líneas de Kewley et al. (2001) que delimita la línea donde se encuentra el máximo nacimiento estelar y la línea de Kauffmann et al. (2003) que delimita la región de galaxias con formación estelar y la de galaxias que albergan un AGN (tipo Seyfert). Los triángulos magenta representan los objetos NGC 300 7, NGC 0598 B90, NGC 4395 -003-003, NGC 5236 p5 y NGC 5236 p36 (de izquierda a derecha). Puesto que estos objetos caen por encima de ambas líneas, se espera que su fuente de radiación sea distinta a la de estrellas jóvenes y masivas, por lo que no se consideraran para nuestra muestra observacional.



# 4

## CÁLCULO DE LOS FACTORES DE CORRECCIÓN POR IONIZACIÓN

En la primera parte de este capítulo se explica el procedimiento general que se llevó a cabo para el cálculo de los ICFs de carbono, nitrógeno, oxígeno, neón, azufre, cloro y argón. En la segunda parte, se explica el procedimiento específico para cada elemento y se indica la expresión analítica propuesta para cada ICF, así como su incertidumbre asociada.

### 4.1 Procedimiento general

En primer lugar, se exploró la literatura en busca de los iones de cada elemento que se observan en el intervalo visible del espectro en regiones H II extragalácticas, con el fin de calcular los ICFs en función de estos iones.

De manera complementaria, se analizaron las fracciones iónicas de cada elemento  $X$ , desde su ion  $X^+$  hasta el ion  $X^{+6}$ , con el fin de estudiar la contribución relativa de cada uno a la abundancia total del elemento. Si los iones que se observan son los que más contribuyen a la abundancia total, la corrección aportada por el ICF será pequeña. En el caso contrario, si se observan los iones que no contribuyen significativamente a la abundancia total del elemento  $X$  entonces el ICF será significativo y por lo tanto, será crucial para la determinación de la abundancia total.

Como ya se mencionó en el Capítulo 1, si se desea calcular la abundancia total de un elemento  $X$  con respecto a H como:

$$\frac{X}{H} = \frac{\sum_i X_{\text{obs}}^{+i}}{H^+} \times \text{ICF}(X^{+i}), \quad (4.1)$$

entonces el ICF será:

$$\text{ICF}(X^{+i}) = \frac{X / \sum_i X_{\text{obs}}^{+i}}{H/H^+}, \quad (4.2)$$

donde  $\sum_i X_{\text{obs}}^{+i}/H^+$  es la suma de las abundancias iónicas de todos los iones observados del elemento  $X$ . Los ICFs se calculan utilizando modelos de fotoionización en los que se conocen todas las fracciones iónicas. Para ello, se debe buscar el mejor ajuste posible del ICF de los modelos (por ejemplo, el ICF de la ecuación 4.2) con respecto a los iones de algún otro elemento cuyas líneas se puedan observar y cuya abundancia iónica se determine fácilmente.

Para nuestro cálculo de ICFs, utilizamos cocientes de iones cuyas líneas sean intensas como son las líneas de los iones de oxígeno, que se observan en regiones H II con facilidad. En este trabajo se exploraron tres cocientes:  $O^{++}/(O^+ + O^{++})$ ,  $O^+/O^{++}$  y  $\log(O^+/O^{++})$ . Además, se exploraron cuatro definiciones distintas para el ICF de los modelos, con el fin de seleccionar aquella que permitiera determinar el mejor ajuste. La primera expresión considerada para el ICF corresponde a la ecuación 4.2, mientras que las otras expresiones exploradas son:

$$\begin{aligned} \frac{X}{O} &= \frac{\sum_{i=1} X^{+i}}{O^+} \times \text{ICF}(X^{+i}/O^+) \rightarrow \text{ICF}(X^{+i}/O^+) = \frac{X / \sum_{i=1} X^{+i}}{O/O^+} \\ \frac{X}{O} &= \frac{\sum_{i=1} X^{+i}}{O^{++}} \times \text{ICF}(X^{+i}/O^{++}) \rightarrow \text{ICF}(X^{+i}/O^{++}) = \frac{X / \sum_{i=1} X^{+i}}{O/O^{++}} \\ \frac{X}{O} &= \frac{\sum_{i=1} X^{+i}}{(O^+ + O^{++})} \times \text{ICF}(X^{+i}/O^+ + O^{++}) \\ \rightarrow \text{ICF}(X^{+i}/O^+ + O^{++}) &= \frac{X / \sum_{i=1} X^{+i}}{O/(O^+ + O^{++})} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Por ejemplo, si se desea calcular la abundancia total de nitrógeno, el único ion cuyas líneas se observan en el intervalo visible del espectro es el  $N^+$  por lo que los cuatro posibles ICFs son:

$$\begin{aligned} 1) \frac{N}{H} &= \frac{N^+}{H^+} \times \text{ICF}(N^+) \Rightarrow \text{ICF}(N^+) = \frac{N/N^+}{H/H^+} \\ 2) \frac{N}{O} &= \frac{N^+}{O^+} \times \text{ICF}(N^+/O^+) \Rightarrow \text{ICF}(N^+/O^+) = \frac{N/N^+}{O/O^+} \\ 3) \frac{N}{O} &= \frac{N^+}{O^{++}} \times \text{ICF}(N^+/O^{++}) \Rightarrow \text{ICF}(N^+/O^{++}) = \frac{N/N^+}{O/O^{++}} \\ 4) \frac{N}{O} &= \frac{N^+}{O^+ + O^{++}} \times \text{ICF}(N^+/O^+ + O^{++}) \Rightarrow \text{ICF}(N^+/O^+ + O^{++}) = \frac{N/N^+}{O/(O^+ + O^{++})} \end{aligned} \quad (4.4)$$

De estas cuatro opciones para el ICF en función de los cocientes  $O^{++}/(O^{+}+O^{++})$ ,  $O^{+}/(O^{+}+O^{++})$  y  $\log(O^{+}/O^{++})$  se seleccionaron las tres mejores opciones que permitan obtener el mejor ajuste con la menor incertidumbre asociada posible. Los ajustes para cada panel seleccionado se calcularon utilizando ZunZun<sup>1</sup>, una herramienta virtual que permite obtener el mejor ajuste para un conjunto de datos buscando entre muchas funciones (alrededor de 860). De estas tres opciones exploradas, seleccionamos aquella con la menor incertidumbre posible y con la expresión analítica más sencilla posible. En adelante, se llama  $ICF_m$  al ICF que se obtiene a partir de los modelos de fotoionización mientras que la expresión analítica de cada ajuste se llama  $ICF_f$  (utilizando la misma nomenclatura que Delgado-Inglada et al. 2014).

Además de la expresión analítica, para cada ICF se provee una estimación de la incertidumbre asociada, dada por la diferencia  $\Delta ICF = ICF_m - ICF_f$ , de manera que si  $\Delta ICF$  tiene valores muy cercanos a cero para todos los modelos, la incertidumbre asociada al ICF será muy baja. Los valores de esta diferencia nos dan una idea de las incertidumbres asociadas al ICF propuesto. Se pueden considerar los valores máximos de esta diferencia como medida de la incertidumbre asociada a este ICF, sin embargo estos no son representativos de la mayoría de los modelos y por tanto el error asociado al ICF se sobrestima. Aquí, además de la incertidumbre máxima, se reporta para cada ICF la incertidumbre asociada a la mayoría de los modelos, que es más representativa. La incertidumbre de la mayoría de los modelos se define a ojo en cada figura de  $\Delta ICF$ , ya que se busca sólo una estimación de los valores más representativos de  $\Delta ICF$  de nuestro conjunto de modelos. En el texto, las incertidumbres se reportan redondeadas a una cifra significativa. En el futuro, se explorarán métodos estadísticos para definir los valores de  $\Delta ICF$  de la mayoría de los modelos, de manera que ya no dependa de la inspección visual de estas figuras.

---

<sup>1</sup>ZunZun Online Curve Fitting and Surface Fitting Web Site <http://zunzun.com/>

## 4.2 Oxígeno

Las líneas de oxígeno que se observan en regiones H II extragalácticas en el intervalo visible del espectro son: [O II] $\lambda$ 3726, [O II] $\lambda$ 3729, [O III]  $\lambda$ 4363, [O III] $\lambda$ 4959, [O III] $\lambda$ 5007 y el cuatriplete [O II] $\lambda$ 7325. Por lo tanto, si se calcula un ICF para la abundancia del oxígeno debe estar basado en la observación de los iones  $O^+$  y  $O^{++}$ .

En la Figura 4.1 se muestran las fracciones iónicas de los primeros seis iones de oxígeno en función de  $O^{++}/(O^++O^{++})$ , exploradas con nuestros modelos. Se puede observar que los dos iones que más contribuyen a la abundancia total de oxígeno son el  $O^+$  y el  $O^{++}$ . Cada uno de estos dos iones contribuye en más del 60% del oxígeno total en nuestros modelos con  $O^{++}/(O^++O^{++}) < 0.4$  y  $O^{++}/(O^++O^{++}) > 0.6$ , respectivamente. El ion  $O^{+3}$  es sólo un 5% únicamente en modelos de alto grado de ionización ( $O^{++}/(O^++O^{++}) > 0.9$ ), mientras que los iones  $O^{+4}$ ,  $O^{+5}$  y  $O^{+6}$  tienen una contribución menor al 1% para todos los grados de ionización.

Por lo tanto, como en las regiones H II se suelen observar simultáneamente líneas de  $O^+$  y  $O^{++}$ , sabemos que la contribución de los otros iones es despreciable y por tanto, el cálculo de un ICF no es necesario. Esto se puede comprobar en la Figura 4.2 donde se muestra el  $ICF_m(O^++O^{++})$  de nuestro conjunto de modelos en función del cociente  $He^{++}/(He^++He^{++})$ . Si se calcula la abundancia de oxígeno simplemente como:

$$\frac{O}{H} = \frac{O^+}{H^+} + \frac{O^{++}}{H^+}, \quad (4.5)$$

(como se hace en regiones H II habitualmente), la incertidumbre asociada a la abundancia total de oxígeno por no utilizar un ICF es como máximo 0.02 dex (que es lo que contribuye a la abundancia total el ion  $O^{+3}$ , cuyas líneas no se observan en el intervalo visible del espectro).

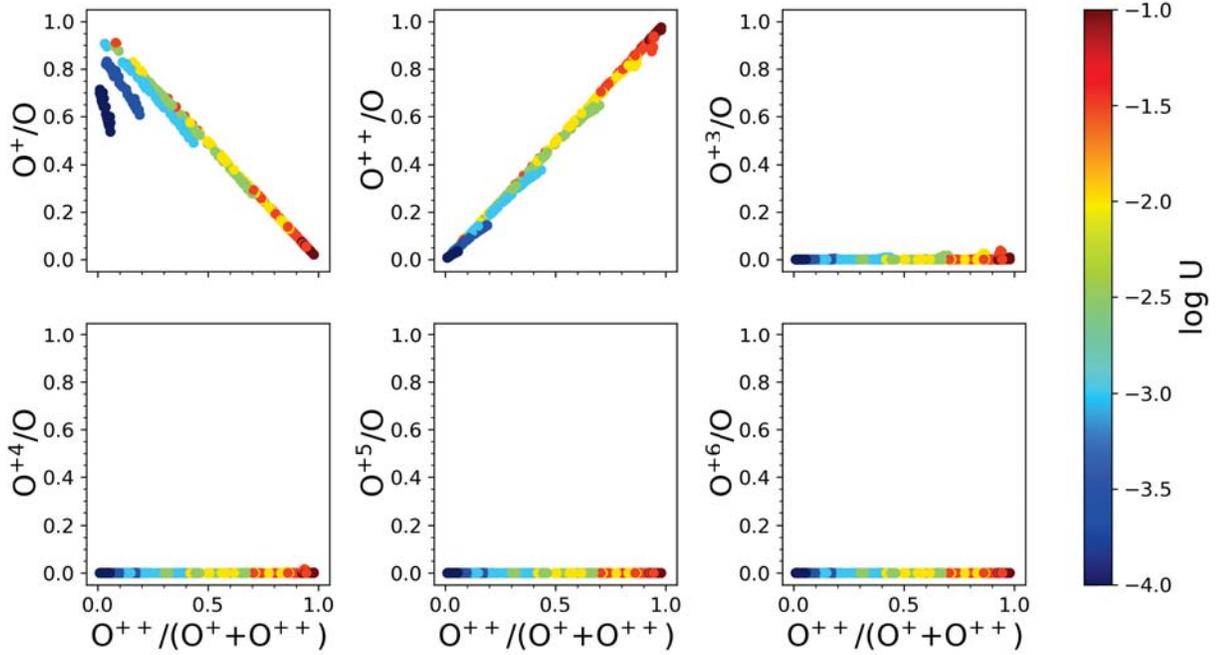


FIGURA 4.1: Fracción iónica de  $O^+$ ,  $O^{++}$ ,  $O^{+3}$ ,  $O^{+4}$ ,  $O^{+5}$  y  $O^{+6}$  en función del cociente  $O^{++}/(O^++ + O^+)$  para los modelos de fotoionización. En la barra de color se indica el valor del parámetro de ionización de los modelos.

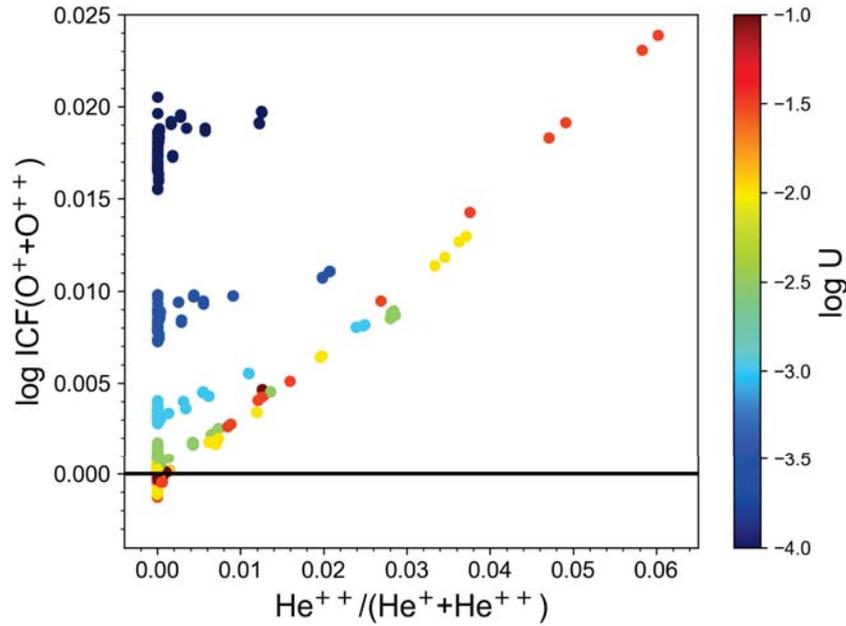


FIGURA 4.2: Valores de  $ICF_m(O^++ + O^+)$  con respecto al cociente  $He^{++}/(He^{++} + He^+)$  para todos los modelos. En la barra de color se indica el valor del parámetro de ionización de los modelos. La línea negra representa  $ICF_m(O^++ + O^+) = 1$ .

### 4.3 Carbono

En el intervalo visible del espectro, las líneas de carbono que pueden observarse son: C II  $\lambda 4267$ , C III  $\lambda 4650$  y C IV  $\lambda 4658$ . De estas líneas, la más intensa suele ser la primera. Debido a esto, en este trabajo se propone un ICF para cuando se observan líneas del ion  $C^{++}$ .

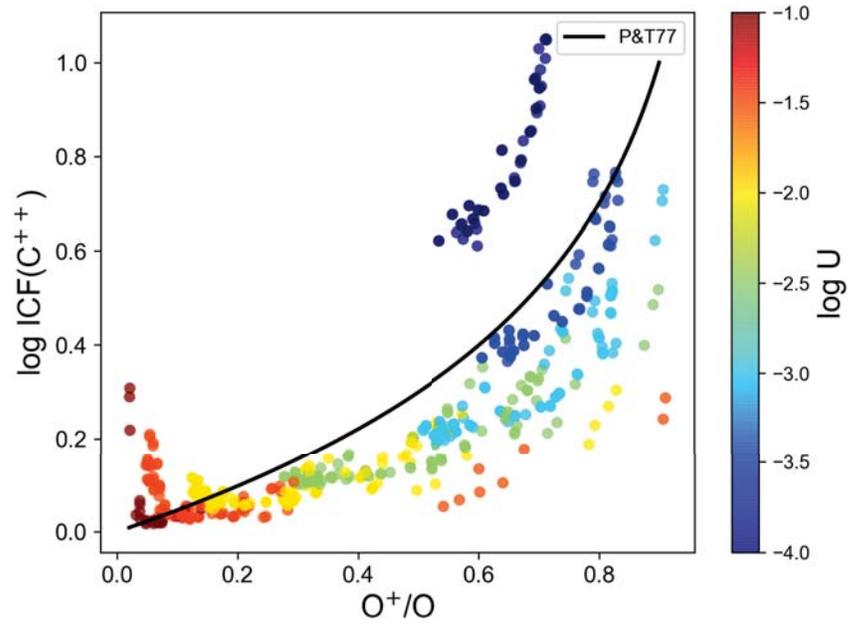
#### 4.3.1 Factores de corrección por ionización previos

Peimbert & Torres-Peimbert (1977) observaron únicamente la línea C II  $\lambda 4267$ , por lo que proponen un ICF para corregir por la presencia del ion  $C^+$ . Este ICF se basa en que el potencial de ionización de  $C^+$  ( $P.I.(C^+) = 24.38$  eV) tiene un valor intermedio entre los potenciales de los iones  $S^+$  y  $O^+$  ( $P.I.(S^+) = 23.33$  eV y  $P.I.(O^+) = 35.12$  eV) y depende de un parámetro  $\gamma$ :

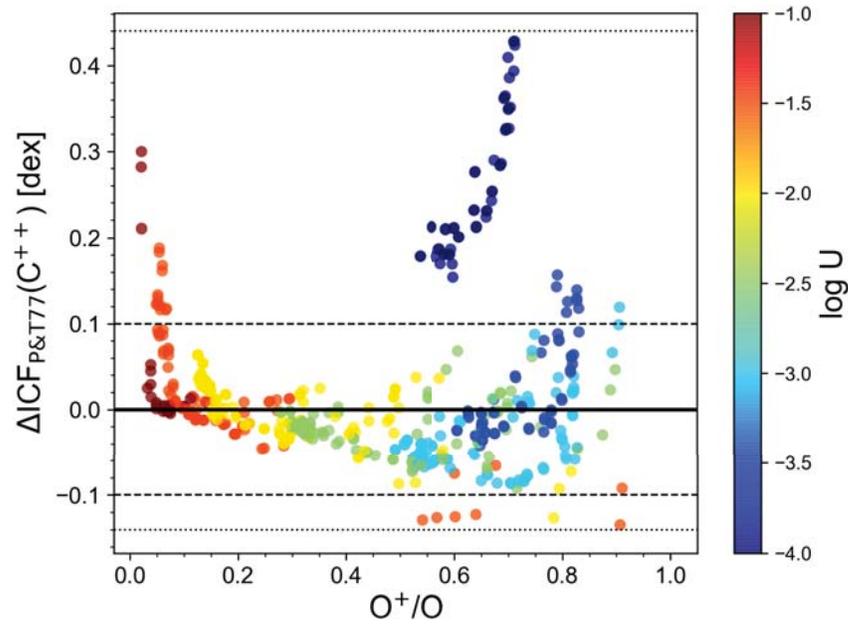
$$ICF_{PT77}(C^{++}) = \frac{1}{1 - \gamma(O^+/O) - (1 - \gamma)(S^+/S)} \quad (4.6)$$

Esta expresión se representa con una línea continua en la Figura 4.3a, donde se muestra el  $ICF_m(C^{++})$  de nuestro conjunto de modelos en función de  $O^+/O$ . En esta figura se ha utilizado  $\gamma = 0.6$ , valor utilizado por Peimbert & Torres-Peimbert (1977) para este parámetro (aunque en el mismo trabajo, Peimbert & Torres-Peimbert (1977) concluyen que el valor del ICF no depende fuertemente de este parámetro  $\gamma$ ).

Se puede observar que la mayoría de los modelos se encuentra por debajo de la curva de esta expresión, lo cual implica que al utilizar este ICF para estimar la abundancia de carbono, en muchos casos se sobrestima el valor real del ICF. Esto se puede ver también en la Figura 4.3b, donde se muestra el valor de  $\Delta ICF_{PT77}(C^{++})$  para nuestro conjunto de modelos. Los valores extremos que alcanza  $\Delta ICF_{PT77}(C^{++})$  mostrados con líneas punteadas son de  $^{+0.4}_{-0.1}$  dex aproximadamente, mientras que para la mayoría de los modelos es de  $\pm 0.1$  dex, valores mostrados en líneas discontinuas.



(a)



(b)

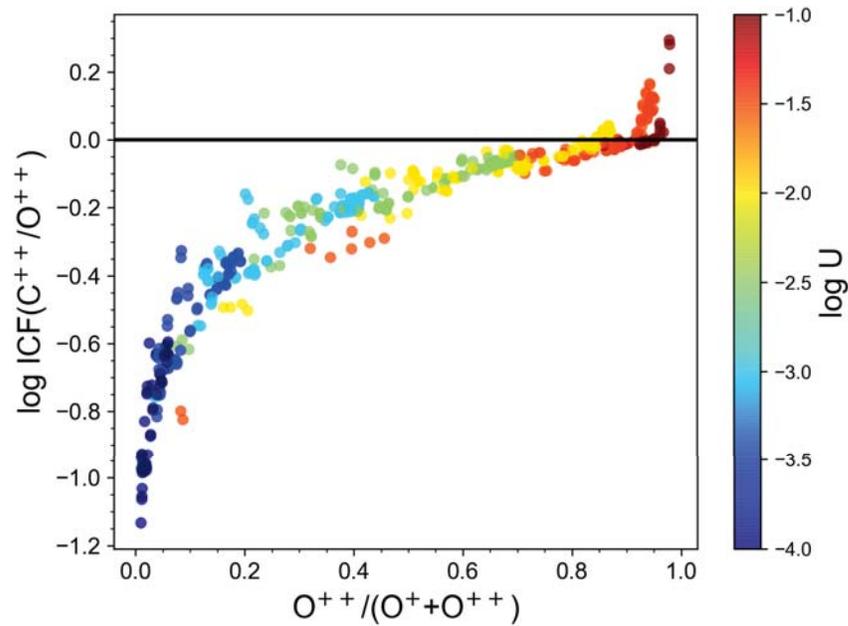
FIGURA 4.3: **a)**  $\text{ICF}_m(\text{C}^{++})$  de nuestro conjunto de modelos en función de  $\text{O}^+/\text{O}$ . La línea continua representa el  $\log \text{ICF}_{\text{P}\&\text{T}77}(\text{C}^{++})$ . En la barra de color se muestran los valores del parámetro de ionización. **b)** Incertidumbre asociada al  $\text{ICF}_{\text{P}\&\text{T}77}(\text{C}^{++})$  en función de  $\text{O}^+/\text{O}$  para los modelos de fotoionización. Las líneas punteadas representan las incertidumbres máximas asociadas al  $\text{ICF}_{\text{P}\&\text{T}77}(\text{C}^{++})$ , mientras que las líneas discontinuas representan las incertidumbres asociadas al  $\text{ICF}$  de la mayoría de los modelos. La línea continua muestra donde se cumple que el  $\text{ICF}_m(\text{C}^{++})$  de los modelos es igual al del ajuste.

Por otro lado, una expresión utilizada con frecuencia para el cálculo de la abundancia de carbono corresponde a:

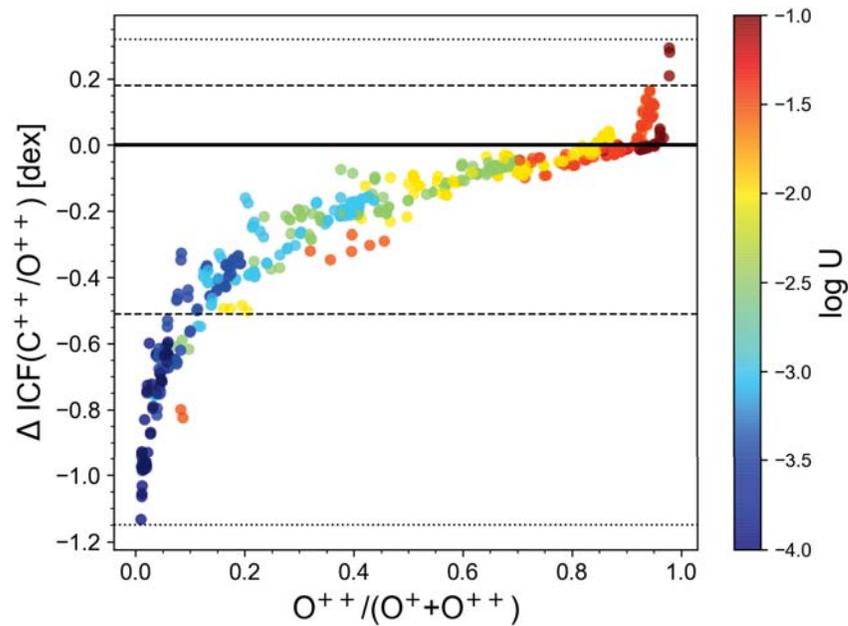
$$\frac{C}{O} = \frac{C^{++}}{O^{++}} \quad (4.7)$$

En la Figura 4.4a esta expresión se muestra con una línea continua. Se puede ver que muchos de los modelos se encuentran por debajo de esta línea, excepto aquellos con  $O^{++}/(O^{+}+O^{++}) > 0.9$ , que se encuentran por arriba de esta. Esto implica que al suponer esta relación, en objetos de alto grado de ionización (con  $O^{++}/(O^{+}+O^{++}) > 0.9$ ) se puede subestimar el ICF (hasta en 0.3 dex), mientras que para el resto de los casos al usar esta relación el ICF se sobrestima (hasta en 1.2 dex). Esto se muestra en la Figura 4.4b con líneas punteadas, donde se puede ver también que la mayoría de modelos presenta valores de  $\Delta\text{ICF}(C^{++})$   $^{+0.2}_{-0.5}$  dex.

De los ICFs explorados aquí, el que se utiliza con más frecuencia corresponde a la relación  $C/O = C^{++}/O^{++}$ . Sin embargo, tanto esta expresión como la propuesta por Peimbert & Torres-Peimbert (1977) implican valores de C/H (o C/O) erróneos de acuerdo con nuestro conjunto de modelos.



(a)



(b)

FIGURA 4.4: **a)** Valores del  $\text{ICF}_m(\text{C}^{++})$  de nuestro conjunto de modelos en función de  $\text{O}^{++}/\text{O}^{++}+\text{O}^{++}$ . La línea continua representa el  $\log \text{ICF}(\text{C}^{++}/\text{O}^{++})$ . En la barra de color se muestran los valores del parámetro de ionización. **b)** Incertidumbre asociada al  $\text{ICF}(\text{C}^{++}/\text{O}^{++})$  en función de  $\text{O}^{++}/\text{O}^{++}+\text{O}^{++}$  para los modelos de fotoionización. Las líneas punteadas representan las incertidumbres máximas asociadas y las líneas discontinuas representan las incertidumbres asociadas al  $\text{ICF}$  de la mayoría de los modelos. La línea continua muestra donde se cumple que el  $\text{ICF}_m(\text{C}^{++}/\text{O}^{++})$  de los modelos es igual al  $\text{ICF}$  del ajuste.

### 4.3.2 Cálculo del ICF(C<sup>++</sup>)

En primer lugar, se exploraron con nuestros modelos las fracciones iónicas de los primeros seis iones de carbono, con el fin de analizar la contribución de cada ion a la abundancia total, con respecto al grado de ionización dado por  $O^{++}/(O^++O^{++})$  (Figura 4.5). Se puede ver que los iones que más contribuyen a la abundancia total para la mayoría de los grados de ionización son  $C^+$ ,  $C^{++}$  y  $C^{+3}$ . El  $C^+$  contribuye en más del 30% en los modelos con  $O^{++}/(O^++O^{++}) < 0.3$  mientras que el  $C^{++}$  contribuye en más del 60% cuando  $O^{++}/(O^++O^{++}) \geq 0.5$ . Por otro lado, el  $C^{+3}$  contribuye sólo hasta un 50% pero únicamente en modelos de alto grado de ionización (con  $O^{++}/(O^++O^{++}) \geq 0.9$ ), mientras que los iones  $C^{+4}$ ,  $C^{+5}$  y  $C^{+6}$  contribuyen en menos del 1% para modelos con cualquier grado de ionización. Por lo tanto, como en las regiones H II sólo se observan líneas de recombinación del ion  $C^{++}$  en el óptico, se espera que el ICF sea significativo y su cálculo sea relevante en objetos con grado de ionización bajo ( $O^{++}/(O^++O^{++}) < 0.4$ ) o con grado de ionización alto ( $O^{++}/(O^++O^{++}) > 0.9$ ) donde la contribución del ion  $C^{+3}$  a la abundancia total de carbono es importante.

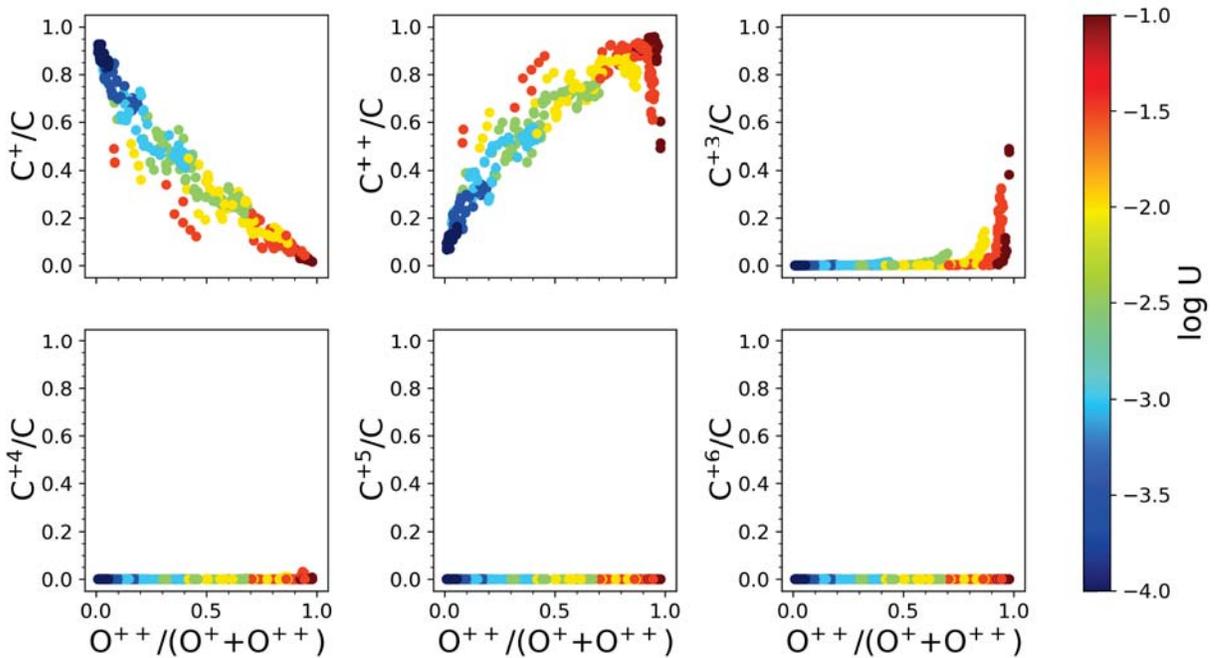


FIGURA 4.5: Fracción iónica de  $C^+$ ,  $C^{++}$ ,  $C^{+3}$ ,  $C^{+4}$ ,  $C^{+5}$  y  $C^{+6}$  en función del cociente  $O^{++}/(O^++O^{++})$  para los modelos de fotoionización. En la barra de color se indica el valor del parámetro de ionización de los modelos.

Como se explicó en el procedimiento general, se compararon cuatro formas del ICF para el carbono de nuestros modelos:  $ICF_m(C^{++}/H^+)$ ,  $ICF_m(C^{++}/(O^++O^{++}))$ ,  $ICF_m(C^{++}/O^+)$

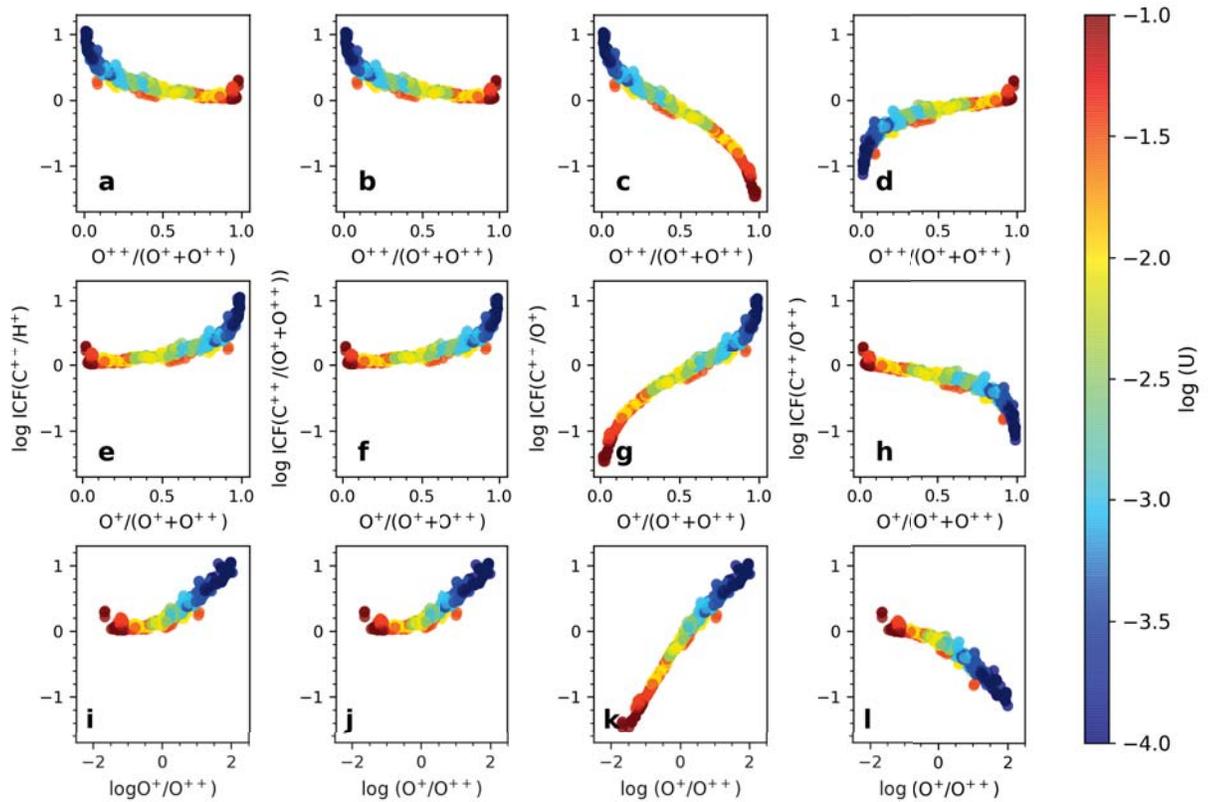


FIGURA 4.6: Opciones exploradas para el  $\text{ICF}_m(\text{C}^{++})$  en función de los cocientes  $\text{O}^{++}/(\text{O}^+ + \text{O}^{++})$ ,  $\text{O}^+ / (\text{O}^+ + \text{O}^{++})$  y  $\log(\text{O}^+ / \text{O}^{++})$ . En la barra de color se indica el valor del parámetro de ionización de los modelos.

y  $\text{ICF}_m(\text{C}^{++}/\text{O}^{++})$ , con respecto a tres cocientes de iones de oxígeno:  $\text{O}^{++}/(\text{O}^+ + \text{O}^{++})$ ,  $\text{O}^+ / (\text{O}^+ + \text{O}^{++})$  y  $\log(\text{O}^+ / \text{O}^{++})$ , y de las doce combinaciones posibles se seleccionó aquella en la que los modelos muestran la tendencia más clara y la menor dispersión posible, de manera que pueda calcularse un buen ajuste. Estas opciones exploradas se muestran en la Figura 4.6.

En esta figura se puede ver que, a pesar de que los modelos muestran dispersión en todas las opciones, los paneles **c**, **g** y **k** son aquellos donde los modelos se encuentran en una región más definida y de menor dispersión, y donde además se ve que la expresión analítica del ajuste puede ser relativamente más sencilla (tentativamente una recta o incluso, una constante), por lo que se seleccionaron estos tres paneles para realizar un ajuste. Posteriormente, de los tres ajustes calculados se seleccionó el mejor (aquel no sólo con menor incertidumbre asociada dada por  $\Delta\text{ICF} = \text{ICF}_m - \text{ICF}_f$  sino también, con la expresión analítica más sencilla). Las expresiones analíticas de los ajustes calculados para los paneles **c**, **g** y **k** son, respectivamente:

$$\log \text{ICF}_f(\text{C}^{++}/\text{O}^+) = 0.5 \ln(-\ln(0.9\omega - 0.01)), \quad (4.8)$$

$$\log \text{ICF}_f(\text{C}^{++}/\text{O}^+) = 0.003e^{5.800v} - 1.500e^{-4.200v}, \quad (4.9)$$

$$\log \text{ICF}_f(\text{C}^{++}/\text{O}^+) = \frac{-12.0}{(-1.3\eta - 3.4)^2 + 15.2} + 2.1, \quad (4.10)$$

donde  $\omega = \text{O}^{++}/(\text{O}^+ + \text{O}^{++})$ ,  $v = \text{O}^+ / (\text{O}^+ + \text{O}^{++})$  y  $\eta = \log(\text{O}^+ / \text{O}^{++})$ . En los paneles de lado izquierdo de la Figura 4.7 se representan estas tres expresiones con líneas continuas junto con los modelos de fotoionización, mientras que en los paneles de lado derecho se muestran las incertidumbres asociadas a cada uno, dadas por  $\Delta \text{ICF}(\text{C}^{++}/\text{O}^+)$ . Con una línea punteada se muestran los valores máximos de la incertidumbre y con líneas discontinuas la incertidumbre asociadas al ICF de la mayoría de los modelos. Se puede ver que las incertidumbres (redondeadas al decimal más próximo) asociadas a los ajustes llegan a ser hasta de  $\pm 0.3$  dex para la ecuación 4.8 (que corresponde al ajuste del panel **c**), y de  ${}^{+0.2}_{-0.3}$  dex para las expresiones 4.9 y 4.10 (de los paneles **g** y **k**). La incertidumbre asociada al ICF en la mayoría de los modelos en los tres casos es de  $\pm 0.1$  dex aproximadamente. Por lo tanto, los tres ajustes realizados tienen una incertidumbre muy similar. Como la expresión del panel **g** (ecuación 4.9) es un poco más sencilla, consideramos que este ajuste es la mejor opción de los ICFs aquí propuestos.

Al comparar esta expresión con la del  $\text{ICF}_{\text{PT77}}(\text{C}^{++})$  las incertidumbres son también muy parecidas, sin embargo el ICF propuesto en este trabajo tiene una expresión analítica ligeramente más sencilla. En conclusión, consideramos que la expresión de la ecuación 4.9 del ajuste del panel **g** es la mejor opción disponible para el ICF para el cálculo de la abundancia de carbono.

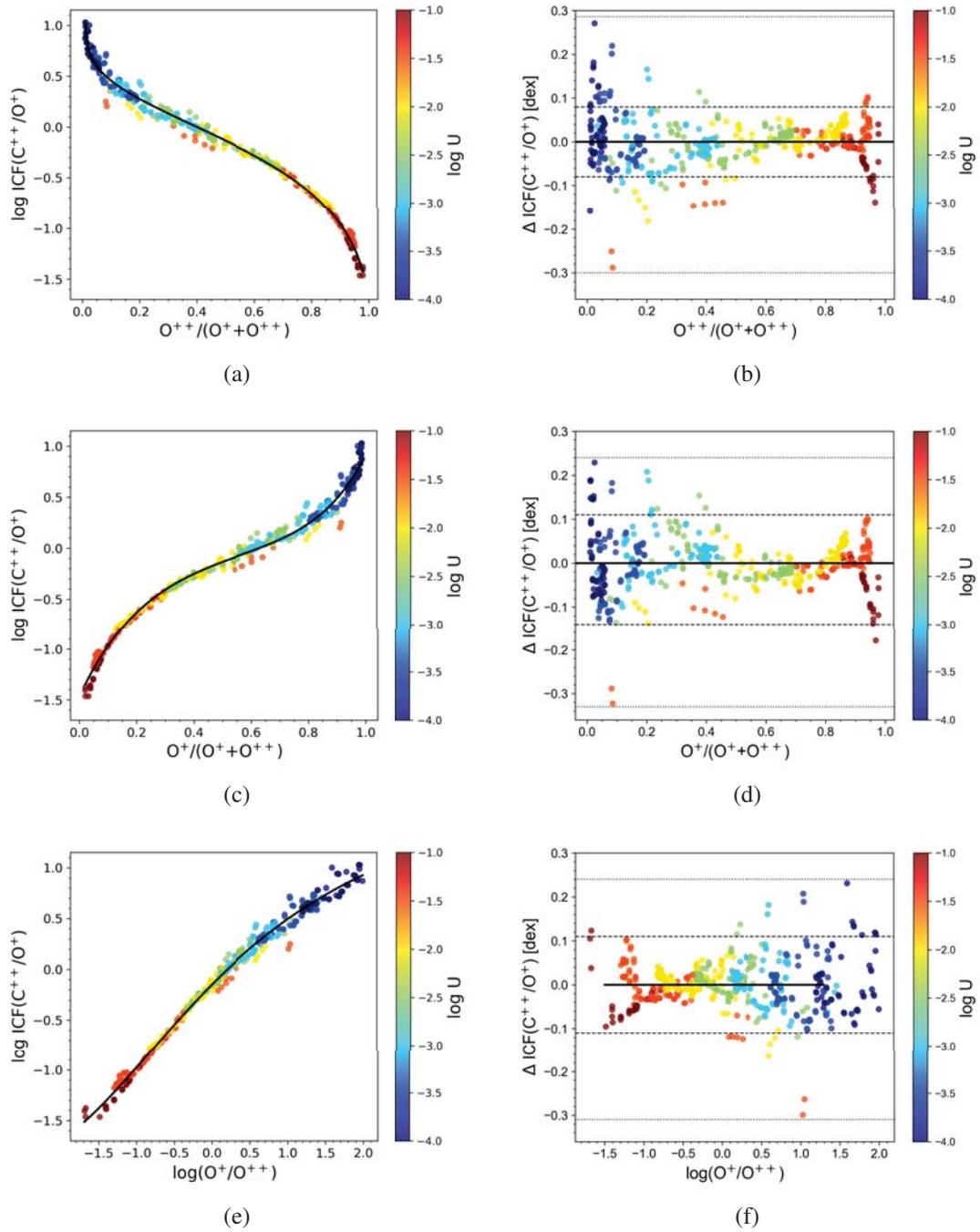


FIGURA 4.7: Valores del  $\log \text{ICF}(\text{C}^{++}/\text{O}^+)$  en función de  $\text{O}^{++}/(\text{O}^+ + \text{O}^{++})$ ,  $\text{O}^+ / (\text{O}^+ + \text{O}^{++})$  y  $\log(\text{O}^+ / \text{O}^{++})$ . Los ajustes se muestran en las figuras de lado izquierdo con líneas continuas y las incertidumbres asociadas a cada ajuste,  $\Delta \text{ICF}(\text{C}^{++}/\text{O}^+)$ , se muestran en los paneles de lado derecho. Las incertidumbres máximas se muestran con líneas punteadas y las incertidumbres asociadas al ICF de la mayoría de los modelos con líneas discontinuas. La línea continua en las figuras de lado derecho, representa donde el  $\text{ICF}_m(\text{C}^{++}/\text{O}^+)$  de los modelos es igual al  $\text{ICF}_f(\text{C}^{++}/\text{O}^+)$  del ajuste.

## 4.4 Nitrógeno

Las líneas de emisión de nitrógeno que se observan comúnmente en regiones H II en el intervalo visible del espectro son [N II]  $\lambda 5755$ , [N II]  $\lambda 6584$  y [N II]  $\lambda 6548$ , aunque las más intensas siempre son las dos últimas. Por ello, el ICF propuesto para nitrógeno se calcula en base al ion  $N^+$ .

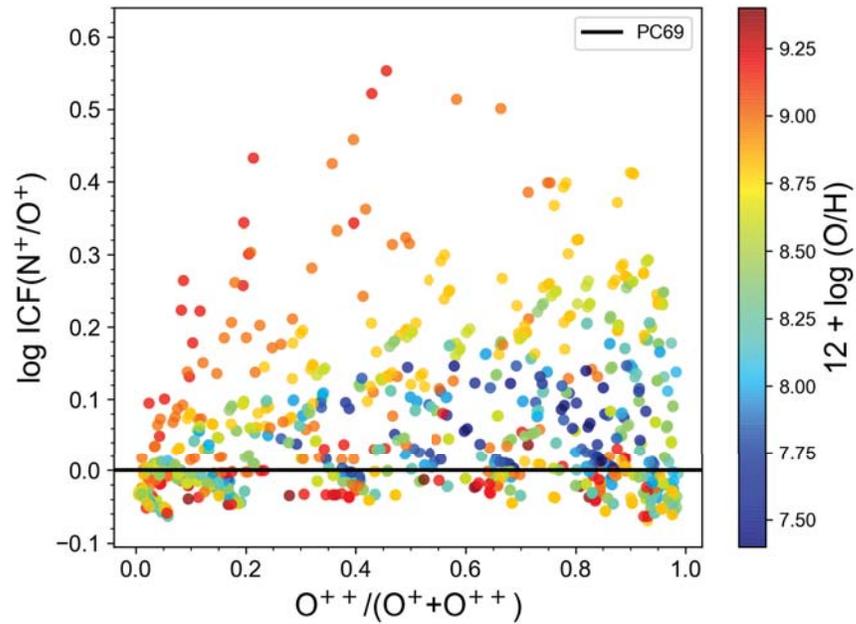
### 4.4.1 Factores de corrección por ionización previos

Para el cálculo de la abundancia de nitrógeno, Peimbert & Costero (1969) proponen un ICF basado en la similitud de los potenciales de ionización de los iones  $N^+$  ( $P.I.(N^+) = 29.60$  eV) y  $O^+$  ( $P.I.(O^+) = 35.12$  eV):

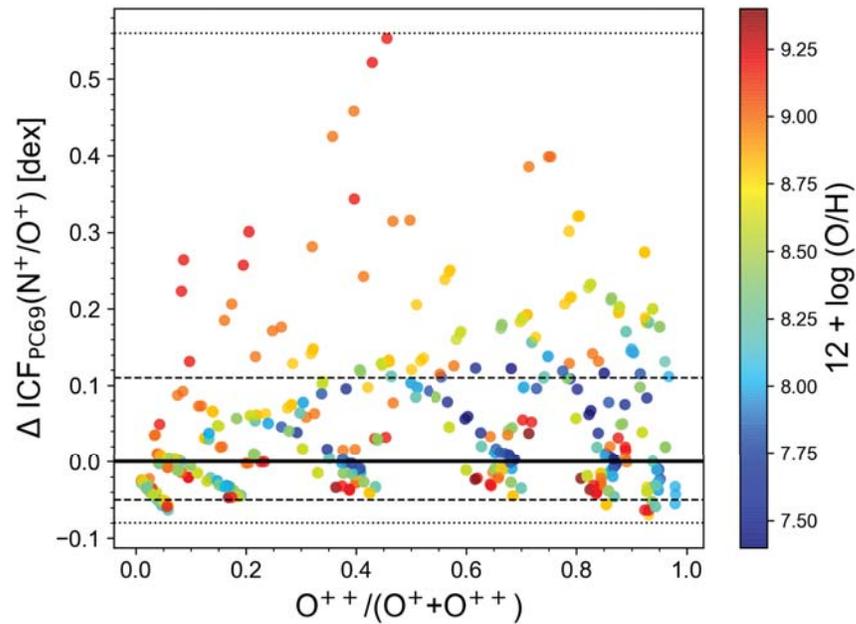
$$\frac{N}{O} = \frac{N^+}{O^+} \quad (4.11)$$

Esta expresión es utilizada con frecuencia en la literatura para determinar la abundancia de nitrógeno (ver por ejemplo, Bresolin 2007, Bresolin et al. 2009a, Zurita & Bresolin 2012). En la Figura 4.8a se representa el  $ICF_{PC69}(N^+)$  con una línea continua, mientras que las diferencias entre este ICF y el de los modelos se muestra en la figura 4.8b. En la barra de color de estas dos figuras se muestran los valores de  $12 + \log(O/H)$  de nuestro conjunto de modelos, lo cual permite distinguir aquellos modelos que se alejan más de cumplir esta expresión. Se puede observar que algunos modelos no cumplen la relación propuesta. Específicamente, los modelos con una abundancia de oxígeno entre  $8.75 < 12 + \log(O/H) < 9.25$  en los cuales la incertidumbre de este ICF llega a ser de hasta  $^{+0.60}_{-0.08}$  dex, aunque la  $\Delta ICF_{PC69}(N^+)$  de la mayoría de los modelos es de  $^{+0.10}_{-0.05}$  dex. Entonces para la mayoría de los modelos se tiene que  $N/O > N^+/O^+$ , en algunos casos hasta en 0.6 dex.

Dado que algunos modelos no cumplen esta relación, en este trabajo se intentó mejorarla. Para esto, se buscó un valor distinto al  $ICF(N^+/O^+) = 1$  buscando hacer a la incertidumbre asociada a este ICF un poco más simétrica. Se encontró que el mejor ICF que se obtiene es  $ICF(N^+/O^+) = 1.016$ , valor muy cercano al ICF propuesto originalmente. Por ello, concluimos que la mejora no es significativa.



(a)



(b)

FIGURA 4.8: **a)** Valores del  $\text{ICF}_m(\text{N}^+)$  de nuestro conjunto de modelos en función de  $\text{O}^{++}/(\text{O}^+ + \text{O}^{++})$ . La línea continua representa el  $\log \text{ICF}_{\text{PC69}}(\text{N}^+)$ . En la barra de color se muestran los valores de  $12 + \log(\text{O}/\text{H})$  de los modelos de fotoionización. **b)** Incertidumbre asociada al  $\text{ICF}_{\text{PC69}}(\text{N}^+)$ , en función de  $\text{O}^{++}/(\text{O}^+ + \text{O}^{++})$  para los modelos de fotoionización. Las líneas punteadas representan las incertidumbres máximas asociadas al  $\text{ICF}_{\text{PC69}}(\text{N}^+)$ , mientras que las líneas discontinuas representan las incertidumbres asociadas al ICF de la mayoría de los modelos. La línea continua muestra donde el  $\text{ICF}_m(\text{N}^+)$  de los modelos es igual al ICF del ajuste.

#### 4.4.2 Cálculo del $ICF(N^+)$

En la Figura 4.9 se muestran las fracciones iónicas de los seis primeros iones de nitrógeno en función del grado de ionización dado por  $O^{++}/(O^++O^{++})$  con nuestro conjunto de modelos. Se puede observar que los iones que contribuyen en mayor proporción a la abundancia de nitrógeno son  $N^+$ ,  $N^{++}$  y  $N^{+3}$ . Los iones  $N^+$  y  $N^{++}$  contribuyen cada uno en más del 40% del nitrógeno total en la mayoría de los modelos, mientras que el ion  $N^{+3}$  contribuye hasta un 40% únicamente en modelos con  $O^{++}/(O^++O^{++}) > 0.8$ . Por otro lado, la contribución de los iones  $N^{+4}$ ,  $N^{+5}$  y  $N^{+6}$  es  $< 1\%$  para todos los grados de ionización. Por lo tanto, dado que en el intervalo visible se observan líneas del ion  $N^+$ , el ICF será significativo y una buena determinación del mismo será crucial para el cálculo de la abundancia de nitrógeno en objetos con  $O^{++}/(O^++O^{++}) > 0.4$ .

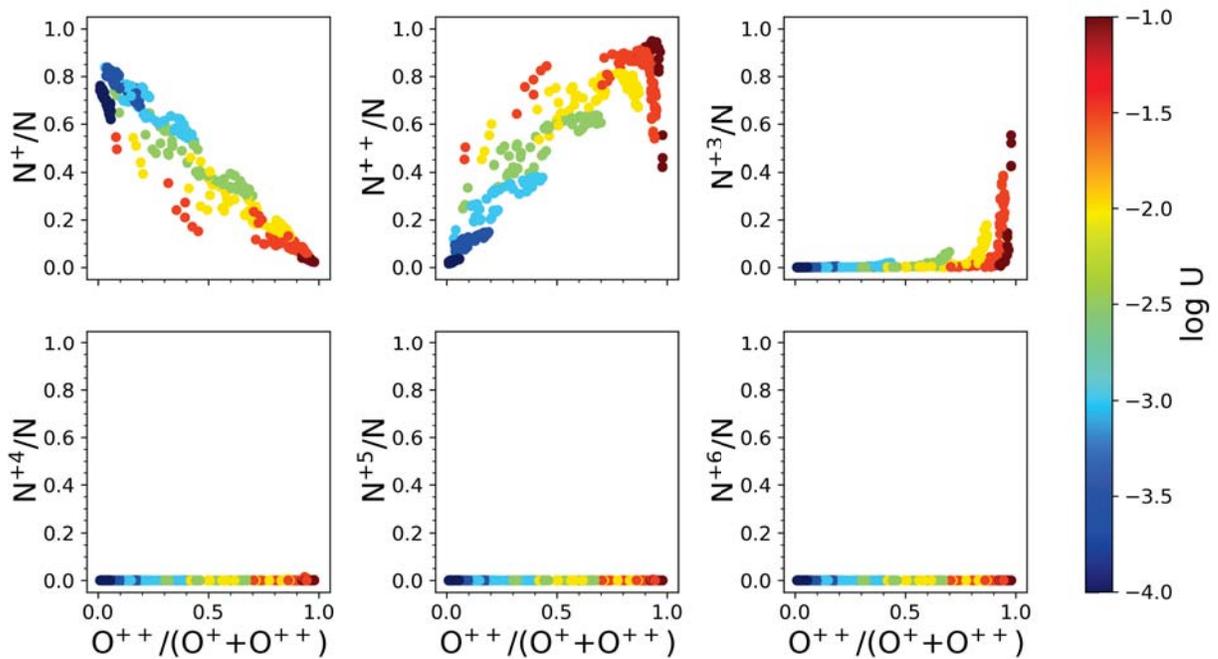


FIGURA 4.9: Fracción iónica de  $N^+$ ,  $N^{++}$ ,  $N^{+3}$ ,  $N^{+4}$ ,  $N^{+5}$  y  $N^{+6}$  en función del cociente  $O^{++}/(O^++O^{++})$  para los modelos de fotoionización. En la barra de color se indica el valor del parámetro de ionización de los modelos.

Para el cálculo del ICF para nitrógeno se compararon las cuatro opciones del ICF con respecto a los tres cocientes de oxígeno detallados anteriormente. En la Figura 4.10 se muestran las doce opciones resultantes de esta comparación, exploradas con nuestro conjunto de modelos. En esta figura se puede ver que los modelos presentan una dispersión similar en todas las opciones exploradas, pero después de calcular un ajuste para las opciones del  $\log ICF(N^+/O^+)$  mostrados en los paneles de la tercera columna y para el  $\log$

ICF(N<sup>+</sup>/O<sup>++</sup>) de la cuarta columna de esta figura (debido a que en estas dos columnas los modelos tienen una dispersión ligeramente menor), se encontró que los tres mejores ajustes se obtienen en los paneles **c**, **d** y **h**, en donde las expresiones analíticas fueron más sencillas y el ajuste presentó una menor incertidumbre asociada.

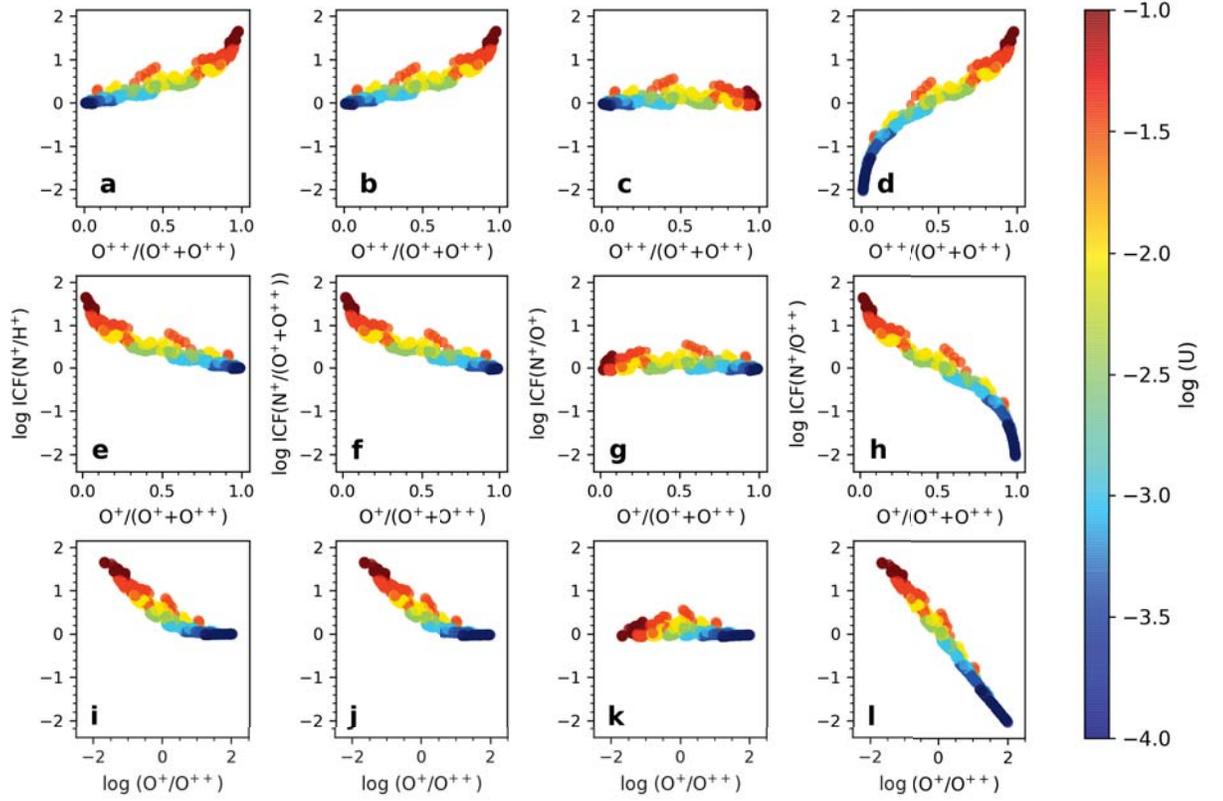


FIGURA 4.10: Opciones exploradas para el ICF<sub>m</sub>(N<sup>+</sup>) en función de los cocientes O<sup>++</sup>/(O<sup>+</sup>+O<sup>++</sup>), O<sup>+</sup>/(O<sup>+</sup>+O<sup>++</sup>) y log(O<sup>+</sup>/O<sup>++</sup>). En la barra de color se indica el valor del parámetro de ionización de los modelos.

Las expresiones de los ICF<sub>f</sub>(N<sup>+</sup>) calculados para los paneles **c**, **d** y **h** son, respectivamente:

$$\log \text{ICF}_f(\text{N}^+/\text{O}^+) = \frac{8.50}{4.30 + \omega} - 1.50\omega - 0.04, \quad (4.12)$$

$$\log \text{ICF}_f(\text{N}^+/\text{O}^{++}) = -1.900e^{-6.000\omega} + 0.020e^{4.400\omega} \quad (4.13)$$

$$\log \text{ICF}_f(\text{N}^+/\text{O}^{++}) = \frac{\nu - 1.0}{0.2\nu^2 - 0.3} - 2.0 \quad (4.14)$$

donde  $\omega = \text{O}^{++}/(\text{O}^+ + \text{O}^{++})$  y  $\nu = \text{O}^+/\text{O}^{++}$ . En los paneles de lado izquierdo de la Figura 4.11 se pueden ver estas tres expresiones con una línea continua junto con

nuestro conjunto de modelos; las incertidumbres asociadas a cada una se muestran en los paneles derechos, las incertidumbres máximas se muestran con líneas punteadas y las incertidumbres asociadas al ICF de la mayoría de los modelos con líneas discontinuas.

Aquí se puede ver que las incertidumbres máximas de los tres ajustes son muy similares, siendo las incertidumbres de cada ajuste aproximadamente de  ${}^{+0.5}_{-0.1}$  dex,  ${}^{+0.5}_{-0.3}$  dex y  ${}^{+0.5}_{-0.2}$  dex respectivamente, mientras que las incertidumbres asociadas al ICF de la mayoría de los modelos son de  ${}^{+0.2}_{-0.1}$  dex,  $\pm 0.2$  dex y  $\pm 0.1$  dex respectivamente para el ajuste de cada panel.

Aunque las incertidumbres asociadas a los tres ICFs son similares, la expresión del ajuste para el panel **h** (de la ecuación 4.14) es la más sencilla, por lo que proponemos este ICF para calcular la abundancia de nitrógeno. Las incertidumbres asociadas a este ICF no son mucho mejores a las asociadas al  $\text{ICF}_{\text{PC69}}(\text{N}^+)$ , sin embargo la expresión del  $\text{ICF}_{\text{PC69}}(\text{N}^+)$  es mucho más sencilla. Por lo tanto, aunque esta expresión puede subestimar el  $\log(\text{N}/\text{O})$  hasta en 0.6 dex en los objetos con  $8.75 < 12 + \log(\text{O}/\text{H}) < 9.25$ , ésta sigue siendo la mejor opción ya que no se ha podido calcular un mejor ICF.

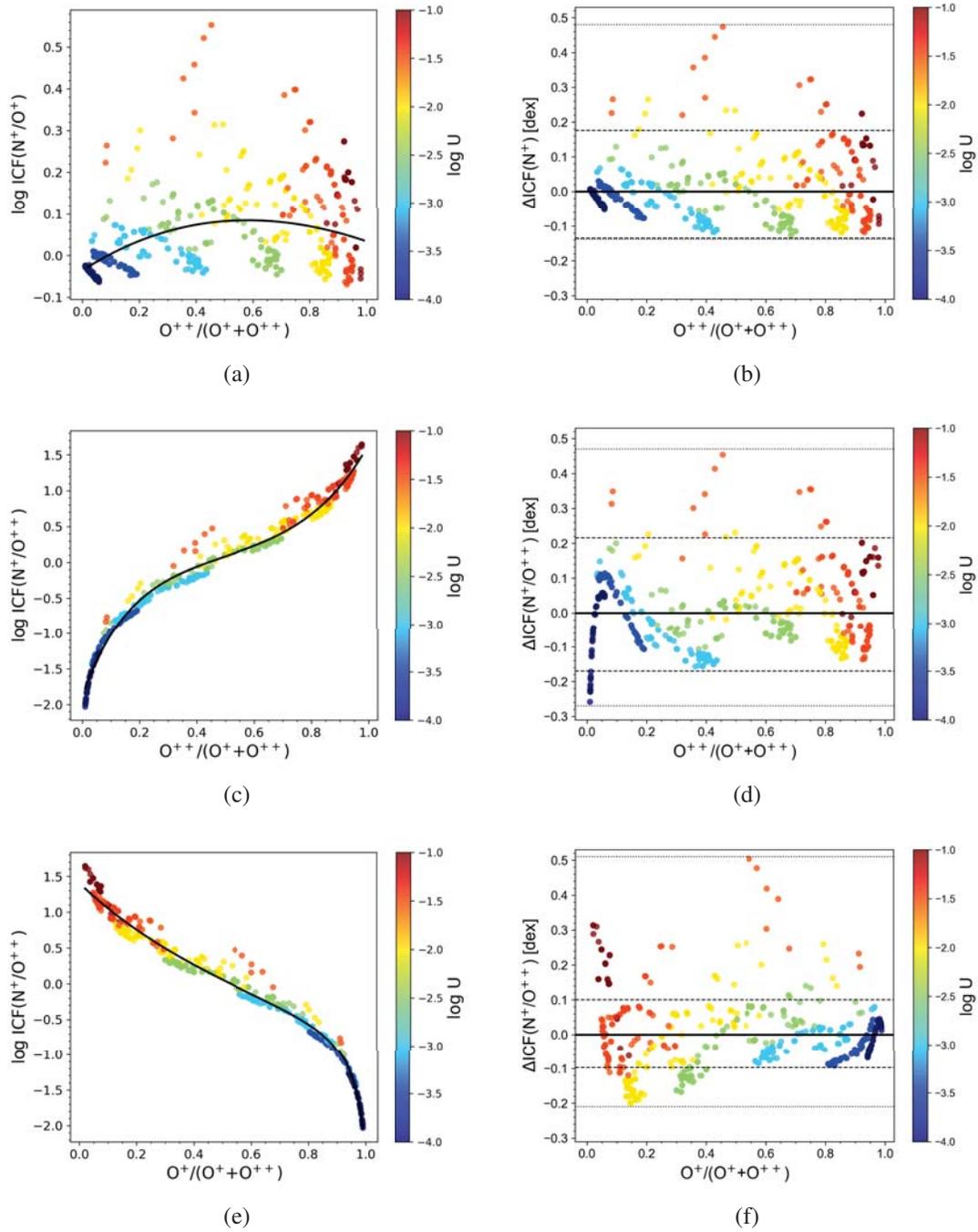


FIGURA 4.11: Valores del  $\log \text{ICF}(\text{N}^+/\text{O}^+)$  y  $\log \text{ICF}(\text{N}^+/\text{O}^{++})$  en función de  $\text{O}^{++}/(\text{O}^+ + \text{O}^{++})$  y  $\text{O}^+ / (\text{O}^+ + \text{O}^{++})$ . Los ajustes se muestran en las figuras de lado izquierdo con líneas continuas y las incertidumbres asociadas a cada ajuste,  $\Delta \text{ICF}(\text{N}^+)$ , se muestran en los paneles de lado derecho. Las incertidumbres máximas se muestran con líneas punteadas y las incertidumbres asociadas al ICF de la mayoría de los modelos con líneas discontinuas. La línea continua en las figuras de lado derecho, representa donde el ICF de los modelos es igual al ICF del ajuste.

## 4.5 Neón

En el caso del neón en regiones H II, en el rango visible sólo se observan líneas del ión  $\text{Ne}^{++}$ , siendo la línea más intensa  $[\text{Ne III}] \lambda 3869$ . Por ello, el ICF que se calcula aquí está basado en la observación de este ion.

### 4.5.1 Factores de corrección por ionización previos

Peimbert & Costero (1969) proponen un ICF para el cálculo de la abundancia de neón en regiones H II basado en la similitud de los potenciales de ionización de  $\text{Ne}^{++}$  (P.I. ( $\text{Ne}^{++}$ ) = 63.45 eV) y  $\text{O}^{++}$  (P.I. ( $\text{O}^{++}$ ) = 54.93 eV), el cual es utilizado con frecuencia en la literatura para determinar la abundancia de neón:

$$\frac{\text{Ne}}{\text{O}} = \frac{\text{Ne}^{++}}{\text{O}^{++}} \quad (4.15)$$

En la Figura 4.12a se muestra esta expresión con una línea continua mientras que en la Figura 4.12b se muestran las incertidumbres asociadas a esta expresión: con líneas punteadas las incertidumbres máximas y con líneas discontinuas las incertidumbres asociadas al ICF de la mayoría de los modelos. En esta segunda figura se ve que la incertidumbre de este ICF crece a grados de ionización menores, siendo mayor en modelos con  $\text{O}^{++}/(\text{O}^{+} + \text{O}^{++}) < 0.5$ . La incertidumbre alcanza valores de hasta  $^{+0.7}_{-0.9}$  dex, aunque se puede ver que la mayoría de los modelos presenta una incertidumbre de  $\pm 0.3$  dex.

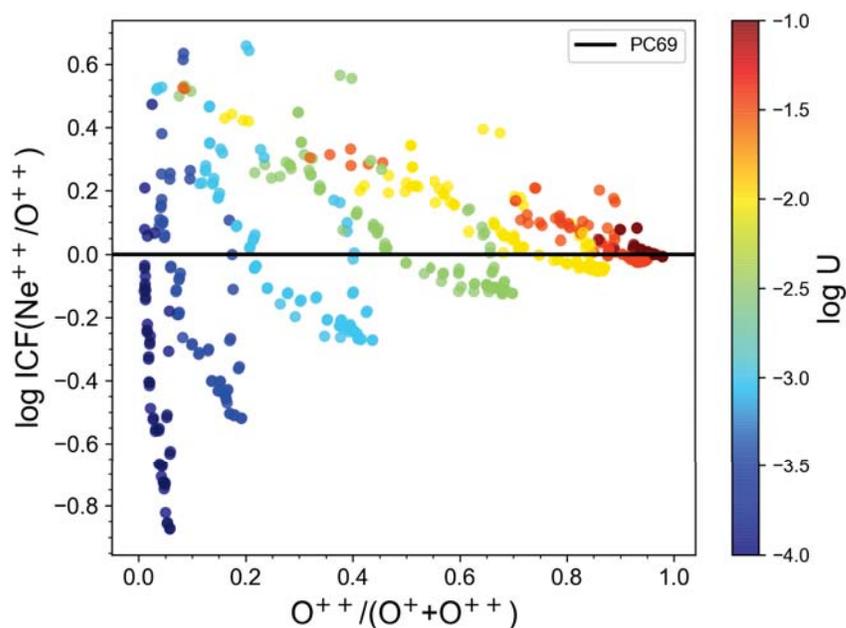
Stasińska (1978) utilizó sus modelos de fotoionización para calcular un ICF para el neón, válido cuando  $\text{O}^{++}/\text{O} > 0.2$ :

$$\text{ICF}_{S78}(\text{Ne}^{++}/\text{O}^{++}) = \left[ 1.2 \left( \frac{\text{O}^{++}}{\text{O}} \right) - 0.2 \right]^{-1} \quad (4.16)$$

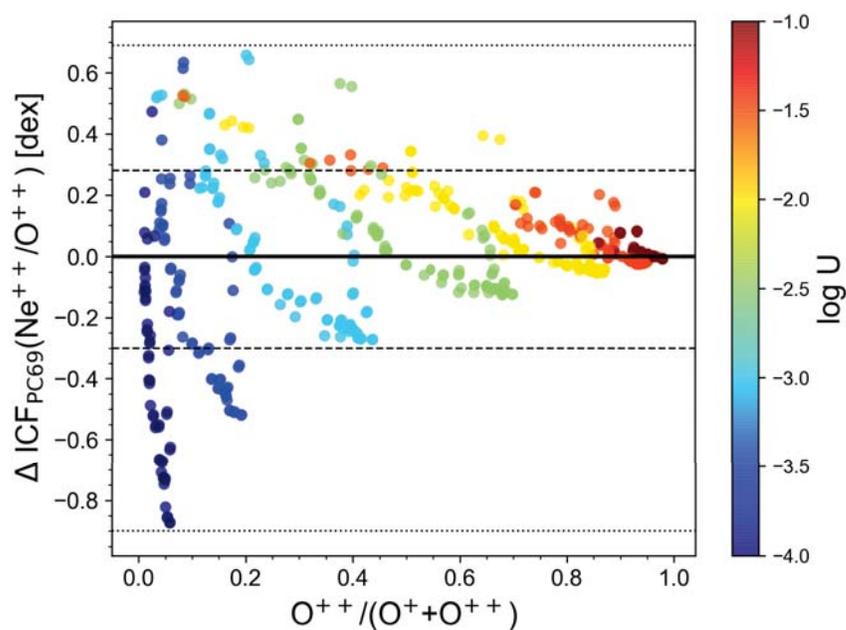
En la Figura 4.13a se puede ver que, aunque esta expresión (mostrada con una línea continua) sigue la tendencia de los modelos, no los ajusta y la mayoría quedan por arriba de ella. Esto implica que esta expresión subestima el valor real del ICF. La incertidumbre asociada a esta expresión se muestra en la Figura 4.13b para modelos con  $\text{O}^{++}/\text{O} > 0.2$ , donde se puede ver que la incertidumbre puede ser de hasta  $^{+0.4}_{-0.8}$  dex aunque para la mayoría de los modelos tiene una incertidumbre asociada al ICF es de  $\pm 0.2$  dex.

Basados en modelos de fotoionización, Izotov et al. (2006) proponen tres ICFs para el neón en función de la abundancia de oxígeno de la región H II:

$$\begin{aligned} \text{ICF}_{I206}(\text{Ne}^{++}) &= -0.385\omega + 1.365 + 0.022/\omega, \text{ si } 12 + \log(\text{O}/\text{H}) \leq 7.2 \\ &= -0.405\omega + 1.382 + 0.021/\omega, \text{ si } 7.2 < 12 + \log(\text{O}/\text{H}) < 8.2 \\ &= -0.591\omega + 0.927 + 0.546/\omega, \text{ si } 12 + \log(\text{O}/\text{H}) \geq 8.2, \end{aligned} \quad (4.17)$$

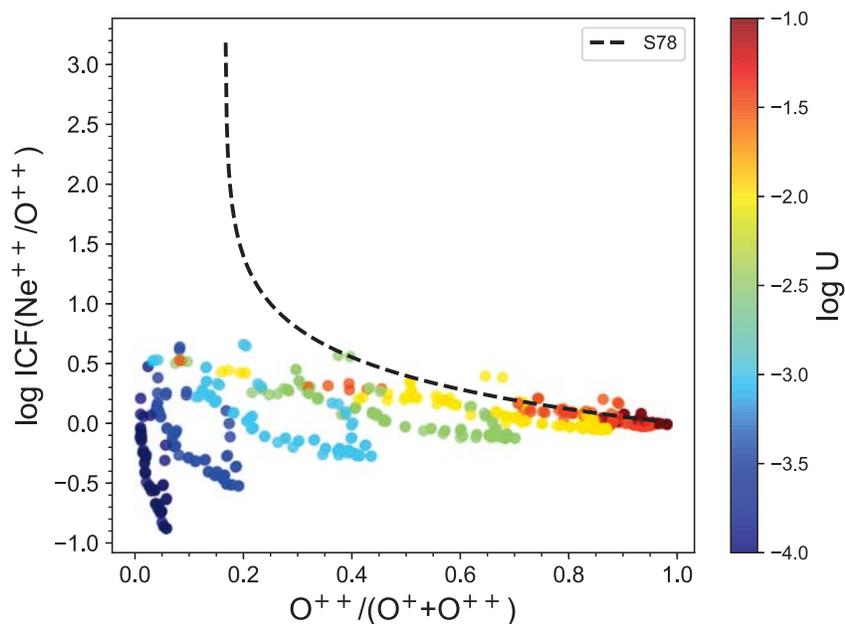


(a)

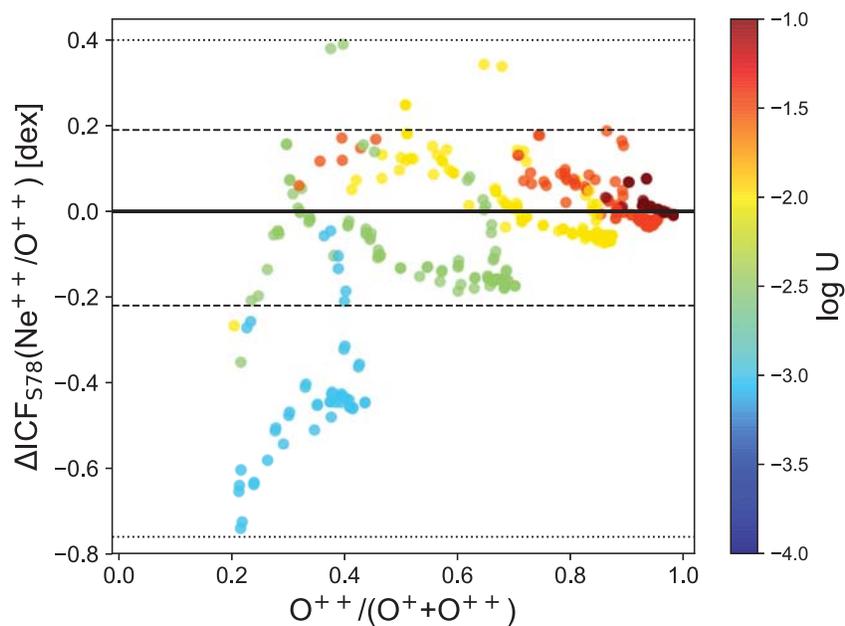


(b)

FIGURA 4.12: **a)** Valores del  $\text{ICF}_m(\text{Ne}^{++}/\text{O}^{++})$  de nuestro conjunto de modelos en función de  $\text{O}^{++}/(\text{O}^{++}+\text{O}^{++})$ . La línea continua representa el  $\text{ICF}_{\text{PC69}}(\text{Ne}^{++}/\text{O}^{++})$ . En la barra de color se muestran los valores del parámetro de ionización de los modelos de fotoionización. **b)** Incertidumbres asociadas al  $\text{ICF}_{\text{PC69}}(\text{Ne}^{++}/\text{O}^{++})$  en función de  $\text{O}^{++}/(\text{O}^{++}+\text{O}^{++})$  para los modelos de fotoionización. La línea de puntos representa la incertidumbre máxima asociada al ICF, mientras que las líneas discontinuas representan las incertidumbres asociadas al ICF en la mayoría de los modelo. La línea continua representa donde el  $\text{ICF}_m(\text{Ne}^{++}/\text{O}^{++})$  de los modelos es igual al ICF del ajuste.



(a)



(b)

FIGURA 4.13: **a)** Valores del  $\text{ICF}_m(\text{Ne}^{++}/\text{O}^{++})$  de nuestro conjunto de modelos en función de  $\text{O}^{++}/\text{O}$ . La línea continua representa el  $\log \text{ICF}_{\text{S78}}(\text{Ne}^{++}/\text{O}^{++})$ . En la barra de color se muestran los valores del parámetro de ionización de los modelos de fotoionización. **b)** Incertidumbre asociada al  $\text{ICF}_{\text{S78}}(\text{Ne}^{++}/\text{O}^{++})$  en función de  $\text{O}^{++}/\text{O}$  para los modelos de fotoionización con  $\text{O}^{++}/\text{O} > 0.2$ . Las líneas de puntos representan las incertidumbres máximas asociadas al  $\text{ICF}_{\text{S78}}(\text{Ne}^{++}/\text{O}^{++})$ , mientras que las líneas discontinuas representan las incertidumbres asociadas al  $\text{ICF}$  de la mayoría de los modelos. La línea continua representa donde el  $\text{ICF}_m(\text{Ne}^{++}/\text{O}^{++})$  de los modelos es igual al  $\text{ICF}_{\text{S78}}(\text{Ne}^{++}/\text{O}^{++})$ .

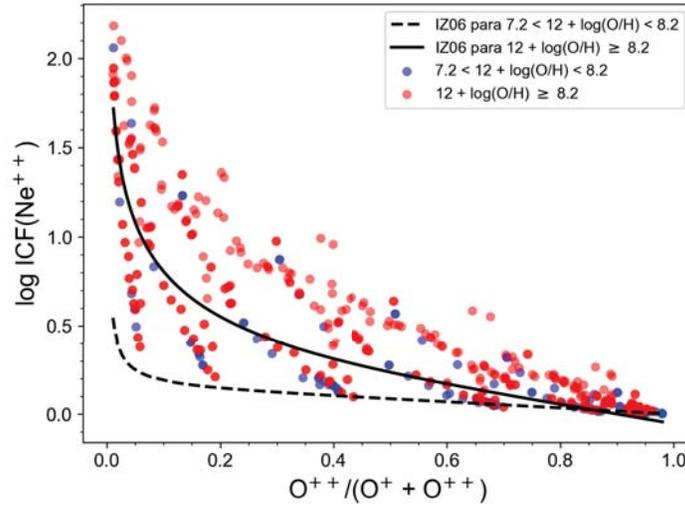
donde  $\omega = \text{O}^{++}/(\text{O}^{+}+\text{O}^{++})$ . Dado que nuestro conjunto de modelos de fotoionización tiene valores de  $12 + \log (\text{O}/\text{H})$  en el intervalo  $7.2 < 12 + \log (\text{O}/\text{H}) < 8.2$ , en nuestro caso sólo exploramos las dos últimas expresiones. En la Figura 4.14a se muestran estas dos expresiones con nuestro conjunto de modelos (aquellos con  $7.2 < 12 + \log (\text{O}/\text{H}) < 8.2$  en azul y aquellos con  $12 + \log (\text{O}/\text{H}) \geq 8.2$  en rojo). La expresión propuesta por Izotov et al. (2006) para modelos con  $7.2 < 12 + \log (\text{O}/\text{H}) < 8.2$  se muestra con una línea discontinua, mientras que la expresión para modelos con  $12 + \log (\text{O}/\text{H}) \geq 8.2$  se muestra con una línea continua. En la Figura 4.14b se ve que para los modelos con  $7.2 < 12 + \log (\text{O}/\text{H}) < 8.2$  este ICF subestima sistemáticamente la abundancia de neón (hasta en 1.6 dex) y para aquellos con  $12 + \log (\text{O}/\text{H}) \geq 8.2$  la incertidumbre asociada al ICF llega a ser de  ${}^{+0.9}_{-0.6}$  dex. Sin embargo la mayoría de los modelos de cada intervalo de abundancia de oxígeno muestra una incertidumbre asociada de  ${}^{+0.40}_{-0.04}$  dex para el primer grupo y de  ${}^{+0.2}_{-0.5}$  dex para el segundo.

También basados en modelos de fotoionización, Pérez-Montero et al. (2007) proponen para el neón el siguiente ICF:

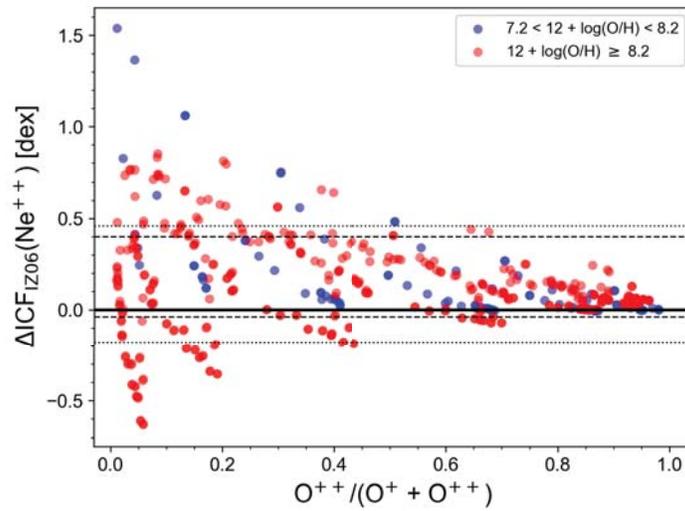
$$\text{ICF}_{\text{PM07}}(\text{Ne}^{++}) = 0.753 + 0.142\omega + \frac{0.171}{\omega}. \quad (4.18)$$

donde  $\omega = \text{O}^{++}/(\text{O}^{+}+\text{O}^{++})$ . Esta expresión se muestra en la Figura 4.15a con la línea continua. En este caso la mayoría de los modelos se encuentra por arriba de esta expresión, por lo que en la mayoría se subestima el valor real del ICF, excepto en unos pocos modelos con  $\log U \sim -4.0$  y con  $\log U \sim -1.0$ . En la Figura 4.15b se ve que esta expresión puede subestimar el ICF hasta en 1.3 dex aunque para pocos modelos con  $\log U \sim -4.0$  puede sobrestimar el ICF hasta 0.2 dex. La incertidumbre asociada a este ICF en la mayoría de los modelos es de  ${}^{+0.30}_{-0.05}$  dex.

De los ICFs previamente propuestos para calcular la abundancia de neón, la relación que se usa más frecuentemente es  $\text{Ne}/\text{O} = \text{Ne}^{++}/\text{O}^{++}$  de Peimbert & Costero (1969). Con nuestro conjunto de modelos encontramos que esta expresión conlleva a valores inciertos de  $\log (\text{Ne}/\text{O})$  (sobre todo para objetos con  $\text{O}^{++}/(\text{O}^{+}+\text{O}^{++}) < 0.5$ ), pero a pesar de esto su incertidumbre asociada es simétrica y su expresión analítica es la más sencilla de los ICFs previos explorados.

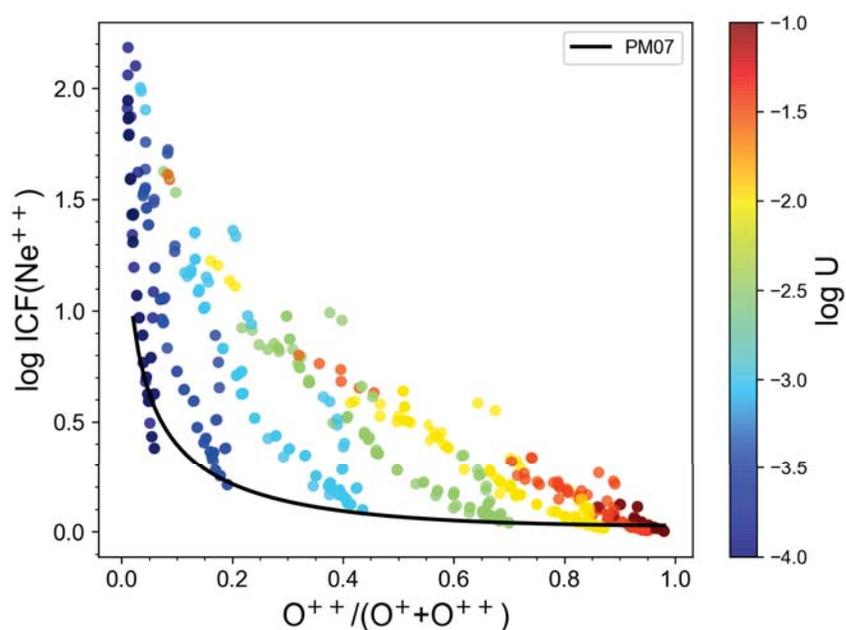


(a)

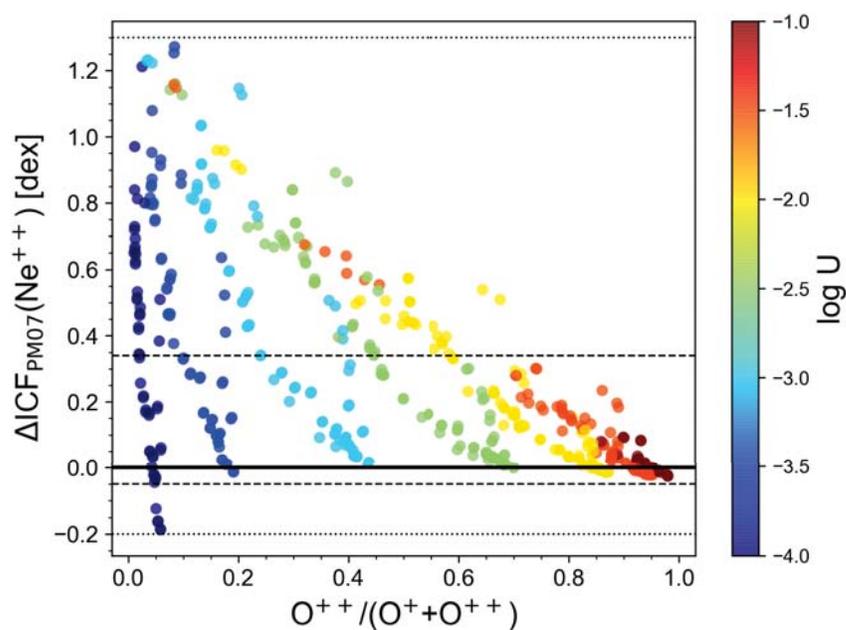


(b)

FIGURA 4.14: **a)** Valores del  $ICF_m(Ne^{++})$  de nuestro conjunto de modelos en función de  $O^{++}/(O^+ + O^{++})$ . Los modelos con  $7.2 < 12 + \log(O/H) < 8.2$  se muestran en azul y en rojo se muestran aquellos con  $12 + \log(O/H) \geq 8.2$ . La línea discontinua representa el  $ICF_{IZ06}(Ne^{++})$  para modelos con  $7.2 < 12 + \log(O/H) < 8.2$  y la línea continua para modelos con  $12 + \log(O/H) \geq 8.2$ . **b)** Incertidumbre asociada al  $ICF_{IZ06}(Ne^{++})$  en función de  $O^{++}/(O^+ + O^{++})$  para los modelos de fotoionización. Las líneas de puntos representan las incertidumbres asociadas al ICF de la mayoría de los modelos asociadas al  $ICF_{IZ06}(Ne^{++})$  para  $12 + \log(O/H) \geq 8.2$ , mientras que las líneas discontinuas representan las mismas incertidumbres asociadas a la expresión para  $7.2 < 12 + \log(O/H) < 8.2$ . La línea continua representa donde el  $ICF_m(Ne^{++})$  de los modelos es igual al ICF del ajuste.



(a)



(b)

FIGURA 4.15: **a)** Valores del  $\text{ICF}_m(\text{Ne}^{++})$  de nuestro conjunto de modelos en función de  $\text{O}^{++}/(\text{O}^{++}+\text{O}^{+})$ . La línea continua representa el  $\text{ICF}_{\text{PM07}}(\text{Ne}^{++})$ . En la barra de color se muestran los valores del parámetro de ionización de los modelos de fotoionización. **b)** Incertidumbre asociada al  $\text{ICF}_{\text{PM07}}(\text{Ne}^{++})$  en función de  $\text{O}^{++}/(\text{O}^{++}+\text{O}^{+})$  para los modelos de fotoionización. Las líneas punteadas representan las incertidumbres máximas asociadas al  $\text{ICF}_{\text{PM07}}(\text{Ne}^{++})$  y las líneas discontinuas representan las incertidumbres asociadas a la mayoría de los modelos. La línea continua representa donde el  $\text{ICF}_m(\text{Ne}^{++})$  de los modelos es igual al ICF del ajuste.

### 4.5.2 Cálculo del $ICF(Ne^{++})$

Al analizar la fracción iónica de los seis primeros iones de neón en la Figura 4.16, se observa que los iones dominantes son  $Ne^+$  y  $Ne^{++}$ : el  $Ne^+$  en los modelos de menor grado de ionización (representando más del 60% del neón total para  $O^{++}/(O^++O^{++}) < 0.6$ ) y el  $Ne^{++}$  en los de mayor grado de ionización (más del 60% del neón total cuando  $O^{++}/(O^++O^{++}) > 0.4$ ). Mientras que los iones  $Ne^{+3}$ ,  $Ne^{+4}$ ,  $Ne^{+5}$  y  $Ne^{+6}$  contribuyen en menos de un 1% para todos los grados de ionización. Por lo tanto, como en las regiones H II generalmente sólo se observan líneas del ion  $Ne^{++}$ , el ICF será significativo para objetos de bajo grado de ionización (con  $O^{++}/(O^++O^{++}) < 0.4$ ) pero será muy pequeño o nulo en objetos de alto grado de ionización ( $O^{++}/(O^++O^{++}) > 0.4$ ).

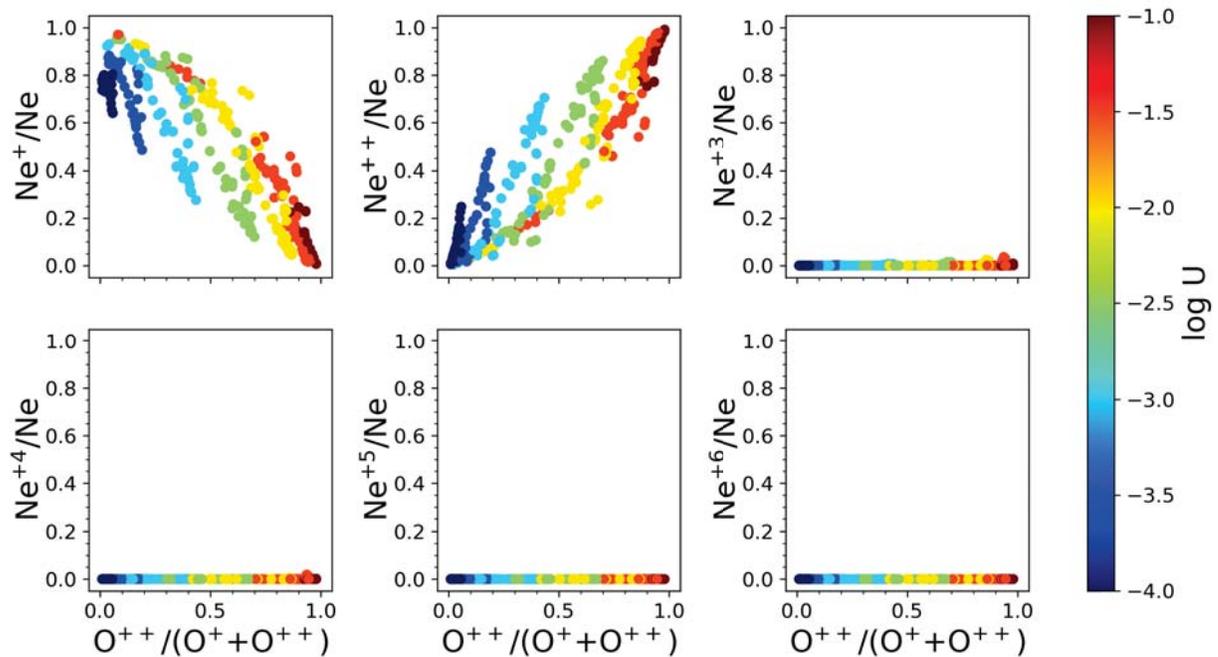


FIGURA 4.16: Fracción iónica de  $Ne^+$ ,  $Ne^{++}$ ,  $Ne^{+3}$ ,  $Ne^{+4}$ ,  $Ne^{+5}$  y  $Ne^{+6}$  en función del cociente  $O^{++}/(O^++O^{++})$  para los modelos de fotoionización. En la barra de color se indica el valor del parámetro de ionización de los modelos.

En la Figura 4.17 se muestran todas las opciones exploradas para calcular el ICF del neón. Se puede ver que en todas las opciones los modelos presentan una dispersión considerable, por lo que el ICF para neón que se calcule aquí probablemente tendrá una gran incertidumbre asociada y por lo tanto, probablemente deba limitarse su uso a un intervalo de validez. De las opciones exploradas se seleccionaron los paneles **c**, **d** y **k** para calcular un ajuste, ya que aunque los paneles **c** y **d** son similares a otros paneles, no se espera que la expresión

analítica del ajuste sea más sencilla o tenga una incertidumbre muy diferente. En cuanto al panel **k**, los modelos muestran una tendencia un poco más clara, y se espera que pueda obtenerse un ajuste con una expresión analítica sencilla, dada la tendencia casi lineal de los modelos en este panel.

Las expresiones analíticas de los ajustes calculados para los paneles **c**, **d** y **k** son respectivamente:

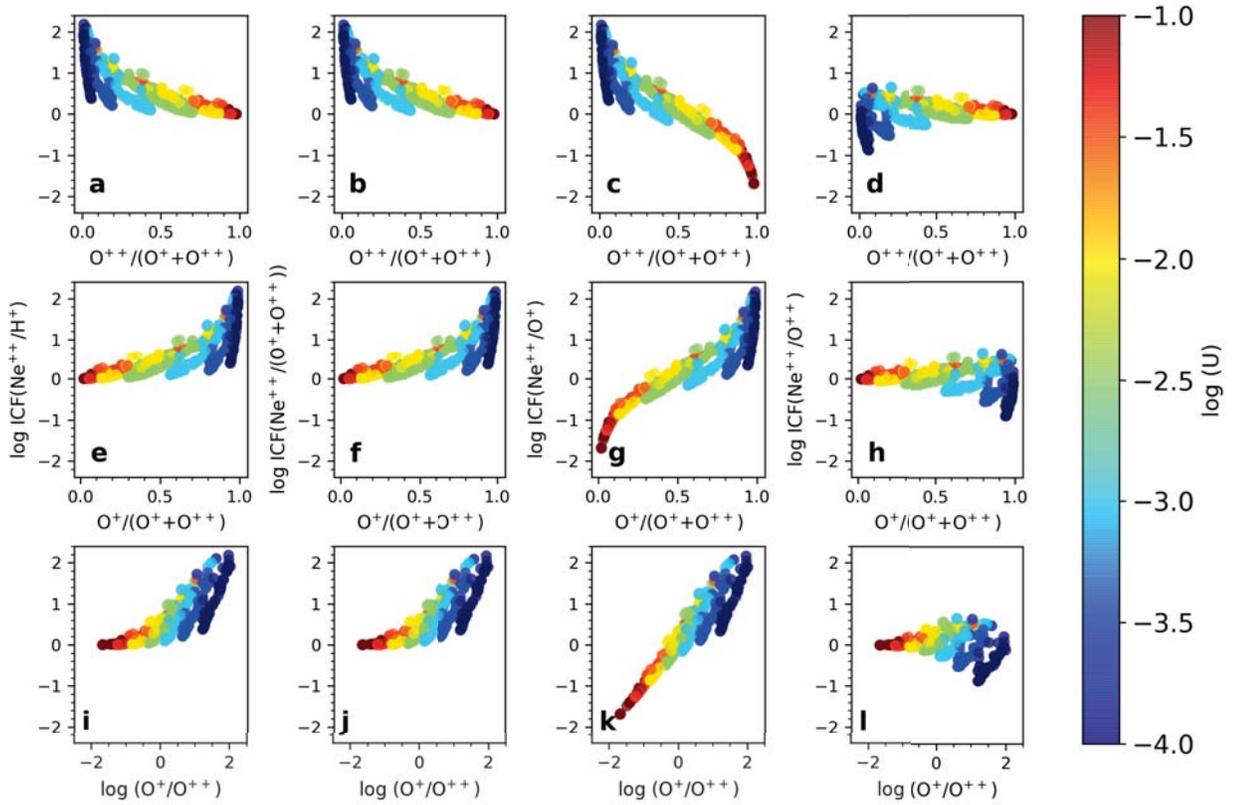


FIGURA 4.17: Opciones exploradas para el  $\text{ICF}_m(\text{Ne}^{++})$  en función de los cocientes  $\text{O}^{++}/(\text{O}^++ + \text{O}^+)$ ,  $\text{O}^+ / (\text{O}^++ + \text{O}^+)$  y  $\log(\text{O}^+ / \text{O}^{++})$ . En la barra de color se indica el valor del parámetro de ionización de los modelos.

$$\log \text{ICF}_f(\text{Ne}^{++} / \text{O}^+) = 0.7 \ln(-1.4 \ln(0.9\omega - 0.01)), \quad (4.19)$$

$$\log \text{ICF}_f(\text{Ne}^{++} / \text{O}^{++}) = 0.015, \quad (4.20)$$

$$\log\text{ICF}_f(\text{Ne}^{++}/\text{O}^+) = -0.7(-0.4(\eta + 1.4)^2) - \log(-0.4\eta + 1.4) + 1.7, \quad (4.21)$$

En los paneles de lado izquierdo de la Figura 4.18 se muestran estos ajustes con una línea continua, y en los paneles de lado derecho se muestran las incertidumbres asociadas, con líneas punteadas para los valores máximos de  $\Delta\text{ICF}_f(\text{Ne}^{++})$  y con líneas discontinuas las asociadas al ICF de la mayoría de los modelos. Las incertidumbres máximas que se obtuvieron para los ajustes de los paneles **c**, **d** y **k** (de las ecuaciones 4.19, 4.20 y 4.21 respectivamente) son de  $\pm 0.8$  dex,  $^{+0.7}_{-0.9}$  dex y  $^{+0.7}_{-0.8}$  dex, respectivamente, mientras que la mayoría de los modelos tienen una incertidumbre de  $^{+0.3}_{-0.2}$  dex asociada a la expresión de la ecuación 4.19 y de  $\pm 0.2$  dex para las expresiones de las ecuaciones 4.20 y 4.21.

En los tres ajustes calculados se obtuvieron incertidumbres asociadas muy similares, pero el del panel **d** tiene la expresión más sencilla (ecuación 4.20). Ésta es muy similar a la del  $\text{ICF}_{\text{PC69}}(\text{Ne}^{++}) = 1.0$ , siendo la diferencia entre las dos expresiones de sólo 0.015 dex. Podemos ver que la incertidumbre asociada al  $\text{ICF} = 1.035$  de la mayoría de los modelos es 0.1 dex menor que al utilizar el  $\text{ICF} = 1$  tradicional, siendo estas dos expresiones casi equivalentes.

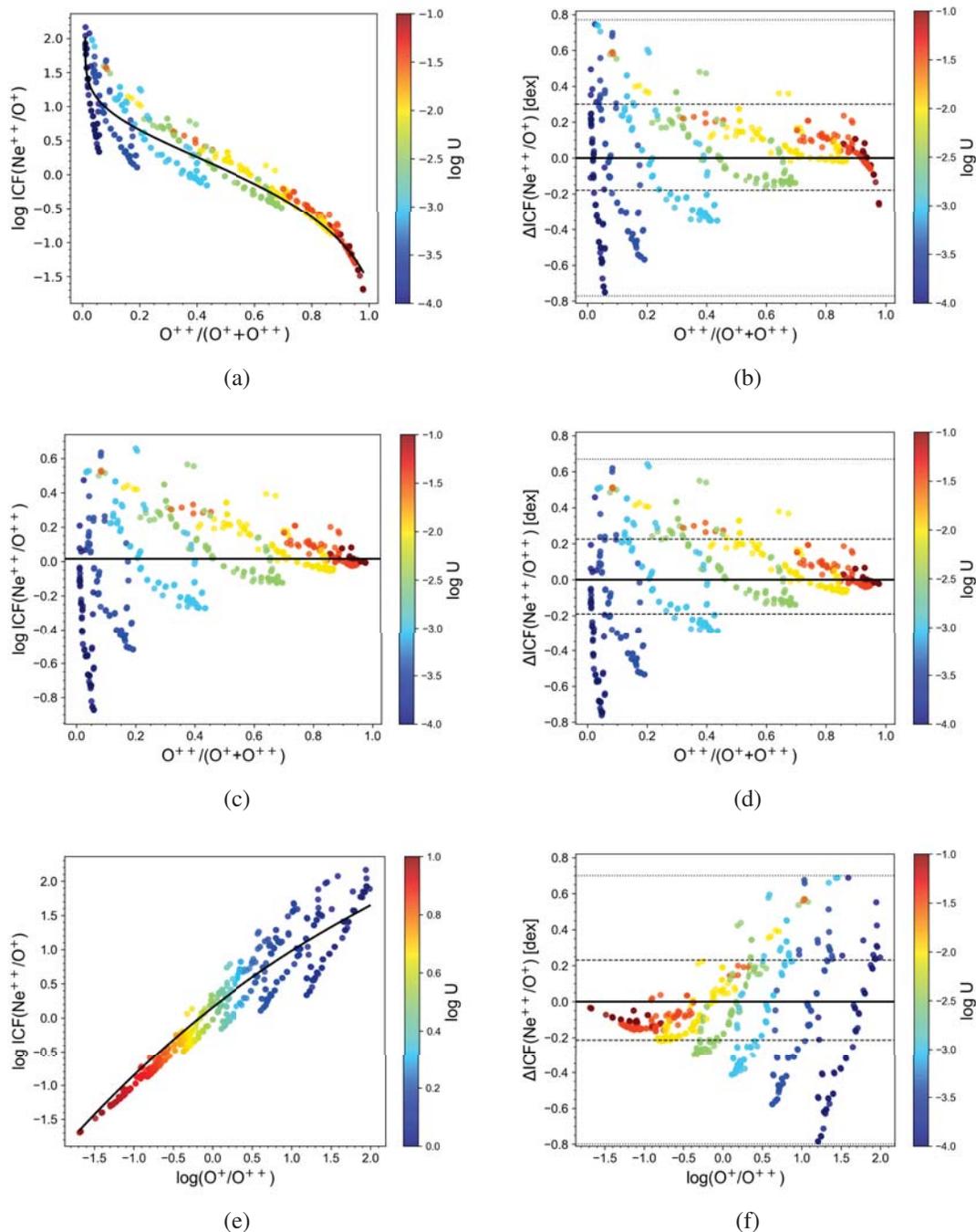


FIGURA 4.18: Valores del  $\log \text{ICF}(\text{Ne}^{++}/\text{O}^+)$  y  $\log \text{ICF}(\text{Ne}^{++}/\text{O}^{++})$  en función de  $\text{O}^{++}/(\text{O}^+ + \text{O}^{++})$  y  $\log(\text{O}^+/\text{O}^{++})$ . Los ajustes se muestran en las figuras de lado izquierdo con líneas continuas y las incertidumbres asociadas a cada ajuste,  $\Delta \text{ICF}(\text{Ne}^{++})$ , se muestran en los paneles de lado derecho. Las incertidumbres máximas se muestran con líneas punteadas y las incertidumbres asociadas al ICF de la mayoría de los modelos con líneas discontinuas. La línea continua en las figuras de lado derecho, representa donde el ICF de los modelos es igual al ICF del ajuste.

## 4.6 Azufre

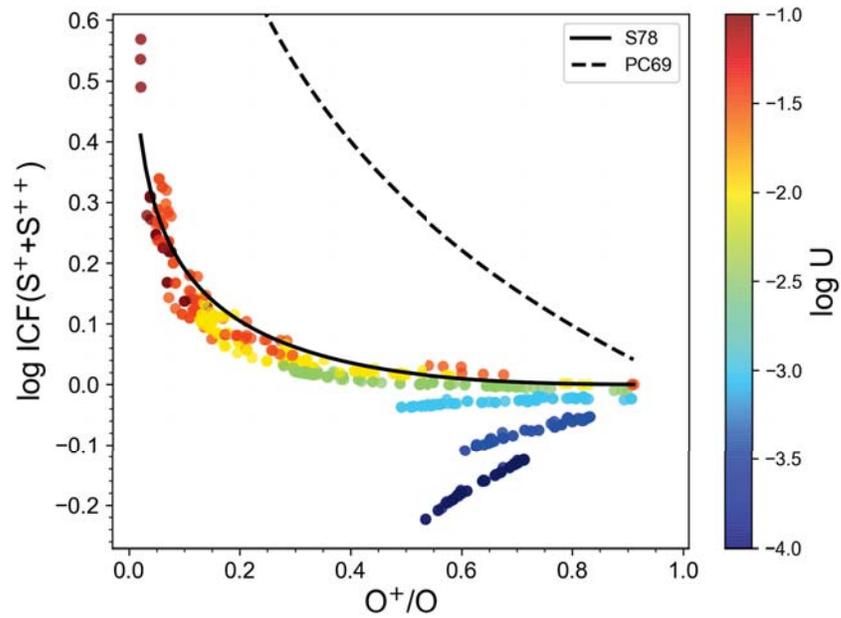
Algunas de las líneas de emisión de azufre que se observan en el visible en regiones H II extragalácticas son: [S II] $\lambda$ 6716, [S II] $\lambda$ 6731, [S III] $\lambda$ 6312, [S III] $\lambda$ 9069 y [S III] $\lambda$ 9532. En algunas ocasiones se observan únicamente líneas del ion S<sup>+</sup> y en otras se observan también líneas de S<sup>++</sup>, por ello, en este trabajo proponemos el cálculo de un ICF para S<sup>+</sup> y otro para cuando se observan S<sup>+</sup> y S<sup>++</sup>.

### 4.6.1 Factores de corrección por ionización previos

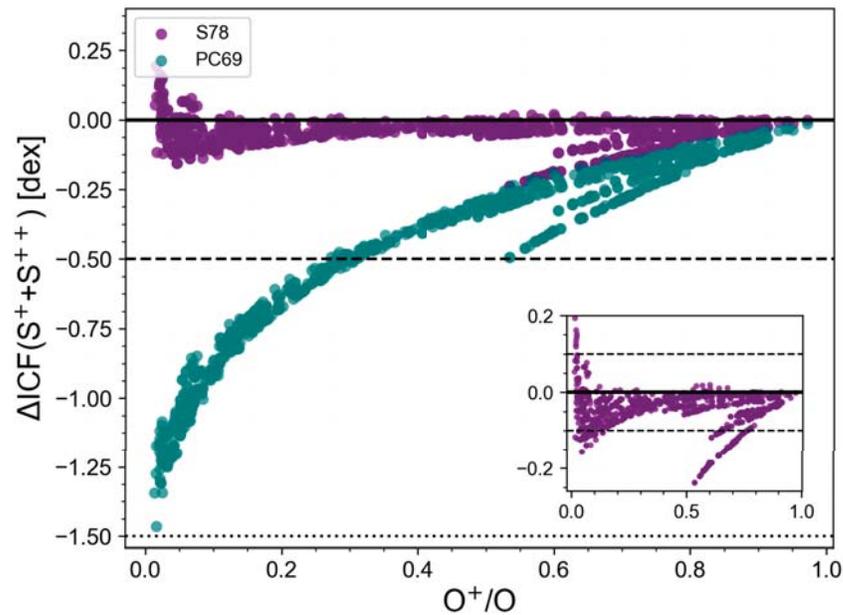
Existen cuatro ICFs principales en la literatura para calcular la abundancia de azufre en regiones H II. Uno de ellos fue propuesto por Peimbert & Costero (1969) y está basado en la similitud de los potenciales de ionización de S<sup>++</sup> (P.I.(S<sup>++</sup>) = 34.83 eV) y de O<sup>+</sup> (P.I.(O<sup>+</sup>) = 35.12 eV):

$$\frac{S}{O} = \frac{S^+ + S^{++}}{O^+} \quad (4.22)$$

En la Figura 4.19a, se puede observar que nuestro conjunto de modelos no sigue esta relación (indicada con la línea punteada), sino que todos los modelos se encuentran en la región por debajo de esta línea, lejos del ajuste. Al utilizar este ICF<sub>PC69</sub>(S<sup>+</sup>+S<sup>++</sup>) se sobrestima sistemáticamente la corrección aportada por el ICF y por lo tanto, la abundancia total del azufre. Esto se puede comprobar en la Figura 4.19b, donde los puntos color verde azulado muestran el valor de  $\Delta$ ICF<sub>PC69</sub>(S<sup>+</sup>+S<sup>++</sup>) que llegan a ser de hasta 1.25 dex aunque la incertidumbre para la mayoría de los modelos es de 0.5 dex. En esta figura se puede ver que la subestimación en la abundancia de azufre si se utiliza el ICF<sub>PC69</sub>(S<sup>+</sup>+S<sup>++</sup>) es mucho mayor que la incertidumbre que introduce el ICF<sub>S78</sub>(S<sup>+</sup>+S<sup>++</sup>) propuesto por Stasińska (1978) explicado a continuación.



(a)



(b)

FIGURA 4.19: **a)** Valores del  $\log \text{ICF}_m(\text{S}^+ + \text{S}^{++})$  de nuestro conjunto de modelos en función de  $\text{O}^+/\text{O}$ . La línea discontinua representa el  $\log \text{ICF}_{\text{PC69}}(\text{S}^+ + \text{S}^{++})$  mientras que la línea continua representa el  $\log \text{ICF}_{\text{S78}}(\text{S}^+ + \text{S}^{++})$ . En la barra de color se muestran los valores del parámetro de ionización. **b)** Incertidumbres asociadas al  $\text{ICF}_{\text{PC69}}(\text{S}^+ + \text{S}^{++})$  (mostradas con los modelos de fotoionización en verde) y al  $\text{ICF}_{\text{S78}}(\text{S}^+ + \text{S}^{++})$  (mostradas con los modelos de fotoionización en morado) en función de  $\text{O}^+/\text{O}$ . En el panel inferior derecho se muestra un acercamiento al  $\Delta(\text{S}^+ + \text{S}^{++})$  asociados al  $\text{ICF}_{\text{S78}}(\text{S}^+ + \text{S}^{++})$ . En este panel, las líneas discontinuas representan las incertidumbres de la mayoría de los modelos. Las líneas continuas muestran donde se cumple que el ICF de los modelos es igual al ICF del ajuste.

Basándose en modelos de fotoionización de regiones H II, Stasińska (1978) propone tres ICFs para el azufre. Dos para el caso en el que sólo se observen líneas de  $S^+$  que dependen del cociente  $I[O III] \lambda\lambda(4959 + 5007) / I[O II] \lambda\lambda(3726 + 3729)$  (llamado aquí O3O2):

$$\frac{S}{O} = \frac{S^+}{O^+} \rightarrow \text{ICF}_{S78}(S^+/O^+) = 1 \text{ si } O3O2 \geq 10, \quad (4.23)$$

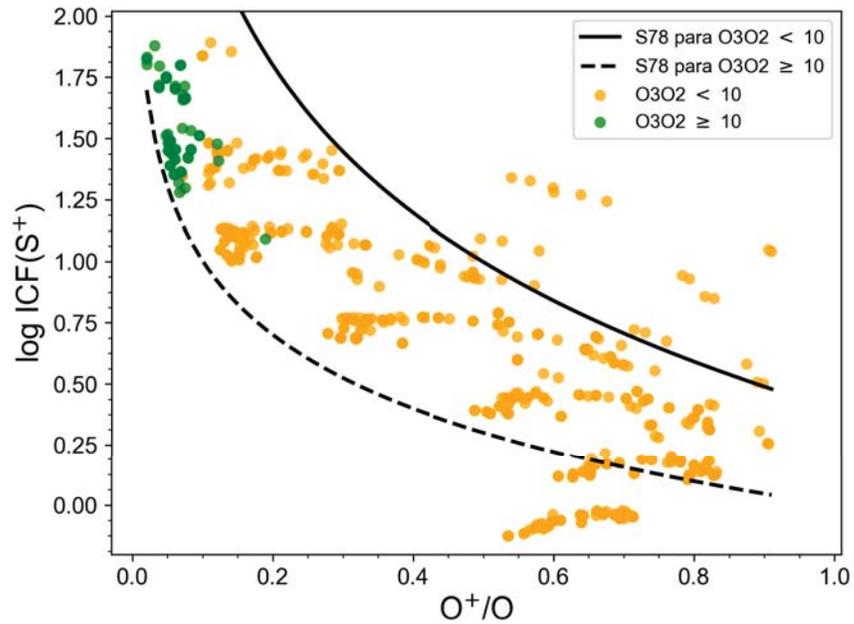
$$\frac{S}{O} = \frac{S^+}{O^+} \times 2.5 \left( \frac{O}{O^+} \right) \rightarrow \text{ICF}_{S78}(S^+/O^+) = 2.5 \left( \frac{O}{O^+} \right) \text{ para los demás casos.}$$

Y un tercer ICF para cuando además se observan líneas de  $S^{++}$ :

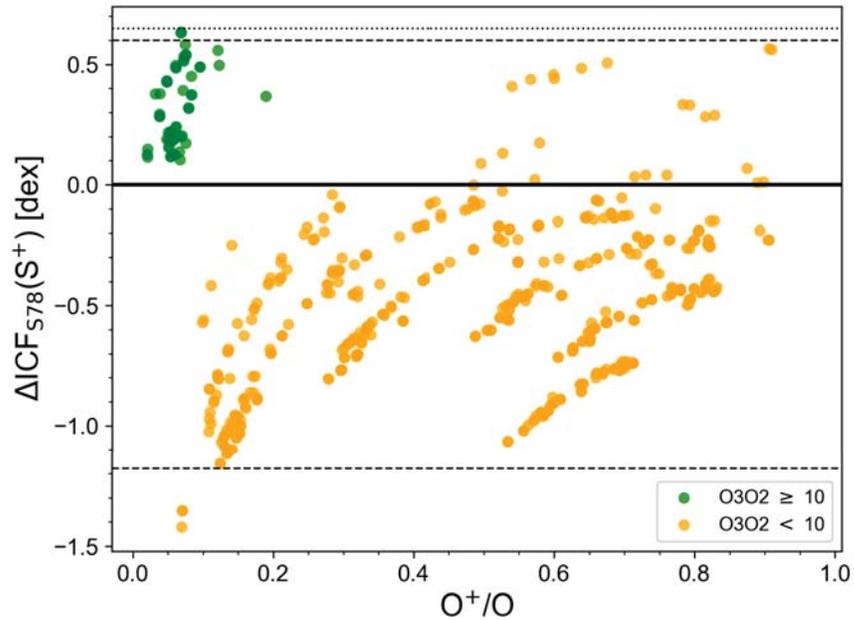
$$\frac{S}{H} = \left( \frac{S^+ + S^{++}}{H^+} \right) \times \left[ 1 - \left( 1 - \frac{O^+}{O} \right)^3 \right]^{-1/3} \quad (4.24)$$

$$\rightarrow \text{ICF}_{S78}(S^+ + S^{++}) = \left[ 1 - \left( 1 - \frac{O^+}{O} \right)^3 \right]^{-1/3}$$

En la Figura 4.20a se muestra el  $\text{ICF}_m(S^+)$  de los modelos en función de  $O^+/O$ , con los modelos con  $O3O2 < 10$  en amarillo y aquellos con  $O3O2 \geq 10$  en verde. En esta figura, el  $\text{ICF}_{S78}(S^+)$  para  $O3O2 \geq 10$  se muestra con la línea discontinua, y con una línea continua el  $\text{ICF}_{S78}(S^+)$  para  $O3O2 < 10$ . Se puede notar que las expresiones del  $\text{ICF}_{S78}(S^+)$  siguen la tendencia de los modelos pero no ajustan bien a la mayoría. Por un lado, la expresión para  $O3O2 < 10$  sobrestima el ICF, ya que la gran mayoría de modelos en amarillo quedan por debajo de la línea continua y por otro lado, la expresión para  $O3O2 \geq 10$  lo subestima, debido a que todos los modelos en verde quedan por arriba de la línea discontinua. En la Figura 4.20b se puede ver que la expresión para  $O3O2 < 10$  sobrestima el ICF hasta en 1.45 dex (aunque para unos pocos modelos en este grupo se subestima hasta en 0.60 dex), mientras que la expresión para  $O3O2 \geq 10$  lo subestima hasta 0.70 dex. La mayoría de los modelos tiene una incertidumbre asociada al ICF correspondiente en la abundancia de azufre de  ${}_{-1.2}^{+0.6}$  dex en modelos con  $O3O2 < 10$  y de 0.7 dex en aquellos con  $O3O2 \geq 10$ .



(a)



(b)

FIGURA 4.20: **a)** Valores del  $\text{ICF}_m(\text{S}^+)$  de nuestro conjunto de modelos en función de  $\text{O}^+/\text{O}$ . Los modelos con  $\text{O3O2} < 10$  se muestran en amarillo y aquellos con  $\text{O3O2} \geq 10$  en verde. La línea continua representa el  $\log \text{ICF}_{\text{S78}}(\text{S}^+)$ . En la barra de color se muestran los valores del parámetro de ionización. **b)** Incertidumbres asociadas al  $\text{ICF}_{\text{S78}}(\text{S}^+)$  en función de  $\text{O}^+/\text{O}$  para los modelos de fotoionización. Las líneas punteadas representan las incertidumbres máximas asociadas al  $\text{ICF}_{\text{S78}}(\text{S}^+)$  y las líneas discontinuas representa la incertidumbre asociadas al ICF de la mayoría de los modelos. La línea continua muestra donde el  $\text{ICF}_m(\text{S}^+)$  de los modelos es igual al ICF del ajuste.

Por otra parte, la expresión del  $\text{ICF}_{\text{S78}}(\text{S}^+ + \text{S}^{++})$  se muestra en la Figura 4.19a (con una línea continua) en función de  $\text{O}^+/\text{O}$  con los modelos de fotoionización. Se puede observar que esta expresión ajusta a muchos de los modelos pero en general se encuentran por debajo de ella. Específicamente, los modelos que más se alejan de esta relación son aquellos con  $\log U \leq -3.5$ , por lo que en regiones H II con bajo grado de ionización este ICF sobreestimaré de forma significativa el ICF real.

La incertidumbre asociada a esta expresión se muestra en la Figura 4.19b con  $\Delta\text{ICF}_{\text{S78}}(\text{S}^+ + \text{S}^{++})$  de los modelos en color morado. Esta incertidumbre alcanza valores de hasta  ${}_{+0.2}^{-0.3}$  dex (específicamente para los modelos con  $\log U \leq -3.5$  donde no funciona el ajuste) pero para la mayoría de los modelos la incertidumbre es de  $\pm 0.1$  dex.

En general, el ICF propuesto por Stasińska (1978) para calcular la abundancia S/H a partir de líneas de  $\text{S}^+$  y  $\text{S}^{++}$  no funciona correctamente para la mayoría de nuestros modelos, pero en la Figura 4.19a se puede ver que si se cambian ligeramente los coeficientes de expresión analítica es posible mejorar este ajuste, por lo que proponemos la siguiente expresión analítica basada en la ecuación 4.25:

$$\text{ICF}_{\text{S78bis}}(\text{S}^+ + \text{S}^{++}) = \left[ 1.1 - \left( 1 - \frac{\text{O}^+}{\text{O}} \right)^5 \right]^{-1/2}. \quad (4.25)$$

Esta expresión analítica se muestra en la Figura 4.21a con una línea continua donde se puede ver que el ajuste es mejor para la mayoría de los modelos. Como ya se mencionó, los modelos de menor grado de ionización (con  $\log U \leq -3.5$ ) no siguen la misma tendencia que el resto de los modelos por lo que para estos no es posible mejorar el ajuste. En estos modelos, la incertidumbre con este ajuste llega a ser de hasta  $\pm 0.2$  dex aunque para la mayoría de los modelos es de  ${}_{-0.03}^{+0.06}$  dex. Por tanto, con esta nueva expresión se logró mejorar el ajuste ya que se obtienen incertidumbres menores que las asociadas al  $\text{ICF}_{\text{S78}}(\text{S}^+ + \text{S}^{++})$ .

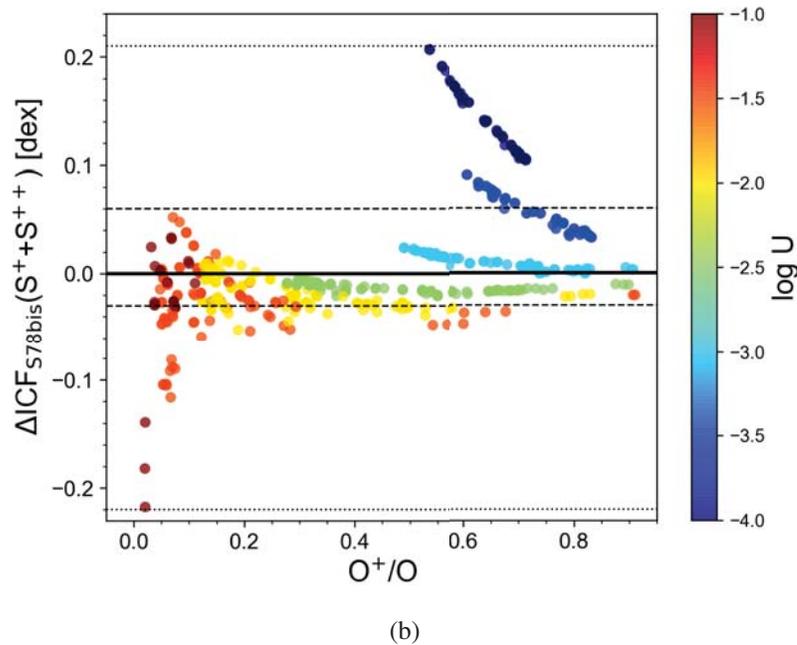
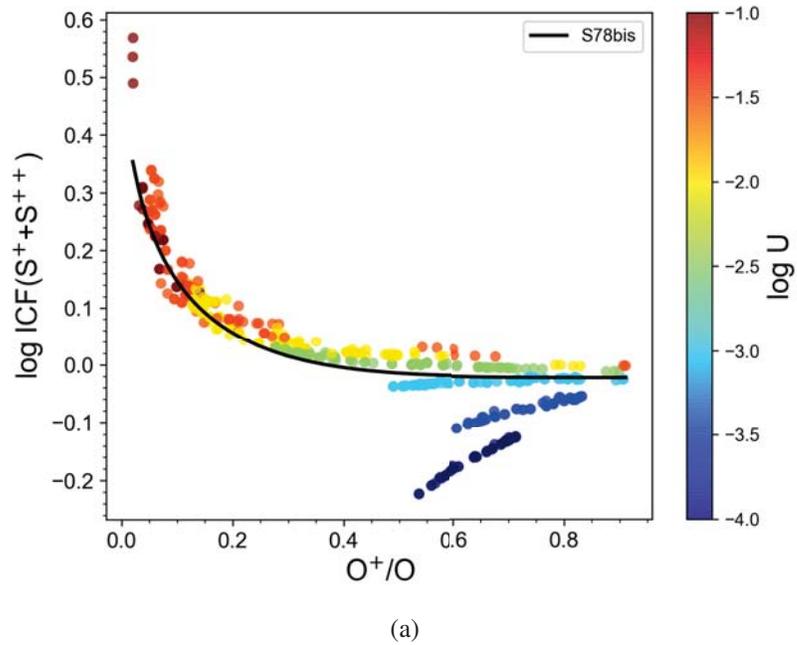


FIGURA 4.21: **a)** Valores del  $\text{ICF}_m(\text{S}^+ + \text{S}^{++})$  de nuestro conjunto de modelos en función de  $\text{O}^+/\text{O}$ . La línea continua representa el  $\log \text{ICF}_{\text{S78bis}}(\text{S}^+)$  propuesto en este trabajo. En la barra de color se muestran los valores del parámetro de ionización. **b)** Incertidumbre asociada al  $\text{ICF}_{\text{S78bis}}(\text{S}^+ + \text{S}^{++})$  en función de  $\text{O}^+/\text{O}$  para los modelos de fotoionización. Las líneas punteadas representan las incertidumbres máximas asociadas al  $\text{ICF}_{\text{S78bis}}(\text{S}^+ + \text{S}^{++})$  y las líneas discontinuas representan las incertidumbres asociadas al ICF de la mayoría de los modelos. La línea continua muestra donde se cumple que el  $\text{ICF}_m(\text{S}^+ + \text{S}^{++})$  de los modelos es igual al ICF del ajuste.

Izotov et al. (2006) proponen otros ICFs para calcular la abundancia total del azufre en regiones H II basados en modelos de fotoionización:

$$\begin{aligned}
 \text{ICF}_{\text{IZ06}}(\text{S}^+ + \text{S}^{++}) &= 0.121\nu + 0.511 + 0.161/\nu, \text{ cuando } 12 + \log(\text{O}/\text{H}) \leq 7.2 \\
 &= 0.155\nu + 0.849 + 0.062/\nu, \text{ cuando } 7.2 < 12 + \log(\text{O}/\text{H}) < 8.2 \\
 &= 0.178\nu + 0.610 + 0.153/\nu, \text{ cuando } 12 + \log(\text{O}/\text{H}) \geq 8.2,
 \end{aligned}
 \tag{4.26}$$

donde  $\nu = \text{O}^+ / (\text{O}^+ + \text{O}^{++})$ . Como se mencionó anteriormente, para nuestro conjunto de modelos sólo tiene sentido explorar las últimas dos expresiones, las cuales se muestran en la Figura 4.22a. El  $\text{ICF}_{\text{IZ06}}(\text{S}^+ + \text{S}^{++})$  para  $7.2 < 12 + \log(\text{O}/\text{H}) < 8.2$  (modelos mostrados en azul) se muestra con una línea continua y el  $\text{ICF}_{\text{IZ06}}(\text{S}^+ + \text{S}^{++})$  para  $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \geq 8.2$  (modelos mostrados en rojo), con la línea discontinua. Al explorar estas dos expresiones se encontró que la expresión propuesta para  $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \geq 8.2$  es un buen ajuste cuando  $\text{O}^+ / (\text{O}^+ + \text{O}^{++}) > 0.4$ , mientras que la expresión para  $7.2 < 12 + \log(\text{O}/\text{H}) < 8.2$  sólo ajusta a los modelos con  $\text{O}^+ / (\text{O}^+ + \text{O}^{++}) < 0.4$ . Se puede ver que un pequeño conjunto de modelos no sigue la tendencia general del resto y no son ajustados por ninguna de las dos expresiones. Estos modelos son aquellos con  $\log U \leq -3.5$  y son los mismos que no se pudieron ajustar con la expresión  $\text{ICF}_{\text{S78bis}}(\text{S}^+ + \text{S}^{++})$ . La incertidumbre asociada a las dos expresiones tomando en cuenta estos modelos es hasta de  $^{+0.01}_{-0.25}$  dex para modelos con  $7.2 < 12 + \log(\text{O}/\text{H}) < 8.2$  y de  $^{+0.05}_{-0.40}$  dex para aquellos con  $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \geq 8.2$ . En la Figura 4.22b sólo se muestran las incertidumbres asociadas al ICF de la mayoría de los modelos asociadas a las dos expresiones: con líneas discontinuas para la de  $7.2 < 12 + \log(\text{O}/\text{H}) < 8.2$  (de  $^{+0.01}_{-0.05}$  dex) y con líneas punteadas para la expresión para  $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \geq 8.2$  (de  $^{+0.05}_{-0.1}$  dex).

Después de revisar los ICFs previos, se encontró que si sólo se observan líneas del ion  $\text{S}^+$  el único ICF disponible es el  $\text{ICF}_{\text{S78}}(\text{S}^+)$  que depende del cociente  $\text{O3O2}$ . Sin embargo, se encontró que ninguna de las dos expresiones de este ICF ajusta nuestros modelos ya que con estas expresiones se sobrestima o subestima el valor del ICF, dependiendo del cociente  $\text{O3O2}$ . Por lo tanto, para el caso en el que sólo se observan líneas de  $\text{S}^+$  se buscará una mejor expresión para el ICF.

Para el caso en el que se observan líneas de los iones  $\text{S}^+$  y  $\text{S}^{++}$ , el ICF más utilizado en la literatura es el  $\text{ICF}_{\text{S78}}(\text{S}^+ + \text{S}^{++})$ . Al comparar este ICF con los otros ICFs previos disponibles, se encontró que éste es el que ajusta mejor a los modelos. Fue posible mejorar este ICF cambiando un poco los coeficientes de la expresión propuesta por Stasińska (1978), disminuyendo ligeramente las incertidumbres asociadas. Por ello, hasta este punto consideramos que el mejor ICF para el cálculo de la abundancia de azufre cuando se observan líneas de  $\text{S}^+$  y  $\text{S}^{++}$  corresponde al  $\text{ICF}_{\text{S78bis}}(\text{S}^+ + \text{S}^{++})$ .

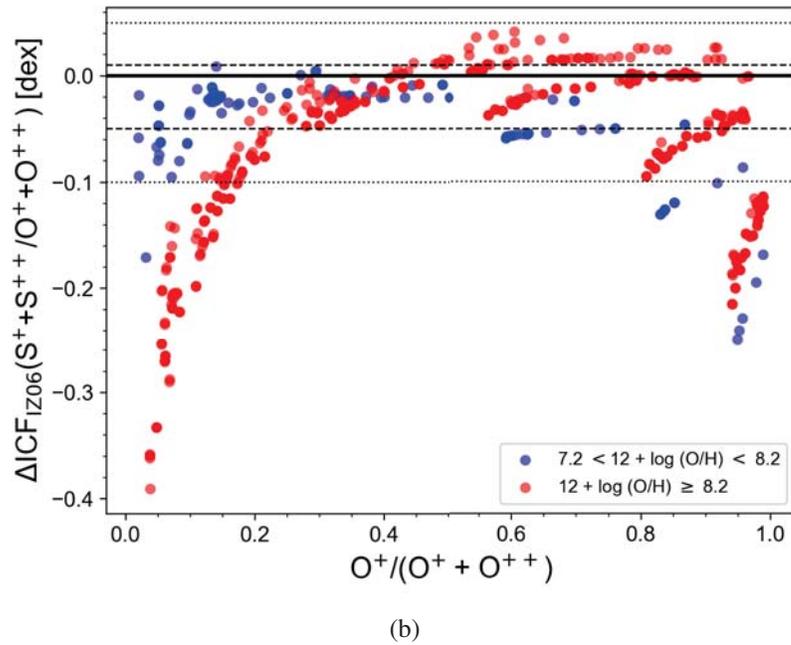
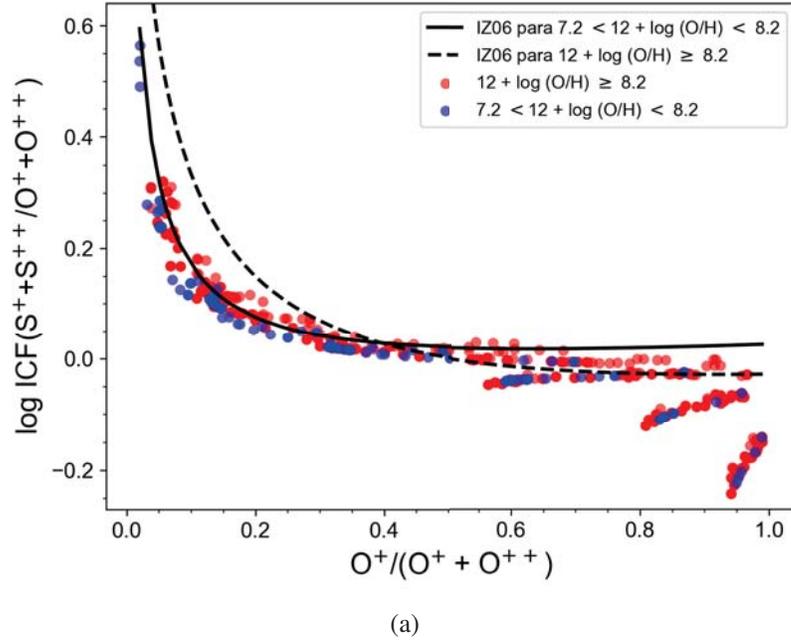


FIGURA 4.22: **a)** Valores del  $\text{ICF}_m(\text{S}^++/\text{S}^+/\text{O}^{++}/\text{O}^+)$  de nuestro conjunto de modelos en función de  $\text{O}^+/\text{O}^{++}$ . Los modelos con  $7.2 < 12 + \log(\text{O}/\text{H}) < 8.2$  se muestran en azul y en rojo se muestran aquellos con  $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \geq 8.2$ . La línea discontinua representa el  $\text{ICF}_{\text{IZ06}}(\text{S}^++/\text{S}^+/\text{O}^{++}/\text{O}^+)$  para modelos con  $7.2 < 12 + \log(\text{O}/\text{H}) < 8.2$  y la línea continua para modelos con  $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \geq 8.2$ . **b)** Incertidumbres asociadas al  $\text{ICF}_{\text{IZ06}}(\text{S}^++/\text{S}^+/\text{O}^{++}/\text{O}^+)$  en función de  $\text{O}^+/\text{O}^{++}$  para los modelos de fotoionización. Las líneas de puntos representan las incertidumbres asociadas al  $\text{ICF}_{\text{IZ06}}(\text{S}^++/\text{S}^+/\text{O}^{++}/\text{O}^+)$  para  $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \geq 8.2$ , mientras que las líneas discontinuas representan las incertidumbres asociadas a la expresión para  $7.2 < 12 + \log(\text{O}/\text{H}) < 8.2$ . Las líneas continuas representan donde el  $\text{ICF}_m(\text{S}^++/\text{S}^+/\text{O}^{++}/\text{O}^+)$  de los modelos es igual al  $\text{ICF}$  del ajuste.

### 4.6.2 Cálculo de $ICF(S^+)$

Al explorar los iones de azufre con los modelos de fotoionización, se encontró que los que más contribuyen a la abundancia total de azufre son  $S^+$ ,  $S^{++}$  y  $S^{+3}$ : el  $S^+$  en los modelos de menor grado de ionización (con  $O^{++}/(O^++O^{++}) < 0.3$ ) en los que representa más del 60% del azufre total, el  $S^{++}$  en modelos con  $0.3 < O^{++}/(O^++O^{++}) < 0.9$  donde contribuye en hasta un 90% y el  $S^{+3}$  en los de mayor grado de ionización (donde  $O^{++}/(O^++O^{++}) \geq 0.9$ ). El resto de los iones no contribuye de manera significativa. El  $S^{+4}$  sólo representa hasta un 10% en modelos con  $O^{++}/(O^++O^{++}) > 0.9$  y los iones  $S^{+5}$  y  $S^{+6}$  tienen una contribución  $\ll 1\%$  (Figura 4.23). Por ello, si sólo se observan líneas de  $S^+$  el ICF será significativo a partir de  $O^{++}/(O^++O^{++}) > 0.3$ . Pero si además de este ion se observan líneas de  $S^{++}$ , el ICF será significativo únicamente en objetos con  $O^{++}/(O^++O^{++}) > 0.7$ , donde se vuelve importante la contribución del  $S^{+3}$ .

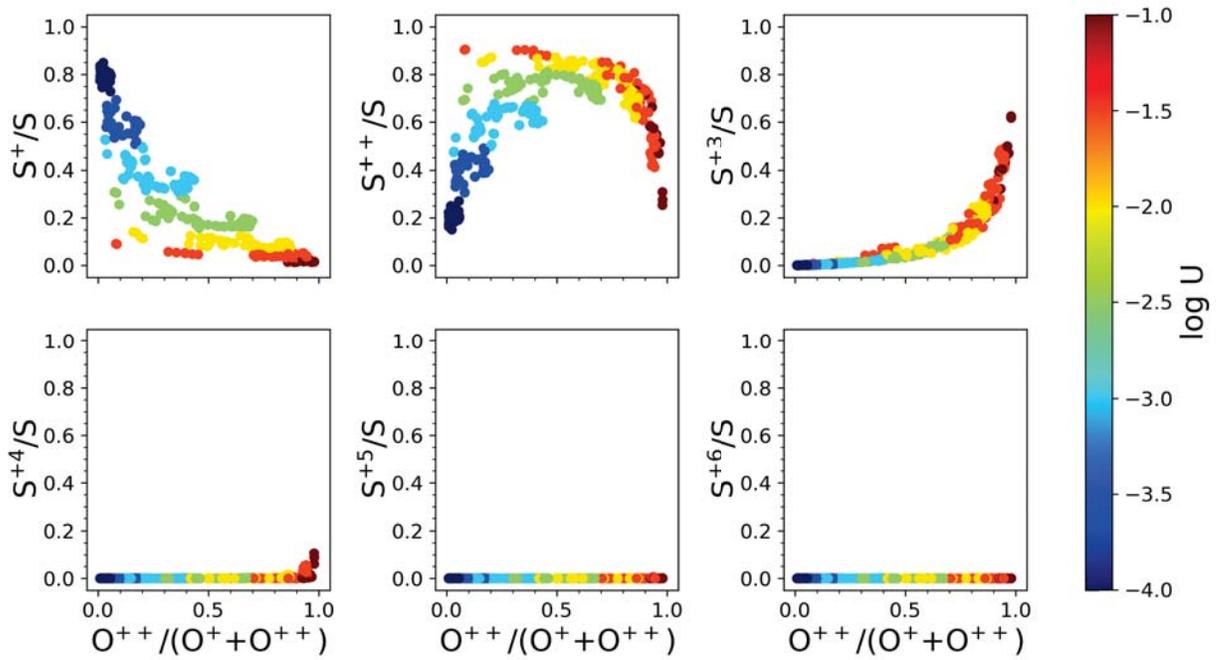


FIGURA 4.23: Fracción iónica de  $S^+$ ,  $S^{++}$ ,  $S^{+3}$ ,  $S^{+4}$ ,  $S^{+5}$  y  $S^{+6}$  en función del cociente  $O^{++}/(O^++O^{++})$  para los modelos de fotoionización. En la barra de color se indica el valor del parámetro de ionización de los modelos.

De las opciones exploradas para el  $ICF_m(S^+)$  mostradas en la Figura 4.24, se calculó un ajuste para los paneles **d**, **h** y **i** en los cuales, los modelos muestran una tendencia un poco más clara y una dispersión ligeramente menor que en los demás paneles. Las expresiones analíticas de cada ajuste para cada panel son respectivamente:

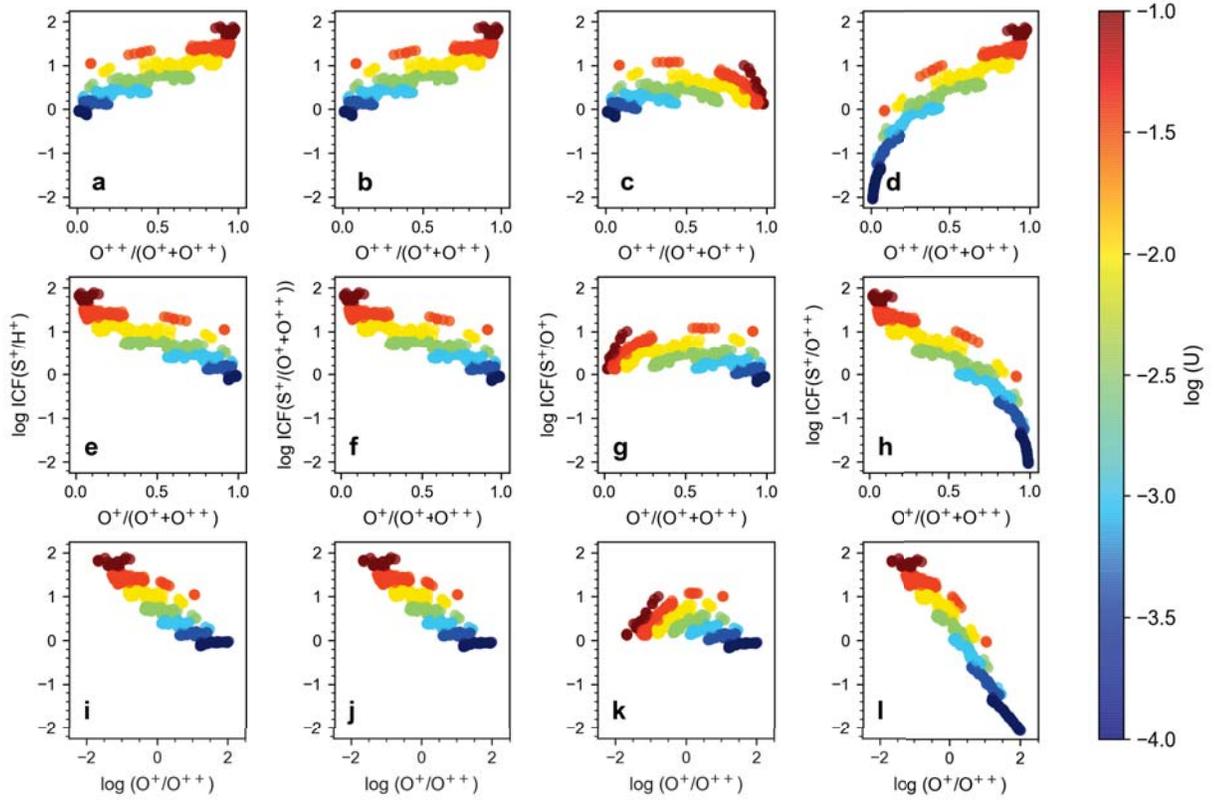


FIGURA 4.24: Opciones exploradas para el  $\text{ICF}_m(\text{S}^+)$  en función de los cocientes  $\text{O}^{++}/(\text{O}^++\text{O}^+)$ ,  $\text{O}^+/\text{O}^+ + \text{O}^{++}$  y  $\log(\text{O}^+/\text{O}^{++})$ . En la barra de color se muestra el logaritmo del parámetro de ionización de los modelos.

$$\log \text{ICF}_f(\text{S}^+/\text{O}^{++}) = 7.6\omega^{(0.1+0.2\omega)} - 6.0, \quad (4.27)$$

$$\log \text{ICF}_f(\text{S}^+/\text{O}^{++}) = \frac{-0.9 + \nu}{-0.3 + 0.3\nu^2}, \quad (4.28)$$

$$\log \text{ICF}_f(\text{S}^+/\text{O}^{++}) = \frac{6.2}{1.0 + 0.5e^{0.9\eta}} - 3.8, \quad (4.29)$$

donde  $\omega = \text{O}^{++}/(\text{O}^++\text{O}^+)$ ,  $\nu = \text{O}^+/\text{O}^+ + \text{O}^{++}$  y  $\eta = \log(\text{O}^+/\text{O}^{++})$ . Estas expresiones se muestran en los paneles del lado izquierdo de la Figura 4.25 y sus incertidumbres asociadas se muestran en los paneles de lado derecho. Las incertidumbres máximas asociadas a cada expresión (mostradas con líneas punteadas) son de  $^{+0.9}_{-0.4}$  dex para el ajuste del panel **d** (ecuación 4.27) y de  $^{+0.9}_{-0.3}$  dex para los ajustes de los paneles **h** y **l** (ecuaciones 4.28 y 4.29). Se puede ver que la incertidumbre del ICF de la mayoría de los modelos (mostrada con

líneas discontinuas) para los tres ajustes es de  $\pm 0.3$  dex aproximadamente.

De los tres ICFs propuestos todos tienen incertidumbres muy similares pero como la expresión del ajuste del panel **h** (de la ecuación 4.28) es un poco más sencilla, consideramos que esta expresión es la mejor opción de los tres  $ICF_f(S^+)$  calculados en este trabajo.

Como ya se mencionó, las dos expresiones del  $ICF_{S78}(S^+)$  están lejos de ajustar nuestros modelos por lo que consideramos que cuando sólo se observan líneas del ion  $S^+$  el ICF propuesto aquí es el mejor disponible.

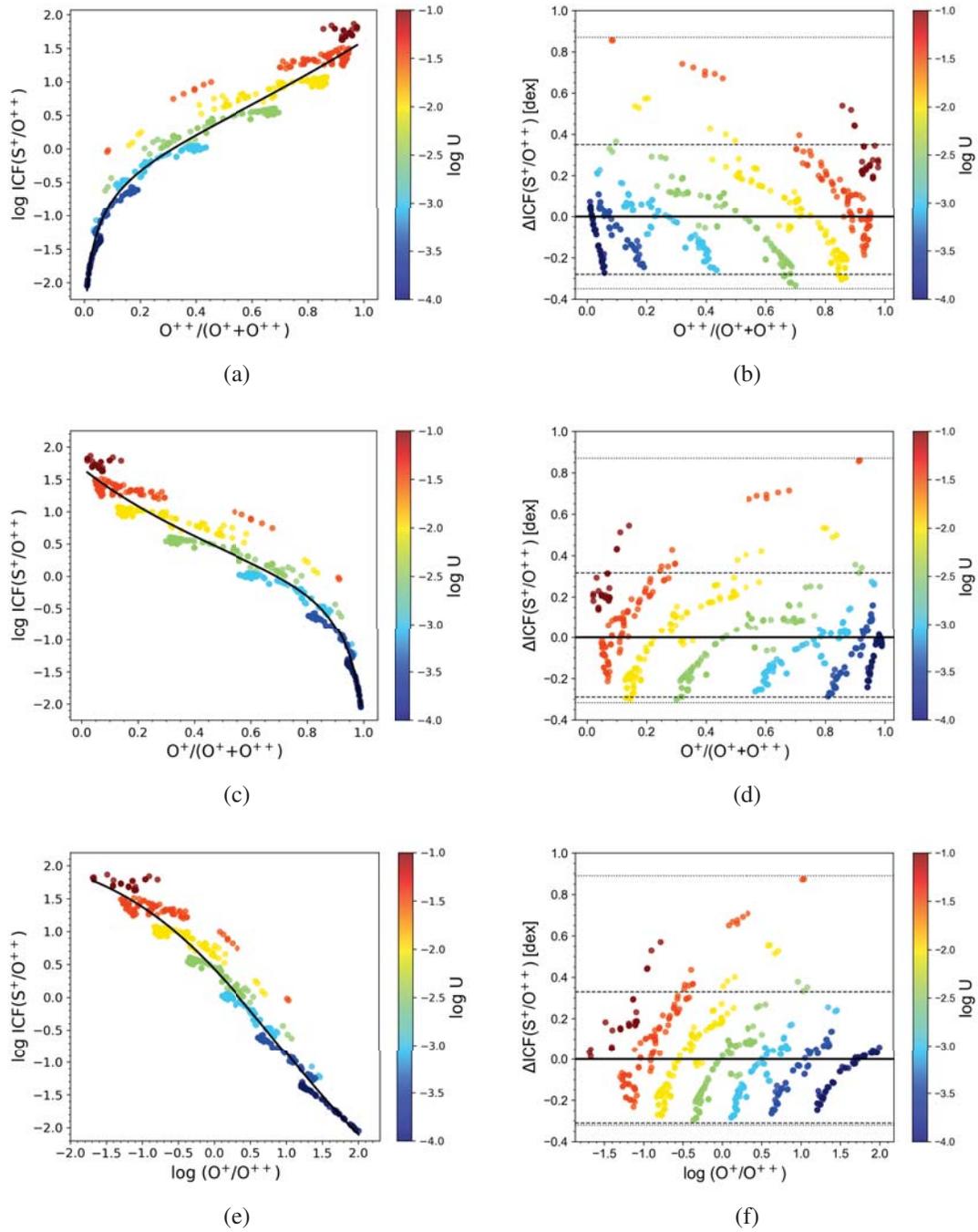


FIGURA 4.25: Valores del  $\log \text{ICF}(\text{S}^+/\text{O}^{++})$  en función de  $\text{O}^{++}/(\text{O}^+ + \text{O}^{++})$ ,  $\text{O}^+ / (\text{O}^+ + \text{O}^{++})$  y  $\log(\text{O}^+/\text{O}^{++})$ . Los ajustes se muestran en las figuras de lado izquierdo con líneas continuas y las incertidumbres asociadas a cada ajuste,  $\Delta \text{ICF}(\text{S}^+)$ , se muestran en los paneles de lado derecho. Las incertidumbres máximas se muestran con líneas punteadas y las incertidumbres asociadas al ICF de la mayoría de los modelos con líneas discontinuas. La línea continua en las figuras de lado derecho, representa donde el  $\text{ICF}_m(\text{S}^+)$  de los modelos es igual al  $\text{ICF}_f(\text{S}^+)$  del ajuste.

### 4.6.3 Cálculo del $\text{ICF}(\text{S}^+ + \text{S}^{++})$

Las distintas opciones exploradas para el  $\text{ICF}(\text{S}^+ + \text{S}^{++})$  se muestran en la Figura 4.26, en donde se puede ver que, en general, los modelos en los distintos paneles tienen una dispersión muy similar. Debido a esto, no se espera que tanto la incertidumbre asociada al ajuste como la sencillez de las expresiones analíticas sean muy diferentes en todos los paneles. A pesar de esto, en los paneles **d**, **g** y **h** los modelos muestran ligeramente una menor dispersión, por lo que fueron seleccionados para calcular un ajuste. La expresión analítica de los  $\text{ICF}_f(\text{S}^+ + \text{S}^{++})$  para cada panel son, respectivamente:

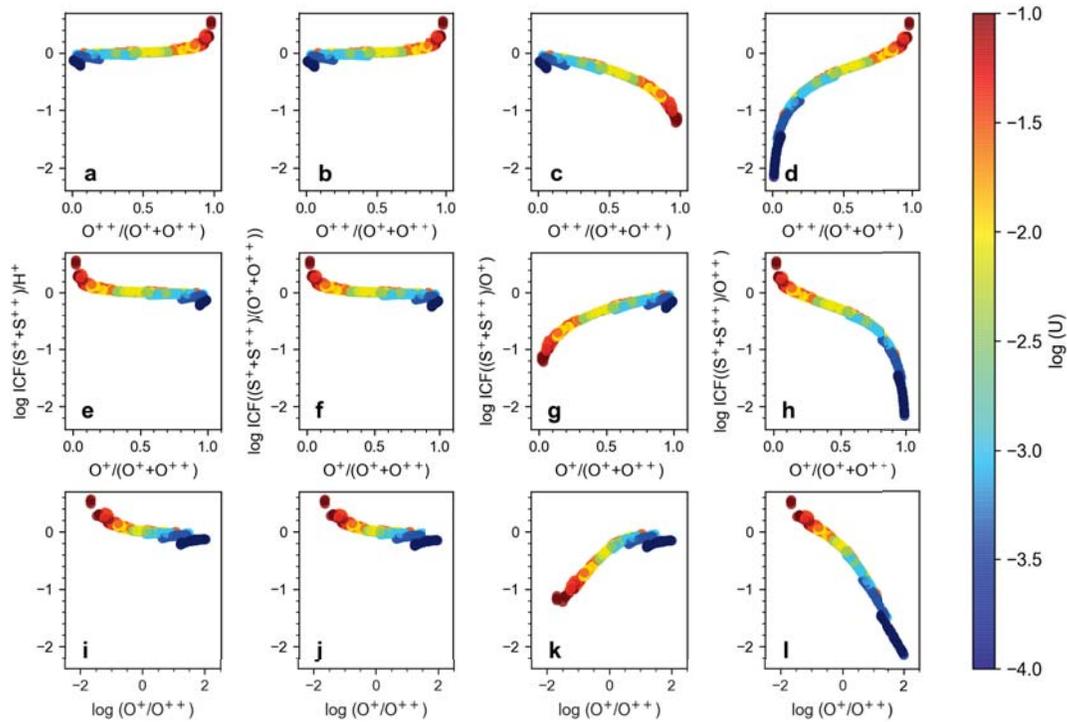


FIGURA 4.26: Opciones exploradas para el  $\text{ICF}_m(\text{S}^+ + \text{S}^{++})$  en función de los cocientes  $\text{O}^{++}/(\text{O}^+ + \text{O}^{++})$ ,  $\text{O}^+/\text{O}^{++}$  y  $\log(\text{O}^+/\text{O}^{++})$ . En la barra de color se indica el valor del parámetro de ionización de los modelos.

$$\log \text{ICF}_f(\text{S}^+ + \text{S}^{++}/\text{O}^{++}) = 0.40\omega^{10.30/\omega} + 0.50 \ln(\omega) + 0.04, \quad (4.30)$$

$$\log \text{ICF}_f(\text{S}^+ + \text{S}^{++}/\text{O}^+) = 1.5\nu^{0.3-0.3\nu} - 1.7, \quad (4.31)$$

$$\log \text{ICF}_f(\text{S}^+ + \text{S}^{++}/\text{O}^{++}) = \frac{-0.9 + \nu}{-0.6 + 0.6\nu^2} - 1.2, \quad (4.32)$$

donde  $\omega = \text{O}^{++}/(\text{O}^{+}+\text{O}^{++})$  y  $\nu = \text{O}^{+}/(\text{O}^{+}+\text{O}^{++})$ . Estos tres ICFs se muestran con una línea continua en los paneles del lado izquierdo de la Figura 4.27. Al explorar con los modelos el valor de  $\Delta\text{ICF}_f(\text{S}^{+}+\text{S}^{++})$  de cada ajuste, se encontró que las incertidumbres máximas asociadas (mostradas con líneas punteadas en los paneles del lado derecho de la misma figura) son hasta de  $\pm 0.1$  dex aproximadamente para los tres ajustes, sin embargo, las incertidumbres de cada ajuste asociadas al ICF de la mayoría de los modelos (mostradas con líneas discontinuas) son de  ${}_{-0.03}^{+0.06}$  dex,  ${}_{-0.06}^{+0.07}$  dex y  $\pm 0.07$  dex, para los ICFs de las ecuaciones 4.30, 4.31 y 4.32, respectivamente.

De los tres ajustes las incertidumbres asociadas al ajuste de los paneles **g** y **h** (de las ecuaciones 4.31 y 4.32) son similares pero dado que la expresión del panel **g** tiene una forma un poco más sencilla, consideramos que esta expresión es la mejor opción de las expresiones calculadas aquí. Las incertidumbres asociadas a esta expresión son incluso menores que las asociadas al  $\text{ICF}_{\text{S78bis}}(\text{S}^{+}+\text{S}^{++})$ . Por lo tanto, proponemos la expresión de la ecuación 4.31 del panel **g** para calcular la abundancia de azufre en regiones H II para el caso en el que se observen los iones  $\text{S}^{+}$  y  $\text{S}^{++}$ .

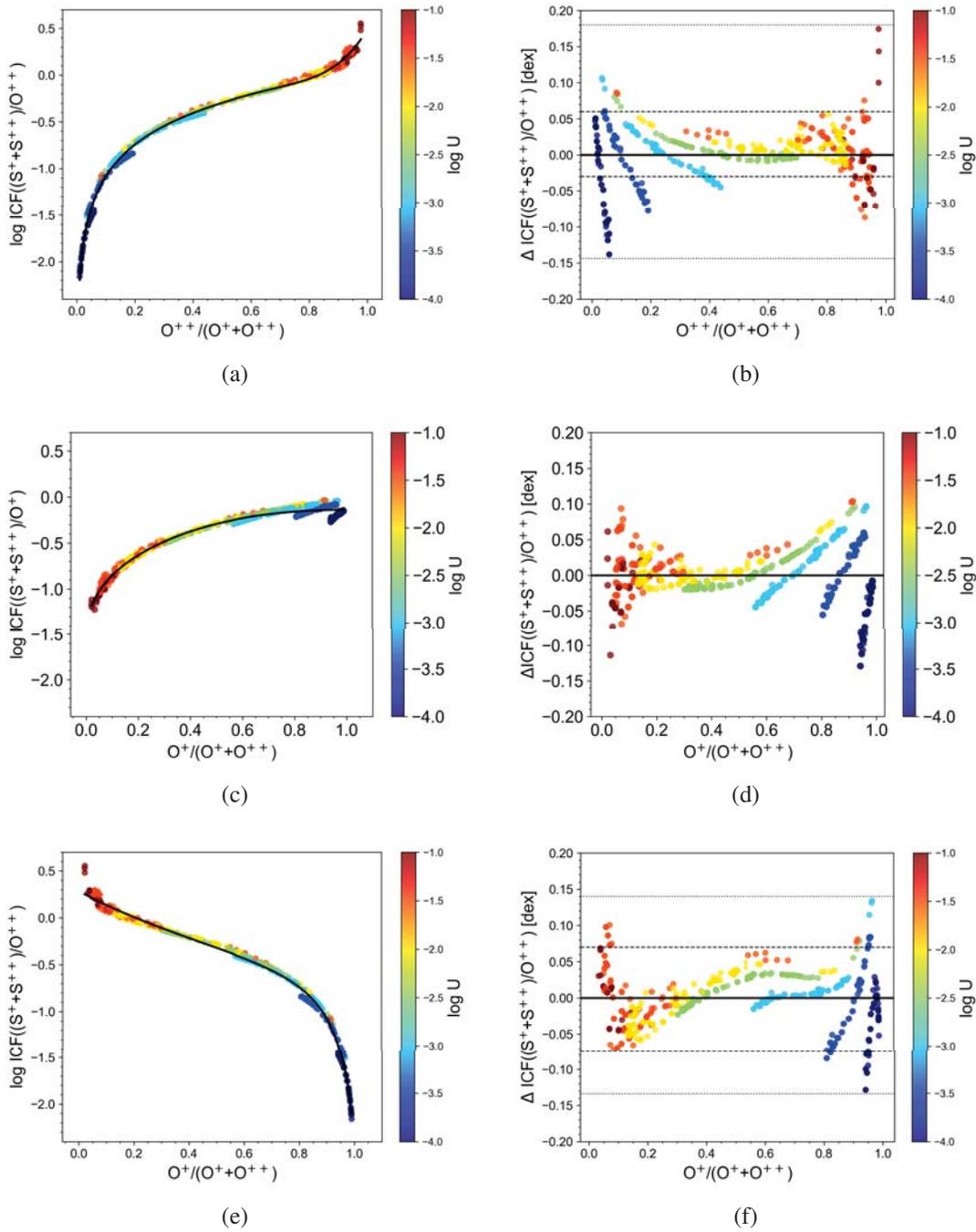


FIGURA 4.27: Valores del  $\log \text{ICF}(\text{S}^+ + \text{S}^{++} / \text{O}^+)$  y  $\log \text{ICF}(\text{S}^+ + \text{S}^{++} / \text{O}^{++})$ , en función de  $\text{O}^{++} / (\text{O}^+ + \text{O}^{++})$  y  $\text{O}^+ / (\text{O}^+ + \text{O}^{++})$ . Los ajustes se muestran en las figuras de lado izquierdo con líneas continuas y las incertidumbres asociadas a cada ajuste,  $\Delta \text{ICF}(\text{S}^+ + \text{S}^{++})$ , se muestran en los paneles de lado derecho. Las incertidumbres máximas se muestran con líneas punteadas y las incertidumbres asociadas al ICF de la mayoría de los modelos con líneas discontinuas. La línea continua en las figuras de lado derecho, representa donde el  $\text{ICF}_m(\text{S}^+ + \text{S}^{++})$  de los modelos es igual al  $\text{ICF}_f(\text{S}^+ + \text{S}^{++})$  del ajuste.

## 4.7 Cloro

En el intervalo visible del espectro de las regiones H II, las líneas de cloro que se observan con mayor frecuencia son: [Cl III]  $\lambda 5517$  y [Cl III]  $\lambda 5537$ . Aunque pueden llegar a observarse líneas de [Cl II] y [Cl IV] (por ejemplo, sus líneas más brillantes: [Cl II]  $\lambda 9123$  y [Cl IV]  $\lambda 8046$ ), en este trabajo sólo se calcula un ICF para el caso en el que se observen líneas de [Cl III] debido a que se busca comparar con los ICFs disponibles en la literatura y la mayoría están calculados en función de este ion. En el futuro se realizará el cálculo de ICFs para cloro en el caso en el que además se observan líneas de los iones  $\text{Cl}^+$  y  $\text{Cl}^{+3}$ .

### 4.7.1 Factores de corrección por ionización previos

Peimbert & Torres-Peimbert (1977) proponen un ICF para cuando sólo se observan líneas de  $\text{Cl}^{++}$  dado como:

$$\text{ICF}_{\text{PT77}}(\text{Cl}^{++}) = \frac{1}{1 - (\text{S}^+/\text{S}) - (\text{O}^{++}/\text{O})}, \quad (4.33)$$

Esta expresión se muestra con una línea continua de la Figura 4.28a y las incertidumbres asociadas se muestran en la Figura 4.28b (con líneas punteadas los valores máximos de la incertidumbre y con líneas discontinuas las incertidumbres que presentan la mayoría de los modelos). En general, una buena parte de los modelos se encuentra por arriba de la curva definida por esta expresión, lo que implica que en la mayoría de los casos el  $\text{ICF}_{\text{PT77}}(\text{Cl}^{++})$  subestima el valor del ICF de los modelos. Únicamente algunos modelos con  $\log U \sim -4.0$  son ajustados por esta expresión. Para los modelos que quedan por debajo de la curva, se puede ver en la Figura 4.28b que esta expresión subestima el ICF hasta en 0.8 dex y para aquellos con  $\log U \sim -4.0$  la incertidumbre es de  $\sim_{-0.1}^{+0.1}$  dex.

Izotov et al. (2006) proponen tres ICFs para el cloro:

$$\begin{aligned} \text{ICF}_{\text{IZ06}}(\text{Cl}^{++}) &= 0.756\nu + 0.648 + 0.128/\nu, \text{ cuando } 12 + \log(\text{O}/\text{H}) \leq 7.2 \\ &= 0.814\nu + 0.620 + 0.131/\nu, \text{ cuando } 7.2 < 12 + \log(\text{O}/\text{H}) < 8.2 \\ &= 1.186\nu + 0.357 + 0.121/\nu, \text{ cuando } 12 + \log(\text{O}/\text{H}) \geq 8.2, \end{aligned} \quad (4.34)$$

donde  $\nu = \text{O}^+ / (\text{O}^+ + \text{O}^{++})$ . En la Figura 4.29a únicamente se muestran la segunda y tercera expresión con una línea continua y punteada, respectivamente, dada la metalicidad de nuestro conjunto de modelos. En esta figura los modelos con  $7.2 < 12 + \log(\text{O}/\text{H}) < 8.2$  se muestran en azul y aquellos con  $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \geq 8.2$  se muestran en rojo. Se puede notar que los valores máximos de las incertidumbres son de  $\pm 0.4$  dex y  $_{-0.4}^{+0.6}$  dex para las expresiones para  $7.2 < 12 + \log(\text{O}/\text{H}) < 8.2$  y  $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \geq 8.2$  respectivamente, aunque para la mayoría de los modelos se tiene un  $\Delta\text{ICF}_{\text{IZ06}}(\text{Cl}^{++})$  de  $_{-0.3}^{+0.2}$  dex y  $_{-0.2}^{+0.3}$  dex respectivamente (Figura 4.29b).

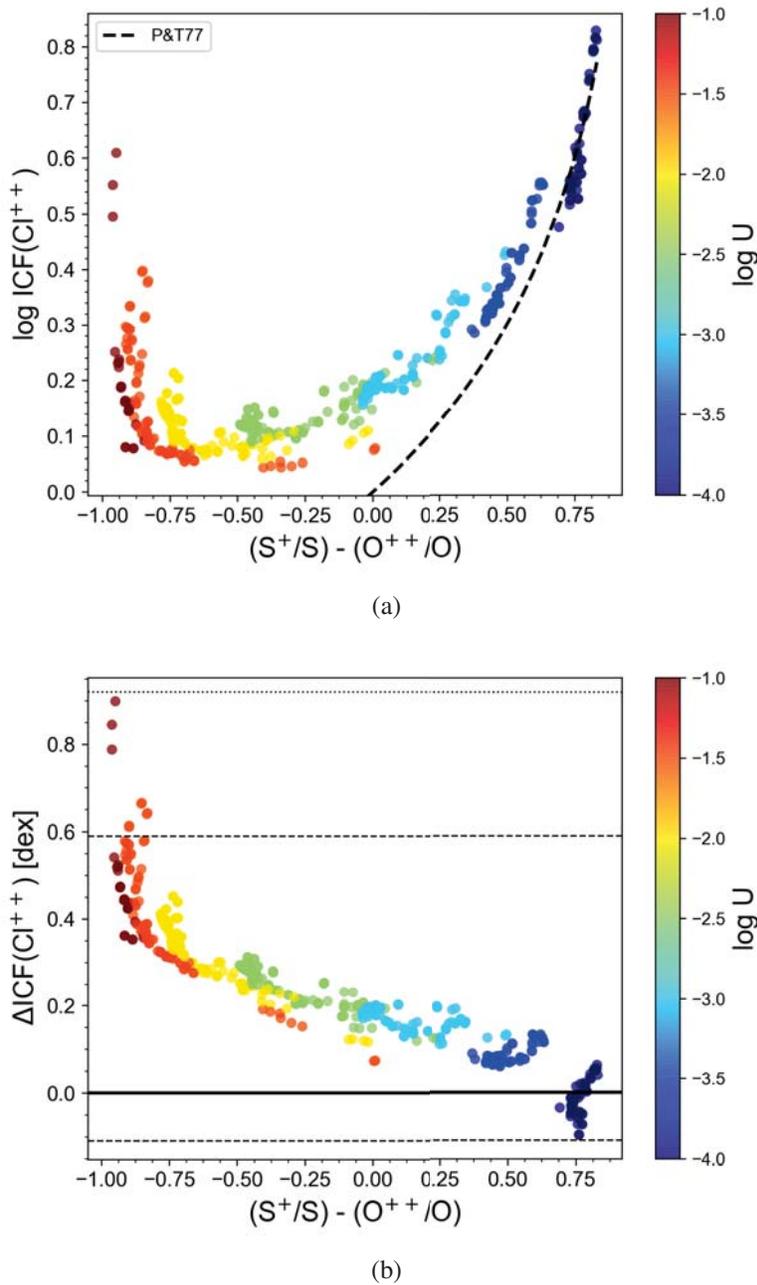


FIGURA 4.28: **a)** Valores del  $\text{ICF}_m(\text{Cl}^{++})$  de nuestro conjunto de modelos en función de  $(S^+/S) - (O^{++}/O)$ . La línea continua representa el  $\log \text{ICF}_{\text{P&T77}}(\text{Cl}^{++})$ . En la barra de color se muestran los valores del parámetro de ionización. **b)** Incertidumbre asociada al  $\text{ICF}_{\text{P&T77}}(\text{Cl}^{++})$  en función de  $(S^+/S) - (O^{++}/O)$  para los modelos de fotoionización. Las líneas punteadas representan las incertidumbres máximas asociadas al  $\text{ICF}_{\text{P&T77}}(\text{Cl}^{++})$ , mientras que las líneas discontinuas representan las incertidumbres asociadas al ICF de la mayoría de los modelos. La línea continua muestra donde se cumple que el  $\text{ICF}_m(\text{Cl}^{++})$  de los modelos es igual al ICF del ajuste.

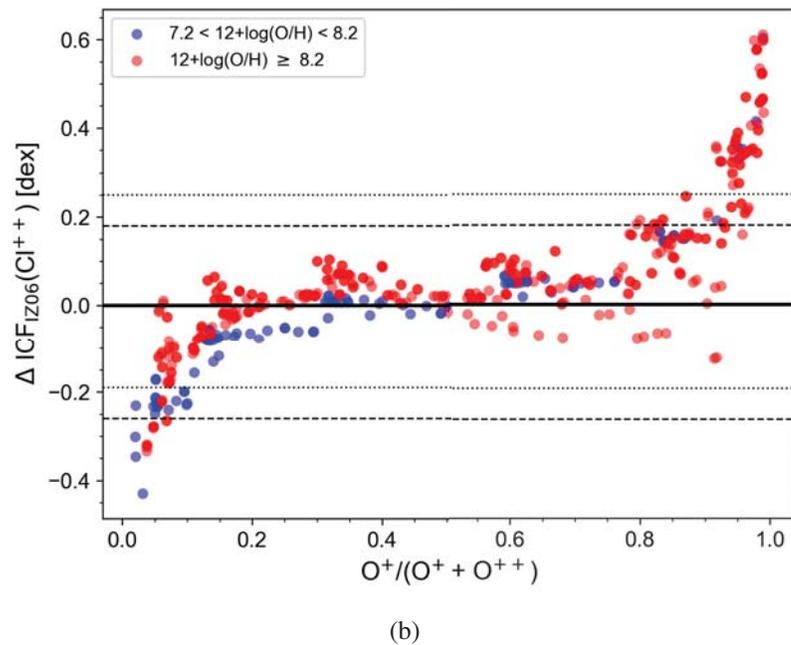
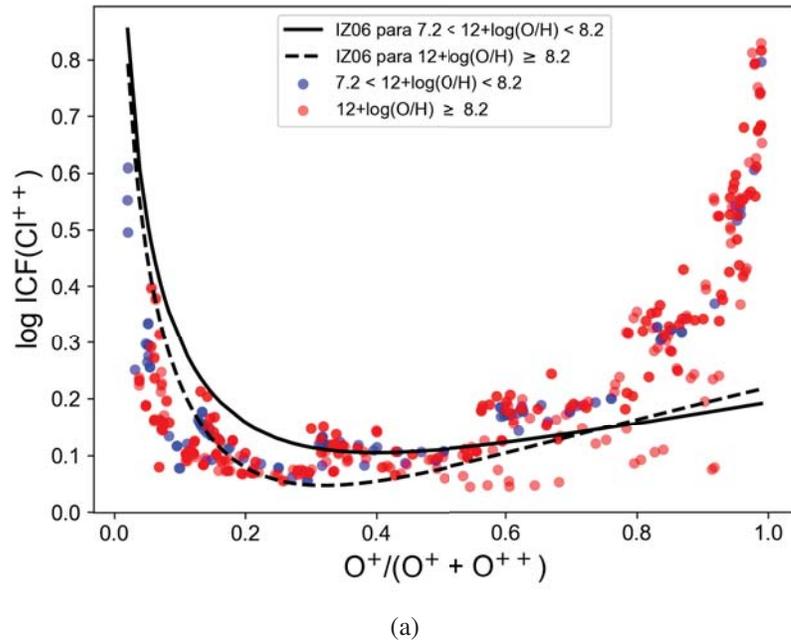


FIGURA 4.29: **a)** Valores del  $\text{ICF}_m(\text{Cl}^{++})$  de nuestro conjunto de modelos en función de  $\text{O}^+ / (\text{O}^+ + \text{O}^{++})$ . Los modelos con  $7.2 < 12 + \log(\text{O}/\text{H}) < 8.2$  se muestran en azul y en rojo se muestran aquellos con  $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \geq 8.2$ . La línea discontinua representa el  $\text{ICF}_{\text{IZ06}}(\text{Cl}^{++})$  para modelos con  $7.2 < 12 + \log(\text{O}/\text{H}) < 8.2$  y la línea continua para modelos con  $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \geq 8.2$ . **b)** Incertidumbre asociada al  $\text{ICF}_{\text{IZ06}}(\text{Cl}^{++})$  en función de  $\text{O}^+ / (\text{O}^+ + \text{O}^{++})$  para los modelos de fotoionización. Las líneas de puntos representan las incertidumbres de la mayoría de los modelos asociadas al  $\text{ICF}_{\text{IZ06}}(\text{Cl}^{++})$  para  $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \geq 8.2$ , mientras que la línea discontinua representa la misma incertidumbre asociada a la expresión para  $7.2 < 12 + \log(\text{O}/\text{H}) < 8.2$ . La línea continua representa donde el  $\text{ICF}_m(\text{Cl}^{++})$  de los modelos es igual al ICF del ajuste.

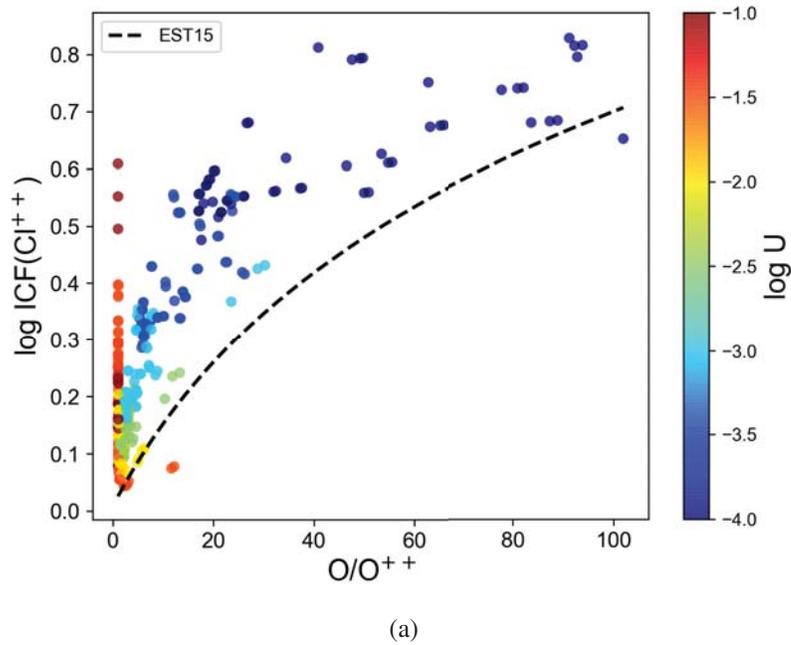
Por último, Esteban et al. (2015) proponen un ICF a partir de sus observaciones de  $\text{Cl}^+$ ,  $\text{Cl}^{++}$  y  $\text{Cl}^{+3}$ , lo que les permite determinar una expresión analítica para el ICF de cloro cuando sólo se observan líneas del ion  $\text{Cl}^{++}$ :

$$\text{ICF}_{\text{EST15}}(\text{Cl}^{++}) = 1.02 + 0.04 \left( \frac{\text{O}}{\text{O}^{++}} \right). \quad (4.35)$$

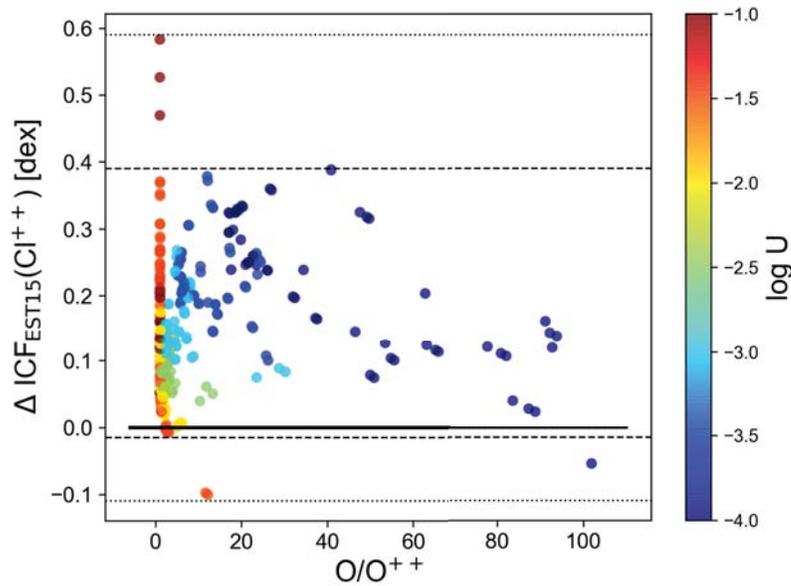
Esta expresión se muestra en la Figura 4.30a con una línea discontinua, donde se ve que a pesar de que sigue la misma tendencia de los modelos, en general no los ajusta. Esto se esperaba debido a que Esteban et al. (2015) indican que esta expresión sólo es válida para objetos con  $1.0 \leq \text{O}/\text{O}^{++} \leq 7.0$  y como se puede ver, nuestro conjunto de modelos alcanza valores mayores de este cociente. En el intervalo para el cual se propuso esta expresión el  $\text{ICF}_{\text{EST15}}(\text{Cl}^{++})$  ajusta algunos de nuestros modelos, pero la mayoría se encuentra por encima de ella. Es decir, esta expresión subestima el valor del ICF para la mayor parte de nuestro conjunto de modelos, por lo que se espera que al utilizarlo se subestime la abundancia de cloro determinada en la mayoría de los casos.

En la Figura 4.30b se ve que al utilizar esta expresión se subestima el ICF real en hasta  $^{+0.6}_{-0.1}$  dex, aunque para la mayoría de los modelos la incertidumbre asociada al ICF es de  $^{+0.4}_{-0.02}$  dex.

Después de explorar con nuestro conjunto de modelos los ICFs disponibles para cloro en regiones H II, se encontró que las expresiones con menor incertidumbre asociada corresponden a las propuestas por Izotov et al. (2006) aunque debe considerarse que estas dependen de la abundancia de oxígeno.



(a)



(b)

FIGURA 4.30: **a)** Valores del  $\text{ICF}_m(\text{Cl}^{++})$  de nuestro conjunto de modelos en función de  $O/O^{++}$ . La línea discontinua representa el  $\log \text{ICF}_{\text{EST15}}(\text{Cl}^{++})$ . En la barra de color se muestran los valores del parámetro de ionización. **b)** Incertidumbre asociada al  $\text{ICF}_{\text{EST15}}(\text{Cl}^{++})$  en función de  $O/O^{++}$  para los modelos de fotoionización. Las líneas punteadas representan las incertidumbres máximas asociadas al  $\text{ICF}_{\text{EST15}}(\text{Cl}^{++})$ , mientras que las líneas discontinuas representan las incertidumbres de la mayoría de los modelos asociadas al  $\text{ICF}$ . La línea continua muestra donde el  $\text{ICF}_m(\text{Cl}^{++})$  de los modelos es igual al  $\text{ICF}$  del ajuste.

4.7.2 Cálculo del ICF( $\text{Cl}^{++}$ )

Las fracciones iónicas de cloro en nuestro conjunto de modelos se muestran en la Figura 4.31. Los iones que contribuyen de manera más importante al cloro total son el  $\text{Cl}^+$ ,  $\text{Cl}^{++}$  y el  $\text{Cl}^{+3}$ , dado que los dos primeros iones representan hasta un 90% del cloro total en modelos de menor grado de ionización ( $O^{++}/(O^++O^{++}) < 0.1$ ) y más del 40% en modelos con  $0.3 < O^{++}/(O^++O^{++}) < 0.9$ , respectivamente. El ion  $\text{Cl}^{+3}$  contribuye hasta en 75% únicamente en modelos con  $O^{++}/(O^++O^{++}) > 0.8$ . Por otro lado, los iones  $\text{Cl}^{+4}$ ,  $\text{Cl}^{+5}$  y  $\text{Cl}^{+6}$  tienen una contribución  $\ll 1\%$  para todos los grados de ionización. Por ello, en el caso en el que sólo se observen líneas de  $\text{Cl}^{++}$  será importante tomar en cuenta un ICF para objetos con  $O^{++}/(O^++O^{++}) < 0.3$  o  $O^{++}/(O^++O^{++}) > 0.8$ , ya que en estos dos límites se espera que el ICF sea significativo.

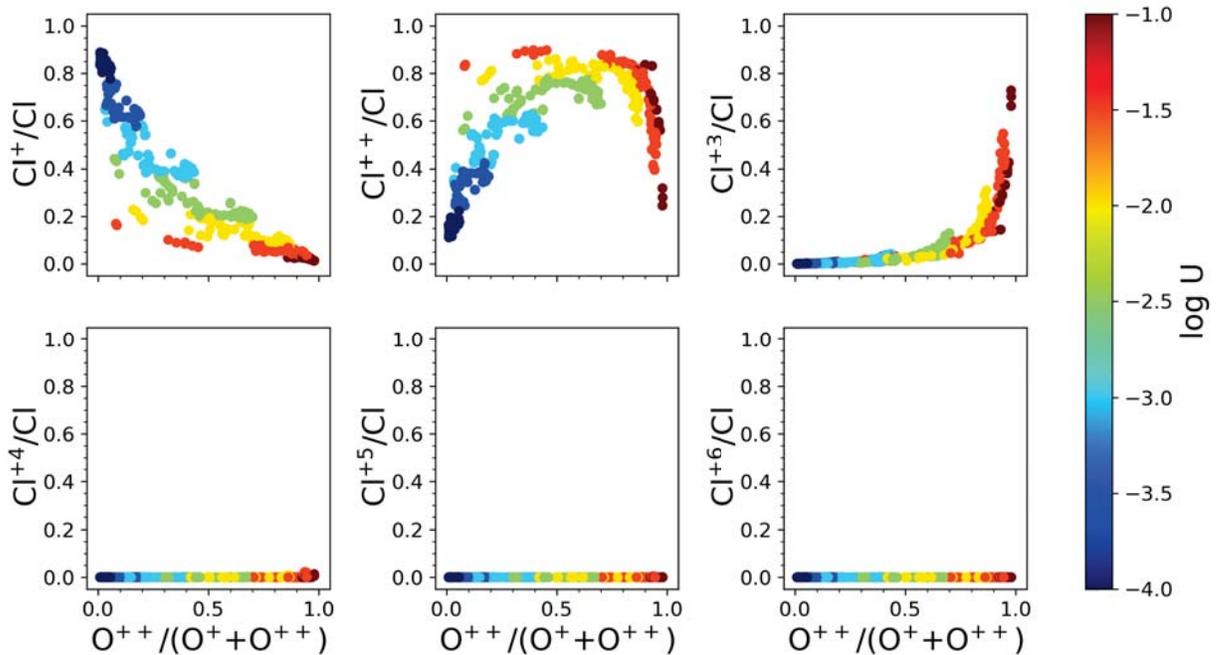


FIGURA 4.31: Fracción iónica de  $\text{Cl}^+$ ,  $\text{Cl}^{++}$ ,  $\text{Cl}^{+3}$ ,  $\text{Cl}^{+4}$ ,  $\text{Cl}^{+5}$  y  $\text{Cl}^{+6}$  en función del cociente  $O^{++}/(O^++O^{++})$  para los modelos de fotoionización. En la barra de color se indica el valor del parámetro de ionización de los modelos.

De las opciones exploradas para el  $\text{ICF}_f(\text{Cl}^{++})$  mostradas en la Figura 4.32, en este caso se seleccionaron los paneles **c**, **g** y **k** para calcular un ajuste. Al igual que para elementos previos, los modelos en este caso presentan una dispersión similar en la mayoría de los paneles de esta figura (excepto quizá por las opciones exploradas para el  $\text{ICF}(\text{Cl}^{++}/\text{H}^+)$  de la primera columna y para el  $\text{ICF}(\text{Cl}^{++}/(O^++O^{++}))$  de la segunda columna, donde los modelos tienen una mayor dispersión), por lo que no se espera que pueda obtenerse un mejor ajuste de otros paneles distintos a los seleccionados.

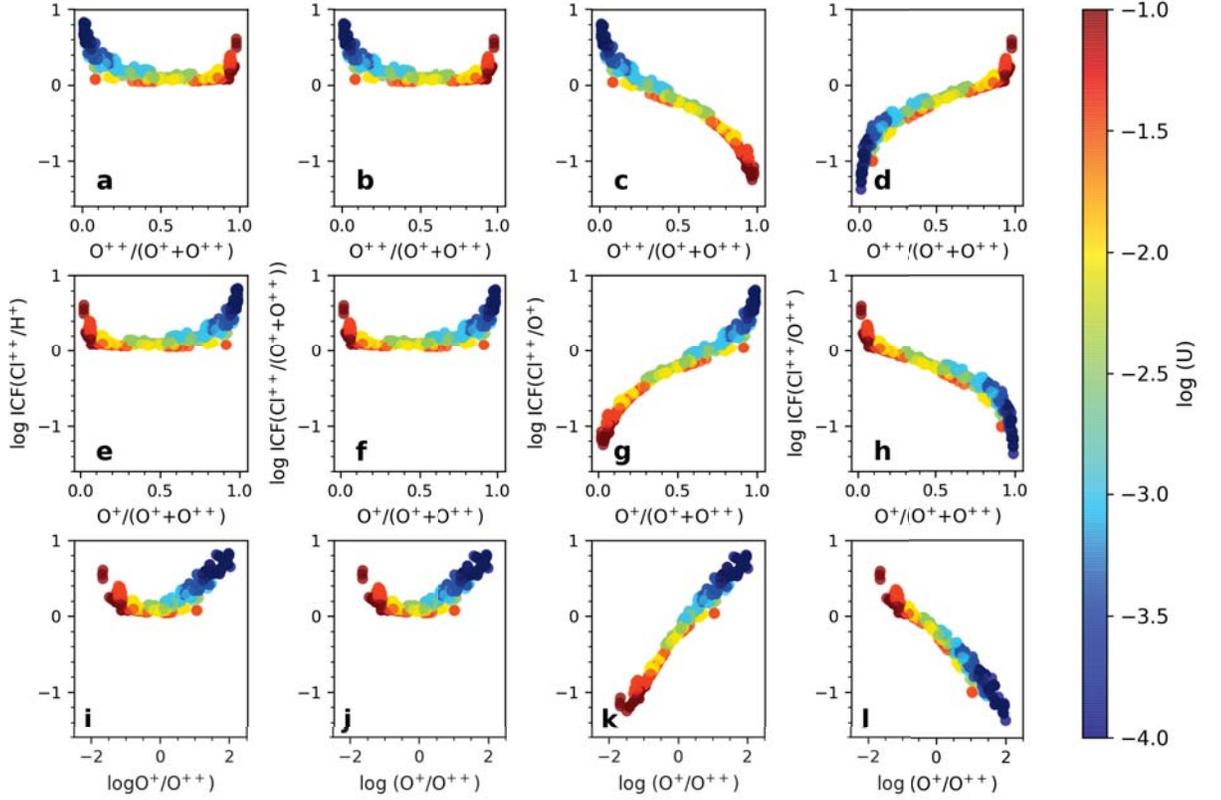


FIGURA 4.32: Opciones exploradas para el  $\text{ICF}_m(\text{Cl}^{++})$  en función de los cocientes  $\text{O}^{++}/(\text{O}^+ + \text{O}^{++})$ ,  $\text{O}^+ / (\text{O}^+ + \text{O}^{++})$  y  $\log(\text{O}^+ / \text{O}^{++})$ . En la barra de color se indica el valor del parámetro de ionización de los modelos.

Las expresiones analíticas de los ajustes para los paneles seleccionados (c, g y k respectivamente) son:

$$\log \text{ICF}_f(\text{Cl}^{++} / \text{O}^+) = 0.4 \ln(-0.9 \ln(0.9\omega - 0.01)), \quad (4.36)$$

$$\log \text{ICF}_f(\text{Cl}^{++} / \text{O}^+) = 0.0011e^{6.5v} - 1.2e^{-3.6v}, \quad (4.37)$$

$$\log \text{ICF}_f(\text{Cl}^{++} / \text{O}^+) = 2.8e^{-0.7e^{-0.7\eta}}, \quad (4.38)$$

donde  $\omega = \text{O}^{++}/(\text{O}^+ + \text{O}^{++})$ ,  $v = \text{O}^+ / (\text{O}^+ + \text{O}^{++})$  y  $\eta = \log(\text{O}^+ / \text{O}^{++})$ . Estos ajustes se muestran con una línea continua en los paneles izquierdos de la Figura 4.33 y en los de lado derecho se muestran las incertidumbres asociadas a cada uno. En los tres casos, la incertidumbre asociada a cada ICF llega a ser hasta de  ${}^{+0.2}_{-0.4}$  dex, mientras que las

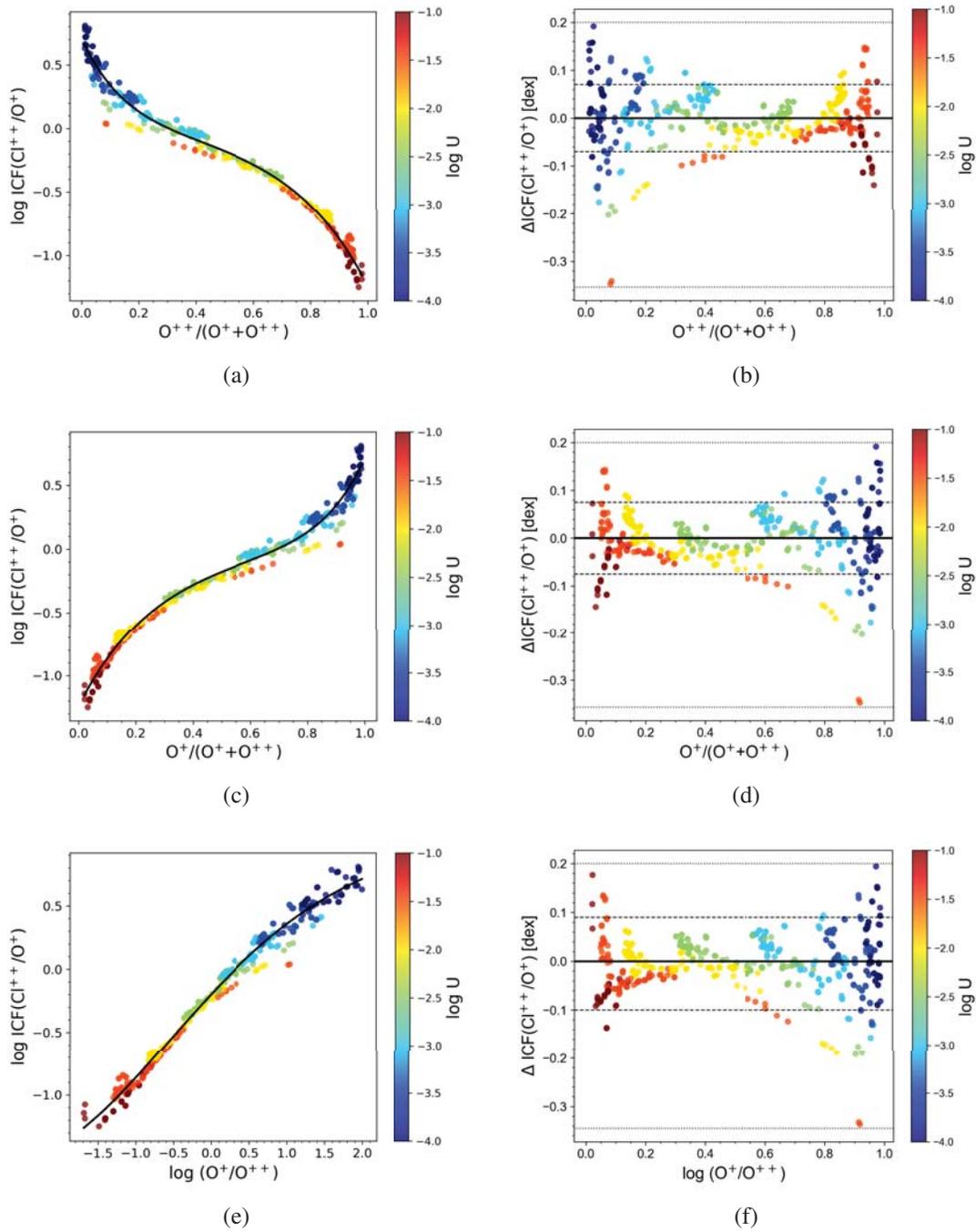


FIGURA 4.33: Valores del  $\log \text{ICF}(\text{Cl}^{++}/\text{O}^+)$  en función de  $\text{O}^{++}/(\text{O}^++\text{O}^{++})$ ,  $\text{O}^+/\text{O}^++\text{O}^{++}$  y  $\log(\text{O}^+/\text{O}^{++})$ . Los ajustes se muestran en las figuras de lado izquierdo con líneas continuas y las incertidumbres asociadas a cada ajuste,  $\Delta \text{ICF}(\text{Cl}^{++})$ , se muestran en los paneles de lado derecho. Las incertidumbres máximas se muestran con líneas punteadas y las incertidumbres asociadas al ICF de la mayoría de los modelos con líneas discontinuas. La línea continua en las figuras de lado derecho, representa donde el  $\text{ICF}_m(\text{Cl}^{++})$  de los modelos es igual al  $\text{ICF}_f(\text{Cl}^{++})$  del ajuste.

incertidumbres de la mayoría de los modelos asociadas a los ICFs de las ecuaciones 4.36, 4.37 y 4.38 es de  $\pm 0.07$  dex,  $\pm 0.08$  dex y  $\pm 0.10$  dex, respectivamente.

Los tres ajustes propuestos tienen una incertidumbre asociada muy similar. Ninguna de las tres expresiones es sencilla sin embargo, la del ICF propuesto para el panel g (de la ecuación 4.37) es ligeramente más sencilla, por lo que seleccionamos esta como la mejor opción.

A pesar de que esta expresión no es más sencilla que las dos expresiones del  $\text{ICF}_{\text{IZO6}}(\text{Cl}^{++})$  su incertidumbre asociada es menor, por lo que sugerimos utilizar la expresión del ICF de la ecuación 4.37 para el cálculo de la abundancia de cloro.

## 4.8 Argón

En regiones H II extragalácticas, las líneas de argón que se observan en el intervalo visible del espectro son: [Ar III]  $\lambda 7135$ , [Ar III]  $\lambda 7751$ , [Ar IV]  $\lambda 4711$  y [Ar IV]  $\lambda 4740$ . Debido a esto, en este trabajo proponemos dos ICFs para el argón: uno para cuando sólo se observan líneas del  $\text{Ar}^{++}$  y otro para cuando también se observan líneas del  $\text{Ar}^{+3}$ .

### 4.8.1 Factores de corrección por ionización previos

Para el cálculo de la abundancia de argón en regiones H II, Izotov et al. (1994) proponen dos ICFs basados en los modelos de Stasińska (1990):

$$\begin{aligned} \text{ICF}_{\text{IZ94}}(\text{Ar}^{++}) &= 0.15 + x(2.39 - 2.64x) \\ \text{ICF}_{\text{IZ94}}(\text{Ar}^{++} + \text{Ar}^{+3}) &= 0.99 + x[0.091 + x(-1.14 + 0.077x)]^{-1} \end{aligned} \quad (4.39)$$

Donde  $x = \text{O}^+/\text{O}$ . Estas expresiones se muestran en las Figuras 4.34a y 4.35a y sus incertidumbres asociadas se muestran en las Figuras 4.34b y 4.35b, donde las líneas punteadas muestran los valores máximos de la incertidumbre mientras que las líneas discontinuas muestran las incertidumbres asociadas al ICF de la mayoría de los modelos.

En general nuestros modelos quedan por debajo de la línea del  $\text{ICF}_{\text{IZ94}}(\text{Ar}^{++})$  a pesar de que esta sigue la misma tendencia de los modelos. Se puede ver que sólo algunos modelos con  $\log U < -3.5$  cumplen que  $\text{ICF}_{\text{IZ94}}(\text{Ar}^{++}) = \text{ICF}_m(\text{Ar}^{++})$ . Esto implica que al utilizar esta expresión se sobrestima la abundancia de argón. Esta expresión sobrestima el ICF de nuestros modelos en hasta 0.7 dex, aunque para los pocos modelos que quedan por arriba del ajuste (aquellos con  $\log U < -3.5$ ) el valor del ICF llega a subestimarse hasta en 0.1 dex (como se muestra en la Figura 4.34b).

Sucede algo similar con la expresión del  $\text{ICF}_{\text{IZ94}}(\text{Ar}^{++} + \text{Ar}^{+3})$  ya que la mayoría de modelos queda también por debajo de la línea discontinua, como se muestra en la Figura 4.35a), aunque en este caso la línea ajusta bien a los modelos con  $\text{O}^+/\text{O} < 0.2$ . Por ello, la incertidumbre asociada a esta expresión en estos modelos es muy pequeña, pero crece conforme avanzamos a valores de  $\text{O}^+/\text{O}$  mayores, para finalmente, alcanzar una incertidumbre de hasta  ${}^{+0.08}_{-0.50}$  dex, aunque la mayoría de los modelos presentan una incertidumbre asociada a esta expresión de  ${}^{+0.08}_{-0.40}$  dex. Con esta expresión, por lo tanto, también se sobrestima en general el ICF por lo que se espera que se sobrestime la abundancia de argón.

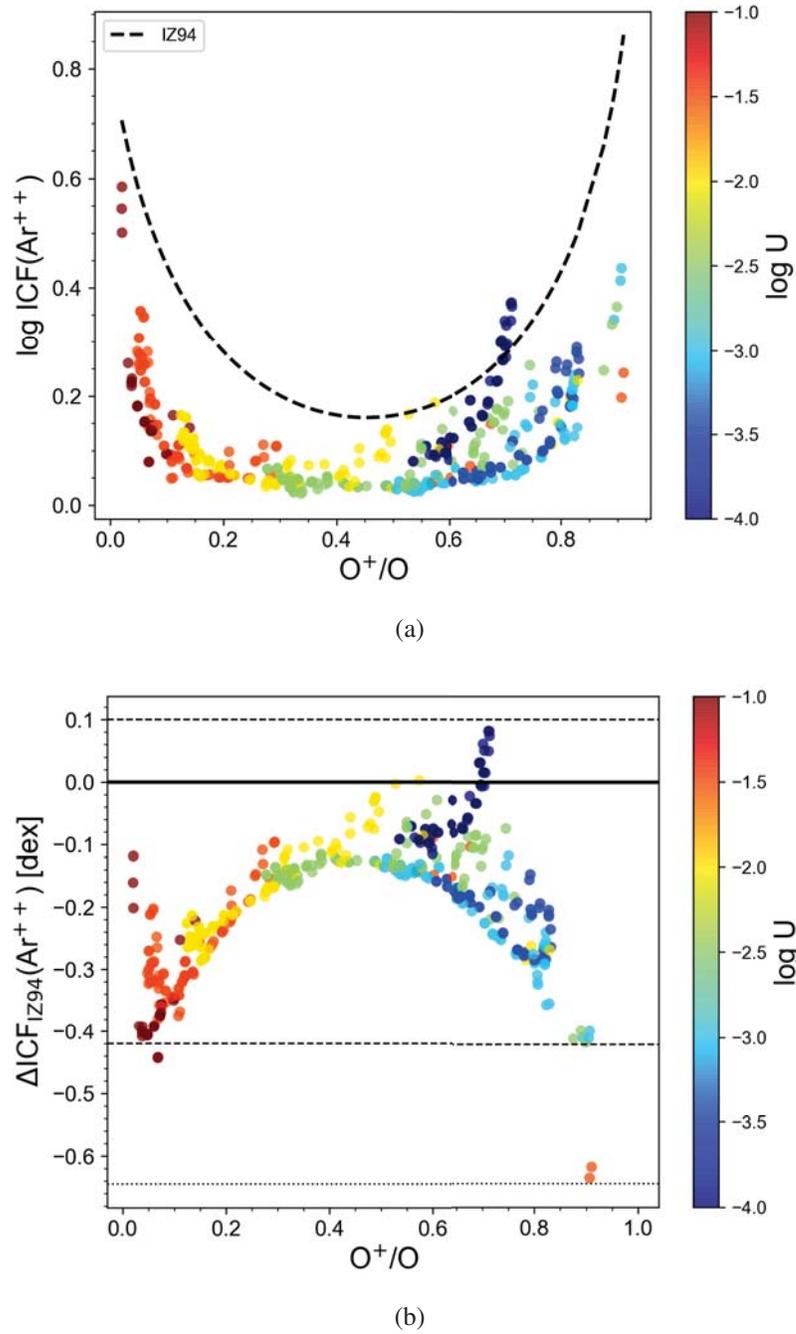


FIGURA 4.34: **a)** Valores del  $\text{ICF}_m(\text{Ar}^{++})$  de nuestro conjunto de modelos en función de  $\text{O}^+/\text{O}$ . La línea discontinua representa el  $\log \text{ICF}_{\text{IZ94}}(\text{Ar}^{++})$ . En la barra de color se muestran los valores del parámetro de ionización. **b)** Incertidumbre asociada al  $\text{ICF}_{\text{IZ94}}(\text{Ar}^{++})$  en función de  $\text{O}^+/\text{O}$  con los modelos de fotoionización. La líneas punteadas representan las incertidumbres máximas asociadas al  $\text{ICF}_{\text{IZ94}}(\text{Ar}^{++})$ , mientras que las líneas discontinuas representan las incertidumbres de la mayoría de los modelos asociadas al ICF. La línea continua muestra donde el  $\text{ICF}_m(\text{Ar}^{++})$  de los modelos es igual al ICF del ajuste.

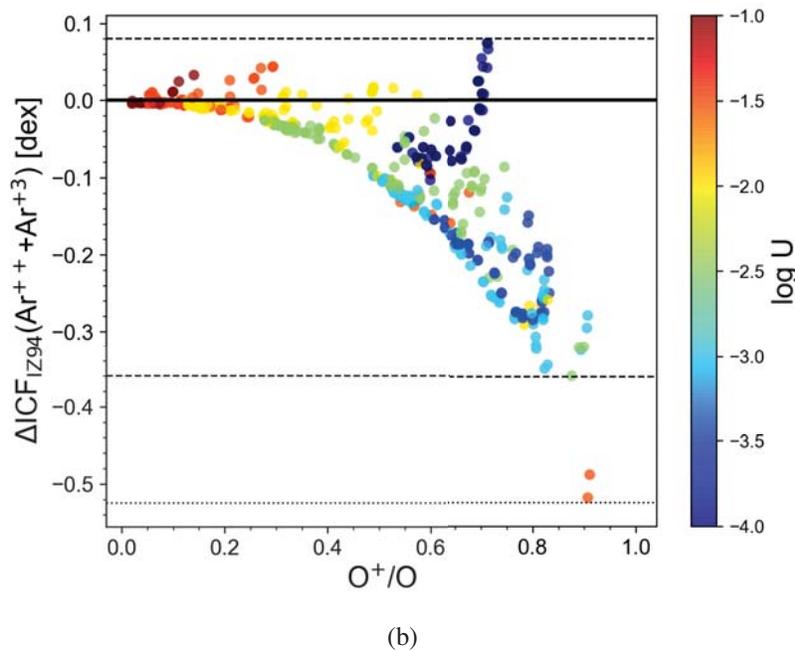
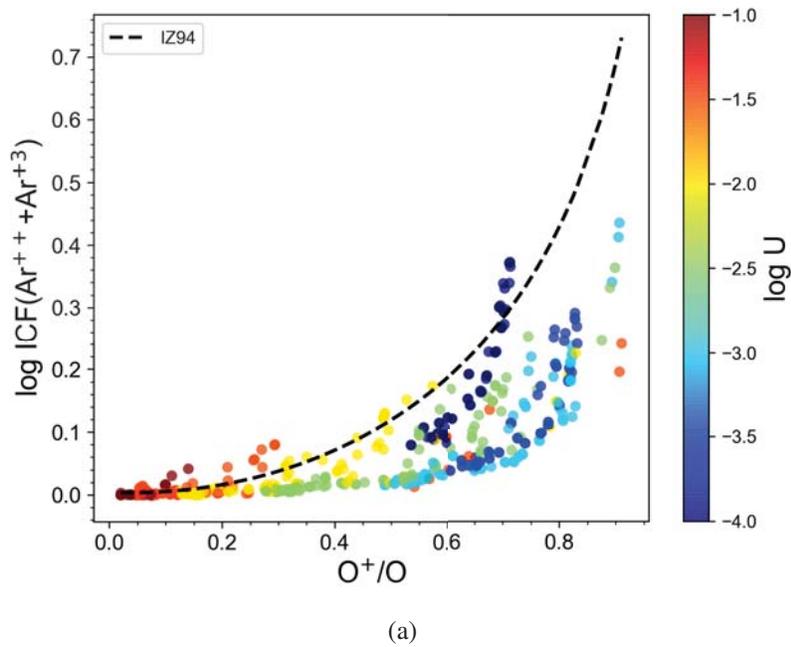


FIGURA 4.35: **a)**  $\text{ICF}_m(\text{Ar}^{++} + \text{Ar}^{+3})$  de nuestro conjunto de modelos en función de  $\text{O}^+/\text{O}$ . La línea discontinua representa el  $\log \text{ICF}_{\text{IZ94}}(\text{Ar}^{++} + \text{Ar}^{+3})$ . En la barra de color se muestran los valores del parámetro de ionización. **b)** Incertidumbre asociada al  $\text{ICF}_{\text{IZ94}}(\text{Ar}^{++} + \text{Ar}^{+3})$  en función de  $\text{O}^+/\text{O}$  para los modelos de fotoionización. Las líneas punteadas representan las incertidumbres máximas asociadas al  $\text{ICF}_{\text{IZ94}}(\text{Ar}^{++} + \text{Ar}^{+3})$ , mientras que las líneas discontinuas representan las incertidumbres de la mayoría de los modelos asociadas al ICF. La línea continua muestra donde el  $\text{ICF}_m(\text{Ar}^{++} + \text{Ar}^{+3})$  de los modelos es igual al ICF del ajuste.

Basados en modelos de fotoionización, Pérez-Montero et al. (2007) proponen cuatro ICFs para el argón en función de dos cocientes:  $O^{++}/(O^{+}+O^{++})$  (que se denomina  $\omega$ ) y  $S^{++}/(S^{+}+S^{++})$  (llamado  $\mu$ ). Para el caso en el que se observen líneas de  $Ar^{++}$  proponen:

$$\begin{aligned} ICF_{PM07}(Ar^{++}) &= 0.596 + 0.967(1 - \omega) + \frac{0.077}{1 - \omega} \\ &= 0.596 + 0.967(1 - \mu) + \frac{0.077}{1 - \mu}, \end{aligned} \quad (4.40)$$

Y para cuando además se observan líneas de  $Ar^{+3}$ , proponen:

$$\begin{aligned} ICF_{PM07}(Ar^{++} + Ar^{+3}) &= 0.928 + 0.364(1 - \omega) + \frac{0.006}{1 - \omega} \\ &= 0.870 + 0.695(1 - \mu) + \frac{0.0086}{1 - \mu}, \end{aligned} \quad (4.41)$$

En los paneles de lado izquierdo de las Figuras 4.36 y 4.37 se muestran con líneas discontinuas las expresiones del  $ICF_{PM07}(Ar^{++})$  y  $ICF_{PM07}(Ar^{++} + Ar^{+3})$  respectivamente, en función de  $O^{++}/(O^{+}+O^{++})$  y  $S^{++}/(S^{+}+S^{++})$ . En los paneles de lado derecho, se muestran las incertidumbres asociadas a cada expresión.

Se puede ver que la expresión del  $ICF_{PM07}(Ar^{++})$  en función de  $O^{++}/(O^{+}+O^{++})$  sigue la tendencia de los modelos, pero dada la dispersión de los modelos cuando  $O^{++}/(O^{+}+O^{++}) < 0.3$  y cuando  $O^{++}/(O^{+}+O^{++}) > 0.9$  el ajuste tiene una incertidumbre asociada significativa en estas regiones. Esta llega hasta  $\pm 0.25$  dex, para modelos en estos dos intervalos, sin embargo, la mayoría presenta un  $\Delta ICF_{PM07}(Ar^{++})$  de  $\pm 0.10$  dex. La dispersión de los modelos es aún mayor en el caso de la expresión de este ICF en función de  $S^{++}/(S^{+}+S^{++})$  para la cual la incertidumbre máxima llega hasta  $\pm 0.4$  dex. Para esta expresión, los valores de  $\Delta ICF_{PM07}(Ar^{++})$  representativos de la mayoría de modelos son de  ${}_{-0.1}^{+0.2}$  dex.

De manera similar, las dos expresiones del  $ICF_{PM07}(Ar^{++} + Ar^{+3})$  siguen la tendencia de los modelos pero debido a que estos presentan una dispersión significativa, los ajustes no son buenos. La expresión de este ICF en función de  $O^{++}/(O^{+}+O^{++})$  en general, subestima el ICF para la mayoría de los modelos y lo sobrestima para una fracción pequeña de ellos. Esta subestimación llega a ser de 0.33 dex, mientras que en algunos lo sobrestima hasta en 0.1 dex. Sin embargo, la incertidumbre asociada de la mayoría de los modelos para esta expresión es de  ${}_{-0.06}^{+0.20}$  dex. Por otro lado, la expresión de este ICF en función de  $S^{++}/(S^{+}+S^{++})$  subestima también el ICF en la mayoría de los casos, con una incertidumbre máxima asociada de  ${}_{-0.1}^{+0.4}$  dex pero con la incertidumbre asociadas al ICF de la mayoría de los modelos de  ${}_{-0.05}^{+0.20}$  dex.

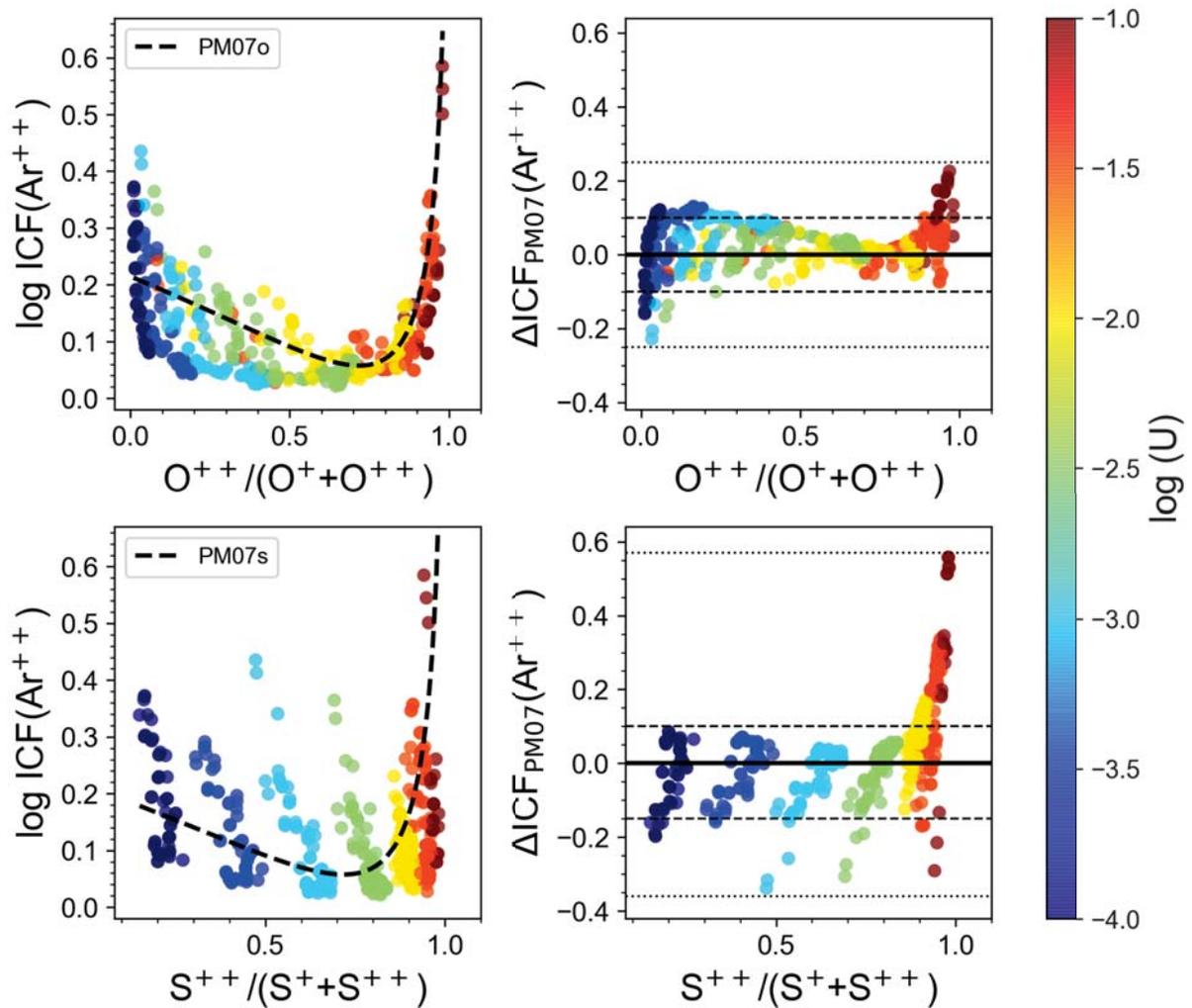


FIGURA 4.36: En las figuras de lado izquierdo, se muestran los valores del  $ICF_m(Ar^{++})$  de nuestro conjunto de modelos en función de  $O^{++}/(O^{++} + O^{+})$  y  $S^{++}/(S^{++} + S^{+})$ . Las líneas discontinuas en las dos figuras representan el  $\log ICF_{PM07}(Ar^{++})$  en cada caso. En la barra de color se muestran los valores del parámetro de ionización. En las figuras de lado derecho, se muestran las incertidumbres asociadas a los  $ICF_{PM07}(Ar^{++})$  en función de  $O^{++}/(O^{++} + O^{+})$  y  $S^{++}/(S^{++} + S^{+})$  con los modelos de fotoionización. Las líneas punteadas representan las incertidumbres máximas asociadas a los  $ICF_{PM07}(Ar^{++})$ , mientras que las líneas discontinuas representan las incertidumbres de la mayoría de los modelos asociadas al ICF. Las líneas continuas muestran donde se cumple que el  $ICF_m(Ar^{++})$  de los modelos es igual al ICF del ajuste.

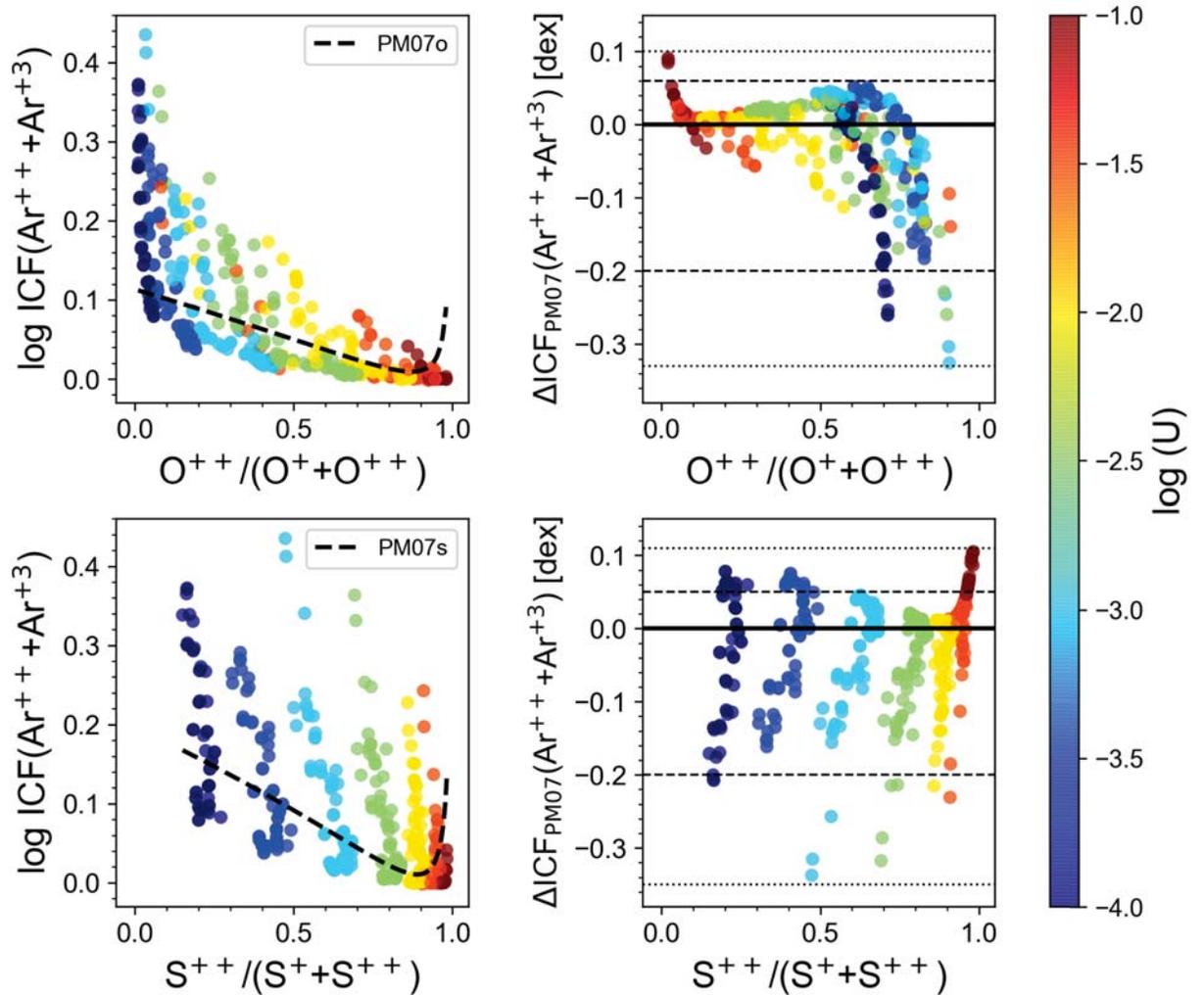


FIGURA 4.37: En las figuras de lado izquierdo, se muestran los valores del  $\text{ICF}_m(\text{Ar}^{++} + \text{Ar}^{+3})$  de nuestro conjunto de modelos en función de  $\text{O}^{++}/(\text{O}^{+} + \text{O}^{++})$  y  $\text{S}^{++}/(\text{S}^{+} + \text{S}^{++})$ . Las líneas discontinuas en las dos figuras representan el  $\log \text{ICF}_{\text{PM07}}(\text{Ar}^{++} + \text{Ar}^{+3})$  de cada caso. En la barra de color se muestran los valores del parámetro de ionización. En las figuras de lado derecho, se muestran las incertidumbres asociadas a los  $\text{ICF}_{\text{PM07}}(\text{Ar}^{++} + \text{Ar}^{+3})$  en función de  $\text{O}^{++}/(\text{O}^{+} + \text{O}^{++})$  y  $\text{S}^{++}/(\text{S}^{+} + \text{S}^{++})$  con los modelos de fotoionización. Las líneas punteadas representan las incertidumbres máximas asociadas al  $\text{ICF}_{\text{PM07}}(\text{Ar}^{++} + \text{Ar}^{+3})$ , mientras que las líneas discontinuas representan las incertidumbres de la mayoría de los modelos asociadas al ICF. Las líneas continuas muestran donde el  $\text{ICF}_m(\text{Ar}^{++} + \text{Ar}^{+3})$  de los modelos es igual al ICF del ajuste.

Basados en modelos de fotoionización, Izotov et al. (2006) proponen seis ICFs para el argón, en función de la metalicidad de la región H II. Para cuando sólo se observan líneas de  $\text{Ar}^{++}$  proponen:

$$\begin{aligned} \text{ICF}_{\text{IZ06}}(\text{Ar}^{++}) &= 0.278\nu + 0.836 + 0.051/\nu, \text{ cuando } 12 + \log(\text{O}/\text{H}) \leq 7.2 \\ &= 0.285\nu + 0.833 + 0.051/\nu, \text{ cuando } 7.2 < 12 + \log(\text{O}/\text{H}) < 8.2 \\ &= 0.517\nu + 0.763 + 0.042/\nu, \text{ cuando } 12 + \log(\text{O}/\text{H}) \geq 8.2, \end{aligned} \quad (4.42)$$

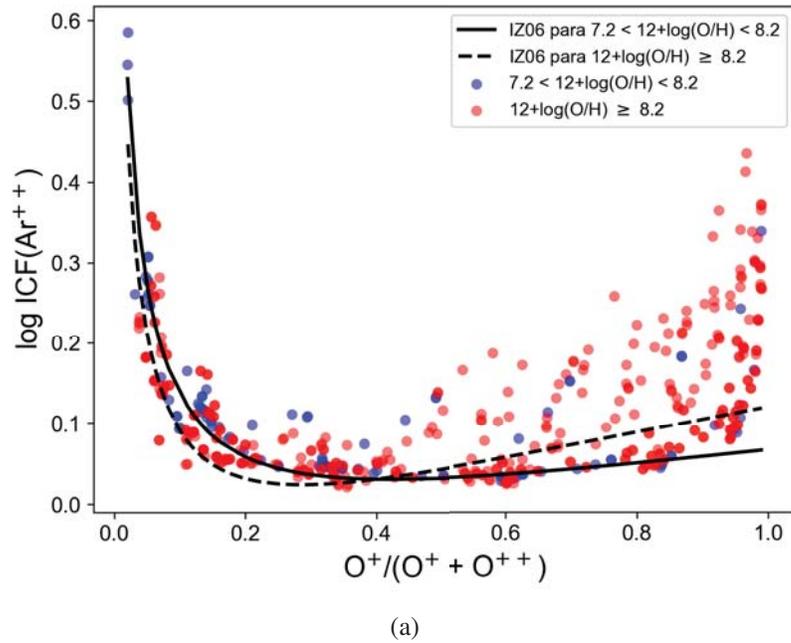
y para cuando además se observan líneas de  $\text{Ar}^{+3}$  proponen:

$$\begin{aligned} \text{ICF}_{\text{IZ06}}(\text{Ar}^{++} + \text{Ar}^{+3}) &= 0.158\nu + 0.958 + 0.004/\nu, \text{ cuando } 12 + \log(\text{O}/\text{H}) \leq 7.2 \\ &= 0.104\nu + 0.980 + 0.001/\nu, \text{ cuando } 7.2 < 12 + \log(\text{O}/\text{H}) < 8.2 \\ &= 0.238\nu + 0.931 + 0.004/\nu, \text{ cuando } 12 + \log(\text{O}/\text{H}) \geq 8.2, \end{aligned} \quad (4.43)$$

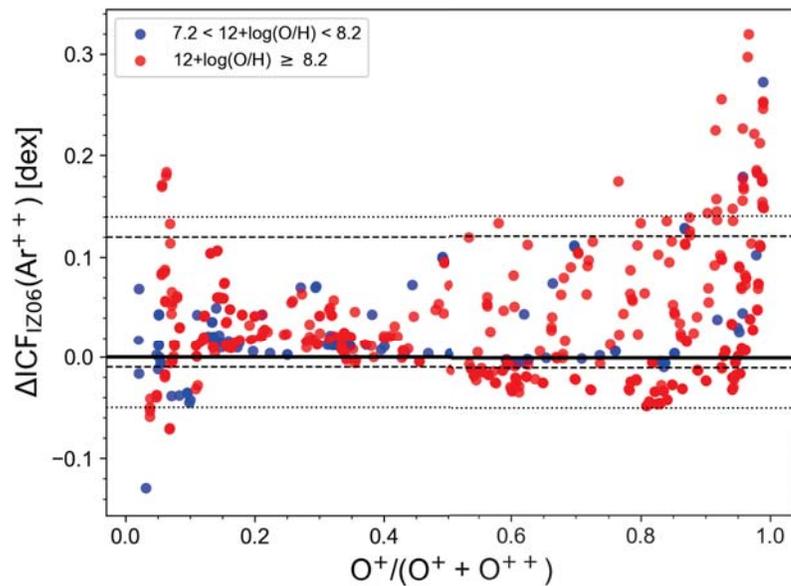
donde  $\nu = \text{O}^+ / (\text{O}^+ + \text{O}^{++})$ . En las Figuras 4.38a y 4.39a se muestran sólo la segunda y tercera expresión del  $\text{ICF}_{\text{IZ06}}(\text{Ar}^{++})$  y del  $\text{ICF}_{\text{IZ06}}(\text{Ar}^{++} + \text{Ar}^{+3})$  respectivamente, dada la metalicidad de nuestro conjunto de modelos. En estas dos figuras, los modelos con  $7.2 < 12 + \log(\text{O}/\text{H}) < 8.2$  se muestran en azul (a los cuales les corresponde el ajuste mostrado con una línea continua) y los que tienen  $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \geq 8.2$ , en rojo (cuyo ajuste propuesto se muestra con una línea discontinua). En general, las cuatro expresiones subestiman el ICF en nuestro conjunto de modelos. También, se puede ver que en estas dos figuras, la dispersión de los modelos es significativa cuando  $\text{O}^+ / (\text{O}^+ + \text{O}^{++}) > 0.4$ . En el caso del  $\text{ICF}_{\text{IZ06}}(\text{Ar}^{++})$ , las dos expresiones ajustan a los modelos por debajo de este límite pero a mayores valores de este cociente, su incertidumbre asociada aumenta. Algo similar pasa con el  $\text{ICF}_{\text{IZ06}}(\text{Ar}^{++} + \text{Ar}^{+3})$ , sin embargo, en este caso las dos expresiones subestiman el ICF para todos los valores de  $\text{O}^+ / (\text{O}^+ + \text{O}^{++})$ .

En las Figuras 4.38b y 4.39b se muestran las incertidumbres asociadas al ICF de la mayoría de los modelos asociadas a cada expresión: con líneas discontinuas para  $7.2 < 12 + \log(\text{O}/\text{H}) < 8.2$  y con líneas punteadas para  $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \geq 8.2$ .

Las dos expresiones en función de la abundancia de oxígeno del  $\text{ICF}_{\text{IZ06}}(\text{Ar}^{++})$  llegan a tener una incertidumbre máxima en modelos con  $\text{O}^+ / (\text{O}^+ + \text{O}^{++}) > 0.4$  de hasta  $^{+0.3}_{-0.1}$  dex. Sin embargo, se puede ver que para la mayoría de los modelos se tiene una incertidumbre de  $^{+0.10}_{-0.01}$  dex y  $^{+0.10}_{-0.05}$  dex para metalicidad intermedia y alta respectivamente. Para las expresiones del  $\text{ICF}_{\text{IZ06}}(\text{Ar}^{++} + \text{Ar}^{+3})$ , las incertidumbres máximas asociadas llegan a ser de hasta  $^{+0.21}_{-0.02}$  dex y  $^{+0.40}_{-0.03}$  dex, según la metalicidad, pero la mayoría de los modelos en cada grupo presenta una incertidumbre de  $^{+0.080}_{-0.002}$  dex y  $^{+0.13}_{-0.02}$  dex para  $7.2 < 12 + \log(\text{O}/\text{H}) < 8.2$  y  $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \geq 8.2$  respectivamente.



(a)



(b)

FIGURA 4.38: **a)** Valores del  $\text{ICF}_m(\text{Ar}^{++})$  de nuestro conjunto de modelos en función de  $\text{O}^+ / (\text{O}^+ + \text{O}^{++})$ . Los modelos con  $7.2 < 12 + \log(\text{O}/\text{H}) < 8.2$  se muestran en azul y en rojo se muestran aquellos con  $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \geq 8.2$ . La línea discontinua representa la expresión propuesta por Izotov et al. (2006) para modelos con  $7.2 < 12 + \log(\text{O}/\text{H}) < 8.2$  y la línea continua representa la expresión propuesta para modelos con  $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \geq 8.2$ . **b)** Incertidumbres asociadas a los  $\text{ICF}_{\text{IZ06}}(\text{Ar}^{++})$  en función de  $\text{O}^+ / (\text{O}^+ + \text{O}^{++})$ , con los modelos de fotoionización. Las líneas de puntos representan las incertidumbres de la mayoría de los modelos asociadas al  $\text{ICF}_{\text{IZ06}}(\text{Ar}^{++})$  para  $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \geq 8.2$ , mientras que las líneas discontinuas representan las incertidumbres de la mayoría de los modelos asociadas al  $\text{ICF}_{\text{IZ06}}(\text{Ar}^{++})$  para  $7.2 < 12 + \log(\text{O}/\text{H}) < 8.2$ . La línea continua representa donde el  $\text{ICF}_m(\text{Ar}^{++})$  de los modelos es igual al ICF del ajuste.

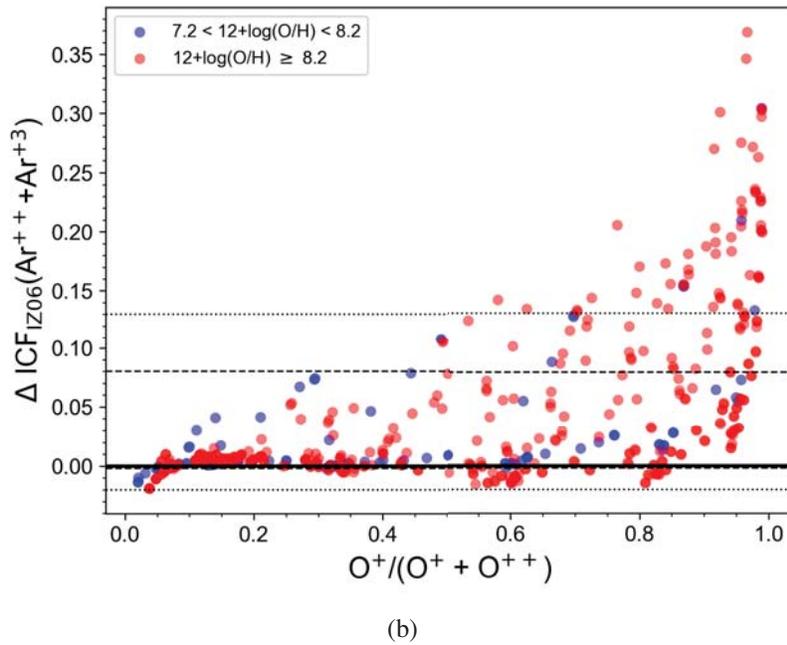
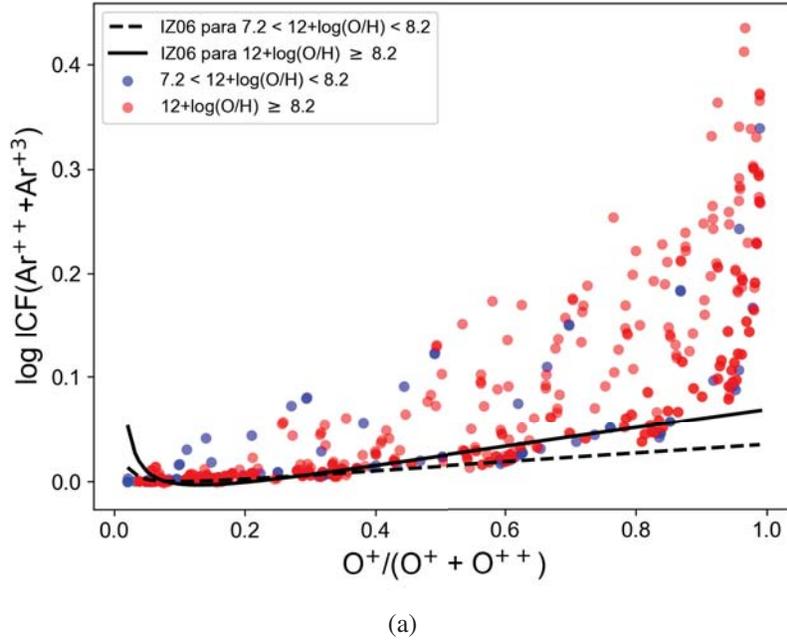


FIGURA 4.39: **a)** Valores del  $\text{ICF}_m(\text{Ar}^{++} + \text{Ar}^{+3})$  de nuestro conjunto de modelos en función de  $\text{O}^{+}/(\text{O}^{+} + \text{O}^{++})$ . Los modelos con  $7.2 < 12 + \log(\text{O}/\text{H}) < 8.2$  se muestran en azul y en rojo se muestran aquellos con  $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \geq 8.2$ . La línea discontinua representa la expresión propuesta por Izotov et al. (2006) para modelos con  $7.2 < 12 + \log(\text{O}/\text{H}) < 8.2$  y la línea continua representa la expresión propuesta para modelos con  $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \geq 8.2$ . **b)** Incertidumbres asociadas a los  $\text{ICF}_{\text{IZ06}}(\text{Ar}^{++} + \text{Ar}^{+3})$  en función de  $\text{O}^{+}/(\text{O}^{+} + \text{O}^{++})$ , con los modelos de fotoionización. Las líneas de puntos representan las incertidumbres de la mayoría de los modelos asociadas al  $\text{ICF}_{\text{IZ06}}(\text{Ar}^{++} + \text{Ar}^{+3})$  para  $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \geq 8.2$ , mientras que las líneas discontinuas representan las incertidumbres de la mayoría de los modelos asociadas al  $\text{ICF}_{\text{IZ06}}(\text{Ar}^{++} + \text{Ar}^{+3})$  para  $7.2 < 12 + \log(\text{O}/\text{H}) < 8.2$ . La línea continua representa donde el  $\text{ICF}_m(\text{Ar}^{++} + \text{Ar}^{+3})$  de los modelos es igual al  $\text{ICF}$  del ajuste.

Después de explorar con nuestro conjunto de modelos los ICFs previos de argón para el caso en el que sólo se observen líneas de  $\text{Ar}^{++}$ , se encontró que los que tienen una incertidumbre asociada menor son las expresiones de  $\text{ICF}_{\text{IZ06}}(\text{Ar}^{++})$  y la expresión del  $\text{ICF}_{\text{PM07}}(\text{Ar}^{++})$  en función del cociente  $\text{O}^+ / (\text{O}^+ + \text{O}^{++})$ . Estas expresiones tienen una complejidad similar, por lo que ninguna de las dos opciones representa ventajas sobre la otra y se puede utilizar cualquiera de ellas para obtener la abundancia de argón (aunque las dos expresiones del  $\text{ICF}_{\text{IZ06}}(\text{Ar}^{++})$  requieren de conocer previamente la metalicidad de la región H II).

Por otro lado, para cuando también se observan líneas de  $\text{Ar}^{+3}$  las expresiones con menor incertidumbre asociada corresponden a los  $\text{ICF}_{\text{IZ06}}(\text{Ar}^{++} + \text{Ar}^{+3})$ , por lo que en este trabajo concluimos que es la mejor opción disponible para calcular la abundancia de argón, excepto para cuando la abundancia de oxígeno es  $12 + \log(\text{O}/\text{H}) > 8.2$ , ya que la expresión propuesta por los autores para objetos en este intervalo no pudo ser estudiada aquí. En el caso en el que no se conozca la abundancia de oxígeno previamente se pueden utilizar las expresiones de Pérez-Montero et al. (2007) en función de  $\text{O}^+ / (\text{O}^+ + \text{O}^{++})$ , cuya incertidumbre y complejidad fueron similares a los de las expresiones del  $\text{ICF}_{\text{IZ06}}(\text{Ar}^{++} + \text{Ar}^{+3})$ .

4.8.2 Cálculo del ICF( $\text{Ar}^{++}$ )

Al explorar con nuestro conjunto de modelos las fracciones iónicas de argón, se encontró que los iones que contribuyen de manera más importante son  $\text{Ar}^+$ ,  $\text{Ar}^{++}$  y  $\text{Ar}^{+3}$ . En la Figura 4.40 se puede ver que el ion  $\text{Ar}^+$  contribuye hasta en 60% a la abundancia total de argón para objetos con  $\text{O}^{++}/(\text{O}^++ + \text{O}^{++}) \leq 0.3$ , el  $\text{Ar}^{++}$  representa hasta un 90% de la abundancia total en objetos con  $0.3 < \text{O}^{++}/(\text{O}^++ + \text{O}^{++}) < 0.9$  y el  $\text{Ar}^{+3}$  representa hasta un  $\sim 60\%$  del argón únicamente en modelos con  $\text{O}^{++}/(\text{O}^++ + \text{O}^{++}) > 0.9$ . Los iones  $\text{Ar}^{+4}$ ,  $\text{Ar}^{+5}$  y  $\text{Ar}^{+6}$ , contribuyen en  $\ll 1\%$  para todos los grados de ionización. Por lo tanto, si en una región H II sólo se observa el ion  $\text{Ar}^{++}$ , el ICF será significativo en objetos con  $\text{O}^{++}/(\text{O}^++ + \text{O}^{++}) < 0.3$  o  $\text{O}^{++}/(\text{O}^++ + \text{O}^{++}) > 0.9$ , donde la contribución de los iones  $\text{Ar}^+$  y  $\text{Ar}^{+3}$  es importante. Sin embargo, si además se observan líneas de  $\text{Ar}^{+3}$ , el ICF sólo será considerable cuando  $\text{O}^{++}/(\text{O}^++ + \text{O}^{++}) < 0.3$ , donde contribuye de manera importante el ion  $\text{Ar}^+$ .

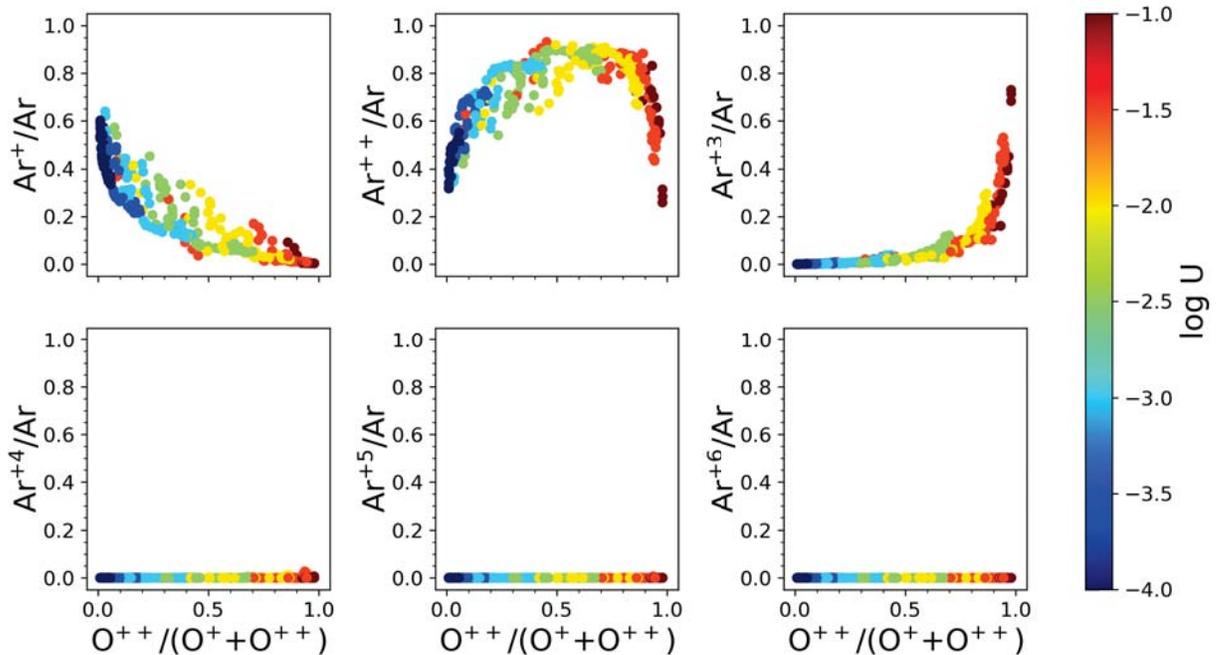


FIGURA 4.40: Fracción iónica de  $\text{Ar}^+$ ,  $\text{Ar}^{++}$ ,  $\text{Ar}^{+3}$ ,  $\text{Ar}^{+4}$ ,  $\text{Ar}^{+5}$  y  $\text{Ar}^{+6}$  en función del cociente  $\text{O}^{++}/(\text{O}^++ + \text{O}^{++})$  para los modelos de fotoionización. En la barra de color se indica el valor del parámetro de ionización de los modelos.

Primero, se calculó el ICF para el caso en el que sólo se observan líneas de  $\text{Ar}^{++}$ . En la Figura 4.41 se muestran las opciones exploradas para el  $\text{ICF}_m(\text{Ar}^{++})$  de las que se seleccionaron los paneles **d**, **h** y **l** para calcular un ajuste debido a que estos tres paneles muestran una dispersión ligeramente menor que las demás opciones.

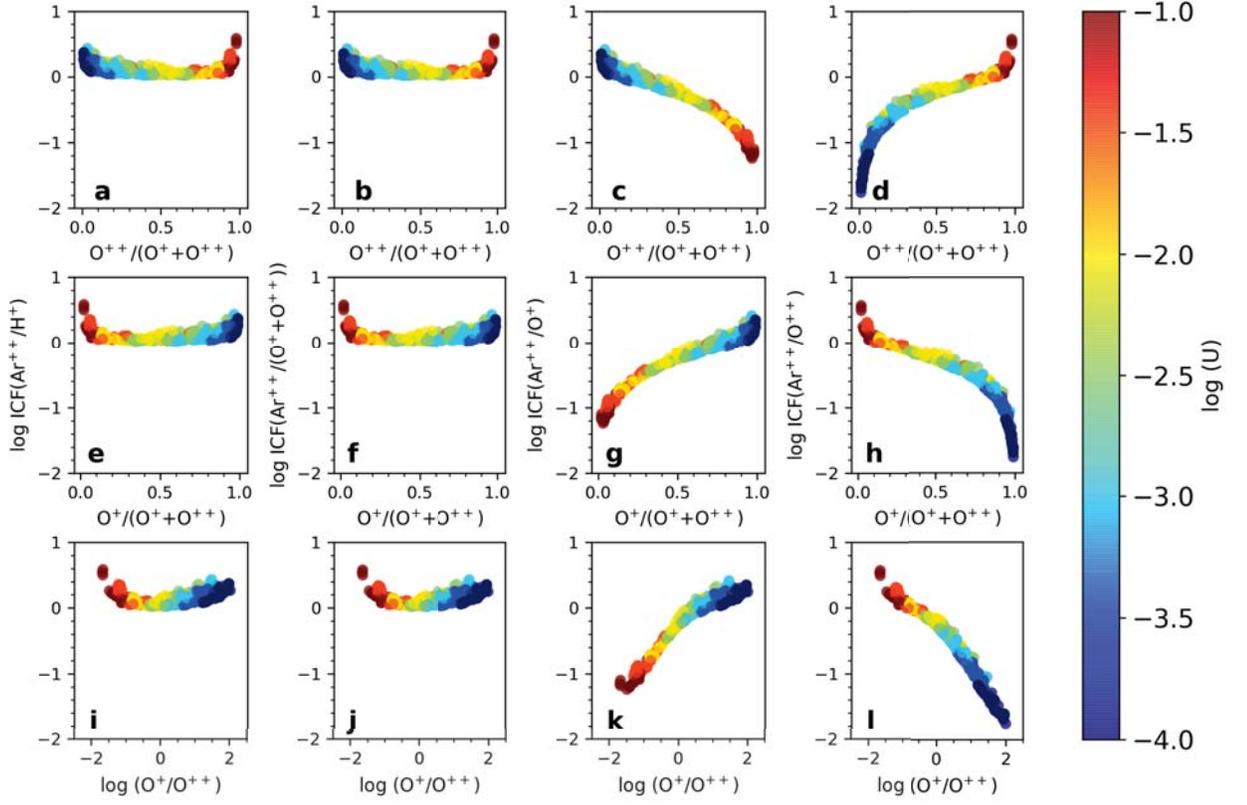


FIGURA 4.41: Opciones exploradas para el  $\text{ICF}_m(\text{Ar}^{++})$  en función de los cocientes  $\text{O}^{++}/(\text{O}^+ + \text{O}^{++})$ ,  $\text{O}^+ / (\text{O}^+ + \text{O}^{++})$  y  $\log(\text{O}^+ / \text{O}^{++})$ . En la barra de color se indica el valor del parámetro de ionización de los modelos.

Las expresiones analíticas de los ajustes calculados para cada panel son:

$$\log \text{ICF}_f(\text{Ar}^{++} / \text{O}^{++}) = 0.50 \omega^{\frac{14.30}{\omega}} + 0.40 \ln(\omega) + 0.03, \quad (4.44)$$

$$\log \text{ICF}_f(\text{Ar}^{++} / \text{O}^{++}) = 0.30 \ln(-0.60 \ln(1.03(\nu - 0.02))), \quad (4.45)$$

$$\log \text{ICF}_f(\text{Ar}^{++} / \text{O}^{++}) = -0.30 - 0.50\eta - 0.10\eta^2 - 0.02\eta^3, \quad (4.46)$$

donde  $\omega = \text{O}^{++}/(\text{O}^+ + \text{O}^{++})$ ,  $\nu = \text{O}^+ / (\text{O}^+ + \text{O}^{++})$  y  $\eta = \log(\text{O}^+ / \text{O}^{++})$ . Estos ajustes se muestran con líneas continuas en los paneles izquierdos de la Figura 4.42 mientras que en los paneles derechos se muestran las incertidumbres asociadas a cada ajuste; con líneas punteadas se indican los valores máximos de  $\Delta \text{ICF}_f(\text{Ar}^{++})$  y con líneas discontinuas se muestran las incertidumbres asociadas al ICF de la mayoría de los modelos. Para los ajustes

de las ecuaciones 4.44, 4.45 y 4.46 (de los paneles **d**, **h** y **l**), las incertidumbres máximas llegan hasta  $^{+0.3}_{-0.1}$  dex, mientras que la incertidumbre asociada al ICF de la mayoría de los modelos fue de  $\pm 0.1$  dex para las ecuaciones 4.44, 4.46 y de  $^{+0.2}_{-0.1}$  dex para el ajuste de la ecuación 4.45.

De los tres ajustes calculados, los ajustes con menor incertidumbre asociada son los de las ecuaciones 4.44, 4.46 y aunque las expresiones analíticas de los tres ajustes son complicadas, la expresión 4.46 tiene una forma ligeramente más sencilla. Por lo tanto, seleccionamos esta expresión analítica como nuestro  $ICF_f(\text{Ar}^{++})$ .

La incertidumbre asociada a este ajuste es, de hecho, muy similar a la de las expresiones del  $ICF_{IZ06}(\text{Ar}^{++})$  y a la expresión del  $ICF_{PM07}(\text{Ar}^{++})$  en función del cociente  $O^+/(O^+ + O^{++})$ , pero esta expresión analítica es un poco más sencilla y, a diferencia de los  $ICF_{IZ06}(\text{Ar}^{++})$ , funciona para cualquier grado de ionización. Por ello, en este trabajo seleccionamos la ecuación 4.46 para el cálculo de la abundancia de argón en regiones H II cuando sólo se observan líneas de [Ar III].

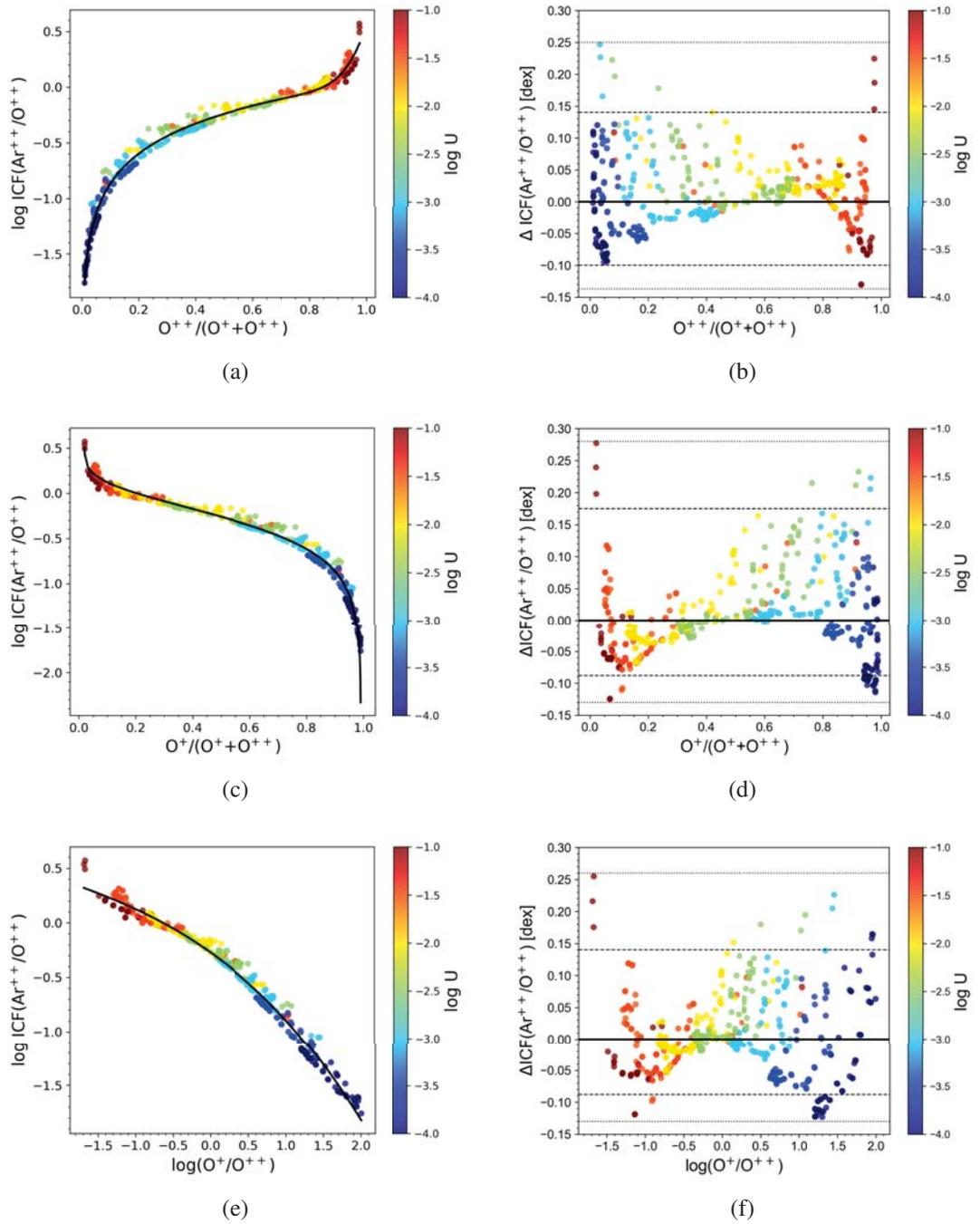


FIGURA 4.42: Valores del  $\log \text{ICF}(\text{Ar}^{++}/\text{O}^{++})$  en función de  $\text{O}^{++}/(\text{O}^{+}+\text{O}^{++})$ ,  $\text{O}^{+}/(\text{O}^{+}+\text{O}^{++})$  y  $\log(\text{O}^{+}/\text{O}^{++})$ . Los ajustes se muestran en las figuras de lado izquierdo con líneas continuas y las incertidumbres asociadas a cada ajuste,  $\Delta \text{ICF}(\text{Ar}^{++})$ , se muestran en los paneles de lado derecho. Las incertidumbres máximas se muestran con líneas punteadas y las incertidumbres asociadas al ICF de la mayoría de los modelos con líneas discontinuas. La línea continua en las figuras de lado derecho, representa donde el  $\text{ICF}_m(\text{Ar}^{++})$  de los modelos es igual al  $\text{ICF}_f(\text{Ar}^{++})$  del ajuste.

### 4.8.3 Cálculo del $\text{ICF}(\text{Ar}^{++} + \text{Ar}^{+3})$

De las opciones mostradas en la Figura 4.43 se seleccionaron los paneles **d**, **h** y **l** para derivar un ajuste, debido a que en estos paneles los modelos presentan una menor dispersión, por lo que se puede calcular un mejor ajuste.

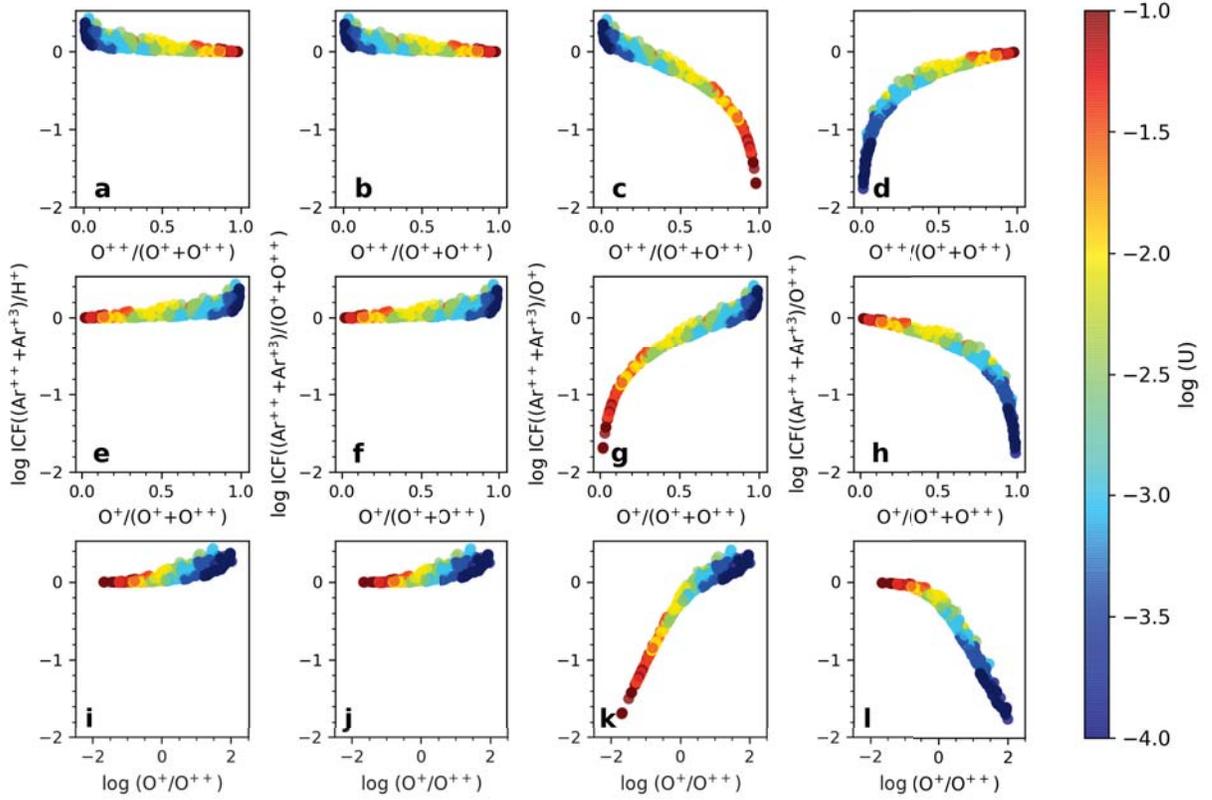


FIGURA 4.43: Opciones exploradas para el  $\text{ICF}_m(\text{Ar}^{++} + \text{Ar}^{+3})$  en función de los cocientes  $\text{O}^{++}/(\text{O}^{+} + \text{O}^{++})$ ,  $\text{O}^{+}/(\text{O}^{+} + \text{O}^{++})$  y  $\log(\text{O}^{+}/\text{O}^{++})$ . En la barra de color se indica el valor del parámetro de ionización de los modelos.

Las expresiones analíticas de cada ICF propuesto para cada panel (**d**, **h** y **l** respectivamente) son:

$$\log \text{ICF}_f((\text{Ar}^{++} + \text{Ar}^{+3})/\text{O}^{++}) = -5.4(\omega + 0.01)^{-0.10} + 5.4, \quad (4.47)$$

$$\log \text{ICF}_f((\text{Ar}^{++} + \text{Ar}^{+3})/\text{O}^{++}) = \frac{0.10\nu}{-1.06 + \nu} - 0.70\nu \quad (4.48)$$

$$\log \text{ICF}_f((\text{Ar}^{++} + \text{Ar}^{+3})/\text{O}^{++}) = -1.8e^{\frac{\eta-2.5}{-3.2}}, \quad (4.49)$$

De lado derecho de la Figura 4.44 se muestran los modelos de fotoionización con estas tres expresiones analíticas representadas con una línea continua, y de lado izquierdo se muestran las incertidumbres máximas (líneas punteadas) y las de la mayoría de los modelos (líneas discontinuas) asociadas a cada expresión.

Como se muestra en la Figura 4.44, las incertidumbres máximas asociadas a las ecuaciones 4.47, 4.48 y 4.49 son de  $^{+0.3}_{-0.1}$  dex en los tres casos, mientras que las incertidumbres asociadas al ICF de la mayoría de los modelos son de  $^{+0.04}_{-0.03}$  dex para las ecuaciones 4.47 y 4.49 (de los ajustes para los paneles **d** y **l**) y de  $^{+0.06}_{-0.04}$  dex para la ecuación 4.48 del ajuste para el panel **h**. De los tres ajustes calculados, se puede notar que las incertidumbres estimadas son similares pero las ecuaciones con menor incertidumbre asociada son las ecuaciones 4.47 y 4.49. Sin embargo, al comparar las expresiones analíticas de estos dos ajustes, se puede ver que la expresión 4.47 del panel **d** es un poco más sencilla y, por lo tanto, seleccionamos esta expresión como nuestro  $ICF_f(Ar^{++}+Ar^{+3})$ . Esta expresión tiene una incertidumbre asociada similar a los ICFs previos revisados anteriormente y es igual de compleja que las expresiones de estos; por ello, concluimos que no fue posible mejorar el ajuste para el  $ICF(Ar^{++}+Ar^{+3})$ , pero que se puede utilizar la expresión propuesta en este trabajo para el cálculo de la abundancia total de argón.

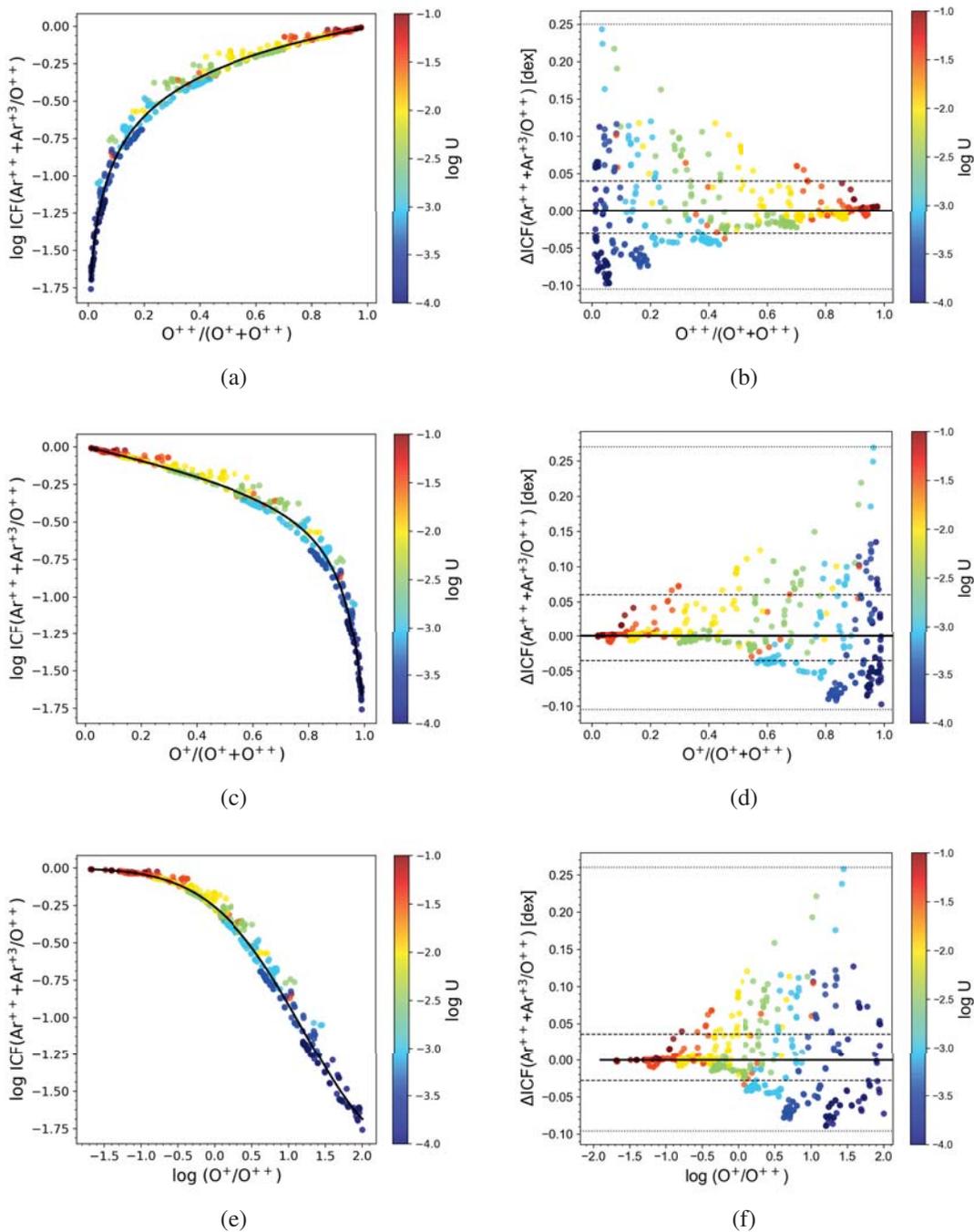


FIGURA 4.44: Valores del  $\log \text{ICF}(\text{Ar}^{++} + \text{Ar}^{+3}/\text{O}^{++})$  en función de  $\text{O}^{++}/(\text{O}^{+} + \text{O}^{++})$ ,  $\text{O}^{+}/(\text{O}^{+} + \text{O}^{++})$  y  $\log(\text{O}^{+}/\text{O}^{++})$ . Los ajustes se muestran en las figuras de lado izquierdo con líneas continuas y las incertidumbres asociadas a cada ajuste,  $\Delta \text{ICF}(\text{Ar}^{++} + \text{Ar}^{+3})$ , se muestran en los paneles de lado derecho. Las incertidumbres máximas se muestran con líneas punteadas y las incertidumbres asociadas al ICF de la mayoría de los modelos con líneas discontinuas. La línea continua en las figuras de lado derecho, representa donde el  $\text{ICF}_m(\text{Ar}^{++} + \text{Ar}^{+3})$  de los modelos es igual al  $\text{ICF}_f(\text{Ar}^{++} + \text{Ar}^{+3})$  del ajuste.

En la Tabla 3.1, se muestran las expresiones de los ICFs finales, seleccionadas de los ajustes derivados para cada elemento en este trabajo. En la primera columna se muestra la abundancia del elemento obtenida al utilizar el ICF propuesto, la segunda columna muestra en función a la observación de qué líneas se estimó el ICF. La tercera columna contiene las expresiones finales para el log  $ICF_f$  de cada elemento, usando la notación explicada al inicio de este capítulo. Finalmente, las columnas cuarta y quinta muestran los valores superiores e inferiores de las incertidumbres típicas asociadas en la mayoría de los modelos estimada para cada expresión.

Abundancia	Iones Observados	$\log \text{ICF}_f$	$x$	Incertidumbre (dex)
S/O	S <sup>+</sup>	$\log \text{ICF}(\text{S}^+/\text{O}^{++}) = (-0.9 + x)/(-0.3 + 0.3x^2)$	$\text{O}^+ / (\text{O}^+ + \text{O}^{++})$	$\pm 0.3$
	S <sup>+</sup> +S <sup>++</sup>	$\log \text{ICF}(\text{S}^+ + \text{S}^{++}/\text{O}^+) = 1.5x^{0.3-0.3x} - 1.7$	$\text{O}^+ / (\text{O}^+ + \text{O}^{++})$	$^{+0.07}$ $_{-0.06}$
N/O	N <sup>+</sup>	$\log \text{ICF}(\text{N}^+/\text{O}^{++}) = (x - 1.0)/(0.2x^2 - 0.3) - 2.0$	$\text{O}^+ / (\text{O}^+ + \text{O}^{++})$	$\pm 0.1$
Ar/O	Ar <sup>++</sup>	$\log \text{ICF}(\text{Ar}^{++}/\text{O}^{++}) = -0.30 - 0.50x - 0.10x^2 - 0.02x^3$	$\log (\text{O}^+ / \text{O}^{++})$	$\pm 0.1$
	Ar <sup>++</sup> +Ar <sup>+3</sup>	$\log \text{ICF}(\text{Ar}^{++} + \text{Ar}^{+3}/\text{O}^{++}) = -5.4(x+0.01)^{-0.10} + 5.4$	$\text{O}^{++} / (\text{O}^+ + \text{O}^{++})$	$^{+0.04}$ $_{-0.03}$
Ne/O	Ne <sup>++</sup>	$\log \text{ICF}(\text{Ne}^{++}/\text{O}^{++}) = 0.015$	-	$\pm 0.2$
Cl/O	Cl <sup>++</sup>	$\log \text{ICF}(\text{Cl}^{++}/\text{O}^+) = 0.0011e^{6.5x} - 1.2e^{-3.6x}$	$\text{O}^+ / (\text{O}^+ + \text{O}^{++})$	$\pm 0.1$
C/O	C <sup>++</sup>	$\log \text{ICF}(\text{C}^{++}/\text{O}^+) = 0.003e^{5.8x} - 1.5e^{-4.2x}$	$\text{O}^{++} / (\text{O}^+ + \text{O}^{++})$	$\pm 0.1$

TABLA 4.1: Expresiones analíticas de los ICFs calculados para cada elemento.

# 5

## CÁLCULO DE ABUNDANCIAS QUÍMICAS CON NUESTROS ICFs

En este capítulo se usan los ICFs obtenidos en el capítulo anterior para calcular las abundancias químicas en un conjunto de galaxias azules compactas (BCG) y regiones H II gigantes (GHR). Para esto, primero se determinaron las condiciones físicas, luego las abundancias iónicas y finalmente, las abundancias totales de cada elemento. Se compararon las abundancias de cada elemento, obtenidas utilizando distintos ICFs, y se analizaron las tendencias de las abundancias con el grado de ionización y de las abundancias relativas con respecto a la abundancia de oxígeno. No fue posible estudiar los ICFs de C y Cl debido a que en nuestro conjunto de observaciones no se tienen líneas de estos elementos.

### 5.1 Condiciones físicas

En primer lugar, utilizando las líneas de emisión corregidas por extinción en cada objeto de la muestra observacional, se determinaron la temperatura electrónica ( $T_e$ ) y densidad electrónica ( $n_e$ ) a partir de cocientes sensibles a estos parámetros físicos, utilizando el código PyNeb (Luridiana et al. 2015). Como los objetos de la muestra BCG no presentan la línea [O III]  $\lambda 5007$  y dado que se buscó aplicar un proceso lo más homogéneo posible a todos los objetos, la  $T_e$  se determinó a partir del cociente [O III]  $\lambda 4363/\lambda 4959$ . Las densidades ( $n_e$ ) fueron estimadas a partir del cociente de líneas [S II]  $\lambda 6731/\lambda 6716$ . Para los objetos para los que no fue posible estimar la densidad, se supuso una densidad de  $100 \text{ cm}^{-3}$ , valor típico de la densidad de regiones H II gigantes (Stasińska 2002).

PyNeb permite la selección y modificación de los datos atómicos con los que se trabajará, por lo que para los iones  $S^+$  y  $O^{++}$  se seleccionaron los datos atómicos mostrados en la Tabla 5.1. Para esta selección (y para los datos atómicos de todos los demás iones), se excluyeron los datos atómicos identificados por Juan de Dios & Rodríguez (2017) que llevan a valores extremos en la densidad. En su lugar, se seleccionaron aquellos con los que la densidad calculada es consistente con la que se obtiene con la mayoría de los datos atómicos disponibles. Siguiendo este método, fue posible determinar  $T_e$  y  $n_e$  para 23 de 694 objetos del conjunto GHR y fue posible determinar la temperatura electrónica en los 140 objetos BCG, lo que da un total de 163 objetos para los que fue posible calcular las abundancias iónicas.

Para determinar los valores finales de  $T_e$ ,  $n_e$  y sus incertidumbres asociadas, se realizó una simulación Monte Carlo de 300 experimentos. Este número se seleccionó después de explorar valores mayores de números aleatorios, donde se encontró que la estimación de los parámetros físicos y sus incertidumbres no variaban significativamente con números mayores de experimentos. Además, con este valor fue posible trabajar con un tiempo computacional razonable.

Ion	Probabilidades de transición	Fuerzas de colisión
$O^+$	Froese Fischer & Tachiev (2004)	Kisielius et al. (2009)
$O^{++}$	Wiese et al. (1996) Storey & Zeippen (2000)	Storey et al. (2014)
$N^+$	Froese Fischer & Tachiev (2004)	Lennon & Burke (1994)
$S^+$	Podobedova et al. (2009) Tayal & Zatsarinny (2010)	Ramsbottom et al. (1996)
$S^{++}$	Podobedova et al. (2009)	Tayal & Gupta (1999)
$Ne^{++}$	Galavis et al. (1997)	McLaughlin & Bell (2000)
$Ar^{++}$	Munoz Burgos et al. (2009)	Munoz Burgos et al. (2009)
$Ar^{+3}$	Mendoza & Zeippen (1982) Kaufman & Sugar (1986)	Ramsbottom & Bell (1997)

TABLA 5.1: Datos atómicos utilizados en este trabajo.

En primer lugar, se generó una distribución gaussiana centrada en el valor de las intensidades observadas y con una desviación estándar igual al error de la línea observada. Después, se calcularon la  $T_e$  y  $n_e$  con PyNeb para cada valor Monte Carlo, dando como resultado una distribución para la temperatura y una distribución para la densidad para cada objeto de la muestra. Para el valor final de  $T_e$  y  $n_e$  se tomó la mediana de cada distribución debido a que la mediana se ve menos afectada por cambios pequeños en el cociente de líneas, a diferencia del promedio. Para las incertidumbres asociadas a cada valor de temperatura y densidad de cada objeto, se tomó el intervalo alrededor de la mediana de cada distribución

cuya probabilidad acumulada es de 68%.

En la Tabla 5.2, como ejemplo, se muestran los valores finales de  $T_e$ ,  $n_e$  y sus incertidumbres asociadas para 10 objetos de los conjuntos BCG y GHR. En general, se encontró que los valores determinados aquí son consistentes con los de la literatura. Por ejemplo, al comparar las temperaturas calculadas aquí para 14 objetos BCG con las estimadas por Izotov & Thuan (2004) para los mismos objetos, la diferencia máxima entre el valor reportado por los autores y nuestra temperatura calculada es de hasta 600 K. En cuanto a la densidad, el valor promedio de las densidades estimadas por los autores para estos objetos es de  $60 \text{ cm}^{-3}$ , que es similar al supuesto en este trabajo para estos objetos. En el caso de los objetos GHR, al comparar las condiciones físicas calculadas aquí para 18 objetos con los valores estimados por Kennicutt et al. (2003), se encontró que la diferencia entre sus temperaturas y las nuestras es inferior a 650 K, mientras que para la densidad los autores proponen un límite superior de  $100 \text{ cm}^{-3}$  a partir de la inspección de las líneas [S II]  $\lambda 6717$  y [S II]  $\lambda 6731$ . Los pocos objetos en los que se encontraron pequeñas diferencias con la literatura se pueden atribuir por un lado, al uso de cocientes distintos para determinar las condiciones físicas y por otro al uso de datos atómicos distintos para su determinación.

En el caso de los objetos BCG, por ejemplo, Izotov & Thuan (2004) utilizan el cociente [O III]  $\lambda 4363/\lambda\lambda(4959+5007)$  para determinar  $T_e$  (distinto al utilizado aquí de [O III]  $\lambda 4363/\lambda 4959$ ) y el cociente [S II]  $\lambda 6717/\lambda 6731$  para la  $n_e$  (a diferencia de este trabajo en el que se supuso una  $n_e$  de  $100 \text{ cm}^{-3}$ ), y utilizan datos atómicos distintos a los utilizados en este trabajo. Para los objetos GHR que comparamos con la literatura, aunque Kennicutt et al. (2003) utilizan el mismo cociente para estimar la temperatura y se basan en el mismo cociente para proponer el límite superior de la densidad, las diferencias encontradas se deben a que los autores utilizan datos atómicos distintos a los utilizados en este trabajo.

## 5.2 Abundancias iónicas

Para todos los objetos de la muestra, las abundancias iónicas se estimaron a partir de las líneas de excitación colisional más intensas de cada ion, utilizando los datos atómicos mostrados en la Tabla 5.1.

La abundancia iónica de  $O^+$  se estimó a partir de el doblete [O II]  $\lambda 3726 + \lambda 3729$  mientras que la abundancia del ion  $O^{++}$  se estimó a partir de las líneas [O III]  $\lambda\lambda 4959, 5007$ . Para la abundancia iónica del único ion de nitrógeno observado,  $N^+$ , se utilizaron las líneas [N II]  $\lambda\lambda 6548, 6584$ . Para los iones  $S^+$  y  $S^{++}$  del azufre, la abundancia iónica se calculó a partir de las líneas [S II]  $\lambda\lambda 6716, 6731$  y [S III]  $\lambda 6312$ , respectivamente (debido a que en ninguna de nuestras muestras se tenía disponibles las líneas de azufre de [S III]  $\lambda 9069$  y [S III]  $\lambda 9532$ ). La abundancia del ion  $Ne^{++}$  se estimó a partir de la línea [Ne III]  $\lambda 3869$ . Finalmente, para la abundancia iónica de los iones  $Ar^{++}$  y  $Ar^{+3}$  las líneas utilizadas fueron [Ar III]  $\lambda 7136$  y [Ar IV]  $\lambda 4740$ , respectivamente.

A partir de estas líneas y utilizando la  $T_e$  y  $n_e$  obtenidas en la sección anterior, se calcularon las abundancias iónicas de  $O^+$ ,  $O^{++}$ ,  $N^+$ ,  $S^+$ ,  $S^{++}$ ,  $Ne^{++}$ ,  $Ar^{++}$  y  $Ar^{+3}$ . Este

Muestra	Nombre	$T_e[\text{O III}]$ (K)	$n_e$ [S II] ( $\text{cm}^3$ )
BCG	HS0111+2115	$11140^{+100}_{-90}$	100
	Haro_3	$10140^{+70}_{-50}$	100
	Mrk_1315	$10980 \pm 100$	100
	Mrk1329	$10730^{+100}_{-90}$	100
	HS2359+1659	$11890 \pm 100$	100
	NGC_1140	$10200^{+40}_{-60}$	100
	HS0735+3512	$12040 \pm 100$	100
	HS1213+3636A	$10800^{+70}_{-60}$	100
	HS1311+3628	$11360 \pm 100$	100
	Mrk_450_1	$11660^{+90}_{-100}$	100
GHR	NGC_5457_H1105	$8830 \pm 200$	$210 \pm 100$
	NGC_5457_H1159	$9580 \pm 600$	$40^{+60}_{-30}$
	NGC_5457_H1176	$9920^{+300}_{-500}$	$60^{+70}_{-40}$
	NGC_5457_H1216	$11320^{+300}_{-200}$	$70^{+60}_{-50}$
	NGC_5457_H149_2	$9550^{+500}_{-700}$	$120^{+80}_{-70}$
	NGC_5457_H409	$9750^{+200}_{-300}$	$180 \pm 100$
	NGC_5457_H67	$11400^{+600}_{-500}$	$70^{+100}_{-60}$
	NGC_5457_N5471-A	$13070^{+200}_{-300}$	$200 \pm 100$
	M31_H25	$9280^{+300}_{-200}$	$100^{+80}_{-70}$
	M31_H26	$9390 \pm 300$	$70^{+100}_{-50}$

TABLA 5.2: Valores de  $T_e$  y  $n_e$  para diez objetos de las muestras BCG y GHR estudiadas en este trabajo.

cálculo se llevó a cabo utilizando la función *getIonAbundance* de PyNeb la cual dada una temperatura, una densidad y la intensidad de una línea, calcula las abundancias iónicas con respecto a  $H^+$ .

Para estimar las incertidumbres asociadas a las abundancias iónicas, se llevó a cabo un proceso similar al explicado en la sección anterior. De la distribución de abundancia obtenida para cada ion, se tomó la mediana como valor final y para la incertidumbre asociada, se consideró el intervalo en torno a la mediana donde se tenía el 68% de probabilidad acumulada, como se explicó en la sección anterior.

En la Tabla 5.3 se muestran, como ejemplo, las abundancias iónicas obtenidas en  $12 + \log(X^{+i}/H^+)$  (donde  $X^{+i}$  corresponde a cada ion) para los mismos diez objetos de cada muestra cuya temperatura y densidad se mostró en la sección anterior.

### 5.3 Abundancias totales

Una vez calculadas las abundancias iónicas de todos los iones, se determinaron las abundancias químicas totales de cada elemento. Para cada elemento se calculó la abundancia total utilizando el ICF propuesto en este trabajo y otros ICFs previos de la literatura, con el fin de comparar los resultados. A continuación se muestran los resultados para cada elemento. También, se muestran las abundancias totales con respecto al grado de ionización dado por  $O^{++}/(O^+ + O^{++})$ . Las barras de error que se muestran en cada figura son las que resultan solamente de la simulación Monte Carlo realizada a partir de las líneas de emisión, es decir, no se incluyen aquí las incertidumbres asociadas a cada ICF. No se ha incluido el error asociado a cada ICF porque la incertidumbre asociada a cada uno hasta ahora ha sido sólo una estimación. Se profundizará en el cálculo de la incertidumbre asociada a cada expresión en un trabajo a futuro.

#### 5.3.1 Oxígeno

En la Figura 5.1 se muestra la abundancia de oxígeno expresada en  $12 + \log(O/H)$  con respecto a  $O^{++}/(O^+ + O^{++})$  para los objetos BCG y GHR. La abundancia total se determinó sumando las abundancias iónicas de  $O^+$  y  $O^{++}$  ya que, como se vio en la sección anterior, la contribución del ion  $O^{+3}$  es de máximo 0.02 dex (valor que se alcanza sólo en modelos con  $\log U \sim -4.0$  y  $\log U \sim -1.5$ , como se vio en la Figura 4.2 del capítulo anterior) por lo que no es necesario considerar un ICF. Las abundancias de oxígeno calculadas en la muestra BCG se encuentran en el intervalo  $7.04 \leq 12 + \log(O/H) \leq 8.40$  y las de la muestra GHR en el intervalo  $7.50 \leq 12 + \log(O/H) \leq 8.60$ . Las abundancias de oxígeno obtenidas para algunos objetos en cada muestra se compararon con valores presentados en la literatura y resultaron consistentes, dentro de los errores. Esto se esperaba ya que la abundancia de oxígeno se han calculado de la misma manera (sumando las abundancias iónicas de  $O^+$  y  $O^{++}$ ). La diferencia entre los valores de la abundancia de oxígeno calculados para la muestra BCG y los obtenidos por Izotov & Thuan (2004) para los mismos objetos es de  $\pm 0.02$  dex mientras que la diferencia de las abundancias de oxígeno calculadas en este trabajo para la muestra GHR con los valores obtenidos por Kennicutt et al. (2003) es de

Muestra	Nombre	O <sup>+</sup>	O <sup>++</sup>	N <sup>+</sup>	S <sup>+</sup>	S <sup>++</sup>	Ne <sup>++</sup>	Ar <sup>++</sup>	Ar <sup>+3</sup>
BCG	HS0111+2115	7.88±0.03	8.04 <sup>+0.02</sup> <sub>-0.03</sub>	6.47±0.01	5.88±0.01	6.01 <sup>+0.02</sup> <sub>-0.01</sub>	7.44±0.02	5.72±0.01	—
	Haro_3	7.93±0.02	8.12 <sup>+0.01</sup> <sub>-0.02</sub>	6.57±0.01	5.80±0.01	6.41±0.01	7.51±0.01	5.87±0.01	—
	Mrk_1315	7.43±0.02	8.19±0.03	5.95±0.01	5.37±0.01	6.40±0.02	7.57±0.02	5.84±0.01	5.10±0.01
	Mrk1329	7.53±0.02	8.18 <sup>+0.02</sup> <sub>-0.03</sub>	6.06±0.01	5.46±0.01	6.46±0.02	7.52 <sup>+0.01</sup> <sub>-0.02</sub>	5.78±0.01	4.91±0.01
	HS2359+1659	7.37±0.02	8.10±0.03	5.95±0.01	5.52±0.01	6.29±0.02	7.41±0.02	5.70±0.01	—
	NGC_1140	7.89±0.02	7.98 <sup>+0.02</sup> <sub>-0.01</sub>	6.68±0.01	5.95±0.01	—	7.35±0.01	5.72 <sup>+0.010</sup> <sub>-0.004</sub>	—
	HS0735+3512	7.56±0.02	8.04±0.03	6.15±0.01	5.66±0.01	6.24±0.02	7.45±0.01	5.63±0.01	—
	HS1213+3636A	7.91±0.03	7.93±0.02	6.45±0.01	5.77 <sup>+0.004</sup> <sub>-0.010</sub>	6.43±0.01	7.28±0.01	5.71±0.01	5.03±0.01
	HS1311+3628	7.59±0.02	8.07±0.03	6.22±0.01	5.66±0.01	6.44±0.02	7.42±0.01	5.78±0.01	—
Mrk 450	7.55±0.02	8.04±0.02	6.18±0.01	5.64±0.01	6.40 <sup>+0.02</sup> <sub>-0.01</sub>	7.38±0.01	5.76±0.01	5.02±0.01	
GHR	NGC_5457_H1105	8.09±0.04	8.25 <sup>+0.04</sup> <sub>-0.03</sub>	6.97 <sup>+0.03</sup> <sub>-0.04</sub>	5.91 <sup>+0.03</sup> <sub>-0.04</sub>	6.72 <sup>+0.06</sup> <sub>-0.05</sub>	7.54 <sup>+0.04</sup> <sub>-0.06</sub>	6.07 <sup>+0.04</sup> <sub>-0.03</sub>	—
	NGC_5457_H1159	7.92 <sup>+0.2</sup> <sub>-0.1</sub>	8.12 <sup>+0.10</sup> <sub>-0.09</sub>	6.70±0.10	5.87 <sup>+0.09</sup> <sub>-0.06</sub>	6.62 <sup>+0.20</sup> <sub>-0.10</sub>	7.39 <sup>+0.20</sup> <sub>-0.10</sub>	5.91 <sup>+0.07</sup> <sub>-0.09</sub>	—
	NGC_5457_H1176	7.79 <sup>+0.09</sup> <sub>-0.07</sub>	8.15 <sup>+0.07</sup> <sub>-0.06</sub>	6.63±0.06	5.74±0.05	6.58 <sup>+0.07</sup> <sub>-0.09</sub>	7.46 <sup>+0.09</sup> <sub>-0.08</sub>	5.94 <sup>+0.06</sup> <sub>-0.05</sub>	—
	NGC_5457_H1216	7.52±0.05	8.05±0.04	6.19 <sup>+0.04</sup> <sub>-0.03</sub>	5.51 <sup>+0.02</sup> <sub>-0.03</sub>	6.34 <sup>+0.03</sup> <sub>-0.06</sub>	7.37 <sup>+0.05</sup> <sub>-0.03</sub>	5.71 <sup>+0.03</sup> <sub>-0.05</sub>	—
	NGC_5457_H149_2	8.00 <sup>+0.20</sup> <sub>-0.10</sub>	8.15±0.10	6.91 <sup>+0.09</sup> <sub>-0.07</sub>	5.98 <sup>+0.08</sup> <sub>-0.07</sub>	6.61 <sup>+0.20</sup> <sub>-0.10</sub>	7.40±0.10	6.05 <sup>+0.08</sup> <sub>-0.07</sub>	—
	NGC_5457_H409	7.95 <sup>+0.06</sup> <sub>-0.05</sub>	8.17 <sup>+0.03</sup> <sub>-0.04</sub>	6.76 <sup>+0.03</sup> <sub>-0.04</sub>	5.89 <sup>+0.04</sup> <sub>-0.03</sub>	6.64±0.06	7.48±0.05	5.91±0.04	—
	NGC_5457_H67	7.69±0.10	7.89 <sup>+0.07</sup> <sub>-0.06</sub>	6.34 <sup>+0.06</sup> <sub>-0.04</sub>	5.63 <sup>+0.06</sup> <sub>-0.04</sub>	6.38±0.10	7.20 <sup>+0.09</sup> <sub>-0.07</sub>	5.72 <sup>+0.08</sup> <sub>-0.06</sub>	—
	NGC_5457_N5471-A	7.15±0.04	8.00 <sup>+0.04</sup> <sub>-0.03</sub>	5.85 <sup>+0.03</sup> <sub>-0.04</sub>	5.31±0.03	6.11±0.03	7.33±0.04	5.55±0.04	—
	M31_H25	7.90 <sup>+0.05</sup> <sub>-0.06</sub>	8.07±0.05	6.88 <sup>+0.04</sup> <sub>-0.03</sub>	5.72 <sup>+0.04</sup> <sub>-0.03</sub>	6.58 <sup>+0.07</sup> <sub>-0.05</sub>	7.35±0.06	5.99 <sup>+0.05</sup> <sub>-0.04</sub>	—
M31_H26	8.04 <sup>+0.08</sup> <sub>-0.07</sub>	8.00 <sup>+0.06</sup> <sub>-0.07</sub>	7.05 <sup>+0.05</sup> <sub>-0.05</sub>	5.90 <sup>+0.04</sup> <sub>-0.05</sub>	6.62±0.08	7.29 <sup>+0.06</sup> <sub>-0.08</sub>	5.96 <sup>+0.06</sup> <sub>-0.05</sub>	—	

TABLA 5.3: Abundancias iónicas en  $12 + \log (X^{+i}/H^+)$  de los mismos 10 objetos de la tabla anterior, calculadas para las muestras de galaxias azules compactas (BCG) y regiones H II gigantes (GHR).

$\pm 0.04$  dex. Estas diferencias se deben principalmente a que los datos atómicos utilizados en este trabajo han sido distintos a los de Izotov & Thuan (2004) y Kennicutt et al. (2003), así como los cocientes utilizados para determinar las condiciones físicas.

Trabajos anteriores (ver McGaugh 1991, Pérez-Montero 2014) mostraron que en las regiones H II gigantes la abundancia de oxígeno tiene una tendencia a disminuir cuando aumenta el grado de ionización, lo cual, se debe a que una estrella de cierta masa tiene una temperatura efectiva menor si su metalicidad es mayor (Maeder 1990). Esta tendencia se observa también en nuestra muestra BCG, mientras que en los objetos GHR no es tan evidente, probablemente por el menor número de objetos en esta muestra. Por otro lado, se ve también que en ninguna de nuestras dos muestras tenemos objetos con grado de ionización muy bajo ( $O^{++}/(O^{+}+O^{++}) < 0.2$ ), por lo que no pudimos explorar el comportamiento de la abundancia con el grado de ionización en objetos con  $O^{++}/(O^{+}+O^{++}) < 0.2$ .

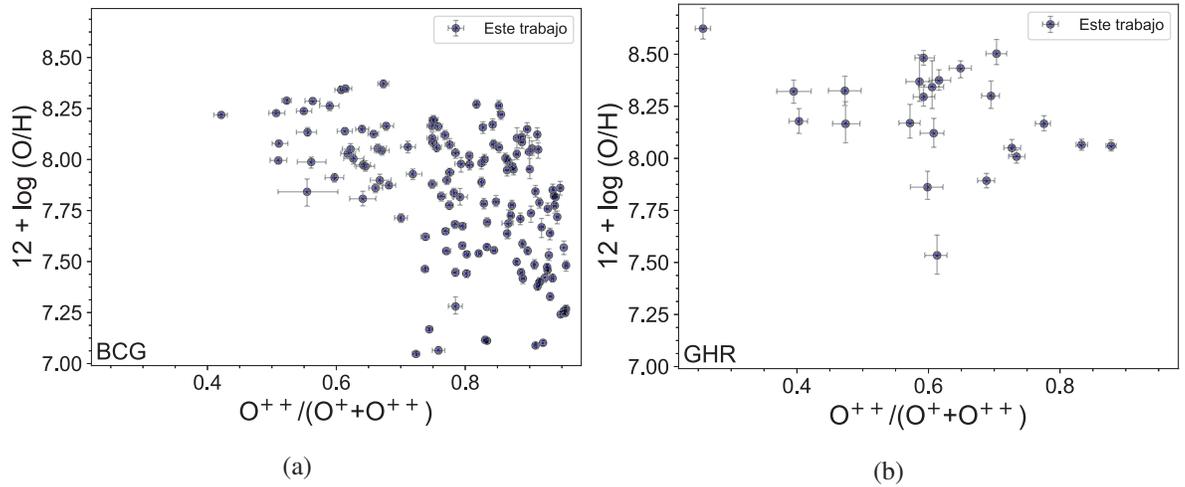


FIGURA 5.1: Valores de  $12 + \log(O/H)$  en los conjuntos BCG (panel a) y GHR (panel b) con respecto al grado de ionización dado por  $O^{++}/(O^{+}+O^{++})$ .

### 5.3.2 Nitrógeno

En la Figura 5.2 se muestra la abundancia de nitrógeno obtenida con distintos ICFs, con respecto a la abundancia de oxígeno para las muestras BCG y GHR. Los círculos representan las abundancias calculadas con el  $ICF(N^{+})$  propuesto en este trabajo y las cruces representan las abundancias calculadas con el  $ICF_{PC69}(N^{+})$ , propuesto por Peimbert & Costero (1969). Se puede ver que al utilizar nuestro ICF, se obtienen valores mayores (de 0.02 a 0.12 dex) que los obtenidos con el  $ICF_{PC69}(N^{+})$ . También, se ve que en las dos muestras, la abundancia de nitrógeno N/O presenta una tendencia creciente con la abundancia de oxígeno, como se ha visto en muchos trabajos previos (por ejemplo, Vila

Costas & Edmunds 1993; Henry et al. 2000), lo cual se espera si el nitrógeno tiene un origen *secundario* en el que es producido durante el ciclo CNO y depende de la abundancia inicial de elementos pesados de la estrella que contaminó el medio. Dada la complejidad de la relación del nitrógeno con el oxígeno y de la relación observada de  $O/H$  con  $O^{++}/O$ , no se discute para este elemento una figura de  $\log(N/O)$  con respecto al grado de ionización como se hace con el resto de los elementos, ya que es probable que no se pueda distinguir una tendencia introducida por el ICF.

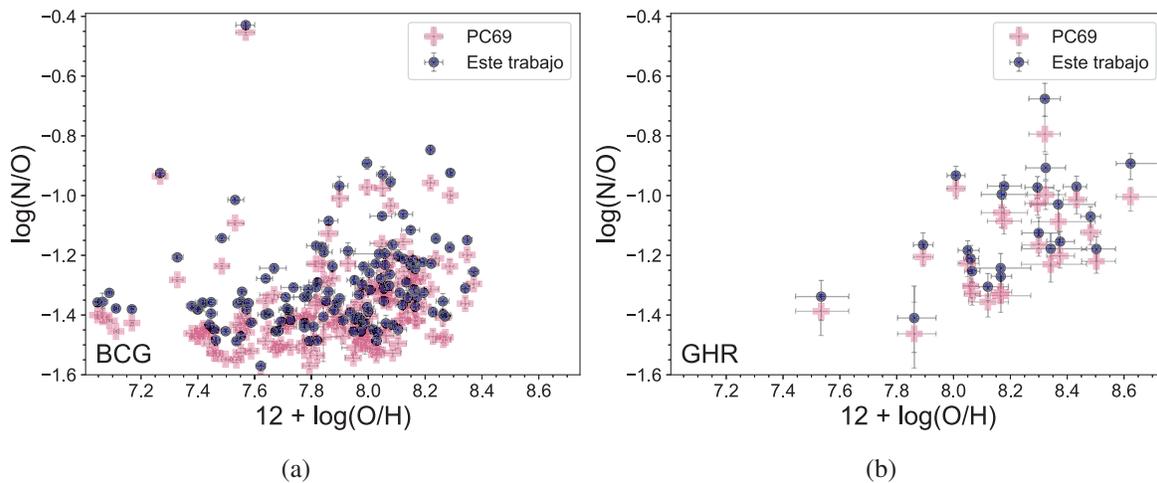


FIGURA 5.2: Valores de  $\log(N/O)$  con respecto a  $12 + \log(O/H)$  para las muestras BCG (a) y GHR (b).

### 5.3.3 Neón

En la Figura 5.3 se muestra la abundancia de neón con respecto a la abundancia de oxígeno para las muestras BCG y GHR. Las estrellas representan las abundancias calculadas con el  $ICF_{S78}(Ne^{++})$  propuesto por Stasińska (1978), los triángulos rojos y triángulos verdes invertidos representan las calculadas con  $ICF_{IZ06}(Ne^{++})$  para  $12 + \log(O/H) \geq 8.2$  y para  $7.4 \leq 12 + \log(O/H) \leq 9.4$ , respectivamente, las cruces representan las abundancias calculadas con el  $ICF_{PC69}(Ne^+)$  y los círculos representan las abundancias calculadas con nuestro ICF. No mostramos las abundancias calculadas con el  $ICF_{PM07}(Ne^+)$  propuesto por Pérez-Montero et al. (2007) debido a que, como se vio en la sección anterior, su ICF es menor en hasta 1.3 dex que el ICF de nuestros modelos.

La abundancia determinada con nuestro ICF es muy similar a la calculada con el  $ICF_{PC69}(Ne^+)$  (con una diferencia de 0.01 a 0.02 dex en las dos muestras), lo cual era algo que se esperaba ya que las dos expresiones son muy similares. Por otro lado, las abundancias obtenidas con  $ICF_{S78}(Ne^{++})$  son similares con nuestro ICF en objetos con  $12 + \log(O/H) < 8.0$ . Sin embargo, en observaciones con mayor metalicidad, los resultados que se obtienen con los dos ICFs difieren hasta en 0.16 dex para objetos BCG y hasta en 0.4 dex en la muestra GHR. Las abundancias determinadas con las dos expresiones del  $ICF_{IZ06}(Ne^{++})$  difieren de las abundancias calculadas con el resto de los ICFs, y difieren de las abundancias calculadas con nuestro ICF en 0.1 dex a 0.2 dex en la muestra BCG y en 0.05 a 0.27 dex en los objetos GHR.

En los objetos BCG, los cocientes Ne/O calculados con  $ICF_{PC69}(Ne^+)$ ,  $ICF_{S78}(Ne^{++})$  y con nuestro ICF presentan una ligera tendencia creciente con la abundancia de oxígeno, con una dispersión de  $\sim 0.3$  dex, como se ve en la Figura 5.3. Esta tendencia puede tener distintas explicaciones: parte del oxígeno es capturado en granos de polvo y por lo tanto no está presente en el gas que se observa (de 0.08 dex a 0.12 dex, según lo encontrado por Peimbert & Peimbert 2010), mientras que el neón al ser un gas noble, no interacciona con el polvo. El cociente Ne/O se ve afectado por este proceso y aumenta, conforme aumenta el secuestro de oxígeno en los granos de polvo (es decir, a mayor metalicidad este cociente crece). También, se puede deber a que los ICFs no funcionan bien en objetos con bajo grado de ionización, tal como se revisó en la sección anterior. Sin embargo, para concluir que esta tendencia es realmente debida al ICF que se utiliza y no por un sesgo en nuestra muestra, será necesario analizar los distintos ICFs con una muestra de objetos más amplia en la cual se incluyan objetos con  $O^{++}/(O^+ + O^{++}) < 0.2$  (región que no es ocupada por nuestra muestra observacional actual).

Por otro lado, los objetos en la muestra GHR presentan una baja dispersión, menor que 0.2 dex y posiblemente una tendencia contraria, de manera que a menor abundancia de oxígeno se tiene aparentemente mayor  $\log(Ne/O)$ . Sin embargo, si no se consideran los dos objetos con mayor y menor  $\log(Ne/O)$ , esta tendencia desaparece.

Para analizar el efecto del grado de ionización en la Figura 5.3, se muestra en la Figura 5.4 la abundancia de neón calculada con distintos ICFs con respecto al grado de ionización. En general, la diferencia en las abundancias calculadas con los distintos ICFs es mayor a grados de ionización menores ( $\sim O^{++}/(O^+ + O^{++}) < 0.5$ ), donde los ICFs tienen una

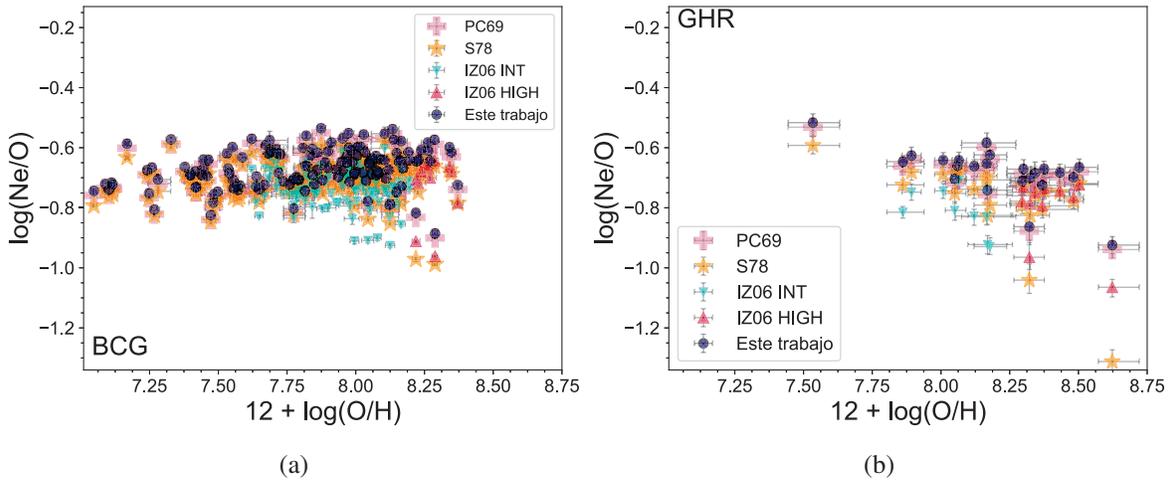


FIGURA 5.3: Valores de  $\log(\text{Ne}/\text{O})$  con respecto a  $12 + \log(\text{O}/\text{H})$  para las muestras BCG (a) y GHR (b).

mayor incertidumbre asociada (como se vio con nuestro conjunto de modelos en el capítulo anterior) y por lo tanto implican una determinación menos fiable. En cambio, a grados de ionización mayores, la abundancia calculada con los distintos ICFs es similar.

En las dos muestras se observa que cuando  $\text{O}^{++}/(\text{O}^{+} + \text{O}^{++}) < 0.6$ , el cociente  $\text{Ne}/\text{O}$  aumenta con el grado de ionización (lo cual es más evidente en la muestra GHR y un poco menos obvio en la muestra BCG). La incertidumbre asociada a nuestro ICF es pequeña únicamente para objetos con  $\text{O}^{++}/(\text{O}^{+} + \text{O}^{++}) > 0.6$ . La mayoría de los objetos GHR tienen  $\text{O}^{++}/(\text{O}^{+} + \text{O}^{++}) < 0.7$ , por lo que se espera que no se obtenga una abundancia de neón fiable con este ICF en esta muestra. Por otro lado, los objetos de la muestra BCG tienen un alto grado de ionización y se espera que nuestro ICF dé resultados correctos, por lo que en esta muestra la explicación debida al polvo parece ser la más probable.

### 5.3.4 Azufre

En la Figura 5.7 se muestran las abundancias relativas de azufre con respecto a la abundancia de oxígeno para las muestras BCG y GHR con el  $\text{ICF}_{\text{S78}}(\text{S}^{+} + \text{S}^{++})$  (estrellas en naranja), el  $\text{ICF}_{\text{S78bis}}(\text{S}^{+} + \text{S}^{++})$  (en rombos color verde olivo), las dos expresiones del  $\text{ICF}_{\text{IZ06}}(\text{S}^{+} + \text{S}^{++})$  para  $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \geq 8.2$  (triángulos en rojo) y para  $7.4 \leq 12 + \log(\text{O}/\text{H}) \leq 9.4$  (triángulos invertidos en verde) y las abundancias calculadas con el ICF propuesto en este trabajo (en círculos azul oscuro).

Se puede ver que con nuestros ICFs se obtienen valores similares de  $\text{S}/\text{O}$  que con  $\text{ICF}_{\text{S78}}(\text{S}^{+} + \text{S}^{++})$ ,  $\text{ICF}_{\text{S78bis}}(\text{S}^{+} + \text{S}^{++})$  y  $\text{ICF}_{\text{IZ06}}(\text{S}^{+} + \text{S}^{++})$ .

El cociente  $\text{S}/\text{O}$  en objetos de la muestra BCG es constante para todos los valores de  $12 + \log(\text{O}/\text{H})$ , con una dispersión de  $\sim 0.4$  dex, lo cual se esperaba dado que el azufre tiene el mismo origen que el oxígeno. La muestra GHR parece mostrar lo mismo. En la Figura 5.6 se muestra la abundancia de azufre con el grado de ionización. En la muestra GHR, el log

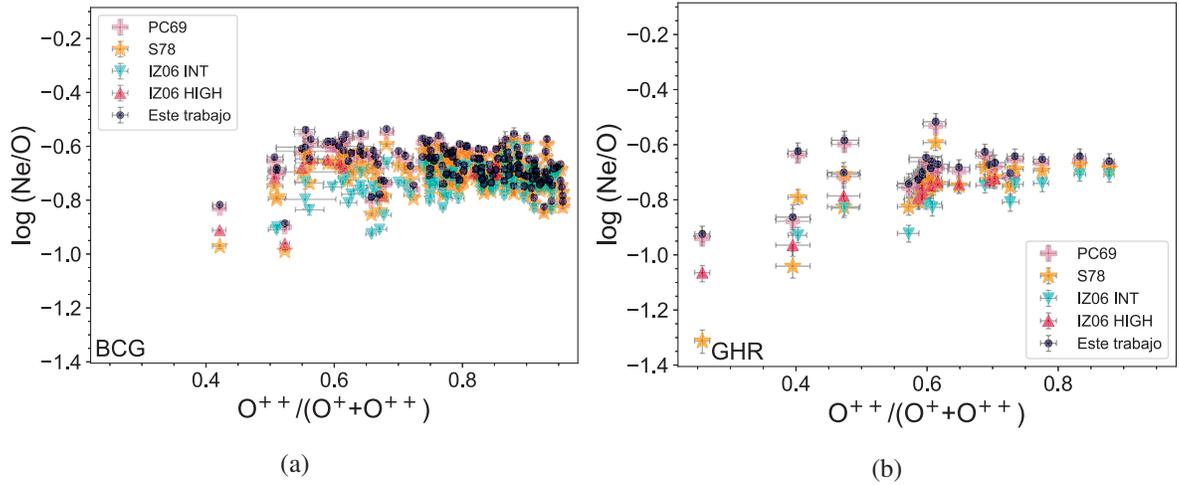


FIGURA 5.4: Valores de  $\log(\text{Ne}/\text{O})$  con respecto al grado de ionización dado por  $\text{O}^{++}/(\text{O}^{+} + \text{O}^{++})$  para las muestras observacionales BCG (a) y GHR (b).

(S/O) es constante con el grado de ionización, y presenta una muy baja dispersión (menor a 0.2 dex), lo cual es algo sorprendente.

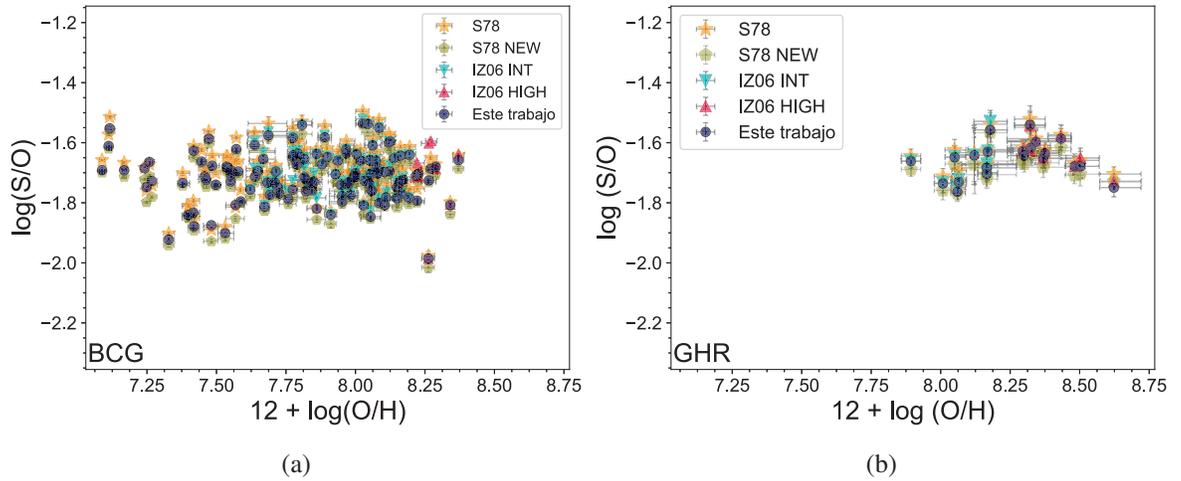


FIGURA 5.5: Valores de  $\log(\text{S}/\text{O})$  con respecto a  $12 + \log(\text{O}/\text{H})$  para las muestras BCG (a) y GHR (b).

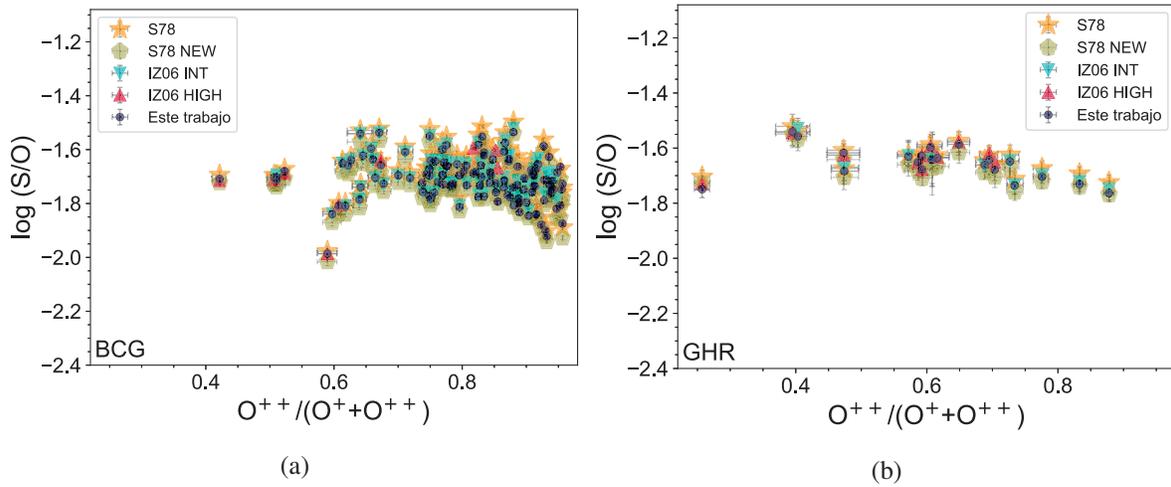


FIGURA 5.6: Valores de  $\log(S/O)$  con respecto al grado de ionización dado por  $O^{++}/(O^{+}+O^{++})$  para las muestras observacionales BCG (a) y GHR (b).

### 5.3.5 Argón

Las abundancias relativas de argón con respecto a la abundancia de oxígeno para las muestras BCG y GHR se muestran en la Figura 5.9 utilizando seis ICFs distintos:  $ICF_{IZ94}(Ar^{++})$  propuesto por Izotov et al. (1994) (cuyas abundancias se muestran con cuadrados azules), las dos expresiones del  $ICF_{PM07}(Ar^{++})$  en función de  $O^{++}/(O^{+}+O^{++})$  (rombos amarillos) y en función de  $S^{++}/(S^{+}+S^{++})$  (círculos morados) y las dos expresiones del  $ICF_{IZ06}(Ar^{++})$  para  $12 + \log(O/H) \geq 8.2$  (triángulos rojos) y para  $7.4 \leq 12 + \log(O/H) \leq 9.4$  (triángulos invertidos verdes) y el  $ICF(Ar^{++})$  propuesto en este trabajo. En este caso, al utilizar el  $ICF_{IZ94}(Ar^{++})$ , en las dos muestras se obtienen valores mayores (de hasta 0.3 dex) que los que se obtienen con nuestro ICF, lo cual se esperaba debido a que como se vio con los modelos, al utilizar esta expresión se sobrestima la abundancia de argón. Por otro lado, con nuestro ICF se obtienen valores similares a los calculados con las dos expresiones del  $ICF_{IZ06}(Ar^{++})$  (con una diferencia máxima promedio de tan sólo 0.04 dex en las dos muestras para las dos expresiones). Al utilizar el  $ICF_{PM07}(Ar^{++})$  en función de  $O^{++}/(O^{+}+O^{++})$ , se obtuvieron abundancias similares a las que se obtienen con nuestro ICF, siendo la diferencia promedio de 0.07 dex. En cambio, las abundancias calculadas con el  $ICF_{PM07}(Ar^{++})$  en función de  $S^{++}/(S^{+}+S^{++})$ , difieren de las obtenidas con el ICF aquí propuesto en hasta 0.2 dex.

En la muestra BCG el cociente  $Ar/O$  se mantiene constante con la abundancia de oxígeno, pero con una dispersión de hasta  $\sim 0.4$  dex, mientras que en los objetos GHR no se puede concluir si existe una tendencia o no, dado que el número de objetos es menor y por su dispersión de hasta 0.3 dex. En el caso del  $\log(Ar/O)$  en las dos muestras, no se observó una tendencia creciente notable, como se observó en el caso del neón. Si la tendencia positiva del neón con la abundancia del oxígeno que obtenemos en nuestra muestra BCG se

debiera a la depleción de oxígeno en polvo, siguiendo lo propuesto por Izotov et al. (2006), se esperaría ver la misma tendencia del argón con la abundancia del oxígeno, debido a que también es un gas noble que tampoco es incorporado al polvo, por lo que también se espera que el cociente  $\text{Ar}/\text{O}$  crezca a medida que aumenta la cantidad de polvo en la región H II. Por tanto, es probable que la tendencia del cociente de neón se deba al mal funcionamiento del ICF en los objetos de la muestra BCG de bajo grado de ionización.

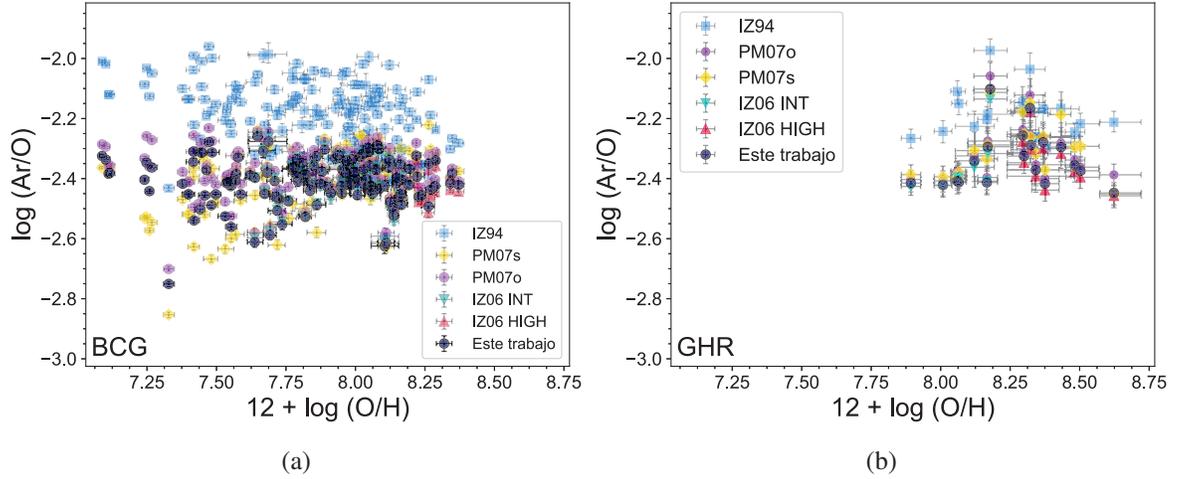


FIGURA 5.7: Valores de  $\log(\text{Ar}/\text{O})$  a partir del ion  $\text{Ar}^{++}$  con respecto a  $12 + \log(\text{O}/\text{H})$  para las muestras BCG (a) y GHR (b).

En la Figura 5.8, se muestra la abundancia de argón con respecto al grado de ionización, utilizando los ICFs descritos en la figura anterior. Se puede ver que nuestro ICF para argón implica valores de  $\text{Ar}/\text{O}$  independientes de  $\text{O}^{++}/\text{O}$ , mientras que los de  $\text{ICF}_{\text{IZ94}}(\text{Ar}^{++})$  y los de  $\text{ICF}_{\text{PM07}}(\text{Ar}^{++})$  en función de  $\text{S}^{++}/(\text{S}^{+} + \text{S}^{++})$  dan valores de  $\text{Ar}/\text{O}$  dependientes de  $\text{O}^{++}/\text{O}$ . En el capítulo anterior se vio que las incertidumbres asociadas al  $\text{ICF}_{\text{PM07}}(\text{Ar}^{++})$  en función de  $\text{O}^{++}/(\text{O}^{+} + \text{O}^{++})$ , al  $\text{ICF}_{\text{IZ06}}(\text{Ar}^{++})$  y a nuestro ICF son similares y menores a las incertidumbres asociadas a los demás ICFs. Por ello, para la abundancia de argón cuando sólo se observan líneas de  $\text{Ar}^{++}$  consideramos que con estos ICFs se pueden obtener abundancias cuyo valor será fiable.

El  $\text{ICF}(\text{Ar}^{++} + \text{Ar}^{+3})$  calculado aquí sólo se puede poner a prueba con los datos de BCG ya que en los datos GHR no se observa  $\text{Ar}^{+3}$ . En la muestra BCG se calculó la abundancia de argón con seis ICFs distintos (mostrados en la Figura 5.9): el  $\text{ICF}_{\text{IZ94}}(\text{Ar}^{++} + \text{Ar}^{+3})$  (abundancias mostradas con cuadrados azules), las dos expresiones del  $\text{ICF}_{\text{PM07}}(\text{Ar}^{++} + \text{Ar}^{+3})$  con  $\text{O}^{++}/(\text{O}^{+} + \text{O}^{++})$  (rombos amarillos) y con  $\text{S}^{++}/(\text{S}^{+} + \text{S}^{++})$  (círculos en morado), las dos expresiones del  $\text{ICF}_{\text{IZ06}}(\text{Ar}^{++} + \text{Ar}^{+3})$  para  $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \geq 8.2$  (triángulos en rojo) y para  $7.4 \leq 12 + \log(\text{O}/\text{H}) \leq 9.4$  (triángulos verdes invertidos) y las abundancias que resultan al utilizar el ICF propuesto en este trabajo (en puntos azul oscuro).

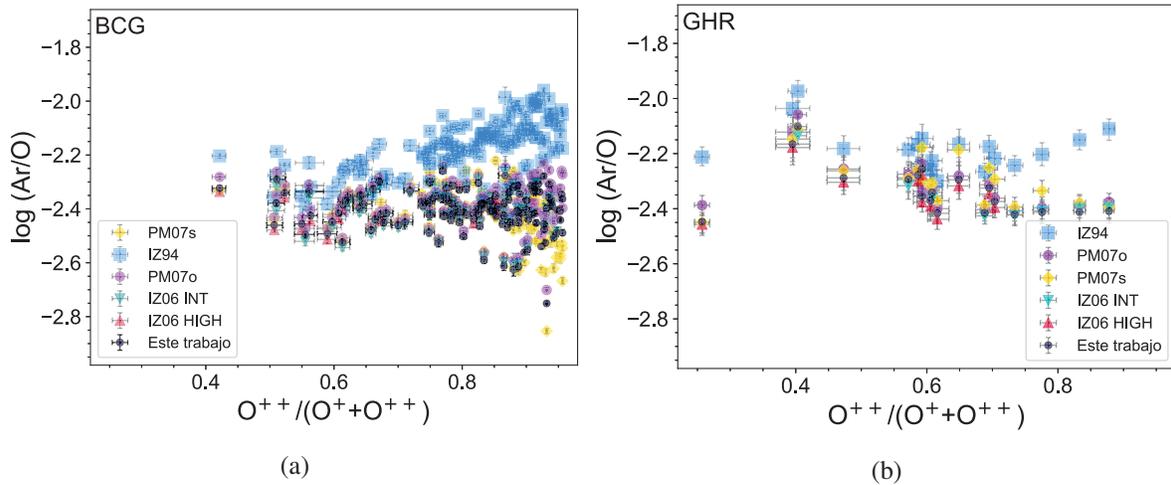


FIGURA 5.8: Valores de  $\log(\text{Ar}/\text{O})$  calculado solamente a partir de  $\text{Ar}^{++}$ , con respecto al grado de ionización dado por  $\text{O}^{++}/(\text{O}^{+}+\text{O}^{++})$  para las muestras observacionales BCG (a) y GHR (b).

Estas abundancias se muestran en la Figura 5.9a en función de la abundancia de oxígeno y en la Figura 5.9b con respecto al grado de ionización. Se puede ver que la dispersión de  $\text{Ar}/\text{O}$  con respecto a la abundancia de oxígeno cuando se observan los dos iones de argón (de hasta 0.27 dex) es menor que cuando sólo se observa  $\text{Ar}^{++}$ . En este caso, todas las abundancias de argón obtenidas con los ICFs previos son similares a las obtenidas con nuestro ICF, debido a que la mayoría funciona bien para todas las metalicidades.

La Figura 5.10 muestra las abundancias de N, Ne, S y Ar con respecto a la abundancia de oxígeno, obtenidas únicamente con nuestros ICFs. Se puede ver de forma más clara que la muestra GHR abarca un intervalo más amplio de metalicidades. Se ve que  $\text{Ne}/\text{O}$  no muestra el comportamiento esperado, probablemente debido a que nuestro ICF para neón no funciona bien en grados bajos de ionización.

Se pueden observar mejor las tendencias de  $\text{N}/\text{O}$  con la metalicidad, discutidas anteriormente, debidas a la presencia de nitrógeno primario y secundario. Se puede notar que su dispersión aumenta a mayores valores de  $12 + \log(\text{O}/\text{H})$ .

Se puede ver que los cocientes  $\text{S}/\text{O}$  y  $\text{Ar}/\text{O}$  son aproximadamente constantes con la metalicidad, como ya se discutió, pero con una cierta dispersión.

El cociente  $\text{Ne}/\text{O}$  en función de  $\text{O}/\text{H}$  tiene una dispersión mucho menor. Se puede ver nuevamente que en la muestra BCG aumenta ligeramente con  $\text{O}/\text{H}$ , lo que podría deberse a que parte del oxígeno este secuestrado en el polvo, proceso que es más importante a mayor metalicidad. Como se discutió antes, es difícil explicar dar una única explicación a

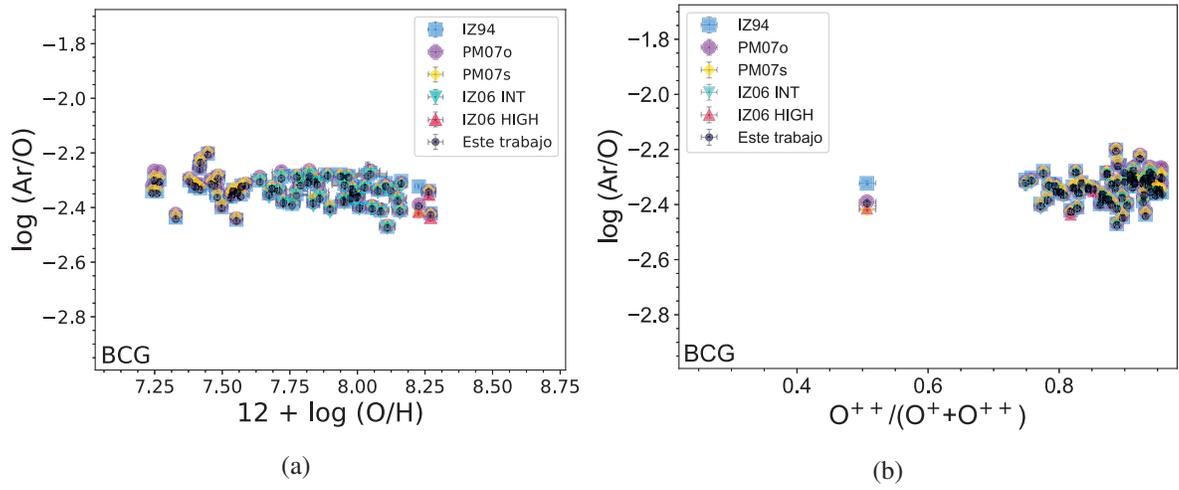


FIGURA 5.9: Valores de  $\log(\text{Ar}/\text{O})$  calculado a partir de  $\text{Ar}^{++} + \text{Ar}^{+3}$  en la muestra BCG, con respecto a: (a) la abundancia de oxígeno y (b) el grado de ionización dado por  $\text{O}^{++}/(\text{O}^{++} + \text{O}^{++})$ .

todos estos diagramas de forma consistente.

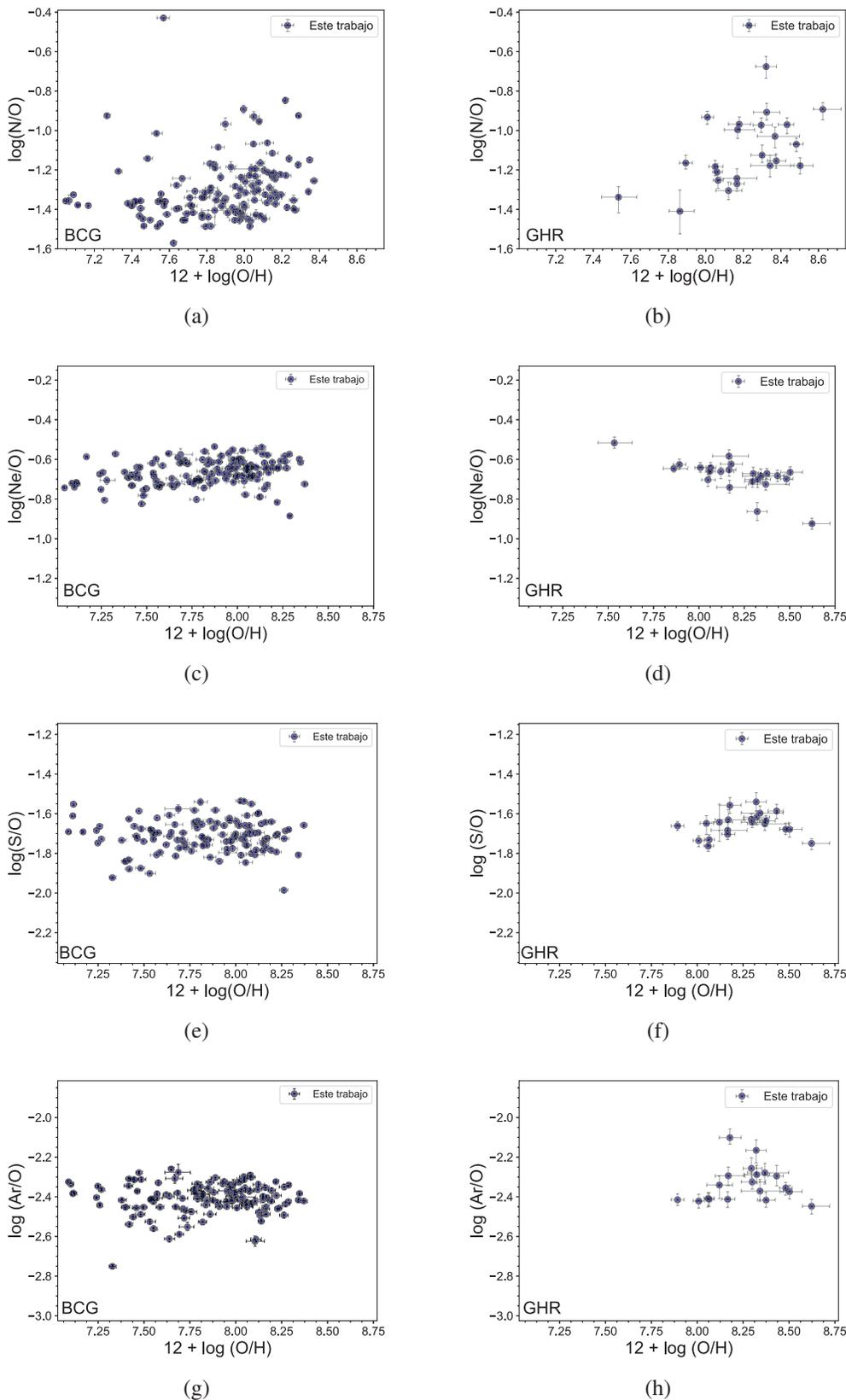


FIGURA 5.10: Comparación de la abundancia de N/O, Ne/O, S/O y Ar/O calculados con nuestros ICFs, con respecto a  $\log(O/H)$  para las muestras BCG (paneles de la columna izquierda) y GHR (paneles de la columna derecha).

# 6

## CONCLUSIONES

En este trabajo se han determinado los factores de corrección por ionización (ICFs) para el cálculo de abundancias químicas de carbono, nitrógeno, oxígeno, neón, azufre, cloro y argón en regiones H II extragalácticas, junto con una estimación de sus incertidumbres. Para ello, se utilizó el conjunto de modelos de fotoionización de Vale Asari et al. (2016), calculado con el código CLOUDY (Ferland et al. 2013), que cubre un amplio rango de parámetros físicos característicos de regiones H II extragalácticas. Con el fin de seleccionar únicamente los modelos representativos de las regiones H II observadas, se utilizaron tres criterios basados en las relaciones empíricas entre N/O y O/H, entre el parámetro de ionización U y O/H y entre los cocientes de intensidades  $[\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta$  y  $[\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha$  (utilizadas en Vale Asari et al. 2016 para definir un subconjunto representativo de regiones H II). Después, se comparó el conjunto resultante de esta selección con un conjunto de observaciones conformado por 140 galaxias azules compactas (de Izotov et al. 2007), 694 regiones H II gigantes (de distintas referencias que abarcan desde 1998 hasta 2013) y 133436 galaxias del Main Galaxy Sample del Data Release 7 del Sloan Digital Sky Survey (Strauss et al. 2002). Al realizar esta comparación, fue necesario ampliar los criterios de selección utilizados con el fin de que los modelos cubrieran mejor a las observaciones.

Para la selección de modelos, no se tomaron en cuenta objetos de nuestra muestra observacional cuya fuente de ionización fuera distinta a estrellas masivas, por lo que los resultados encontrados en este trabajo no son válidos para ese tipo de objetos. De esta manera el conjunto final con el que se calcularon los ICFs fue de 499 modelos de fotoionización representativos de las regiones H II extragalácticas.

Utilizando estos modelos, se calcularon las expresiones analíticas de los ajustes del  $\text{ICF}_m$  de

los modelos en función de los cocientes  $O^{++}/(O^{+}+O^{++})$ ,  $O^{+}/(O^{+}+O^{++})$  y  $\log(O^{+}/O^{++})$ . Se estimaron también las incertidumbres asociadas a cada uno (la incertidumbre máxima y la de la mayoría de los modelos), por medio de la diferencia  $\Delta ICF = ICF_m - ICF_f$  donde el  $ICF_f$  corresponde a la expresión analítica del ajuste calculado. Esta estimación se realizó a ojo, por lo que en el futuro se deberá mejorar el cálculo de las incertidumbres.

Los ICFs calculados se aplicaron en el cálculo de la abundancia de N, Ne, S y Ar para el conjunto de observaciones de galaxias azules compactas (BCG) y regiones H II gigantes (GHR). Los ICFs propuestos para Cl y C no se pudieron probar ya que en este conjunto de observaciones no se tienen líneas de estos elementos.

En resumen, las novedades aportadas por nuestros ICFs son las siguientes:

Para el oxígeno, no hay cambio en el cálculo a como se hace actualmente (sumando las abundancias iónicas de  $O^{+}$  y  $O^{++}$ ). Para el nitrógeno, con nuestro ICF obtenemos valores mayores de N/O (de 0.02 a 0.12 dex en las dos muestras) a los obtenidos con el ICF de Peimbert & Costero (1969), basado en similitudes de potenciales de ionización. Para neón, con nuestro ICF se obtienen valores menores de Ne/O que con los ICFs de Peimbert & Costero (1969) (basado en potenciales de ionización) de hasta 0.02 dex en las dos muestras, y Stasińska (1978) (basado en modelos de fotoionización), de hasta 0.02 dex menores en la muestra BCG y hasta 0.4 dex en la GHR. Los valores de Ne/O obtenidos con nuestro ICF son mayores que los obtenidos con los ICFs de Izotov et al. (2006), en hasta 0.2 dex en la muestra BCG y en hasta 0.3 dex en la GHR. Para el azufre, con nuestro ICF, se obtuvieron valores de S/O similares a los obtenidos con el ICF de Stasińska (1978) (con una diferencia menor que 0.02 dex) y a los obtenidos con los de Izotov et al. (2006) (con una diferencia menor que 0.03 dex en la muestra GHR y menor que 0.08 dex en la muestra BCG). Para el Ar/O calculado sólo con el ion  $Ar^{++}$ , se encontraron valores similares con nuestro ICF que con los ICFs de Izotov et al. (2006) (con una diferencia de hasta 0.04 dex en las dos muestras), mientras que se obtienen valores mucho mayores con el ICF de Izotov et al. (1994) (de hasta 0.3 dex). Con nuestro ICF para el caso en el que además se observan líneas del ion  $Ar^{+3}$ , en la muestra BCG se obtuvieron valores de Ar/O similares que con los ICFs de Izotov et al. (2006), y valores mucho menores a los de Izotov et al. (1994). Si se observan líneas de los iones  $Ar^{++}$  y  $Ar^{+3}$  sugerimos utilizarlos ambos para determinar la abundancia de argón, ya que la incertidumbre es mucho menor.

Al comparar  $12 + \log(O/H)$  con respecto a  $O^{++}/(O^{+}+O^{++})$  y N/O con respecto a  $12 + \log(O/H)$ , se encontraron relaciones bien conocidas en la literatura. Para Ar, S y Ne, se espera que las abundancias con respecto a oxígeno sean constantes, dado que estos son elementos  $\alpha$ , producidos por el mismo mecanismo en estrellas masivas. Como se esperaba, se encontró que S/O y Ar/O no muestran ninguna tendencia con la abundancia de oxígeno. Por otro lado, sí se observó que Ne/O tiende a subir conforme O/H aumenta. Esto tiene dos posibles explicaciones: que el oxígeno se encuentre depletado en el polvo o que el ICF para neón dé valores incorrectos de la abundancia. De hecho, existen diversos trabajos previos en donde se indica que el oxígeno se encuentra depletado en el polvo de regiones H II

(por ejemplo Simón-Díaz & Stasińska 2011) y que el cociente polvo-gas aumenta con la metalicidad (Rémy-Ruyer et al. 2014). Si esto fuera la explicación para la tendencia que se observa de Ne/O con respecto a O/H, se esperaría ver lo mismo al comparar Ar/O con O/H, debido a que el argón al igual que el neón, es un gas noble que no es capturado en el polvo. Sin embargo, como ya se dijo, el Ar/O es constante con la abundancia de oxígeno, lo que parece indicar que el ICF de neón no brinda abundancias fiables.

Al estudiar los cocientes Ar/O y S/O con respecto al grado de ionización, no se ve ninguna tendencia, lo que en primera vista, favorece que los ICFs de Ar y S no introducen sesgos. Por otro lado, Ne/O parece mostrar una tendencia a aumentar con el grado de ionización, lo que deberá ser estudiado en un trabajo a futuro con una mayor muestra de observaciones.

Con los datos disponibles para este trabajo, no hay manera de obtener una solución que explique todas las relaciones observadas. Esto deberá estudiarse con una muestra más amplia y considerando las incertidumbres debidas a los ICFs en los diagramas realizados.

En el futuro, se repetirá el cálculo de los ICFs incluyendo los modelos con una geometría de esfera hueca, que no se han incluido aquí. Se explorará si es posible obtener mejores ICFs dividiendo nuestro conjunto de modelos en subconjuntos en función a su abundancia de oxígeno. Esto permitirá proponer mejores ajustes definidos para distintos intervalos de metalicidad, reduciendo así las incertidumbres asociadas a los ICFs. También, se explorará el cálculo de los ICFs en función a iones distintos a los de oxígeno explorados aquí, para ver si permiten la obtención de mejores ajustes. Posteriormente, se utilizará un conjunto de observaciones más amplio, en el cual se incluyan objetos en el intervalo de grado de ionización que no se ha podido explorar aquí. También, se buscará que el nuevo conjunto de observaciones incluya objetos con líneas de cloro y carbono, para utilizar nuestros ICFs en el cálculo de abundancias de estos elementos. En la nueva muestra observacional se calcularán las abundancias de los elementos, y se determinarán las incertidumbres, de manera que en el análisis de las abundancias, se incluyan las incertidumbres asociadas a los ICFs.

Se realizará la redacción de un artículo tomando en cuenta todos estos aspectos.



# 7

## APÉNDICE

### 7.1 Diagrama BPT

La línea de Kewley et al. (2001) (línea K01) es una curva teórica propuesta para el diagrama BPT, basada en modelos de fotoionización cuyas fuentes de ionización se tomaron de modelos de síntesis de poblaciones estelares. Kewley et al. (2001) propusieron esta línea con el propósito de seleccionar de una muestra de galaxias a aquellas que, con certeza, tuvieran un núcleo activo. La curva K01 corresponde a la línea envolvente de los modelos de fotoionización ionizados por brotes de formación estelar calculados por los autores. Sin embargo, algunos de sus modelos están alejados de la realidad debido a que Kewley et al. (2001) no compararon sus modelos con regiones H II reales y su línea se propuso como el límite superior obtenido para modelos de fotoionización con ionización de estrellas masivas *a priori*. En cambio, la línea propuesta por Stasińska et al. (2006) (línea S06) fue obtenida a partir de modelos de fotoionización con brotes de formación estelar para reproducir el envolvente de los objetos ionizados por estrellas masivas en el diagrama BPT, utilizando decenas de miles de galaxias del SDSS (datos con los que Kewley et al. 2001 no contaba). La línea de Kauffmann et al. (2003) (línea K03) es simplemente una traslación de la línea K01 motivada por observaciones de galaxias por el SDSS, las cuales mostraban claramente que la línea K01 no delimitaba correctamente a las galaxias ionizadas únicamente por estrellas masivas. Esta línea es puramente empírica, pero no reproduce exactamente al envolvente superior de galaxias del SDSS en el diagrama BPT. Las líneas de K01 y K03 son ampliamente utilizadas en la literatura para separar galaxias ionizadas únicamente por un núcleo activo de galaxias ionizadas conjuntamente por un núcleo activo y por estrellas

masivas (llamadas galaxias *compuestas*, las cuales ocupan la región entre las líneas K01 y K03 en el diagrama BPT) y de galaxias ionizadas únicamente por estrellas masivas. Esta interpretación no es correcta: las galaxias que se encuentran por debajo de la línea K03 tienen una contribución de su ionización debida a fuentes más energéticas que estrellas masivas, siendo esta contribución mayor a medida que uno se aleja de la línea S06 hacia arriba. Por otro lado, las galaxias que se encuentran por arriba de la línea K01 no son ionizadas por núcleos activos únicamente, sino que tienen una contribución de estrellas masivas, y disminuye conforme uno se aleja de la línea de K01. Por lo tanto, se espera que las observaciones de nuestra muestra que se encuentran en la región por arriba de las curvas de Kewley et al. (2001) y de Kauffmann et al. (2003) tengan una fuente de ionización distinta a las fuentes de radiación de regiones H II. Esto se confirmó al explorar cada una de estas observaciones por separado:

- En el caso de la primera observación, NGC 300 7, Bresolin et al. (2009a) determinan una temperatura  $T_e[\text{O III}]$  muy alta para este objeto comparada con las otras 27 regiones H II en la galaxia NGC 300 de su muestra; además, reportan líneas anchas de He II  $\lambda\lambda 5200, 4541$  y  $5411$  y líneas de He II  $\lambda 4686$  muy intensas. Estas características llevan a Bresolin et al. (2009a) a plantear que la fuente de este objeto corresponde a una estrella tipo W-R y confirman que se trata de una WN temprana, algo propuesto previamente por Schild & Testor (1992). Esto confirma que este objeto no puede ser considerado una región H II típica, por lo que no se buscó cubrirla con nuestro conjunto de modelos de fotoionización.
- El objeto NGC 0598 B90 observado por Bresolin et al. (2010) no es resaltado por estos autores. Sin embargo, Crockett et al. (2006) reportan para este objeto (bajo el nombre de BCLMP 090) un cociente de intensidades de  $[\text{O III}] \lambda 5007/\text{H}_\beta$  de 6.6, valor alto comparado con el mismo cociente en regiones H II de su muestra con una abundancia de oxígeno similar (de  $\log(\text{O}/\text{H}) = -3.5$ ). Además, los mismos autores detectan en este objeto la línea nebular de He II  $\lambda 4686$ , la cual, está asociada a nebulosas con estrellas de tipo Wolf-Rayet (Garnett et al. 1991), binarias de rayos X de alta masa y solamente en un caso a una nebulosa con una estrella tipo O de secuencia principal (Stasińska et al. 1986). Esto confirma el alto grado de ionización y excitación de la nebulosa, y por lo tanto la incertidumbre sobre la naturaleza de la fuente de radiación del objeto BCLMP 090 (Crockett et al. 2006), por lo que tampoco se buscará cubrir esta observación con nuestros modelos.
- El objeto NGC 4395 -003-003 reportado por van Zee et al. (1998) también diverge del conjunto de 186 regiones H II de distintas galaxias que los autores estudian, ya que su posición se encuentra alejada del conjunto total de objetos, no sólo en el diagrama BPT clásico, sino también en el diagrama de  $[\text{O III}] \lambda\lambda 4959, 5007/\text{H}_\beta$  con respecto a  $[\text{S II}] \lambda\lambda 6717, 6731/\text{H}_\alpha$ . Esto lleva a los autores a concluir que la galaxia NGC 4395 alberga una galaxia Seyfert enana (confirmando lo propuesto por Ho et al. 1995), la cuál domina el espectro observado.

- Finalmente, para NGC 5236 p5 y NGC 5236 p36, Bresolin et al. (2009b) determinaron cocientes de  $[\text{N II}] \lambda 6584/\text{H}_\alpha$  y  $[\text{S II}] \lambda\lambda 6717,6731/\text{H}_\alpha$  muy altos comparados con el resto de las regiones H II de su muestra (lo cual, llevó a los autores a excluirlos de su muestra observacional). Específicamente en el caso del objeto NGC 5236 p36, esto comprueba lo propuesto por Blair & Long (2004), quienes clasifican a este objeto como un remanente de supernova. Puesto que el comportamiento del objeto NGC 5236 p5 es similar en los diagramas diagnóstico, es probable que también se trate de un remanente de supernova, por lo que al igual que Bresolin et al. (2009b) descartaremos ambas observaciones de nuestra muestra observacional.



## REFERENCIAS

- Abazajian, K. N., Adelman-McCarthy, J. K., Agüeros, M. A., Allam, S. S., Allende Prieto, C., An, D., Anderson, K. S. J., Anderson, S. F., Annis, J., Bahcall, N. A., & et al. 2009, *ApJS*, 182, 543
- Asplund, M., Grevesse, N., Sauval, A. J., & Scott, P. 2009, *ARA&A*, 47, 481
- Baldwin, J. A., Phillips, M. M., & Terlevich, R. 1981, *PASP*, 93, 5
- Berg, D. A., Skillman, E. D., Garnett, D. R., Croxall, K. V., Marble, A. R., Smith, J. D., Gordon, K., & Kennicutt, Jr., R. C. 2013, *ApJ*, 775, 128
- Blair, W. P. & Long, K. S. 2004, *ApJS*, 155, 101
- Bresolin, F. 2007, *ApJ*, 656, 186
- . 2011a, *ApJ*, 729, 56
- . 2011b, *ApJ*, 730, 129
- Bresolin, F., Garnett, D. R., & Kennicutt, Jr., R. C. 2004, *ApJ*, 615, 228
- Bresolin, F., Gieren, W., Kudritzki, R.-P., Pietrzyński, G., Urbaneja, M. A., & Carraro, G. 2009a, *ApJ*, 700, 309
- Bresolin, F., Kennicutt, R. C., & Ryan-Weber, E. 2012, *ApJ*, 750, 122
- Bresolin, F., Ryan-Weber, E., Kennicutt, R. C., & Goddard, Q. 2009b, *ApJ*, 695, 580
- Bresolin, F., Schaerer, D., González Delgado, R. M., & Stasińska, G. 2005, *A&A*, 441, 981
- Bresolin, F., Stasińska, G., Vílchez, J. M., Simon, J. D., & Rosolowsky, E. 2010, *MNRAS*, 404, 1679
- Carigi, L. & Peimbert, M. 2011, *RevMexAA*, 47, 139

- Chabrier, G. 2003, *PASP*, 115, 763
- Cid Fernandes, R., Stasińska, G., Schlickmann, M. S., Mateus, A., Vale Asari, N., Schoenell, W., & Sodr e, L. 2010, *MNRAS*, 403, 1036
- Crockett, N. R., Garnett, D. R., Massey, P., & Jacoby, G. 2006, *ApJ*, 637, 741
- Delgado-Inglada, G., Morisset, C., & Stasińska, G. 2014, *MNRAS*, 440, 536
- Draine, B. T. 2011, *ApJ*, 732, 100
- Esteban, C., García-Rojas, J., & P rez-Mesa, V. 2015, *MNRAS*, 452, 1553
- Ferland, G. J., Porter, R. L., van Hoof, P. A. M., Williams, R. J. R., Abel, N. P., Lykins, M. L., Shaw, G., Henney, W. J., & Stancil, P. C. 2013, *RevMexAA*, 49, 137
- Froese Fischer, C. & Tachiev, G. 2004, *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 87, 1
- Galavis, M. E., Mendoza, C., & Zeippen, C. J. 1997, *A&AS*, 123, 159
- Garnett, D. R. 1989, *ApJ*, 345, 282
- Garnett, D. R., Kennicutt, Jr., R. C., Chu, Y.-H., & Skillman, E. D. 1991, *PASP*, 103, 850
- Goddard, Q. E., Bresolin, F., Kennicutt, R. C., Ryan-Weber, E. V., & Rosales-Ortega, F. F. 2011, *MNRAS*, 412, 1246
- González Delgado, R. M., Pérez, E., Cid Fernandes, R., García-Benito, R., de Amorim, A. L., Sánchez, S. F., Husemann, B., Cortijo-Ferrero, C., López Fernández, R., Sánchez-Bl zquez, P., Bekeraite, S., Walcher, C. J., Falcón-Barroso, J., Gallazzi, A., van de Ven, G., Alves, J., Bland-Hawthorn, J., Kennicutt, R. C., Kupko, D., Lyubenova, M., Mast, D., Moll , M., Marino, R. A., Quirrenbach, A., Vílchez, J. M., & Wisotzki, L. 2014, *A&A*, 562, A47
- Henry, R. B. C., Edmunds, M. G., & K ppen, J. 2000, *ApJ*, 541, 660
- Ho, L. C., Filippenko, A. V., & Sargent, W. L. 1995, *ApJS*, 98, 477
- Izotov, Y. I., Stasińska, G., Meynet, G., Guseva, N. G., & Thuan, T. X. 2006, *A&A*, 448, 955
- Izotov, Y. I. & Thuan, T. X. 2004, *ApJ*, 602, 200
- Izotov, Y. I., Thuan, T. X., & Lipovetsky, V. A. 1994, *ApJ*, 435, 647
- Izotov, Y. I., Thuan, T. X., & Stasińska, G. 2007, *ApJ*, 662, 15
- Juan de Dios, L. & Rodríguez, M. 2017, *MNRAS*, 469, 1036

- Kauffmann, G., Heckman, T. M., Tremonti, C., Brinchmann, J., Charlot, S., White, S. D. M., Ridgway, S. E., Brinkmann, J., Fukugita, M., Hall, P. B., Ivezić, Ž., Richards, G. T., & Schneider, D. P. 2003, *MNRAS*, 346, 1055
- Kaufman, V. & Sugar, J. 1986, *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 15, 321
- Kennicutt, Jr., R. C., Bresolin, F., & Garnett, D. R. 2003, *ApJ*, 591, 801
- Kepner, J. V. 1999, *ApJ*, 520, 59
- Kewley, L. J., Dopita, M. A., Sutherland, R. S., Heisler, C. A., & Trevena, J. 2001, *ApJ*, 556, 121
- Kisielius, R., Storey, P. J., Ferland, G. J., & Keenan, F. P. 2009, *MNRAS*, 397, 903
- Kobulnicky, H. A. & Kewley, L. J. 2004, *ApJ*, 617, 240
- Kurucz, R. L. 1979, *ApJS*, 40, 1
- Lanz, T. & Hubeny, I. 2003, *ApJS*, 146, 417
- Lennon, D. J. & Burke, V. M. 1994, *A&AS*, 103, 273
- Li, Y., Bresolin, F., & Kennicutt, Jr., R. C. 2013, *ApJ*, 766, 17
- Luridiana, V., Morisset, C., & Shaw, R. A. 2015, *A&A*, 573, A42
- Maeder, A. 1990, *A&AS*, 84, 139
- Mathis, J. S. 1985, *ApJ*, 291, 247
- Mathis, J. S. & Rosa, M. R. 1991, *A&A*, 245, 625
- McGaugh, S. S. 1991, *ApJ*, 380, 140
- McLaughlin, B. M. & Bell, K. L. 2000, *Journal of Physics B Atomic Molecular Physics*, 33, 597
- Mendoza, C. & Zeippen, C. J. 1982, *MNRAS*, 198, 127
- Mihalas, D. 1972, *Non-LTE model atmospheres for B and O stars*.
- Mollá, M., García-Vargas, M. L., & Bressan, A. 2009a, *MNRAS*, 398, 451
- . 2009b, *MNRAS*, 398, 451
- Munoz Burgos, J. M., Loch, S. D., Ballance, C. P., & Boivin, R. F. 2009, *A&A*, 500, 1253
- Osterbrock, D. E. 1989, *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei*

- Pagel, B. E. J. 2009, *Nucleosynthesis and Chemical Evolution of Galaxies*
- Pauldrach, A. W. A., Hoffmann, T. L., & Lennon, M. 2001, *A&A*, 375, 161
- Peimbert, A. & Peimbert, M. 2010, *ApJ*, 724, 791
- Peimbert, M. & Costero, R. 1969, *Boletín de los Observatorios Tonantzintla y Tacubaya*, 5, 3
- Peimbert, M. & Torres-Peimbert, S. 1977, *MNRAS*, 179, 217
- Pérez-Montero, E. 2014, *MNRAS*, 441, 2663
- Pérez-Montero, E., Hägele, G. F., Contini, T., & Díaz, Á. I. 2007, *MNRAS*, 381, 125
- Pilyugin, L. S., Vílchez, J. M., Mattsson, L., & Thuan, T. X. 2012, *MNRAS*, 421, 1624
- Podobedova, L. I., Kelleher, D. E., & Wiese, W. L. 2009, *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 38, 171
- Ramsbottom, C. A. & Bell, K. L. 1997, *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 66, 65
- Ramsbottom, C. A., Bell, K. L., & Stafford, R. P. 1996, *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 63, 57
- Rémy-Ruyer, A., Madden, S. C., Galliano, F., Galametz, M., Takeuchi, T. T., Asano, R. S., Zhukovska, S., Lebouteiller, V., Cormier, D., Jones, A., Bocchio, M., Baes, M., Bendo, G. J., Boquien, M., Boselli, A., DeLooze, I., Doublier-Pritchard, V., Hughes, T., Karczewski, O. Ł., & Spinoglio, L. 2014, *A&A*, 563, A31
- Schild, H. & Testor, G. 1992, *A&A*, 266, 145
- Simón-Díaz, S. & Stasińska, G. 2011, *A&A*, 526, A48
- Smith, L. J., Norris, R. P. F., & Crowther, P. A. 2002, *MNRAS*, 337, 1309
- Stasińska, G. 1978, *A&A*, 66, 257
- . 1990, *A&AS*, 83, 501
- . 2002, *ArXiv Astrophysics e-prints*
- Stasińska, G., Cid Fernandes, R., Mateus, A., Sodré, L., & Asari, N. V. 2006, *MNRAS*, 371, 972
- Stasińska, G., Izotov, Y., Morisset, C., & Guseva, N. 2015, *A&A*, 576, A83
- Stasińska, G., Testor, G., & Heydari-Malayeri, M. 1986, *A&A*, 170, L4
- Storey, P. J., Sochi, T., & Badnell, N. R. 2014, *MNRAS*, 441, 3028

- Storey, P. J. & Zeippen, C. J. 2000, MNRAS, 312, 813
- Strauss, M. A., Weinberg, D. H., Lupton, R. H., Narayanan, V. K., Annis, J., Bernardi, M., Blanton, M., Burles, S., Connolly, A. J., Dalcanton, J., Doi, M., Eisenstein, D., Frieman, J. A., Fukugita, M., Gunn, J. E., Ivezić, Ž., Kent, S., Kim, R. S. J., Knapp, G. R., Kron, R. G., Munn, J. A., Newberg, H. J., Nichol, R. C., Okamura, S., Quinn, T. R., Richmond, M. W., Schlegel, D. J., Shimasaku, K., SubbaRao, M., Szalay, A. S., Vanden Berk, D., Vogeley, M. S., Yanny, B., Yasuda, N., York, D. G., & Zehavi, I. 2002, AJ, 124, 1810
- Tayal, S. S. & Gupta, G. P. 1999, ApJ, 526, 544
- Tayal, S. S. & Zatsarinny, O. 2010, ApJS, 188, 32
- Tremonti, C. A., Heckman, T. M., Kauffmann, G., Brinchmann, J., Charlot, S., White, S. D. M., Seibert, M., Peng, E. W., Schlegel, D. J., Uomoto, A., Fukugita, M., & Brinkmann, J. 2004, ApJ, 613, 898
- Vale Asari, N., Stasińska, G., Morisset, C., & Cid Fernandes, R. 2016, MNRAS, 460, 1739
- van Zee, L., Salzer, J. J., Haynes, M. P., O'Donoghue, A. A., & Balonek, T. J. 1998, AJ, 116, 2805
- Vila Costas, M. B. & Edmunds, M. G. 1993, MNRAS, 265, 199
- Wiese, W. L., Fuhr, J. R., & Deters, T. M. 1996, Atomic transition probabilities of carbon, nitrogen, and oxygen : a critical data compilation
- Zurita, A. & Bresolin, F. 2012, MNRAS, 427, 1463