

EL CONTENIDO ESTELAR DE LAS GALAXIAS A LA RESOLUCIÓN DE J-PAS

Proyecto de candidatura para optar al título de Ph.D.

ALFREDO J. MEJÍA



Posgrado de Física Fundamental
Facultad de Ciencias
Universidad de Los Andes

Alfredo J. Mejía: *El Contenido Estelar de las Galaxias a la Resolución de J-PAS*, Proyecto de candidatura para optar al título de Ph.D., © 20 de noviembre de 2017

SUPERVISOR:

Gladis Magris

LUGAR:

Centro de Investigaciones de Astronomía (CIDA), Mérida, Venezuela

FECHA:

20 de noviembre de 2017

ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	El contexto	1
1.2	El problema	3
1.2.1	Sobre los sondeos de galaxias	3
1.2.2	Sobre la síntesis espectral	3
1.3	El objetivo	4
1.3.1	Los objetivos específicos	4
2	MUESTRAS Y PROCEDIMIENTOS	5
2.1	Los sondeos relevantes	5
2.1.1	La muestra simulada	5
2.1.2	La muestra observada	7
2.2	El método	8
2.2.1	Ajuste espectral no paramétrico	9
2.2.2	El algoritmo DYNBAS	10
2.3	Los ingredientes y los parámetros físicos	10
2.3.1	Los efectos del MIE	11
2.3.2	La cinemática estelar	12
2.3.3	El contenido estelar	12
2.4	El tratamiento estadístico	13
2.4.1	Análisis de los residuos	13
2.4.2	Análisis de las discrepancias	14
2.4.3	Análisis de la Relación Edad-Metalicidad	14
	BIBLIOGRAFÍA	17

INTRODUCCIÓN

1.1 EL CONTEXTO

En el camino hacia la construcción de una teoría que explique la formación de las estructuras visibles en el Universo, las galaxias, que son los bloques fundamentales que conforman dicha estructura, se han convertido en el tópico de investigación más importante de la cosmología observacional. Aunque no existe una definición formal de lo que es una galaxia (e.g. Forbes y Kroupa, 2011), esta es generalmente descrita como un sistema gravitacionalmente ligado que resulta de la co-evolución dinámica de un halo de materia oscura y un conjunto de subestructuras de materia bariónica. Dicha materia bariónica coexiste en múltiples fases: gas ionizado, atómico y molecular, y en plasmas autogravitantes llamados estrellas. Aunque en esta definición clasifican la gran *mayoría* de los objetos extragalácticos observados en el presente, la falta de una definición formal es mero reflejo de que una teoría que explique la existencia de *todos* estos objetos está ausente. El camino tiene dos sentidos. Uno consiste en una construcción *ab initio* para la formación y la evolución de las estructuras en el Universo a partir de las leyes fundamentales de la física y de un contexto cosmológico que dicte las escalas espaciales y temporales en las cuales los fenómenos físicos tienen lugar.

El otro sentido, el cual será el recorrido en el presente estudio, consiste en interpretar los observables en las propiedades físicas de las galaxias observadas a distintas épocas cosmológicas. Para ello los sondeos proveen la información necesaria en la forma de mediciones de la radiación electromagnética que las galaxias emiten. En términos de las distintas componentes del contenido bariónico en una galaxia, la luminosidad *emitida*, en la longitud de onda $\lambda = \lambda_{\text{emi}}$, en el instante t_{emi} , puede representarse simplemente como la suma:

$$L_{\lambda}^{\text{emi}}(Z; t_{\text{emi}}) = L_{\lambda, \star}(Z_{\star}; t_{\text{emi}}) + L_{\lambda, \text{MIE}^{+}}(Z_{\text{MIE}^{+}}; t_{\text{emi}}) - L_{\lambda, \text{MIE}^{-}}(Z_{\text{MIE}^{-}}; t_{\text{emi}}), \quad (1)$$

donde $L_{\lambda, \star}$ es luminosidad integrada de cada estrella, y $L_{\lambda, \text{MIE}^{-}}$ y $L_{\lambda, \text{MIE}^{+}}$ son la luminosidad absorbida/dispersada por parte del gas y del polvo fríos, y la re-emisión por parte del gas ionizado y del polvo caliente, respectivamente, en el Medio Interestelar (MIE). La luminosidad por supuesto depende de las propiedades físicas del medio en el que se origina y a través del cual viajan los fotones. De manera que ésta se ha descrito en la Ec. (1) como función del contenido químico, usualmente parametrizado por la metalicidad (i.e., la fracción de especies químicas más pesadas que el helio) en los interiores estelares, Z_{\star} , y de la metalicidad del MIE, Z_{MIE} ; ambas a su vez funciones del tiempo.

La cantidad que se mide en los observatorios no es la luminosidad en sí, sino el flujo, i.e. la cantidad de energía radiada por unidad de tiempo por unidad de área, F_{λ}^{obs} , observado en un rango de longitudes de onda, $\lambda = \lambda_{\text{obs}}$. Este flujo es inevitablemente perturbado con incertidumbres inherentes al proceso de medición debidas a las limitaciones tecnológicas del instrumento, la técnica de medición y a las condiciones

en que se realizó la misma. A estas fuentes de incertidumbre se les denominará ϵ_{med} . Si la radiación electromagnética emitida es isotrópica, entonces la luminosidad en la Ec. (1) puede reescribirse en términos del flujo medido como:

$$F_{\lambda_{\text{obs}}}^{\text{obs}}(Z; t_{\text{emi}}) = \frac{1}{1+z} \frac{L_{\lambda_{\text{emi}}}^{\text{emi}}(Z; t_{\text{emi}})}{4\pi D_L(z)^2} + \delta F_{\lambda_{\text{obs}}}^{\text{obs}}(\epsilon_{\text{med}}), \quad (2)$$

donde $D_L(z)$ es la distancia que recorre un fotón desde que escapa al Medio Intergaláctico (MIG) hasta que es observado por el detector (distancia luminosa) y $z \equiv \lambda_{\text{obs}}/\lambda_{\text{emi}} - 1$ es el corrimiento al rojo cosmológico, i. e., el factor por el cual éste se ha alargado hacia el rojo en longitud de onda debido a la expansión del Universo, desde el instante de su emisión (Hogg, 1999; Hogg y col., 2002). Es el objetivo principal de la astronomía extragaláctica interpretar el conjunto de observaciones de galaxias individuales, $\{F_{\lambda}^{\text{obs}}\}$, provisto por los sondeos, en la Historia de Enriquecimiento Químico (HEQ), $\zeta(Z_0, t)$, y en la Historia de Formación Estelar (HFE), $\psi(Z; t)$, con el fin de avanzar en la construcción teórica que describa la formación y la evolución de las galaxias. Tal objetivo no es trivial, pues no solo las incertidumbres introducidas por ϵ_{med} intervienen, sino que los procesos físicos involucrados, los cuales ocurren en una gran variedad de escalas espaciales y temporales, suponen que la astronomía extragaláctica debe fundamentarse en los pilares de la física fundamental (véase Naab y Ostriker, 2017; Somerville y Davé, 2015, para revisiones detalladas). Consecuentemente, las incertidumbres inherentes a cada teoría y a cada supuesto, encapsuladas en ϵ_{teo} , se propagarán durante el proceso de interpretación de $\{F_{\lambda}^{\text{obs}}\}$ en las funciones $\zeta(Z_0, t)$ y $\psi(Z; t)$.

Además de las fuentes de incertidumbres mencionadas en los párrafos anteriores, el problema de interpretar los observables en parámetros físicos está condicionado por dos razones principalmente. En primer lugar está el hecho de que las observaciones solo proveen la función $F_{\lambda_{\text{obs}}}(Z; t)$ evaluada en t_{emi} en la escala temporal de cada galaxia, por lo tanto la representación de las observaciones en el espacio de las funciones $\zeta(Z_0, t)$ y $\psi(Z; t)$ está probablemente degenerada, i. e. existe un conjunto de funciones capaces de reproducir la misma observación. En segundo lugar está el hecho de que la evolución química ocurre de manera diferencial en el tiempo, lo que significa que no todas las especies más pesadas que el helio están presentes en las mismas proporciones (e. g., Yates y col., 2013), de manera que Z y t_{emi} no solo son difíciles de medir, ambas están relacionadas de una forma *a priori* desconocida. Así, los métodos o técnicas utilizados para llevar a cabo la interpretación de las observaciones $\{F_{\lambda}^{\text{obs}}\}$ en las funciones $\zeta(t)$ y $\psi(Z; t)$, necesariamente introducirán una serie de suposiciones y simplificaciones, las cuales se traducirán en una fuente de incertidumbre adicional. A esta se le denotará por ϵ_{met} . Entonces, se puede describir cualquier variable física, $X_{\text{recuperado}}$ relacionada con las funciones $\zeta(Z_0, t)$ y $\psi(Z; t)$ y que resulte de dicha interpretación, como:

$$X_{\text{recuperado}} = X_{\text{real}} + \delta X(\epsilon_{\text{teo}}, \epsilon_{\text{obs}}, \epsilon_{\text{met}}), \quad (3)$$

donde X_{real} es el valor intrínseco real de la propiedad que se quiere determinar.

1.2 EL PROBLEMA

En los párrafos anteriores se ha descrito el problema principal de la astronomía extragaláctica, en el cual está enmarcado el presente estudio, en términos de las incertidumbres que se originan en las teorías relevantes (e. g., la teoría de formación de estructuras, la teoría del transporte radiativo, las teorías de formación y de evolución estelar, etc.), las incertidumbres inherentes al proceso de medición y las que tienen origen en el método de interpretación. En esta sección se delimitará la contribución que hará el presente estudio para resolver dicho problema.

1.2.1 Sobre los sondeos de galaxias

El producto de los sondeos que será relevante en este estudio es el conjunto de medidas $\{F_\lambda^{\text{obs}}\}$ de galaxias individuales. Se limitará el presente estudio a sondeos de galaxias en el rango espectral óptico, los cuales además proporcionan una plétora de información disponible públicamente (e. g., Abazajian y col., 2009; Moles y col., 2008; Wolf y col., 2003). Esto se traducirá en una minimización del impacto de las incertidumbres introducidas por los ingredientes teóricos (ϵ_{teo}), cuyas predicciones son inciertas más allá del rango óptico del espectro.

Aún con la restricción anterior, existen muchas formas en que $X_{\text{recuperado}}$ puede ser perturbado a través de $\{F_\lambda^{\text{obs}}\}$, sin embargo, este estudio se enfocará en la contribución de la resolución espectral a dichas perturbaciones, debido a que es un parámetro altamente variable de un sondeo a otro ($\Delta\lambda \sim 1 - 1000 \text{ \AA}$) y a que éste puede limitar críticamente la recuperabilidad de propiedades físicas fundamentales como la edad estelar y la metalicidad (e. g., MacArthur y col., 2010; Mitchell y col., 2013; Pforr y col., 2012). En ese sentido, se han escogido tres resoluciones representativas de los sondeos de galaxias en el rango óptico: espectroscopía de alta resolución ($\Delta\lambda \sim 1 \text{ \AA}$) y, fotometría de banda angosta ($\Delta\lambda \sim 100 \text{ \AA}$) y de banda ancha ($\Delta\lambda \sim 1000 \text{ \AA}$). En el siguiente capítulo se darán los detalles de los sondeos escogidos y de las características de $\{F_\lambda^{\text{obs}}\}$.

1.2.2 Sobre la síntesis espectral

El método de interpretación más implementado en la literatura es el de síntesis espectral (pero véase e. g., Chen y col., 2012), pues ha sido diseñado especialmente para explotar el poder estadístico provisto por los sondeos de galaxias, para muestrear el espacio de funciones $\zeta(Z_0, t)$ y $\psi(Z; t)$ (e. g., Heavens y col., 2000; Kauffmann y col., 2003). En la síntesis espectral el conjunto de medidas para una galaxia observada, $\{F_\lambda^{\text{obs}}\}$, es comparado con la predicción de los ingredientes físicos combinados en un modelo plausible. Así, las distintas fuentes de incertidumbres descritas en los párrafos anteriores se convolucionan durante el proceso de interpretación de una forma que no es trivial predecir, pues no todas las incertidumbres son conocidas de antemano. En particular, durante este proceso, el modelo asumido por el método de síntesis espectral para describir las funciones $\zeta(Z_0, t)$ y $\psi(Z; t)$ propaga las incertidumbres encapsuladas en ϵ_{met} . En este trabajo se implementará el método de síntesis espectral no paramétrico, que tradicionalmente ha requerido conjuntos $\{F_\lambda^{\text{obs}}\}$ con un número de elementos de resolución espectral del orden de $N_{\text{obs}} \sim 1000$ (véase el

siguiente capítulo para más detalles), para demostrar su aplicabilidad a sondeos fotométricos de galaxias, que usualmente proporcionan conjuntos $N_{\text{obs}} \sim 10$. Aunque el modelo propuesto captura los fenómenos físicos no lineales representados en la Ec. (2) por las contribuciones del MIE (segundo y tercer término del lado derecho de la igualdad), el enfoque principal en este estudio será el contenido estelar de las galaxias, de manera que las escalas temporales relevantes serán la escala de formación estelar y la de evolución estelar.

1.3 EL OBJETIVO

El principal objeto de este estudio es demostrar que el contenido estelar codificado en la DEE de una galaxia no resuelta, puede extraerse a partir de observaciones fotométricas utilizando el método de la síntesis espectral no paramétrico. Para esto se desarrollará un análisis sobre la propagación de las incertidumbres durante la interpretación de $\{F_{\lambda}^{\text{obs}}\}$ en las funciones $\zeta(Z_0, t)$ y $\psi(Z; t)$, haciendo énfasis en el comportamiento estadístico de las fuentes de incertidumbre combinadas $\epsilon_{\text{obs}} \otimes \epsilon_{\text{teo}} \otimes \epsilon_{\text{met}}$, como función de la resolución espectral.

1.3.1 Los objetivos específicos

DEFINIR LAS MUESTRAS. Se seleccionarán dos muestras de galaxias. La primera será una muestra de galaxias sintéticas con “medidas” en tres resoluciones espectrales representativas de espectroscopía de alta resolución, fotometría de banda ancha y fotometría de banda angosta, todas en el rango óptico del espectro. La segunda muestra será una observada usando la técnica de la espectroscopía de alta resolución.

REALIZAR PRUEBAS DE CONSISTENCIA INTERNA. La muestra sintética a las distintas resoluciones será utilizada para evaluar las incertidumbres propagadas durante la interpretación de las observaciones en la forma de un diagnóstico *interno*, donde X_{real} es conocido de antemano.

REALIZAR PRUEBAS DE CONSISTENCIA EXTERNA. La fotometría tradicional (de banda media/ancha) proporciona poca información sobre la metalicidad debido a que los rasgos espectrales trazadores de esta propiedad son generalmente de unas decenas de Å. Por esta razón se ha planteado en este trabajo evaluar la recuperabilidad de la metalicidad estelar a partir de observaciones fotométricas de banda angosta, en el marco del *Javalambre Physics of the Accelerating Universe Astrophysical Survey* (J-PAS). Para esto, la muestra real se utilizará para realizar un diagnóstico *externo* comparando los resultados del presente estudio con los presentados por otros autores.

El método para realizar la interpretación, los detalles de las muestras de datos simulados y observados, y los procedimientos estadísticos para el análisis de los resultados se describen a continuación.

MUESTRAS Y PROCEDIMIENTOS

En este capítulo se describen las muestras simulada y observada, el método de interpretación de $\{F_{\lambda}^{\text{obs}}\}$ y los procedimientos para el análisis de los resultados.

2.1 LOS SONDEOS RELEVANTES

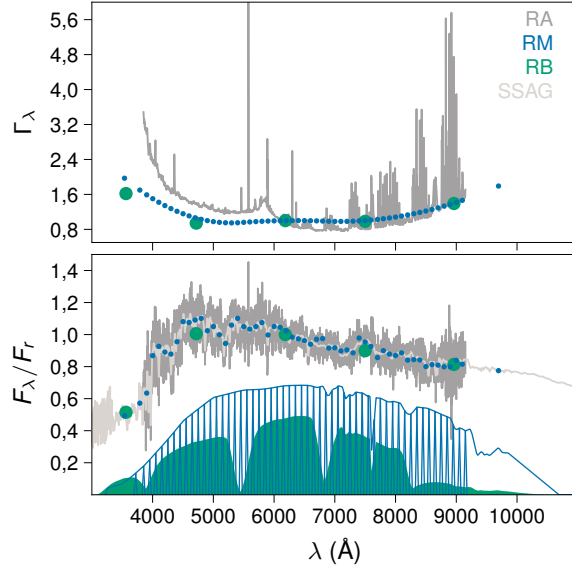
Ya que la resolución espectral de las observaciones es una cantidad que varía de un sondeo a otro, es un parámetro sensible para evaluar el contenido estelar que se puede extraer de los sondeos de galaxias como función de éste. En ese sentido se ha planteado hacer dicha evaluación a tres resoluciones espectrales distintas: fotometría de banda ancha, de banda angosta y espectroscopía de alta resolución. Para contextualizar el análisis en el marco de sondeos reales se han escogido el *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS, York y col., 2000), que proporcionará la información para construir las muestras espectroscópica (Strauss y col., 2002) y fotométrica de banda ancha (Gunn y col., 1998) y, el *Javalambre Physics of the Accelerating Universe Astrophysical Survey* (J-PAS, Benitez y col., 2014; Dupke y col., 2015) que proporcionará la información para construir la muestra fotométrica de banda angosta. Este último sondeo será de particular interés a lo largo de este trabajo puesto que promete superar la información provista por otros sondeos en la recuperación de la abundancia química estelar en las galaxias, un parámetro físico que ha permanecido elusivo hasta ahora en sondeos fotométricos tradicionales (aún así véase, MacArthur y col., 2010).

2.1.1 La muestra simulada

Chen y col. (2012) introdujeron una receta para simular observaciones de galaxias usando un método de Monte Carlo para muestrear el espacio de parámetros de funciones las $\zeta(Z_0, t)$ y $\psi(Z; t)$ previamente definidas por los autores. Magris y col. (2015) implementaron esta receta en una biblioteca llamada *Synthetic Spectral Atlas of Galaxies* (SSAG) para probar varias implementaciones del método de la síntesis espectral. En el presente trabajo se utilizará la misma muestra de 134 HFEs usadas por Magris y col. (2015). Aunque la SSAG por sí misma no proporciona distribuciones de índices espectrales realistas, pues los fenómenos físicos que regulan el contenido estelar no entran en la simulación, la muestra sintética se ha escogido de manera que la bimodalidad en las distribuciones de propiedades observacionales como el color y la discontinuidad de 4000 Å estén presentes como en sondeos reales (Baldry y col., 2004; Kauffmann y col., 2003; Strateva y col., 2001).

Los espectros de la SSAG, por construcción, tienen una resolución espectral $\Delta\lambda = 2,5$ Å. Entonces, a partir de estos espectros se sintetizarán la espectroscopía del SDSS caracterizada por una Resolución Alta (RA: $\Delta\lambda \sim 3$ Å Strauss y col., 2002), y la fotometría del J-PAS de Resolución Media (RM: $\Delta\lambda = 100$ Å Marin-Franch y col.,

Figura 1: *Arriba:* Distribución espectral del ruido instrumental típico a las diferentes resoluciones: espectroscopía del SDSS (RA: *gris*), fotometría del J-PAS (RM: *azul*) y del SDSS (RB: *verde*). Se muestra un espectro ejemplo a las resoluciones espectrales correspondientes. *Abajo:* Como ejemplo se muestra la misma DEE “observada” por los distintos instrumentos, junto con la original (SSAG: *en gris claro*). La función de transmisión de las cámaras fotométricas del J-PAS y del SDSS tomando en cuenta la contribución de la atmósfera terrestre también se muestran.



2015) y la fotometría del SDSS de Resolución Baja (RB: $\Delta\lambda \sim 1000$ Doi y col., 2010), ambas usando la integral del flujo esperado en la k -ésima banda espectral:

$$F_k = \int T_k(\lambda) f_\lambda d\lambda \bigg/ \int T_k(\lambda) d\lambda, \quad (4)$$

donde las funciones de respuesta, $T_k(\lambda)$, de ambos sistemas fotométricos son como se muestra en la Fig. 1.

Para simular datos espectrales realistas a las distintas resoluciones espectrales, se procederá como sigue: (i) se añadirá ruido Gaussiano aleatoriamente al flujo en cada elemento de resolución asumiendo ruido no correlado, lo cual es observacionalmente plausible. Para esto se construye una función Γ_λ tal que ésta es el promedio de los errores reportados por el SDSS en la espectroscopía de galaxias hasta $z = 0,1$, normalizado a la unidad en la longitud de onda efectiva de la banda r' (Magris y col., 2015). Dicha función será luego suavizada y degradada en resolución para ajustarse a las distintas resoluciones espectrales estudiadas en este trabajo. En la Fig. 1 se muestran las curvas Γ_λ resultantes. En este sentido, el espectro “observado” resultante será simplemente:

$$F_\lambda^{\text{obs}} = F_\lambda + \mathcal{N}(\mu, \sigma_\lambda), \quad (5)$$

donde $\mathcal{N}(\mu, \sigma_\lambda)$ representa una realización aleatoria de una distribución Gaussiana con promedio $\mu = 0$ y desviación estándar $\sigma_\lambda = \Gamma_\lambda F_\lambda / (S/N)_r$ en cada elemento de resolución espectral. Para tomar en consideración el hecho de que la relación señal a ruido es $S/N \propto F_\lambda^{\text{obs}} / \sqrt{F_\lambda^{\text{obs}} + \sigma_{\text{ins}}^2}$, donde σ_{ins} es la desviación estándar del ruido introducido por el instrumento, se adoptará distintos valores de ésta en la banda r' , $(S/N)_r = 20, 45$ y 140 para los datos a RA, RM y RB, respectivamente. Nótese que estos valores son consistentes con las expectativas para sondeos reales de galaxias en el Universo local (Benitez y col., 2014; Howell, 2006). Para tomar en consideración las variaciones estadísticas de los parámetros físicos recuperados como función del ruido observacional, el procedimiento de añadir el ruido aleatorio

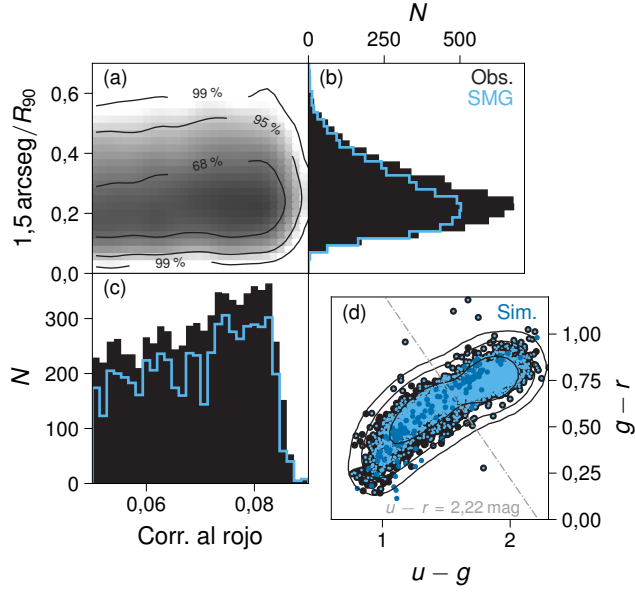


Figura 2: (a) La fracción de luz muestreada por la fibra de 1,5 arcseg con respecto del radio Petrosiano al 90 por ciento de la luz ($1,5 \text{ arcseg}/R_{90}$) como función del corrimiento al rojo cosmológico para la muestra de galaxias observadas (cf., §2.1.2). (b) La distribución marginal correspondiente al eje de las ordenadas y, (c) la correspondiente al eje de las abscisas (negro). (d) El diagrama $g - r$ versus $u - g$ para la muestra observada (negro) con los correspondientes contornos de confiabilidad a 1, 2 y 3σ . En el mismo plano se muestran la Submuestra de Garching (SMG; azul claro) y la muestra de galaxias sintéticas (azul oscuro). El separador entre GFE y GPa también se muestra (línea a trazos).

se repetirá 20 veces para cada espectro en la muestra de 134 galaxias, de manera que la muestra final comprenderá 2680 espectros en tres resoluciones espectrales, representativos de las observaciones reales en el Universo local. El resultado de una de las realizaciones de ruido se muestra en una proyección del espacio de colores del SDSS en la Fig. 2 en azul oscuro.

Es importante notar que el número de realizaciones que se adoptará es completamente arbitrario y representa un compromiso entre un tiempo de cómputo razonable y resultados estadísticamente robustos. A lo sumo se espera que este número de realizaciones permitirá un estudio espectro por espectro (2680) y no HFE por HFE (134) debido a la variabilidad esperada en parámetros físicos como la edad y la metalicidad (e. g., Magris y col., 2015).

2.1.2 La muestra observada

Para construir la muestra observada, se seleccionará un conjunto de ~ 7 k espectros de galaxias de las observaciones espectroscópicas del SDSS-DR7 (Abazajian y col., 2009), con las siguientes restricciones: (i) la relación señal a ruido debe ser > 10 para minimizar el impacto de las degeneraciones en los parámetros físicos recuperados; (ii) las galaxias deben estar en el universo local, $z \leq 0,09$, de manera que los espectros en reposo representen observaciones en el rango óptico; y (iii) el número de píxeles buenos debe ser superior a 3850. Adicionalmente, aquellas regiones del espectro donde se manifiestan las líneas de emisión $[\text{OII}]\lambda\lambda 3726, 3729$, $\text{H}\gamma$, $\text{H}\beta$, $[\text{OIII}]\lambda\lambda 4959, 5007$, $\text{HeI}\lambda 5876$, $[\text{OI}]\lambda 6300$, $[\text{NII}]\lambda\lambda 6548, 6583$, $\text{H}\alpha$, y $[\text{SII}]\lambda\lambda 6717, 6731$ serán enmascaradas (removidas) dentro de $\approx 20 \text{ \AA}$, sin importar si están presentes o no. Para facilitar el análisis en términos del contenido estelar (población vieja y población joven), la muestra resultante se dividirá en Galaxias con Formación Estelar (GFE, $u - r < 2,22 \text{ mag}$) y en Galaxias Pasivas (GPa, $u - r \geq 2,22 \text{ mag}$) de acuerdo con Strateva y col. (2001). En la Fig. 2d se muestra en la región en escala de grises el mapa de densidad de la muestra observada en el plano $g - r$ versus $u - g$,

los contornos representan las regiones de confianza de 1, 2 y 3σ . Un subconjunto de galaxias de la muestra observada fue estudiado por Gallazzi y col. (2005). Para anclar los resultados presentados en este trabajo con los disponibles en la literatura, se usará los resultados de Gallazzi y col. (2005) para este subconjunto el cual será referido en adelante como Submuestra de Garching (SMG)¹. En la Fig. 2 la SMG es representada en azul claro.

Ya que los datos fotométricos del J-PAS no existen aún, para probar la consistencia entre los parámetros derivados a partir de la espectroscopía de RA y los derivados a partir de la fotometría de RM, se sintetizará observaciones a esta última resolución espectral a partir de las observaciones espectroscópicas del SDSS. Para esto se calculará el flujo esperado a través de la cámara fotométrica del J-PAS, usando la integral en la Ec. (4), donde f_λ será sustituido por el espectro en reposo de cada galaxia y $T_k(\lambda)$ por la función de respuesta de la cámara del J-PAS en el k -ésimo filtro (Marin-Franch y col., 2015). Una medida del error en F_k es proporcionada por la propagación de errores convencional (e. g., Bevington y Robinson, 2003) usando la relación

$$\sigma_k^2 = \int_\lambda T_k(\lambda)^2 \sigma_\lambda^2 d\lambda, \quad (6)$$

donde σ_λ es la desviación estándar en la medida f_λ reportada por el SDSS.

Los espectrógrafos del SDSS están configurados para cubrir la región espectral 3800 – 9200 Å (Strauss y col., 2002), mientras que la cámara del J-PAS comprenderá el rango $\sim 3500 - 10000$ Å (Marin-Franch y col., 2015). De manera que la información espectral de al menos cinco bandas fotométricas del J-PAS no estará presente. Más aún, aquellas regiones de los espectros del SDSS donde más del 10 por ciento de los píxeles dentro de una banda fotométrica hayan sido reportados como píxeles malos, se traducirá en que la banda correspondiente será removida del espectro sintetizado. Así que alrededor de 10 medidas del flujo a la resolución de J-PAS serán enmascaradas de los espectros sintetizados. Entonces, de la configuración original de 56 medidas del flujo planeada para J-PAS, solo unas ~ 40 medidas serán representadas en la muestra sintética en el mejor de los casos, i. e., sin tomar en cuenta las regiones enmascaradas para remover el efecto de la emisión del gas en el MIE. Por esta razón, para mitigar las consecuencias que esta incompletitud de información en los espectros sintéticos podría tener en el análisis de los resultados, el procedimiento para remover el efecto de la emisión del gas se realizará *a posteriori*, es decir, después de sintetizar los espectros J-PAS, de manera que *solo* los elementos de resolución afectados por dicha emisión serán removidos. Así, los espectros sintéticos tendrán alrededor de ~ 40 elementos de resolución. Finalmente, para establecer una diferencia entre las DEE de la muestra observada a una resolución y sus correspondientes contrapartidas simuladas, debido a los artefactos antes mencionados (e. g., remoción de las líneas de Balmer y píxeles malos), las DEE observadas a RA y RM serán referidas como RA* y RM*, respectivamente.

2.2 EL MÉTODO

El método de síntesis espectral, ajuste espectral o síntesis inversa ha sido rutinariamente utilizado para extraer el contenido estelar de las galaxias no resueltas desde

¹ disponible en la red en <http://www.mpa-garching.mpg.de/SDSS/>.

que aparecieron públicamente los primeros sondeos de galaxias con el suficiente poder estadístico. Estos métodos pueden dividirse en dos clases, dependiendo de las suposiciones que se hacen sobre las funciones $\zeta(Z_0, t)$ y $\psi(Z; t)$. Por una parte está el método paramétrico que, como su nombre indica, consiste en parametrizar dichas funciones bajo un conjunto de suposiciones físicamente plausibles (e.g., Brinchmann y col., 2004; Gallazzi y col., 2005; Kauffmann y col., 2003; Kriek y col., 2009). Bajo este esquema, los parámetros definitorios de $\zeta(Z_0, t)$ y $\psi(Z; t)$ de entrada se suponen inciertos, de manera que pueden ser descritos por distribuciones de probabilidad que reflejan el conocimiento *previo* sobre los fenómenos físicos involucrados. Así, la extracción del contenido estelar de las observaciones se implementa naturalmente en el marco de la inferencia estadística, generalmente usando el Teorema de Bayes (véase apéndice en Kauffmann y col., 2003). Por otro lado, el método no paramétrico no supone una forma funcional fija para $\zeta(Z_0, t)$ y $\psi(Z; t)$ más allá de las restricciones necesarias en el muestreo de las variables t y Z . Esta flexibilidad del método no paramétrico será particularmente explotada en este trabajo y se explicará en más detalle a continuación.

2.2.1 Ajuste espectral no paramétrico

El problema planteado por el método no paramétrico de ajuste espectral consiste en modelar la DEE observada F_λ^{obs} a partir de la función de verosimilitud $\mathcal{L}(F_\lambda^{\text{obs}} | \mathbf{x})$ que, bajo la suposición generalmente plausible de que las incertidumbres en los datos son Gaussianas y no están correlacionadas entre sí, es simplemente:

$$\mathcal{L}(F_\lambda^{\text{obs}} | \mathbf{x}) = \prod_{\lambda} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_\lambda^2}} \exp \left\{ -\frac{[F_\lambda^{\text{obs}} - F_\lambda^{\text{mod}}(\mathbf{x})]^2}{2\sigma_\lambda^2} \right\} \quad (7)$$

donde σ_λ es la desviación estándar en las medidas F_λ^{obs} . Este problema es usualmente resuelto en el marco de la técnica de Máxima Verosimilitud o Máxima Probabilidad *a posteriori* (e.g., Cid Fernandes y col., 2005; Heavens y col., 2000), que consiste en encontrar $\hat{\mathbf{x}}$ tal que $\mathcal{L}(F_\lambda^{\text{obs}} | \hat{\mathbf{x}})$ es máxima o, equivalentemente, encontrar el mínimo de la función de mérito

$$-2 \log \mathcal{L} + \text{const} \equiv \chi^2(\mathbf{x}) = \sum_{\lambda} \frac{[F_\lambda^{\text{obs}} - F_\lambda^{\text{mod}}(\mathbf{x})]^2}{\sigma_\lambda^2}. \quad (8)$$

Además, si el modelo propuesto es de la forma

$$L_\lambda^{\text{mod}}(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^{N_{\text{PES}}} w^k(\mathbf{x}) L_\lambda^k(\mathbf{x}), \quad (9)$$

y los pesos $w^k(\mathbf{x})$ son lineales en \mathbf{x} ,² entonces $\chi^2(\mathbf{x})$ es una función cuadrática del vector de parámetros y el problema se reduce a la resolución de un sistema de N_λ ecuaciones lineales con N_{PES} incógnitas.

² En esta notación la linealidad de $w^k(\mathbf{x})$ está asegurada, pues los fenómenos físicos no lineales como la cinemática estelar y la extinción por polvo se ya han sido capturados en $F_\lambda^k(\mathbf{x})$.

2.2.2 El algoritmo DYNBAS

Dynamical Basis Selection (DYNBAS; Magris y col., 2015; Mateu, 2009; Mateu y col., 2010) es un algoritmo no paramétrico de ajuste espectral diseñado para recuperar el contenido estelar de las galaxias minimizando los efectos de degeneración intrínsecos del problema. La DEE es reconstruida usando el modelo en la Ec. (9), con

$$w^k(\mathbf{x}) = a_{ij}^k, \quad (10a)$$

$$L_\lambda^k(\mathbf{x}) = L_\lambda^k(t_i, Z_j), \quad (10b)$$

donde $i = 1, \dots, N_{\text{edad}}$ y $j = 1, \dots, N_{\text{metalicidad}}$. El algoritmo DYNBAS por diseño usa un número mínimo de ingredientes físicos (combinando hasta $N_{\text{PESs}} = 3$ Poblaciones Estelares Simples, PES) dinámicamente seleccionados para reproducir los rasgos del espectro problema, mediante la consecución del mínimo absoluto de la función de mérito en Ec. (8), que se encuentre en la región del espacio de parámetros muestreada durante el ajuste. Ya sea que el modelo en las Ecs. (9 y 10) sea ensamblado usando $N_{\text{PESs}} = 1, 2$ o 3 componentes, dependerá de las peculiaridades de F_λ^{obs} .

Claramente DYNBAS no está diseñado para recuperar la HFE en su máxima resolución temporal, sino para hacer estimaciones robustas de las propiedades físicas globales, basadas en los rasgos más importantes en la HFE de la galaxia problema. La implementación actual de DYNBAS es factible para la extracción del contenido estelar a partir de la DEE integrada de poblaciones estelares con HFE relativamente simple (Cabrera-Ziri y col., 2016). A escalas extragalácticas la premisa se mantiene (e. g., Díaz-García y col., 2015; Mejía-Narváez y col., 2017). Díaz-García y col. (2015) presentaron una implementación del método no paramétrico llamada MUFFIT en la que se seleccionan dinámicamente dos PES que en combinación lineal son capaces de reproducir los rasgos espectrales más relevantes de las galaxias de la secuencia roja (dominadas por poblaciones estelares viejas y ricas en metales evolucionando pasivamente) a la resolución de la fotometría de ALHAMBRA (Moles y col., 2008). Independientemente, usando simulaciones de observaciones espectroscópicas de galaxias con $S/N = 20$, Magris y col. (2015) compararon el desempeño de DYNBAS frente a otros algoritmos de base fija y encontró que éste recupera las propiedades físicas globales con una exactitud y precisión comparable con los resultados de implementaciones que efectivamente buscan extraer la HFE (e. g., STARLIGHT). Estos resultados sugieren que las galaxias que resultan de HFE complejas pueden efectivamente ser descritas por una combinación de las contribuciones espectrales de una población joven, intermedia y una vieja (Cid Fernandes y col., 2005).

2.3 LOS INGREDIENTES Y LOS PARÁMETROS FÍSICOS

En este estudio se adoptará una versión actualizada de los modelos de síntesis de poblaciones estelares de Bruzual y Charlot (2003, en adelante BCo3), basada en las trayectorias evolutivas de Padova 1994 (Alongi y col., 1993; Bressan y col., 1993; Fagotto y col., 1994a,b; Girardi y col., 1996) y bibliotecas de espectros estelares actualizadas, denominadas XMLESS para indicar el uso de una versión extendida de las bibliotecas empíricas MILES+STELIB (Le Borgne y col., 2003; Sanchez-Blazquez

y col., 2006). Se adoptará la Función Inicial de Masa (FIM) de Chabrier (2003) y se supondrá universalidad, i. e. la FIM no introducirá parámetros libres durante la interpretación de $\{L_{\lambda}^{\text{obs}}\}$. En adelante a los modelos así definidos se les llamará BCo3xm para distinguirlos de los modelos originales de BCo3.

2.3.1 Los efectos del MIE

Para asegurar la ventaja de la linealidad del problema no paramétrico, los fenómenos no lineales serán tratados como se describe a continuación. Los modelos de síntesis de poblaciones estelares escogidos para el presente estudio no incluyen emisión del gas, de manera que para hacerlo sería necesario adoptar un modelo (e. g., Charlot y Longhetti, 2001) que introduciría más parámetros libres y, probablemente más degeneraciones. En vista de que se ha restringido el presente estudio al contenido estelar de las galaxias, la emisión del MIE ($L_{\lambda, \text{MIE}^+}$ en la Ec. 1) no será modelada. En primer lugar, la muestra simulada descrita en §2.1.1 fue construida usando los mismos modelos, entonces el conjunto de “medidas” $\{F_{\lambda}^{\text{obs}}\}$ será autoconsistente con la suposición en el modelo de que las galaxias no presentan emisión del gas. Por otra parte, en el caso de la muestra observada, la emisión del gas en las regiones de formación estelar (e. g., en GFEs), que será removida de las DEEs como se describe en §2.1.2, supondrá que la DEE resultante está en el mismo sistema de los modelos sin emisión del gas, $\{F_{\lambda}^{\text{mod}}\}$.³

La absorción/dispersión del MIE ($L_{\lambda, \text{MIE}^-}$ en la Ec. 1), cuyo efecto neto es remover fotones de la línea de visión de la galaxia observada, será introducido en $\{F_{\lambda}^{\text{mod}}\}$ usando una curva de extinción de la forma $S_{\lambda}(\tau_V)$. Físicamente se espera que la profundidad óptica, τ_V , sea una función del tiempo ya que las regiones de formación estelar, donde el MIE se condensa lo suficiente como para que la formación de granos de polvo ocurra (Draine, 2009), tienen un tiempo de vida del orden de unas pocas decenas de millones de años (véase, Lada y Lada, 2003, para una revisión). El modelo de extinción en dos fases de Charlot y Fall (2000) intenta capturar esta física de la siguiente manera: en la primera fase ($t_{\star} \leq 10^7$ años) las estrellas se encuentran embebidas en la nube molecular en que se formaron, la cual está caracterizada por una profundidad óptica τ_V y, en la segunda fase ($t_{\star} > 10^7$ años), solo una fracción μ de la profundidad óptica original contribuye a la extinción en el MIE debido a la disociación de la nube molecular. Así, el modelo de polvo en la muestra simulada estará caracterizado por dos curvas de extinción [$S(\tau_V)$ y $S(\mu\tau_V)$], mientras que la muestra observada estará probablemente caracterizada por fenómenos más complejos que los descritos por el modelo de Charlot y Fall (2000). Tojeiro y col. (2007) demostraron que debido a las degeneraciones intrínsecas del problema de síntesis espectral, no es posible recuperar ambos parámetros del polvo (τ_V y μ) de manera simultánea. Por esta razón, en este estudio se buscará la recuperación de la extinción *efectiva*, que en el caso de las galaxias de la muestra sintética sería equivalente a estimar $\tau_V^{\text{ef}} \equiv \mu\tau_V$, donde el parámetro libre, τ_V^{ef} , es la profundidad óptica en la banda V del MIE que está relacionada con la extinción total en la banda V mediante $A_V \approx 1,086\tau_V^{\text{ef}}$. La mejor determinación del parámetro A_V será buscada en el rango

³ Una última consideración sería la emisión del polvo caliente en el MIE. Sin embargo, como la emisión del polvo es importante solo en la región del infrarrojo del espectro, la restricción del presente estudio al rango óptico del espectro será suficiente para despreciar este efecto en la construcción de $\{F_{\lambda}^{\text{mod}}\}$.

plausible $0,0 - 1,5$ mag, de manera iterativa para asegurar un mínimo global de la función $\chi^2(\mathbf{x})$ en la Ec. (8). En este trabajo se adoptará la curva de extinción de Charlot y Fall (2000) para modelar la muestra simulada de la SSAG (descrita en §2.1.1), siendo consistente con la SSAG, y la curva de Cardelli y col. (1989) con $R_V = 3,1$ para modelar la DEE de las galaxias en la muestra observada (descrita en §2.1.2).

2.3.2 La cinemática estelar

Si F_λ^{obs} representa una observación espectroscópica ($\Delta\lambda \sim 1 \text{ \AA}$), la cinemática estelar producirá un efecto notable ($\sim 10 \text{ \AA}$) en las líneas espectrales: el movimiento de las estrellas alrededor del centro de gravedad de la galaxia proyectado en la línea de visión, produce un desplazamiento Doppler en el espectro observado de cada una de las fuentes cuyo efecto neto es el ensanchamiento de las líneas de emisión/absorción. Para modelar este fenómeno, el conjunto de observaciones $\{F_\lambda^{\text{mod}}\}$ será convolucionado con un *kernel* Gaussiano, $G(0, \sigma_v)$, donde σ_v será la dispersión del campo de velocidades estelares estimada para la galaxia. El mejor ajuste de σ_v será buscado en el rango plausible $0 - 400 \text{ km s}^{-1}$ de manera iterativa, ajustando una región angosta de 100 \AA alrededor del rasgo espectral Ca II H y K. En el caso de observaciones fotométricas ($\Delta\lambda > 100 \text{ \AA}$), el efecto de la cinemática estelar será despreciable y por lo tanto no será incluido en el modelo.

2.3.3 El contenido estelar

El contenido estelar de cada galaxia modelada es encapsulado por el algoritmo DYNBAS en las tres ternas $\{a^k\}$, $\{t^k\}$ y $\{Z^k\}$, donde se han omitido los índices i y j para simplificar la notación. Aunque en principio estas ternas proporcionan la información para hacer una construcción de las funciones $\zeta(Z_0, t)$ y $\psi(Z; t)$, dicha construcción a lo sumo ofrecerá información sobre los eventos más relevantes (en términos de las medidas $\{F_\lambda^{\text{obs}}\}$) en la historia de la galaxia problema hasta el instante t_{emi} cuya unicidad, como ya se ha mencionado antes, no está asegurada. Por esta razón muchos autores (e. g., Brinchmann y col., 2004; Cid Fernandes y col., 2013; Gallazzi y col., 2005; Heavens y col., 2000; Lee y col., 2009; Magris y col., 2015) optan por reducir sus versiones de la HFE y la HEQ (en la mayoría de los casos con muestreos más finos que $k \leq 3$) usando alguna estadística que represente estimados *globales* del contenido estelar. En este trabajo se procederá de la misma forma, como se describe a continuación.

La terna $\{a^k\}$ está directamente relacionada con la masa estelar, pues de entrada la DEE de los modelos de PES de BC03xm está normalizada a una masa solar, luego, la luminosidad está expresada en unidades de $L_\odot \text{ \AA}^{-1} M_\odot^{-1}$. Si además F_λ^{obs} está expresado en unidades de $L_\odot \text{ \AA}^{-1}$, los coeficientes $\{a^k\}$ serán precisamente la contribución en masa (en unidades M_\odot) de gas en el MIE con metalicidad $\{Z^k\}$ transformada en estrellas que en el instante t_{emi} tenían una edad $\{t^k\}$. Por otra parte, se adoptará la media ponderada por la masa estelar y ponderada por la luminosidad, denotadas por $\langle x \rangle_M$ y $\langle x \rangle_L$, respectivamente, como estimados globales de la propie-

dad x ($= \log t/\text{año}$ o $\log Z/Z_\odot$) del contenido estelar en la galaxia problema. Estas se definen como:

$$\langle x \rangle_M = \frac{1}{M_\star} \sum_k^{N_{\text{PESs}}} a^k x_k, \quad (11a)$$

$$\langle x \rangle_L = \frac{1}{L_{\star,T}} \sum_k^{N_{\text{PESs}}} a^k L_T^k x_k, \quad (11b)$$

donde los pesos cumplen las igualdades:

$$M_\star = \sum_k^{N_{\text{PESs}}} a^k, \quad (12a)$$

$$L_{\star,T} = \sum_k^{N_{\text{PESs}}} a^k L_T^k, \quad (12b)$$

son la masa estelar total en la galaxia modelo y la luminosidad total calculada de acuerdo con la Ec. (4) en una banda fotométrica cuya función de respuesta es T_λ . En este trabajo se adoptará la luminosidad en la banda r' del SDSS por poseer los errores de medición mejor comportados en este sondeo. En general, $\langle x \rangle_L$ estará naturalmente sesgada hacia la propiedad x de la población estelar más luminosa en la región espectral muestreada por la banda r' , mientras que la estimación $\langle x \rangle_M$ estará naturalmente sesgada hacia la propiedad del evento de formación estelar más masivo ocurrido en la galaxia.

A continuación se describe el procedimiento para cuantificar la robustez de los parámetros recuperados por DYNBAS.

2.4 EL TRATAMIENTO ESTADÍSTICO

2.4.1 Análisis de los residuos

El procedimiento para analizar la consistencia entre los parámetros de salida de la síntesis espectral y los reales conocidos de antemano se ha estandarizado en la literatura reciente (e. g., Lee y col., 2009; Magris y col., 2015; Mitchell y col., 2013; Pforr y col., 2012; Wuyts y col., 2009) y en este trabajo será referido como Pruebas Teórico-Teórico (PTT). Como punto de partida para las PTT, se definirá el residuo de la propiedad x ($= M_\star, \langle \log t_\star/\text{año} \rangle_M, \langle \log t_\star/\text{año} \rangle_L, \langle \log Z_\star/Z_\odot \rangle_M, \langle \log Z_\star/Z_\odot \rangle_L, A_V$), Δx , como el valor real de dicha propiedad (ya conocido), x_{SSAG} restado del valor recuperado mediante el ajuste, i. e.,

$$\Delta x \equiv x - x_{\text{SSAG}}. \quad (13)$$

La distribución de los residuos de la muestra sintética será caracterizada por la mediana(Δx), para estimar el *sesgo* respecto del valor real, y por el semi-rango percentil 16 – 84vo, para estimar la *precisión* del valor estimado, siendo ambas medidas de la incertidumbre sistemática y aleatoria en los parámetros físicos estimados, respectivamente. Nótese que de acuerdo con la definición de precisión anterior, valores crecientes son característicos de resultados menos precisos. Es importante notar además que estas estadísticas representan límites inferiores para las incertidumbres,

dado que los resultados de la síntesis espectral usando observaciones reales son propensos a propagar más incertidumbres que por simplicidad serán ignoradas durante las PTT, e. g., diferencias entre los ingredientes asumidos en el análisis espectral y los presentes en galaxias reales; la forma y universalidad de la FIM asumidas a lo largo de este trabajo; errores instrumentales (además del ruido Gaussiano considerado) y de calibración (véase Conroy y col., 2009, 2010, para una revisión más detallada).

Además de cuantificar los sistemáticos de los residuos individuales, se estudiará las posibles correlaciones entre los residuos de los distintos parámetros físicos, haciendo énfasis en el origen de estas: ¿serán introducidas por el método de síntesis espectral (ϵ_{met})? o ¿tienen más bien un origen físico (ϵ_{teo})?

2.4.2 *Análisis de las discrepancias*

En el presente estudio será particularmente interesante cuantificar las discrepancias que puedan existir entre la espectroscopía y la fotometría de banda angosta en términos del contenido estelar recuperado mediante la síntesis espectral, en vísperas del inicio del J-PAS. Para esto se calculará el estimador sin sesgo \tilde{x} y la discrepancia Δx como:

$$\tilde{x} \equiv x - \text{median}(\Delta x), \quad (14a)$$

$$\delta x \equiv \tilde{x}^{\text{RM}} - \tilde{x}^{\text{RA}}, \quad (14b)$$

respectivamente, para cuantificar las discrepancias entre las estimación de las propiedades físicas a partir de la fotometría de RM y a partir de la espectroscopía a RA. En contraste con la definición del residuo en la Ec. (13), la discrepancia mide los sesgos y las imprecisiones combinadas que surgen de la fotometría y de la espectroscopía. Nótese que no es posible calcular Δx en el caso de las observaciones reales, por lo tanto en este caso el valor calculado en las PTT será utilizado para proporcionar un valor de \tilde{x} como es requerido de acuerdo a la definición de la discrepancia.

2.4.3 *Análisis de la Relación Edad-Metalicidad*

La relación entre la edad y la metalicidad medias estelares no es trivial de predecir desde un punto de vista teórico, pues el aparente rejuvenecimiento de la población estelar en galaxias con formación estelar activa hace que la edad media varíe en ambos sentidos en función del tiempo. La evolución química, por otra parte, produce rasgos prominentes en el espectro óptico, incluso en el emitido por poblaciones jóvenes ($t_* < 1$ Gaño), los cuales permiten estimar la metalicidad del contenido estelar. Sin embargo, en la literatura reciente se ha encontrado dicha relación en repetidas ocasiones usando distintos métodos y conjuntos $\{F_{\lambda}^{\text{obs}}\}$ (e. g., Gallazzi y col., 2005; Panter y col., 2008; Worthey, 1994).

En este trabajo se utilizará la Relación Edad-Metalicidad (REM, en adelante) para enmarcar los propiedades físicas recuperadas por DYNBAS a partir del conjunto de datos $\{F_{\lambda}^{\text{obs}}\}$ de RA y RM, en el entendimiento que se posee de dicha relación, de acuerdo con la literatura reciente. Para ello se comparará directamente la REM recuperada por Gallazzi y col. (2005, en adelante Go5), usando una implementación paramétrica de la síntesis espectral sobre un conjunto de índices espectrales especialmente diseñados para proporcionar información sobre la edad y la metalicidad

estelares (Worthey, 1994), con la REM recuperada por DYNBAS para la espectroscopía de RA. Como dicha comparación tendrá lugar en el conjunto de galaxias en la SMG (azul claro en la Fig. 2), las discrepancias que aparezcan podrán tener tres orígenes: las diferencias en los métodos (paramétrico por parte de Go5 y no paramétrico en este estudio), los diferentes conjuntos de medidas $\{F_{\lambda}^{\text{obs}}\}$ (índices espectrales por parte de Go5 y espectroscopía de RA en este estudio) y los distintos ingredientes estelares (BCo3 por parte de Go5 y BCo3xm en este estudio). En ese sentido, se cuantificarán dichas diferencias definiendo la discrepancia:

$$\delta_{\text{Go5}}x \equiv x^{\text{HR}^*} - x^{\text{Go5}}, \quad (15)$$

que a diferencia de δx , contiene los sistemáticos de ambos métodos de síntesis espectral.

Para estudiar el desempeño del conjunto de datos de RM (fotometría de banda angosta de J-PAS), se compararán sus resultados derivados usando DYNBAS con los mismos derivados a partir de la espectroscopía de RA. Como se utilizará la misma muestra, los mismos ingredientes estelares y el mismo método de síntesis espectral, las únicas discrepancias que se esperan (δx) tendrán origen en la resolución espectral, bajo la suposición de que las incertidumbres en las medidas espectroscópicas del SDSS se propagan de la misma forma a la fotometría de J-PAS sintetizada usando la Ec. (4).

BIBLIOGRAFÍA

- Abazajian, Kevork N. y col. (2009). "the Seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey". En: *ApJ Suppl. Ser.* 182.2, págs. 543-558. ISSN: 0067-0049.
- Alongi, M., G. Bertelli, A. Bressan, C. Chiosi, F. Fagotto, L. Greggio y E. Nasi (1993). "Evolutionary sequences of stellar models with semiconvection and convective overshoot. I - $Z = 0.008$ ". En: *A&AS* 97, págs. 851-871.
- Baldry, I. K., K. Glazebrook, J. Brinkmann, Ž. Ivezić, R. H. Lupton, R. C. Nichol y A. S. Szalay (2004). "Quantifying the Bimodal Color-Magnitude Distribution of Galaxies". En: *ApJ* 600, págs. 681-694.
- Benitez, N. y col. (2014). "J-PAS: The Javalambre-Physics of the Accelerated Universe Astrophysical Survey". En: *ArXiv e-prints*.
- Bevington, Philip R. y D. Keith Robinson (2003). *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*. McGraw-Hill.
- Bressan, A., F. Fagotto, G. Bertelli y C. Chiosi (1993). "Evolutionary sequences of stellar models with new radiative opacities. II - $Z = 0.02$ ". En: *A&AS* 100, págs. 647-664.
- Brinchmann, J., S. Charlot, S. D. M. White, C. Tremonti, G. Kauffmann, T. Heckman y J. Brinkmann (2004). "The physical properties of star-forming galaxies in the low-redshift Universe". En: *MNRAS* 1179.4, págs. 1151-1179. ISSN: 00358711.
- Bruzual, G. y S. Charlot (2003). "Stellar population synthesis at the resolution of 2003". En: *MNRAS* 344.4, págs. 1000-1028. ISSN: 0035-8711.
- Cabrera-Ziri, I. y col. (2016). "Is the escape velocity in star clusters linked to extended star formation histories? Using NGC 7252: W3 as a test case". En: *MNRAS* 457, págs. 809-821.
- Cardelli, J. A., G. C. Clayton y J. S. Mathis (1989). "The relationship between infrared, optical, and ultraviolet extinction". En: *ApJ* 345, págs. 245-256.
- Chabrier, G. (2003). "Galactic Stellar and Substellar Initial Mass Function". En: *PASP* 115, págs. 763-795.
- Charlot, S. y M. Longhetti (2001). "Nebular emission from star-forming galaxies". En: *MNRAS* 323, págs. 887-903.
- Charlot, Stéphane y S. Michael Fall (2000). "A simple model for the absorption of starlight by dust in galaxies". En: *ApJ* 20, págs. 718-731.
- Chen, Y.-M. y col. (2012). "Evolution of the most massive galaxies to $z = 0.6$ - I. A new method for physical parameter estimation". En: *MNRAS* 421, págs. 314-332.
- Cid Fernandes, R. y col. (2013). "Resolving galaxies in time and space. I. Applying STARLIGHT to CALIFA datacubes". En: *A&A* 557, A86, A86.
- Cid Fernandes, Roberto, Abílio Mateus, Laerte Sodré, Grażyna Stasińska y Jean M. Gomes (2005). "Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies - I. Spectral synthesis method". En: *MNRAS* 358.2, págs. 363-378. ISSN: 00358711.
- Conroy, C., J. E. Gunn y M. White (2009). "The Propagation of Uncertainties in Stellar Population Synthesis Modeling. I. The Relevance of Uncertain Aspects of Stellar Evolution and the Initial Mass Function to the Derived Physical Properties of Galaxies". En: *ApJ* 699, págs. 486-506.

- Conroy, C., M. White y J. E. Gunn (2010). “The Propagation of Uncertainties in Stellar Population Synthesis Modeling. II. The Challenge of Comparing Galaxy Evolution Models to Observations”. En: *ApJ* 708, págs. 58-70.
- Díaz-García, L. A. y col. (2015). “Stellar populations of galaxies in the ALHAMBRA survey up to $z \sim 1$. I. MUFFIT: A multi-filter fitting code for stellar population diagnostics”. En: *A&A* 582, A14.
- Doi, M. y col. (2010). “Photometric Response Functions of the Sloan Digital Sky Survey Imager”. En: *AJ* 139, págs. 1628-1648.
- Draine, B. T. (2009). “Interstellar Dust Models and Evolutionary Implications”. En: *Cosmic Dust - Near and Far*. Ed. por T. Henning, E. Grün y J. Steinacker. Vol. 414. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, pág. 453.
- Dupke, R. a., N. Benitez, M. Moles, L. Sodre y J-PAS Collaboration (2015). “J-PAS: The Javalambre-Physics of the Accelerating Universe Astrophysical Survey”. En: *IAU General Assembly 22*, #2257789, #2257789.
- Fagotto, F., A. Bressan, G. Bertelli y C. Chiosi (1994a). “Evolutionary sequences of stellar models with new radiative opacities. III. $Z=0.0004$ and $Z=0.05$ ”. En: *A&AS* 104.
- Fagotto, F., A. Bressan, G. Bertelli y C. Chiosi (1994b). “Evolutionary sequences of stellar models with new radiative opacities. IV. $Z=0.004$ and $Z=0.008$ ”. En: *A&AS* 105.
- Forbes, D. A. y P. Kroupa (2011). “What Is a Galaxy? Cast Your Vote Here”. En: *PASA* 28, págs. 77-82.
- Gallazzi, A., S. Charlot, J. Brinchmann, S. D. M. White y C. A. Tremonti (2005). “The ages and metallicities of galaxies in the local universe”. En: *MNRAS* 362, págs. 41-58.
- Girardi, L., A. Bressan, C. Chiosi, G. Bertelli y E. Nasi (1996). “Evolutionary sequences of stellar models with new radiative opacities. VI. $Z=0.0001$.” En: *A&AS* 117, págs. 113-125.
- Gunn, J. E. y col. (1998). “The Sloan Digital Sky Survey Photometric Camera”. En: *AJ* 116, págs. 3040-3081.
- Heavens, A. F., R. Jimenez y O. Lahav (2000). “Massive lossless data compression and multiple parameter estimation from galaxy spectra”. En: *MNRAS* 317, págs. 965-972.
- Hogg, D. W. (1999). “Distance measures in cosmology”. En: *ArXiv Astrophysics e-prints*.
- Hogg, David W, Ivan K Baldry, Michael R Blanton y Daniel J Eisenstein (2002). “The K correction”. En: págs. 1-5.
- Howell, Steve B. (2006). *Handbook of CCD Astronomy*. Cambridge University Press.
- Kauffmann, G. y col. (2003). “Stellar masses and star formation histories for 105 galaxies from the Sloan Digital Sky Survey”. En: *MNRAS* 341.1, págs. 33-53.
- Kriek, M., P. G. van Dokkum, I. Labbé, M. Franx, G. D. Illingworth, D. Marchesini y R. F. Quadri (2009). “An Ultra-Deep Near-Infrared Spectrum of a Compact Quiescent Galaxy at $z = 2.2$ ”. En: *ApJ* 700, págs. 221-231.
- Lada, C. J. y E. A. Lada (2003). “Embedded Clusters in Molecular Clouds”. En: *ARA&A* 41, págs. 57-115.
- Le Borgne, J.-F., G. Bruzual, R. Pelló, A. Lançon, B. Rocca-Volmerange, B. Sanahuja, D. Schaerer, C. Soubiran y R. Vílchez-Gómez (2003). “STELIB: A library of stellar spectra at $R \sim 2000$ ”. En: *A&A* 402, págs. 433-442.

- Lee, Seong-Kook, Rafal Idzi, Henry C. Ferguson, Rachel S. Somerville, Tommy Wiklund y Mauro Giavalisco (2009). "BIASES AND UNCERTAINTIES IN PHYSICAL PARAMETER ESTIMATES OF LYMAN BREAK GALAXIES FROM BROAD-BAND PHOTOMETRY". En: *ApJ Suppl. Ser.* 184.1, págs. 100-132. ISSN: 0067-0049.
- MacArthur, Lauren a., Michael McDonald, Stéphane Courteau y J. Jesús González (2010). "Integrated Stellar Populations: Confronting Photometry With Spectroscopy". En: *ApJ* 718.2, págs. 768-773. ISSN: 0004-637X.
- Magris, G., J. Mateu P., C. Mateu, G. Bruzual A., I. Cabrera-Ziri y A. Mejía-Narváez (2015). "On the Recovery of Galaxy Properties from SED Fitting Solutions". En: *PASP* 127, págs. 16-30.
- Marin-Franch, A., K. Taylor, J. Cenarro, D. Cristobal-Hornillos y M. Moles (2015). "The J-PAS filter system". En: *IAU General Assembly 22*, pág. 57439.
- Mateu, J. (2009). "Recovering Fossil Records from Galaxy Spectra Using a 2D Dynamical Base". En: *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica Conference Series*. Vol. 35. Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica Conference Series, págs. 164-165.
- Mateu, J., G. Magris y G. Bruzual (2010). "Inverse population synthesis using a dynamical basis". En: *Stellar Populations - Planning for the Next Decade*. Ed. por G. R. Bruzual y S. Charlot. Vol. 262. IAU Symposium, págs. 388-389.
- Mejía-Narváez, A. y col. (2017). "Galaxy properties from J-PAS narrow-band photometry". En: *MNRAS* 471, págs. 4722-4746.
- Mitchell, Peter D, Cedric G Lacey, Carlton M Baugh y Shaun Cole (2013). "How well can we really estimate the stellar masses of galaxies from broad-band photometry?" En: *MNRAS* 435.1, págs. 87-114. ISSN: 0035-8711.
- Moles, M. y col. (2008). "The Alhambra Survey: a Large Area Multimediu-Band Optical and Near-Infrared Photometric Survey". En: *AJ* 136, págs. 1325-1339.
- Naab, T. y J. P. Ostriker (2017). "Theoretical Challenges in Galaxy Formation". En: *ARA&A* 55, págs. 59-109.
- Panter, B., R. Jimenez, A. F. Heavens y S. Charlot (2008). "The cosmic evolution of metallicity from the SDSS fossil record". En: *MNRAS* 391, págs. 1117-1126.
- Pforr, J., C. Maraston y C. Tonini (2012). "Recovering galaxy stellar population properties from broad-band spectral energy distribution fitting". En: *MNRAS* 422, págs. 3285-3326.
- Sanchez-Blazquez, P., R. F. Peletier, J. Jimenez-Vicente, N. Cardiel, a. J. Cenarro, J. Falcon-Barroso, J. Gorgas, S. Selam y a. Vazdekis (2006). "Medium-resolution Isaac Newton Telescope library of empirical spectra". En: *MNRAS* 371.2, págs. 703-718. ISSN: 0035-8711.
- Somerville, R. S. y R. Davé (2015). "Physical Models of Galaxy Formation in a Cosmological Framework". En: *ARA&A* 53, págs. 51-113.
- Strateva, I. y col. (2001). "Color Separation of Galaxy Types in the Sloan Digital Sky Survey Imaging Data". En: *AJ* 122, págs. 1861-1874.
- Strauss, M.A. y col. (2002). "Spectroscopic target selection in the Sloan Digital Sky Survey: The main galaxy sample". En: *Astron. J.* 124, pág. 1810.
- Tojeiro, R., A. F. Heavens, R. Jimenez y B. Panter (2007). "Recovering galaxy star formation and metallicity histories from spectra using VESPA". En: *MNRAS* 381, págs. 1252-1266.

- Wolf, C., K. Meisenheimer, H.-W. Rix, A. Borch, S. Dye y M. Kleinheinrich (2003). "The COMBO-17 survey: Evolution of the galaxy luminosity function from 25 000 galaxies with $0.2 < z < 1.2$ ". En: *A&A* 401, págs. 73-98.
- Worthey, G. (1994). "Comprehensive stellar population models and the disentanglement of age and metallicity effects". En: *ApJS* 95, págs. 107-149.
- Wuyts, Stijn, Marijn Franx, Thomas J. Cox, Lars Hernquist, Philip F. Hopkins, Brant E. Robertson y Pieter G. van Dokkum (2009). "Recovering Stellar Population Properties and Redshifts From Broadband Photometry of Simulated Galaxies: Lessons for Sed Modeling". En: *ApJ* 696.1, págs. 348-369. ISSN: 0004-637X.
- Yates, R. M., B. Henriques, P. A. Thomas, G. Kauffmann, J. Johansson y S. D. M. White (2013). "Modelling element abundances in semi-analytic models of galaxy formation". En: *MNRAS* 435, págs. 3500-3520.
- York, D.G. y col. (2000). "The sloan digital sky survey: Technical summary". En: *Astron. J.* 120, págs. 1579-1587.