

Sonificación de Tipos de Galaxias: Inclusión Astronómica para Personas con Discapacidad Visual

Alexander Vélez Suaza

Trabajo de grado para optar al título de Astrónomo

Asesora
Lauren Melissa Flor Torres

Universidad de Antioquia
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Instituto de Física
Astronomía
2025

Dedicatoria

Dedico este proyecto a mis padres, quienes siempre han deseado verme alcanzar mi título.

Agradecimientos

Gracias a mis compañeros de carrera, quienes siempre me motivaron a seguir en los momentos de dificultad. También a mis familiares y amigos que siempre me apoyaron.

Un agradecimiento especial a María Alejandra Valencia, por su apoyo y acompañamiento incondicional.

Índice general

Resumen 11

Abstract 12

1 Introducción **13**

1.1 Planteamiento del problema 13

1.2 Antecedentes 16

1.3 Justificación 17

1.4 Objetivos 18

1.4.1 Objetivo general 18

1.4.2 Objetivos específicos 19

2 Fundamentos teóricos para la sonificación de galaxias **20**

2.1 Clasificación morfológica de Galaxias. 20

2.1.1 Galaxias Elípticas 21

2.1.2 Galaxias Espirales 23

2.1.3 Galaxias Irregulares 27

2.1.4 Espectros galácticos 28

2.2 Sonificación y Técnicas de Sonificación 31

2.2.1 Bases de teoría musical 32

3 Estrategia de sonificación aplicada a la clasificación galáctica **36**

3.1 Datos para la sonificación 36

3.2 Proceso de Sonificación 37

3.2.1 Parameter mapping sonification 38

3.2.2 Creación de archivos de sonificación 43

3.2.3 Clasificación espectral de galaxias 52

4 Sonificación de Galaxias **53**

4.1 Clasificación de galaxias 53

4.1.1 Subtipos de galaxias espirales 66

4.2 Aplicación web - **UAGalaxySon** 74

4.3 Discusión 77

5 Conclusiones **80**

6 Recomendaciones **82**

Referencias 83

Lista de tablas

3.1 Mapa de correspondencia entre intensidad espectral, nota musical y color en galaxias espirales. Cada nota en la tabla cuenta con un enlace a SoundCloud donde puede reproducirse para una mejor identificación del sonido. 46

3.2 Mapa de correspondencia entre intensidad espectral, nota musical y color en galaxias elípticas. Cada nota en la tabla cuenta con un enlace a SoundCloud donde puede reproducirse para una mejor identificación del sonido 48

Lista de figuras

2.1 Diagrama de Hubble para la evolución galáctica. Imagen tomada de Carroll (2014) 21

2.2 Galaxia M105 (también conocida como NGC 3379). Galaxia elíptica que se encuentra a unos 32 millones de años luz de distancia, en la constelación de Leo. Es la galaxia elíptica más grande del atlas espectral de Messier que no forma parte del cúmulo de Virgo. Fuente: NASA et al. (nd). 22

2.3 Mapa de la Vía Láctea y sus componentes. Fuente: NASA/JPL-Caltech et al. (nd). 23

2.4 NGC 7096. Galaxia espiral tipo Sa. Fuente: Carroll (2014) 25

2.5 La galaxia espiral M81, ubicada en la constelación de la Osa Mayor, es una de las más brillantes del cielo nocturno. Sus brazos espirales contienen estrellas jóvenes y regiones activas de formación estelar, mientras que su prominente bulbo central alberga estrellas viejas y un agujero negro de $\sim$ 70 millones de masas solares. Fuente: NASA et al. (nd) 25

2.6 NGC 2276, una galaxia espiral cuyo núcleo parece desplazado hacia arriba debido a la atracción gravitacional de su vecina NGC 2300. Fuente: NASA et al. (nd). 26

2.7 NGC 1569, galaxia enana irregular en la constelación de la Jirafa, con una tasa de formación estelar 100 veces mayor que la Vía Láctea. Fuente: NASA (2008) 28

2.8 Espectros galácticos de diferentes tipos de galaxias desde el ultravioleta hasta el infrarojo cercano. Imagen tomada de Mo et al. (2010). 29

2.9 Distribución de notasmusicales en el piano. Imagen tomada de Piano (nd). . 33

2.10 Diferenciación de los diferentes volúmenes o dinámicas de sonido clasificadas según la cantidad de decibeles emitidos. Imagen tomada de Benward and Saker (2007). 34

2.11 Duración y equivalencia de las Figuras musicales. La columna Note muestra las Figuras utilizadas para representar la duración de un sonido. La columna Rest indica la Figura utilizada para representar la duración de un silencio Imagen tomada de Benward and Saker (2007). 35

3.1 Mapa de notas de 5 octavas de la escala musical cromática para las galaxias espirales. Espectro electromagnético corresponde a la galaxia NGC 2276. . . 39

3.2 Mapa de notas de 5 octavas de la escala musical cromática para las galaxias elíticas. Espectro electromagnético corresponde a la galaxia NGC 3379 . . . 40

3.3 Mapa de notas de 5 octavas de la escala musical cromática para las galaxias irregulares. Espectro electromagnético corresponde a la galaxia NGC 1569 . 41

3.4 Espectro elesctromagnético de la galaxia tipo Sa NGC 2276 tomado de NASA/IPAC Extragalactic Database (nd) del atlas espectral de galaxias estudiados por Robert C. et al. (1992). El espectro pasó por el algoritmo para detectar la región plana que permitió diferenciar entre líneas de absorción, emisión y ruido. 43

3.5 Espectro elesctromagnético de la galaxia elíptica NGC 3379 tomado de NASA/IPAC Extragalactic Database (nd) del atlas espectral de galaxias estudiados por Robert C. et al. (1992). El espectro pasó por el algoritmo para detectar la región plana que permitió diferenciar entre líneas de abosrción, emisión y ruido. 44

3.6 Espectro elesctromagnético de la galaxia irregular NGC 1569 tomado de NASA/IPAC Extragalactic Database (nd) del atlas espectral de galaxias estudiados por Robert C. et al. (1992). El espectro pasó por el algoritmo para detectar la región plana que permitió diferenciar entre líneas de abosrción, emisión y ruido. 45

3.7 Mapa de notas para las galaxias espirales. La imagen se construyó combinando la Figura 3.2 y una captura del editor MIDI de Reaper. Para mayor claridad visual, las notas de las teclas del piano no corresponden exactamente con las líneas de notas mostradas en el mapa. 51

4.1 Sonificación de la región H_α en la galaxia NGC 2276. Arriba: espectro con la región resaltada. Abajo: sonificación de la región. 55

4.2 Sonificación de la región H_α en la galaxia NGC 3379. Arriba: espectro con la región resaltada. Abajo: sonificación de la región. 56

4.3 Sonificación de la región H_α en la galaxia NGC 1569. Arriba: espectro con la región resaltada. Abajo: sonificación de la región. 57

4.4 Sonificación de la región H_β y $[O_{III}]$ en la galaxia NGC 2276. Arriba: espectro completo con la región resaltada y el mapa de notas. Abajo: ampliación de la región sonificada, con notas cromáticas. 59

4.5 Sonificación de la región H_β y $[O_{III}]$ en la galaxia NGC 3379. Arriba: espectro completo con la región resaltada y el mapa de notas. Abajo: ampliación de la región sonificada, con notas cromáticas. 60

4.6 Sonificación de la región H_β y $[O_{III}]$ en la galaxia NGC 1569. Arriba: espectro completo con la región resaltada y el mapa de notas. Abajo: ampliación de la región sonificada, con notas cromáticas. 61

4.7 Sonificación de la región cercana al quiebre de la Banda G en la galaxia NGC 2276. Arriba: espectro completo con la región resaltada. Abajo: ampliación de la región sonificada. 63

4.8 Sonificación de la región cercana al quiebre de la Banda G en la galaxia NGC 3379. Arriba: espectro completo con la región resaltada. Abajo: ampliación de la región sonificada. 64

4.9 Sonificación de la región cercana al quiebre de la Banda G en la galaxia NGC 1569. Arriba: espectro completo con la región resaltada. Abajo: ampliación de la región sonificada. 65

4.10 Sonificación de la región cercana a la línea H_α en la galaxia NGC 3623. Arriba: espectro completo con la región resaltada y el mapa de notas. Abajo: ampliación de la región sonificada. 67

4.11 Sonificación de la región cercana a las líneas H_β y $[O_{III}]$ en la galaxia NGC 3623. Arriba: espectro completo con la región resaltada y el mapa de notas. Abajo: ampliación de la región sonificada. 68

4.12 Sonificación de la región cercana al quiebre de la banda G en la galaxia NGC 3623. Arriba: espectro completo con la región resaltada y el mapa de notas. Abajo: ampliación de la región sonificada. 69

4.13 Sonificación de la región cercana a la línea H_α en la galaxia NGC 3147. Arriba: espectro completo con la región resaltada y el mapa de notas. Abajo: ampliación de la región sonificada. 71

4.14 Sonificación de la región cercana a las líneas H_β y $[O_{III}]$ en la galaxia NGC 3147. Arriba: espectro completo con la región resaltada y el mapa de notas. Abajo: ampliación de la región sonificada. 72

4.15 Sonificación de la región cercana al quiebre de la Banda G en la galaxia NGC 3147. Arriba: espectro completo con la región resaltada y el mapa de notas. Abajo: ampliación de la región sonificada. 73

4.16 Primera sección de la aplicación realizada con base a la herramienta *UAGalaxySon*, selección de archivo a sonificar. 74

4.17 Formato de texto plano aceptado por la herramienta *UAGalaxySon*. 75

4.18 Segunda sección de la aplicación realizada con base a la herramienta *UAGalaxySon*, selección de parámetros para la sonificación 76

4.19 Tercera sección de la aplicación realizada con base a la herramienta *UAGalaxySon*, reproducción y descarga de la sonificación realizada. 77

Siglas, acrónimos y abreviaturas

PMSon Parameter Mapping Sonification

Resumen

La astronomía, tradicionalmente concebida como una ciencia principalmente visual, presenta barreras de acceso para las personas con discapacidad visual. La divulgación científica inclusiva exige el desarrollo de estrategias que trasciendan la representación gráfica, aprovechando otros sentidos como el oído para la interpretación de datos. En este contexto, la sonificación —proceso que convierte información cuantitativa en sonido— se plantea como una herramienta innovadora para comunicar y analizar fenómenos astronómicos. En este trabajo se implementa la sonificación de algunas zonas de los espectros de los principales tipos morfológicos de galaxias (elípticas, espirales e irregulares) con el objetivo de permitir su caracterización auditiva y favorecer su estudio por públicos diversos, incluyendo personas con discapacidad visual.

Para ello, se desarrolló en Python la herramienta **UAGalaxySon**, diseñada para procesar espectros galácticos y transformar parámetros físicos en atributos sonoros controlables, empleando la técnica *Parameter Mapping Sonification (PMSon)*. El método se centró en regiones espectrales clave —líneas de emisión y absorción de H_α, H_β y O_{III}, y el quiebre en la banda G—, cuya identificación auditiva resulta representativa para la clasificación morfológica. Se integró, además, una interfaz web que permite seleccionar, procesar y reproducir las sonificaciones, favoreciendo su uso tanto en contextos educativos como de investigación.

Los resultados evidencian que la representación sonora de estas características permite diferenciar los tipos morfológicos de galaxias de forma sistemática, demostrando la viabilidad de la sonificación como herramienta de análisis complementaria a la visualización tradicional. Desde el punto de vista inclusivo, el proyecto valida el potencial de esta técnica para democratizar el acceso al conocimiento astronómico, ampliando las oportunidades de participación en ciencia para personas con discapacidad visual. Asimismo, se sientan bases para futuras aplicaciones en la exploración de grandes volúmenes de datos astronómicos, la enseñanza interdisciplinaria y el diseño de experiencias inmersivas de divulgación.

Palabras clave: sonificación, divulgación científica, inclusión social, galaxia, espectro electromagnético, música

Abstract

Astronomy, traditionally conceived as a primarily visual science, presents access barriers for people with visual impairments. Inclusive science communication requires the development of strategies that go beyond graphic representation, making use of other senses such as hearing for data interpretation. In this context, sonification —the process of converting quantitative information into sound— emerges as an innovative tool to communicate and analyze astronomical phenomena. This work implements the sonification of selected regions of the spectra of the main morphological types of galaxies (elliptical, spiral, and irregular) with the aim of enabling their auditory characterization and promoting their study by diverse audiences, including people with visual impairments.

For this purpose, the **UAGalaxySon** tool was developed in Python, designed to process galactic spectra and transform physical parameters into controllable sound attributes, employing the *Parameter Mapping Sonification (PMSon)* technique. The method focused on key spectral regions —emission and absorption lines of H_α, H_β, and O_{III}, as well as the G-band break— whose auditory identification is representative for morphological classification. In addition, a web interface was integrated to allow the selection, processing, and playback of the sonifications, fostering its use in both educational and research contexts.

The results show that the sonic representation of these features allows for the systematic differentiation of galaxy morphological types, demonstrating the feasibility of sonification as a complementary analysis tool to traditional visualization. From an inclusive perspective, the project validates the potential of this technique to democratize access to astronomical knowledge, expanding opportunities for participation in science for people with visual impairments. Furthermore, it lays the groundwork for future applications in the exploration of large volumes of astronomical data, interdisciplinary teaching, and the design of immersive science communication experiences.

Keywords: sonification, science communication, social inclusion, galaxy, electromagnetic spectrum, music

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se presenta el contexto de la divulgación científica, destacando las diversas estrategias empleadas para su desarrollo. En particular, se profundiza en la sonificación y en su aplicación dentro del ámbito astronómico. Asimismo, se introduce el estudio de las galaxias y de sus espectros, que constituyen el objeto central de investigación de esta tesis.

1.1 Planteamiento del problema

La astronomía es una de las ciencias más visuales, dependiendo en gran medida de imágenes y gráficos para la interpretación de datos y el descubrimiento de nuevos conocimientos. Como ejemplo, tenemos las maravillosas imágenes que nos han dejado telescopios como Hubble Space Telescope o James Web, que nos permiten acercarnos a los objetos más distantes del universo.

En las ciencias, la transmisión de conocimiento se realiza generalmente a través de publicaciones en revistas especializadas, utilizando un lenguaje técnico enfocado a la precisión y a facilitar la comprensión por parte de la comunidad científica. Sin embargo, esta forma de comunicación suele traer consigo barreras que limitan la difusión del conocimiento, ya que dichas publicaciones están dirigidas a públicos más específicos y especializados en las diferentes temáticas.

Una solución a este problema de comunicación del conocimiento llega desde la divulgación científica. "Se le llama divulgación científica al conjunto de actividades que interpretan y hacen accesible el conocimiento científico al público general" (Yolaisy et al., 2011). Esto permite que el conocimiento atraviese las barreras limitantes y llegue a cualquier tipo de público, sin necesidad de que este esté especializado en el tema, ya que esta forma de comunicación se realiza en un lenguaje más accesible y a través de medios diversos como la televisión, la radio, videos o redes sociales.

Un ejemplo de estas actividades divulgativas es la escritura como lo son los blogs (Esarey and Wood, 2018), que acercan a las personas a diversos temas de ciencias realizando descripciones de los objetos y procesos de formas simplificadas, sin recurrir al tecnicismo científico que se requiere en revistas académicas. También están entre estas actividades de divulgación científica las conferencias o charlas como los webinars (Esarey and Wood, 2018) que pueden ser realizadas en diferentes espacios como museos, planetarios, o universidades. La divulgación científica también puede llevarse a cabo realizando actividades al aire libre como lo es el caso del proyecto *Explora en los Barrios* del Parque Explora (Explora, 2024), en el cual se llevaron experimentos y experiencias del museo a diversos barrios de la ciudad de Medellín para promover y desarrollas las competencias científicas de las comunidades.

Actualmente, gracias a Internet, se han sumado a estas actividades la divulgación por medio de vídeos publicados en redes sociales o plataformas como YouTube, Facebook, Instagram, entre otras. En un estudio realizado por Perdomo et al. (2024) en los países de México, Perú y Bolivia se encontró que los canales de Youtubers dedicados a la divulgación científica presentan un alcance mucho mayor que los medios institucionales debido a las estrategias utilizadas por los youtubers que hacen que el acercamiento con la ciencia sea más agradable al involucrar experiencias estéticas así como humor, ejemplos, metáforas, discurso sin muchos tecnicismos y la posibilidad de realizar comentarios y recibir respuesta a estos.

Para la accesibilidad de la información a diversos públicos, la divulgación científica debe cumplir con ciertas características. Según lo citado por Hernando (2006), la divulgación científica debe poder estimular la curiosidad, la imaginación, cultivar el espíritu de investigación, desarrollar la capacidad de observación y la creatividad. Esto implica desarrollar formas pedagógicas que permitan una comunicación más accesible y significativa para todo tipo de público. Algunas de las herramientas pedagógicas utilizadas en la divulgación científica son por ejemplo las metáforas, los ejemplos, un discurso sin muchos tecnicismos (Perdomo et al., 2024) que permitan una mejor comprensión de la información científica.

Ahora bien, es importante mencionar que no todas las personas cuentan con todas las herramientas para el disfrute de estas actividades divulgativas. Pues según la Organización Mundial de la Salud en su primer Informe mundial sobre la visión (Organization, 2019) *"Actualmente, al menos 2.200 millones de personas en todo el mundo padecen una discapacidad visual"*. Esto nos lleva a la pregunta, ¿acaso estas personas no merecen conocer y disfrutar de estos conocimientos por medio de la divulgación científica?

Para ello se hacen necesarias técnicas de enseñanza alternativas que no dependan del

sentido de la vista, y que aprovechen en cambio otros sentidos como el tacto o la escucha (Llanos et al., 2024). Una de las herramientas que permite esto es la sonificación de la información, técnica que consiste en transformar datos de cualquier naturaleza en sonidos (no necesariamente música), con el fin de permitir su análisis mediante el complejo sistema auditivo humano (Hermann et al., 2011). Este sistema nos permite identificar fuentes sonoras, palabras o melodías incluso en ambientes ruidosos.

Gracias a los avances tecnológicos de la era contemporánea y al mayor acceso a la información, especialmente en el ámbito de la divulgación científica, las investigaciones y descubrimientos en diversas disciplinas han llegado a un público más amplio. Sin embargo, y como se mencionó anteriormente, en campos como la astronomía, donde el análisis de datos se basa principalmente en la luz de los objetos celestes, pueden surgir barreras para personas con discapacidad visual, además de limitar las formas de interpretar la información.

Los sonidos pueden transmitir información que se puede clasificar en cuatro categorías principales, como se describe en Hermann et al. (2011). Estas categorías corresponden a:

- **Sonidos de alerta o alarma:** los cuales indican que algo ha ocurrido o está por ocurrir; ejemplos comunes incluyen un timbre de puerta o una alarma contra incendios.
- **Sonidos diseñados para monitorear eventos:** es decir, sonidos que cambian con el progreso del fenómeno observado.
- **Sonidos diseñados para permitir la exploración de datos:** Estos son los sonidos que propiamente se consideran sonificaciones, ya que buscan comunicar información relevante a partir de un conjunto de datos.
- **Sonidos con fines artísticos o de entretenimiento:** por ejemplo sonidos de juegos que permiten guíar al jugador o propiamente composiciones musicales.

Estas categorías han sido aplicadas en diversos campos de la ciencia y la tecnología, y ofrecen un marco conceptual útil para trasladar datos complejos a experiencias auditivas significativas. En el caso de la astronomía, la sonificación permite reinterpretar la información obtenida, como espectros, curvas de luz o imágenes, en patrones sonoros que no solo hacen accesible la ciencia a personas con discapacidad visual, sino que también proporcionan nuevas formas de percibir regularidades y anomalías que podrían pasar desapercibidas en la representación visual tradicional.

La conversión de espectros en sonido no solo facilitaría el acceso a estos datos para personas con discapacidad visual, sino que también podría abrir nuevas posibilidades para el análisis astronómico mediante la identificación de patrones auditivos. Al representar las líneas espectrales con sonidos diferenciados según su intensidad y posición en el espectro electromagnético, se ofrecería una herramienta complementaria que enriquecería la interpretación de los datos astronómicos. En este contexto, resulta pertinente revisar en qué medida la sonificación ha sido aplicada en astronomía y cuáles han sido sus principales desarrollos, lo cual se abordará en la sección de antecedentes.

1.2 Antecedentes

La sonificación ha sido aplicada previamente en astronomía para estudiar objetos en longitudes de onda de Rayos X. Un ejemplo destacado es el trabajo de Diaz-Merced et al. (2012), en el que utilizando el software *xSonify* se realizó la sonificación de series temporales de la estrella variable EX Hydrae que permitió identificar variaciones en frecuencia, fase y temporalidad, lo que facilitó la determinación de parámetros orbitales y de espín. De manera similar, en la sonificación de la tormenta solar X17 Halloween Storm de 2003 se realizó la sonificación del espectro de potenciasl del viento solar relacionando índices espectrales con sonidos (Diaz-Merced et al., 2012). La sonificación realizada permitió detectar cambios esperados e inesperados en el espectro de potencias

Otro trabajo a destacar es el realizado en el proyecto *System Sounds* de Santaguida and Russo (Santaguida and Russo), se han centrado en la sonificación de eventos del sistema solar, de sistemas planetarios, agujeros negros y otros eventos astronómicos, de una forma más artística creando melodías agradables e incluyendo navegaciones interactivas en las cuales se pueden reproducir sonidos de imágenes capturas por observatorios como el Vera Rubin. En una de sus sonificaciones es posible conocer la edad de los cráteres de impacto de la Luna así como su tamaño representado por las notas musicales y el volumen del sonido.

En el trabajo de Harrison et al. (2022) se realizó un show acerca del sistema solar llamado *"Dark Tour of the Universe"*, en el cual los objetos del espacio se representaron con sonidos que se combinaron con narrativas y modelos táctiles y visuales. En este show se destacó la importancia de proveer un contexto claro a la audiencia antes de reproducir el audio, puesto que las visuales no necesariamente se deben excluir. Además, es esencial usar modelos táctiles como algo obligatorio, puesto que estos pueden acarrear costos y dificultades al momento de presentar el show en diversos planetarios.

Por otro lado, en el proyecto *A Universe of Sound* en asociación con el proyecto *System Sounds y Chandra X-ray Center* (Arcand and Russo, Arcand and Russo) se han realizado sonificaciones de eventos y objetos astronómicos, entre ellos se encuentran sonificaciones en diferentes bandas del espectro para las galaxias M51 y M74, así como una sonificación del agujero negro Sagittarius A*.

Se han desarrollado también diversos software para la sonificación de datos astronómicos, como es el proyecto *SonoUno* (Casado et al., 2023), el cual es un software basado en Python diseñado para realizar sonificaciones de datos científicos con un fácil acceso al usuario. En el trabajo de Casado et al. (2023), se describe el desarrollo de esta herramienta bajo un enfoque de diseño centrado en el usuario, incluyendo pruebas con participantes tanto con discapacidad visual como sin ella. Los resultados muestran que la sonificación puede convertirse en una técnica eficaz e inclusiva para el análisis de datos astronómicos, siempre que se tengan en cuenta principios como la autonomía, la precisión y la eficiencia en la interacción. Esto refuerza la idea de que la sonificación no solo amplía las posibilidades de divulgación científica, sino que también constituye una vía real para la participación activa de personas con discapacidad visual en la investigación astronómica.

Estos trabajos evidencian que la sonificación ha sido aplicada en astronomía con distintos enfoques: desde el análisis riguroso de datos para extraer parámetros físicos, hasta experiencias artísticas y de divulgación que buscan acercar la ciencia a públicos más amplios. Estos antecedentes demuestran que la sonificación constituye una herramienta versátil que puede adaptarse tanto a fines científicos como educativos y de accesibilidad.

1.3 Justificación

Si bien la sonificación en astronomía ha sido aplicada a datos provenientes de diversos objetos, como lo vimos anteriormente, hemos identificado un desbalance en el material relacionado con la astronomía de objetos de gran interés como las galaxias. En el proyecto *A Universe of Sounds* de Arcand and Russo (Arcand and Russo), se realizó la sonificación de algunas galaxias espirales transformando en sonido la luz emitida en diferentes filtros, lo que permitió generar un mapa auditivo de sus principales componentes. Sin embargo, más allá de estas iniciativas puntuales, la sonificación de galaxias sigue siendo un campo poco explorado en comparación con otros fenómenos astronómicos.

Una comprensión más profunda de estos objetos proviene del estudio de su espectro

electromagnético, ya que a partir de él es posible identificar los elementos químicos presentes y, con ello, los procesos astrofísicos asociados (Carroll, 2014). En el caso particular de las galaxias, una de sus características más relevantes son las distintas poblaciones estelares que las conforman. Esta diversidad se refleja en sus espectros, los cuales permiten obtener información clave para su clasificación, como la tasa de formación estelar a partir de la presencia o ausencia de líneas espectrales indicadoras de este y otros procesos internos Mo et al. (2010).

Si bien la sonificación en astronomía ha sido aplicada a datos provenientes de diversos objetos, como lo vimos anteriormente, hemos identificado un desbalance en el material relacionado con la astronomía de objetos de gran interés como las galaxias. En el proyecto *A Universe of Sounds* Arcand and Russo (Arcand and Russo), se realizó la sonificación de algunas galaxias espirales transformando en sonido la luz emitida en diferentes filtros, lo que permitió generar un mapa auditivo de sus principales componentes. Sin embargo, más allá de estas iniciativas puntuales, la sonificación de galaxias sigue siendo un campo poco explorado en comparación con otros fenómenos astronómicos.

La importancia de este proyecto radica en su potencial para democratizar el acceso a la astronomía, proporcionando herramientas inclusivas que permiten a las personas con discapacidades visuales participar plenamente en el estudio y la apreciación de los fenómenos astronómicos. Al mismo tiempo, esta investigación contribuirá al desarrollo de nuevas metodologías en el campo de la sonificación, abriendo posibilidades para su aplicación en otras áreas científicas.

En este trabajo de grado se presentará una forma en la que la sonificación puede utilizarse en astronomía para analizar espectros de galaxias y transmitir ese conocimiento a personas con discapacidades visuales.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Transformar espectros de los tipos mofológicos de galaxias en sonidos que puedan ser interpretados y comprendidos por personas con discapacidades visuales, facilitando así su acceso a la astronomía y promoviendo la inclusión en esta disciplina.

1.4.2 Objetivos específicos

- Describir los diferentes tipos de galaxias más aceptados por la comunidad científica.
- Analizar carcterísticas representativas de cada tipo de galaxia.
- Investigar diferentes técnicas de sonificación de la información.
- Definir la característica más adecuada para realizar la caracterización del tipo de galaxia por medio de sonificación.

En este contexto, el presente trabajo se ha organizado en cinco capítulos. El Capítulo 1 introduce el problema de investigación, presentando los antecedentes, la justificación y los objetivos que orientan el desarrollo del trabajo. El Capítulo 2 presenta los fundamentos teóricos adecuados para la sonificación de galaxias, en el que se abordan los fundamentos astronómicos relacionados con la clasificación morfológica de galaxias y los principios técnicos de la sonificación de datos. El Capítulo 3 describe la metodología implementada, detallando las fuentes de datos, el proceso de transformación sonora y los criterios empleados para la caracterización auditiva de los espectros. En el Capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos, junto con su análisis y discusión, enfatizando las posibilidades y limitaciones de la propuesta. Finalmente, el Capítulo 5 expone las conclusiones, destacando las implicaciones científicas, educativas e inclusivas de esta investigación, y el Capítulo 6 abordará las recomendaciones así como las perspectivas para trabajos futuros.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos para la sonificación de galaxias

Para comprender cómo la sonificación puede ser empleada como herramienta de divulgación científica inclusiva, resulta necesario contextualizar tanto el contenido astronómico que se desea comunicar como las técnicas utilizadas para traducirlo al ámbito sonoro. En este sentido, el marco teórico abordará, por un lado, la clasificación de las galaxias y sus características fundamentales, dado que constituyen el objeto principal de estudio en este trabajo; y por otro, los principios y métodos de la sonificación de datos, con el fin de fundamentar su aplicación como estrategia de accesibilidad y comunicación científica.

2.1 Clasificación morfológica de Galaxias.

Aunque a simple vista las galaxias pueden presentar diferencias notables entre sí, en astronomía es posible agruparlas según ciertas características, tanto en su estructura morfológica como en los fenómenos físicos que ocurren en su interior (Carroll, 2014). Hasta el momento, el sistema de clasificación galáctica más ampliamente utilizado es el propuesto por Edwin Hubble. Este sistema de clasificación fue realizado por Edwin Hubble a partir de las observaciones de objetos por fuera de nuestra galaxia (Carroll, 2014). Este sistema, presentado en la Figura 2.1, clasifica las galaxias en tres grupos principales —elípticas, espirales e irregulares— mediante un diagrama con forma de diapasón. Cabe destacar que esta clasificación se basa exclusivamente en la forma observada de las galaxias a través de los telescopios.

En el lado izquierdo del diagrama se ubican las galaxias elípticas, también denominadas galaxias tempranas, ya que se formaron en las etapas iniciales del universo. Estas están identificadas en la figura como E0, E3, E7, según su elipticidad, se hará una revisión más profunda en la sección 2.1.1. Por otro lado, en el centro y en el extremo derecho se encuentran las galaxias espirales e irregulares, conocidas como galaxias tardías debido a su aparición en

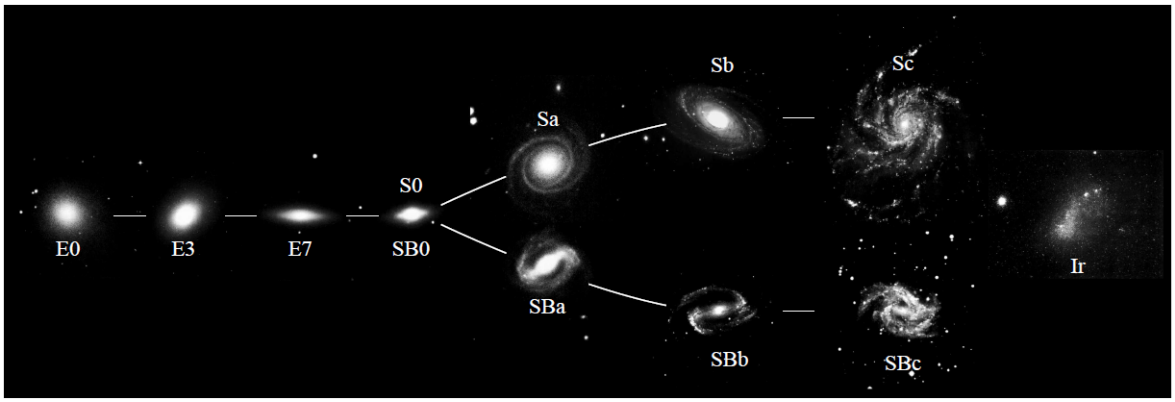

Figura 2.1
Diagrama de Hubble para la evolución galáctica. Imagen tomada de Carroll (2014)

épocas más recientes (Carroll, 2014). En la Figura 2.1 se encuentran las galaxias espirales divididas en dos ramas, la rama superior muestra las galaxias espirales normales mientras la rama inferior las galaxias espirales que presentan una barra en su centro. Las galaxias irregulares se encuentran en el extremo derecho. Aunque el diagrama propuesto por Hubble sugería originalmente una evolución morfológica entre los tipos de galaxias, las observaciones actuales han demostrado que no existe tal secuencia evolutiva. No obstante, el diagrama de Hubble ha resultado útil para interpretar diversos fenómenos físicos característicos de las galaxias según su tipo morfológico (Thuan et al., 1992).

2.1.1 Galaxias Elípticas

Como se muestra en la Figura 2.2, este tipo de galaxias presenta formas elipsoidales, que en algunos casos pueden parecer circulares. Sus tamaños varían considerablemente, desde tan solo 0,2 kpc hasta unos 20 kpc (Binney and Tremaine, 2008). La clasificación de las galaxias elípticas se basa en su *elipticidad*, definida como:

$$\epsilon = 1 - \frac{\beta}{\alpha} \tag{2.1}$$

donde α y β representan los semiejes mayor y menor aparentes de la elipse, respectivamente (Carroll, 2014; Binney and Tremaine, 2008). Esta clasificación abarca desde galaxias completamente esféricas ($\epsilon = 0$), denominadas **E0**, hasta galaxias más elongadas con $\epsilon = 0{,}7$,

conocidas como **E7**. Sin embargo, dado que lo que se observa es el *brillo proyectado* de la galaxia en el cielo, no es posible determinar con certeza su elipticidad real (Binney and Tremaine, 2008).



Figura 2.2
Galaxia M105 (también conocida como NGC 3379). Galaxia elíptica que se encuentra a unos 32 millones de años luz de distancia, en la constelación de Leo. Es la galaxia elíptica más grande del atlas espectral de Messier que no forma parte del cúmulo de Virgo. Fuente: NASA et al. (nd).

Estas galaxias son generalmente galaxias viejas con bajo contenido de gas para la formación de estrellas (Binney and Tremaine, 2008). Esto genera que en su mayoría, estas galaxias estén formadas por estrellas rojas, las cuales tienen bajas temperaturas (entre 2000 y 5000 K), además son estrellas con bajas masas, lo que provoca que su evolución sea lenta llegando a tener edades de hasta 12 billones de años (Sepúlveda, 2013).

Adicionalmente, estas galaxias, al igual que los demás tipos morfológicos, cuentan con la presencia de un halo de materia oscura en el cuál están embebidas, el cual representa gran parte de la masa gravitacional de la galaxia, en el caso de la Vía Láctea la materia oscura está en el rango de $190^{+360}_{180} M_{\odot}$(Carroll, 2014).

2.1.2 Galaxias Espirales

Este tipo de galaxias se diferencia de las galaxias elípticas principalmente por la presencia de una estructura de disco con brazos espirales, además de dividirse en distintas regiones: bulbo, disco y halo, cada una con diferentes contenidos materiales. Un ejemplo de esto se presenta en la Figura 2.3 en donde se puede observar la división de estas zonas para el caso particular de la Vía Láctea.

El bulbo corresponde a la región central de la galaxia y, por lo general, presenta una forma esferoidal similar a una galaxia elíptica en miniatura. Está conformado principalmente por estrellas viejas. Adicionalmente, el bulbo puede mostrar una barra central, como se observa en la Figura 2.1, lo que permite diferenciar entre galaxias espirales y espirales barradas (Carroll, 2014).

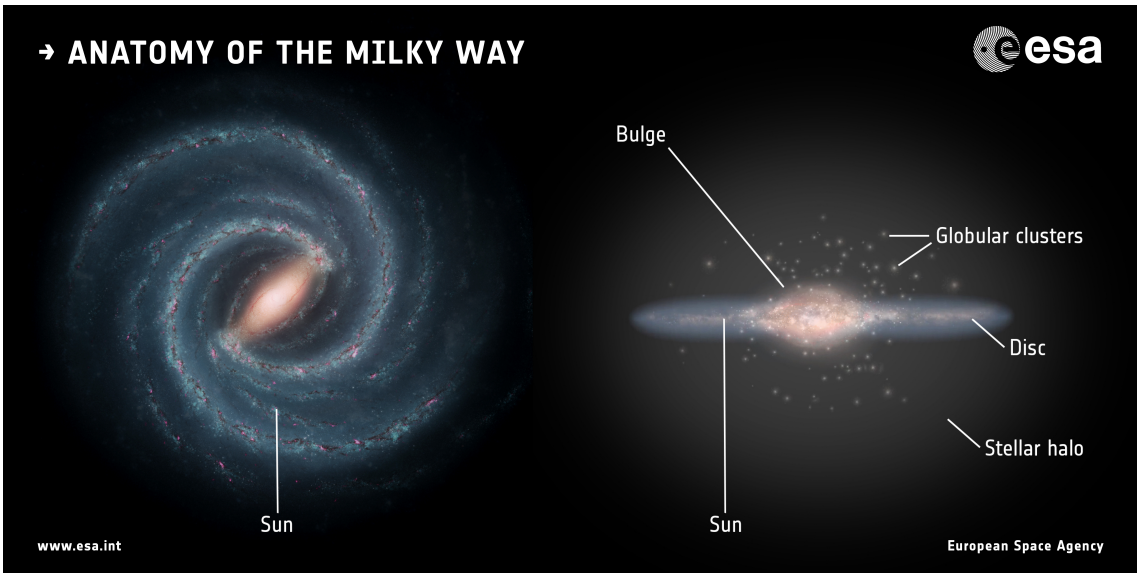

Figura 2.3
Mapa de la Vía Láctea y sus componentes. Fuente: NASA/JPL-Caltech et al. (nd).

El disco corresponde a la región externa al bulbo y se divide en dos subcomponentes: el disco delgado y el disco grueso. El disco delgado contiene la mayor cantidad de gas y alberga principalmente estrellas jóvenes, esto causa que sea una zona donde el color azul predomina al ser la zona con mayor actividad de formación estelar de la galaxia. En contraste, el disco grueso está compuesto por estrellas más antiguas, similares al Sol. Además, el disco galáctico suele presentar brazos espirales formados por fluctuaciones de densidad en su interior (Binney

and Tremaine, 2008; Carroll, 2014).

En la zona más externa de estas galaxias se encuentra el halo, que se subdivide en halo estelar y halo de materia oscura (este último es el mismo mencionado para las galaxias elípticas). El halo estelar alberga principalmente cúmulos globulares, que pueden haber sido adquiridos por acreción de otras galaxias o expulsados desde el disco galáctico (Carroll, 2014; Mo et al., 2010; Binney and Tremaine, 2008).

Aunque las galaxias espirales se describen en estas tres regiones principales, no existe una separación estricta entre ellas, y los componentes pueden migrar de una región a otra con el paso del tiempo (Binney and Tremaine, 2008).

Al contrario de las galaxias elípticas, las galaxias espirales tienen un alto contenido en gas, lo que promueve la formación estelar, presentando así una gran cantidad de estrellas jóvenes, lo que hace de estas galaxias acreedoras de colores más azulados (Carroll, 2014).

Estas galaxias se dividen principalmente en tres grupos con características particulares dentro de la clasificación de Hubble:

- **Galaxias tipo Sa**:
  Estas galaxias presentan brazos espirales muy apretados y una gran proporción de luminosidad proveniente del bulbo (alrededor del 30 %), mientras que el 70 % restante proviene del disco. Esto hace que sean las galaxias espirales con tonos más rojizos. Además, su masa total está conformada en un 4 % por gas, y la razón entre el gas molecular de hidrógeno y el hidrógeno atómico es de $M_{H_2}/M_{H_I} = 2.2$, lo que indica una alta tasa de formación estelar (Carroll, 2014). La Figura 2.4 muestra a la galaxia NGC 7096 la cual corresponde a este tipo de galaxias

- **Galaxias tipo Sb**:
  Un ejemplo de este tipo de galaxias es la galaxia M81 mostrada en la Figura 2.7. En este tipo, los brazos espirales se encuentran algo más abiertos y el bulbo es ligeramente más pequeño que en las galaxias Sa. En este caso, el bulbo aporta un 13 % de la luminosidad total, lo que se traduce en una menor presencia de tonos rojos y un mayor brillo azulado proveniente del disco. La razón M_{H_2}/M_{H_I} es de 1.8, indicando una tasa de formación estelar aún alta, aunque ligeramente inferior a la de las galaxias Sa. La Vía Láctea pertenece a este tipo de galaxias, aunque se aproxima en sus características a las galaxias tipo Sc (Carroll, 2014).

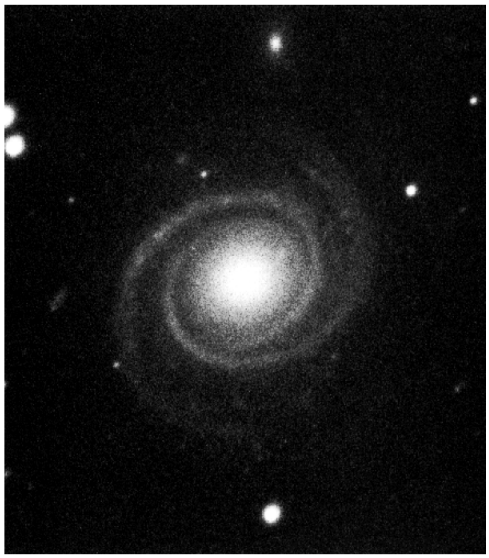

Figura 2.4
NGC 7096. Galaxia espiral tipo Sa. Fuente: Carroll (2014)



Figura 2.5
La galaxia espiral M81, ubicada en la constelación de la Osa Mayor, es una de las más brillantes del cielo nocturno. Sus brazos espirales contienen estrellas jóvenes y regiones activas de formación estelar, mientras que su prominente bulbo central alberga estrellas viejas y un agujero negro de ~ 70 *millones de masas solares. Fuente: NASA et al. (nd)*



Figura 2.6
NGC 2276, una galaxia espiral cuyo núcleo parece desplazado hacia arriba debido a la atracción gravitacional de su vecina NGC 2300. Fuente: NASA et al. (nd).

- **Galaxias tipo Sc**:
  Estas galaxias poseen los bulbos más pequeños entre todas las espirales, representando solo el 5 % de la luminosidad total. Por este motivo, dominan los tonos azules derivados de la mayor contribución luminosa del disco. Sus brazos espirales son los más abiertos entre las galaxias de disco. La razón M_{H_2}/M_{H_I} es de 0.73, lo que refleja una menor eficiencia en la formación estelar comparada con los tipos anteriores (Carroll, 2014). La Figura 2.6 es un ejemplo de este tipo de galaxias.

Si bien la fracción de hidrógeno molecular con respecto al hidrógeno atómico sigue la relación Sa > Sb > Sc, debido a que el gas se encuentra —como se mencionó anteriormente— principalmente en el disco galáctico, y considerando que la relación de tamaño entre disco y bulbo sigue el comportamiento Sa < Sb < Sc, esto implica que en realidad la cantidad de estrellas jóvenes y de regiones de formación estelar sea mayor en las galaxias tipo Sc que en las galaxias tipo Sa (Carroll, 2014; Binney and Tremaine, 2008).

2.1.3 Galaxias Irregulares

A lo largo de la secuencia morfológica de galaxias, desde Sc hasta Sd, las galaxias se vuelven progresivamente menos luminosas y su estructura espiral es cada vez menos definida. Más allá del tipo Sd, se encuentran galaxias de disco de baja luminosidad (enanas) en las que las estrellas jóvenes se distribuyen de forma caótica en lugar de formar brazos espirales. Estas se conocen como galaxias irregulares y se clasifican como Sm o Im, siendo las Nubes de Magallanes los ejemplos más representativos (Binney and Tremaine, 2008).

Las galaxias irregulares son muy comunes —más de un tercio de nuestras galaxias vecinas pertenecen a esta categoría (Binney and Tremaine, 2008), pero están subrepresentadas en los catálogos debido a que estos suelen basarse en límites de flujo, lo que favorece a sistemas más luminosos. En las irregulares, la velocidad circular crece linealmente con el radio (indicando una velocidad angular constante), alcanzando un máximo de aproximadamente 50 a $70\,\mathrm{km\,s^{-1}}$, lo cual contrasta con las galaxias espirales luminosas, donde la velocidad circular es mucho mayor y permanece casi constante (Binney and Tremaine, 2008).

Estas galaxias emiten gran parte de su luz en regiones H II y estrellas jóvenes y masivas. Además, son muy ricas en gas, que a menudo representa más del 30 % de la masa estelar. Su aspecto irregular se debe tanto a la dominancia óptica de un número reducido de regiones luminosas, como al hecho de que la velocidad circular no supera mucho a la velocidad turbulenta del gas interestelar ($10 kms^{-1}$) (Binney and Tremaine, 2008).

Una minoría de galaxias se clasifican como irregulares no por su morfología intrínseca, sino porque han sido perturbadas por interacciones, fusiones recientes o brotes intensos de formación estelar que ocultan su estructura original (Binney and Tremaine, 2008).

La secuencia de Hubble de la Figura 2.1 puede entenderse como una progresión $E \rightarrow S0 \rightarrow Sa \rightarrow Sb \rightarrow Sc \rightarrow Sd \rightarrow Sm \rightarrow Im$, en la cual las galaxias al inicio se denominan de tipo temprano (como las elípticas y lenticulares) y las del final, de tipo tardío (como las espirales tardías e irregulares). Aunque originalmente se creyó que esta secuencia representaba una evolución temporal, hoy se reconoce que esta interpretación era incorrecta, aunque los términos han perdurado (Binney and Tremaine, 2008).

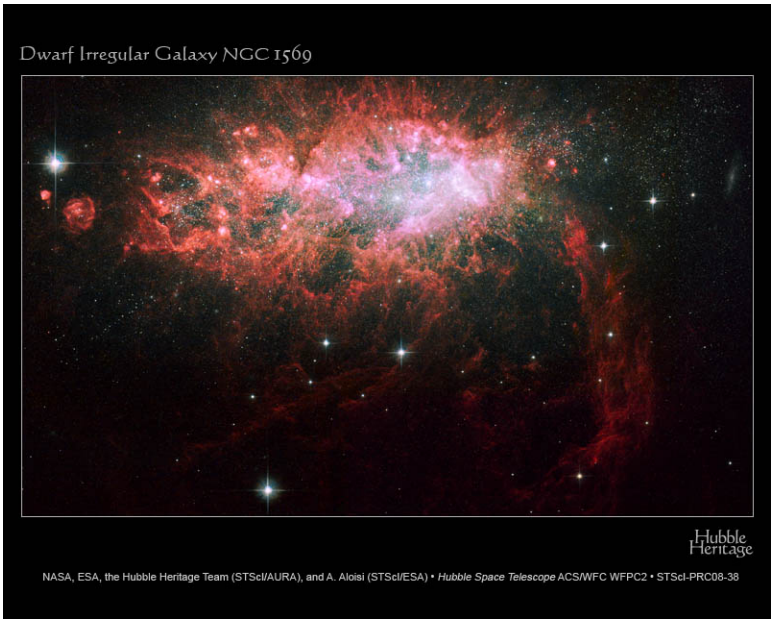

Figura 2.7
NGC 1569, galaxia enana irregular en la constelación de la Jirafa, con una tasa de formación estelar 100 veces mayor que la Vía Láctea. Fuente: NASA (2008)

2.1.4 Espectros galácticos

Como se mencionó en la sección anterior, las galaxias elípticas y espirales presentan grandes diferencias tanto en su forma como en el contenido de material que poseen. Estas diferencias, a su vez, están asociadas con procesos astrofísicos particulares, como las variaciones en la tasa de formación estelar y en el tipo de poblaciones estelares que albergan. Debido a la composición y estructura de cada tipo, el espectro electromagnético de una galaxia varía de acuerdo con su morfología.

A diferencia de las estrellas, que son objetos individuales, el espectro electromagnético de una galaxia está formado por la combinación de múltiples estrellas, gas interestelar y la influencia de procesos activos de formación estelar (Mo et al., 2010). La Figura 2.8 muestra las diferencias entre los espectros de distintos tipos de galaxias. En esta figura también se observa un tipo de galaxias denominado S0; estas corresponden a las galaxias lenticulares, las cuales presentan una forma esferoidal acompañada de un pequeño disco estelar (Carroll, 2014). Sin embargo, este tipo de galaxias, al igual que las galaxias con núcleos activos (Starburst), no se encuentran dentro de los alcances de esta tesis.

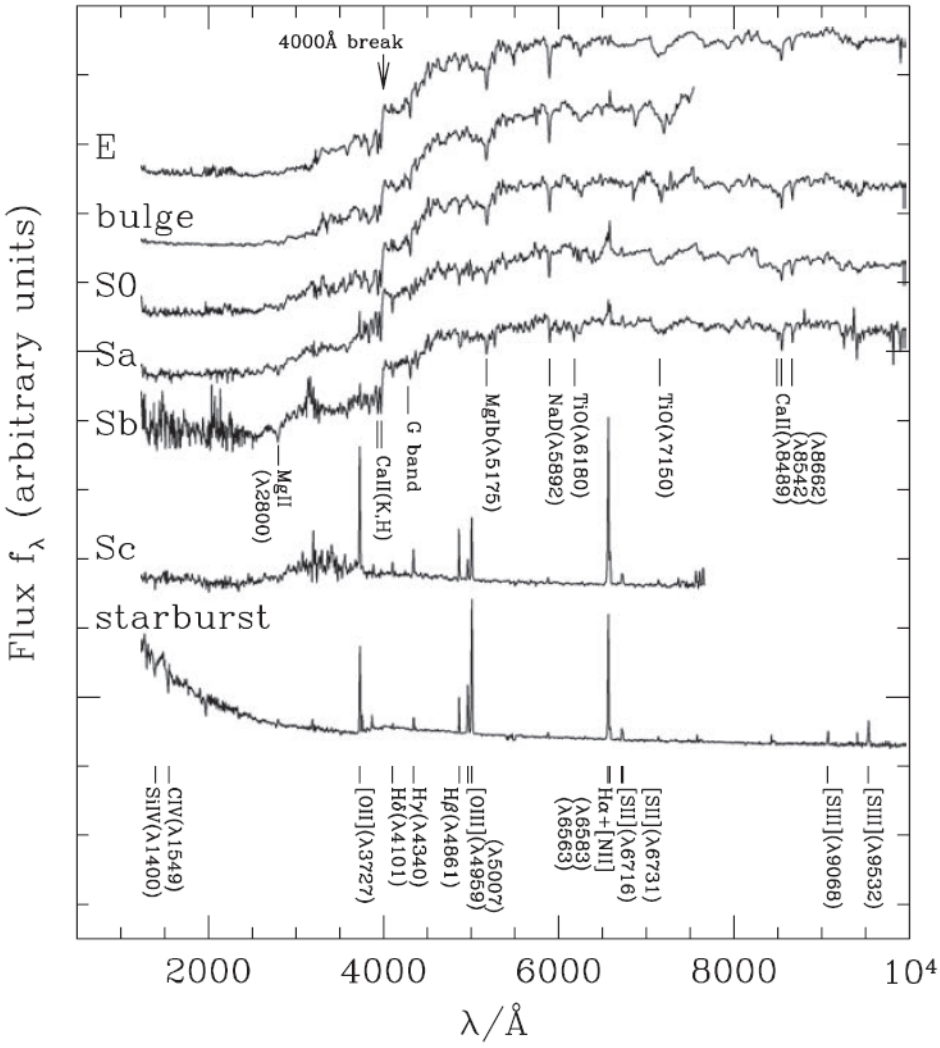

Figura 2.8

Espectros galácticos de diferentes tipos de galaxias desde el ultravioleta hasta el infrarojo cercano. Imagen tomada de Mo et al. (2010).

Con el fin de comprender mejor las diferencias entre los tipos de galaxias, es posible identificar en la Figura 2.8 ciertas zonas del espectro que resultan especialmente significativas.

- En la Figura 2.8 se observa una disminución significativa en el flujo hacia el azul, que se extiende hasta aproximadamente los 4000Å. Este descenso, conocido como el quiebre de la **Banda G** (Mo et al., 2010), se debe a la gran cantidad de estrellas rojas presentes en las galaxias elípticas, así como a la ausencia de formación estelar y de estrellas azules jóvenes.

El mismo fenómeno también se encuentra en los bulbos galácticos y, en menor medida, en galaxias espirales de tipo Sa y Sb, cuya contribución bulbar es mayor y afecta de manera notable la luminosidad total.

- Entre otras características destacadas se encuentran las líneas asociadas a la formación estelar, como las líneas de emisión de la serie de Balmer (Mo et al., 2010), las cuales están presentes en los espectros de galaxias espirales pero ausentes en los de galaxias elípticas debido a su bajo contenido de gas. En general, se observa en la Figura 2.8 que los espectros de las galaxias elípticas están dominados principalmente por líneas de absorción, mientras que en las galaxias espirales hay una mayor presencia de líneas de emisión (Mo et al., 2010).

- La línea H_α (6563Å) surge de la transición de un electrón en un átomo de hidrógeno desde el nivel de energía $n = 3$ hacia $n = 2$. Esta transición pertenece a la serie de Balmer y se genera en regiones H_{ii}, donde el gas es ionizado por la intensa radiación ultravioleta emitida por estrellas jóvenes y masivas. Dado que es una línea de recombinación fuerte, su intensidad se correlaciona directamente con la tasa de formación estelar reciente. Además, debido a su mayor longitud de onda en el rojo, H_α es menos afectada por la extinción interestelar que otras líneas de Balmer, lo que la convierte en una de las herramientas más fiables para estimar la cantidad de gas ionizado y la actividad de formación estelar en galaxias (Osterbrock and Ferland, 2006).

- La línea de H_β (4861Å) también pertenece a la serie de Balmer y se produce por la transición del nivel $n = 4$ al nivel $n = 2$ del hidrógeno. Aunque es más débil que H_α, es fundamental como referencia para corregir la extinción por polvo interestelar, especialmente al compararse con H_α mediante el cociente Balmer (H_α/H_β). Las líneas de recombinación como H_β se utilizan para calcular la densidad de fotones ionizantes, y en combinación con líneas prohibidas, permiten estimar parámetros como la temperatura y densidad electrónica del gas ionizado (Osterbrock and Ferland, 2006).

- Las líneas de $[O_{III}]$ (4959Å y 5007Å) son transiciones prohibidas que se originan en oxígeno doblemente ionizado (O^{2+}) en niveles metaestables, y son características de entornos de baja densidad como las regiones H_{ii} y nebulosas planetarias. La intensidad de estas líneas es extremadamente sensible a la temperatura del gas, ya que provienen de colisiones electrón-ión que excitan los niveles superiores antes de decaer radiativamente. El cociente $[O_{III}]/H_\beta$ se emplea ampliamente en diagramas diagnósticos para distinguir entre ionización debida a formación estelar o a núcleos activos, y también permite estimar la temperatura electrónica del medio interestelar (Osterbrock and Ferland, 2006).

Si bien de la Figura 2.8 es posible evidenciar que hay otras regiones y líneas espectrales, este proyecto se centrará únicamente en las regiones mencionadas ya que son regiones relevantes cuya sonificación puede ayudarnos a identificar cada tipo de galaxia.

2.2 Sonificación y Técnicas de Sonificación

Como se mencionó en la sección 1, la sonificación es el proceso mediante el cual se representan datos mediante señales acústicas, de modo que las características relevantes de dichos datos puedan ser percibidas e interpretadas por el oído humano. Según Hermann et al. (2011), la sonificación permite complementar o sustituir representaciones visuales, resultando especialmente útil en contextos donde la visualización es limitada o se desea incluir a personas con discapacidad visual.

Una de las técnicas más ampliamente utilizadas en este campo es la sonificación por mapeo de parámetros, conocida como *Parameter Mapping Sonification* (PMSon). Este enfoque consiste en asignar ("mapear") directamente variables o dimensiones del conjunto de datos a parámetros perceptuales del sonido, tales como la afinación (pitch o nota musical), la intensidad (loudness o volúmen), el timbre o la localización espacial (Hermann et al., 2011)

Según lo mencionado por Hermann et al. (2011), la flexibilidad de PMSon radica en que permite al diseñador controlar con precisión qué aspectos de los datos se enfatizan y cómo se perciben, adaptando el diseño sonoro al objetivo analítico o comunicativo. Sin embargo, esta flexibilidad también implica la necesidad de tomar decisiones fundamentadas para que los mapeos sean intuitivos y comprensibles para el oyente.

La técnica de PMSon consiste en convertir datos numéricos en eventos sonoros por medio de una función de mapeo de parámetros, que controla atributos acústicos como la frecuencia, amplitud, duración y espacialización del sonido. De acuerdo con Hermann et al. (2011), el proceso se formaliza mediante una función generadora de señal $f(\vec{p}, t)$, donde $\vec{p}$ es un vector de parámetros acústicos, y t representa el tiempo. En general, el sonido resultante $s(t)$ se define como:

$$s(t) = \sum_{i=1}^{N} f\big(g(\vec{x}_i), t\big) \tag{2.2}$$

donde $g : \mathbb{R}^d \to \mathbb{R}^m$ es la función de mapeo de parámetros que convierte el conjunto de

datos $\vec{x}_i$ en parámetros acústicos. En el caso ideal, se busca un mapeo lineal que preserve la relación perceptual directa entre los datos y los atributos sonoros. Sin embargo, en aplicaciones prácticas también se pueden utilizar funciones no lineales, como exponenciales, sigmoides o funciones por tramos, con el fin de resaltar ciertas regiones de los datos o comprimir rangos específicos del espacio de atributos.

Dado que el objetivo de este trabajo es explorar nuevas formas de acceder e interpretar los datos astronómicos, especialmente en el contexto de la inclusión de personas con discapacidad visual, a continuación se presentan los fundamentos de la sonificación y las principales técnicas empleadas en este campo.

2.2.1 Bases de teoría musical

El sonido posee cuatro propiedades principales desde el enfoque de la teoría musical. Una de las más importantes es la afinación o tono, que se refiere a qué tan alto (agudo) o bajo (grave) se percibe un sonido. En la música occidental, los diferentes tonos se representan mediante las primeras siete letras del abecedario: A, B, C, D, E, F y G, las cuales corresponden a las notas musicales La, Si, Do, Re, Mi, Fa y Sol, respectivamente. Sin embargo, entre cada par de notas existe una distancia tonal que puede contener otras notas intermedias, conocidas como alteraciones (Benward and Saker, 2007). La Figura 2.9 muestra cómo se distribuyen estas notas, incluyendo las alteraciones, en el teclado de un piano. Las alteraciones pueden ser de dos tipos: sostenido (♯) y bemol (♭), y se indican agregando el símbolo correspondiente al nombre de la nota, teniendo así una cantidad todal de 12 notas. Mientras el sostenido eleva el tono de la nota hacia una más aguda, el bemol la disminuye, haciéndola más grave (Benward and Saker, 2007).

Adicionalmente, puede observarse de la Figura 2.9 como el patrón de notas se repite a lo largo del teclado, fenómeno conocido como *octavas*. La secuencia de 12 notas se repite de forma regular y se numeran según su posición, comenzando desde A0, B0, C0, D0, ..., hasta C8, que corresponde a la última octava presente en un piano. Este patrón abarca desde los sonidos más graves (en la octava 0) hasta los más agudos (en la octava 8) (Benward and Saker, 2007). Desde una perspectiva física, las octavas se producen cuando la frecuencia fundamental de una onda se duplica o se reduce a la mitad, generando así la percepción de la misma nota en un registro más agudo o más grave, respectivamente (López, 2007).

En la teoría musical, la distancia entre dos notas se denomina *intervalo*. El intervalo más

pequeño reconocido en la música occidental es el Semitono o Medio tono, que corresponde a la distancia entre dos teclas adyacentes en el piano, ya sea una blanca y una negra, o en algunos casos, dos blancas contiguas (véase Figura 2.9, Benward and Saker (2007)). Además, como se observa en dicha Figura, una misma tecla puede recibir dos nombres distintos, dependiendo del contexto armónico. Por ejemplo, la nota Mi♭ es equivalente a Re♯. Esta equivalencia, conocida como equivalentes enarmónicos, se debe a que las notas pueden leerse en sentido ascendente (de más grave a más agudo) o descendente (de más agudo a más grave), lo que da lugar a denominaciones alternativas (Benward and Saker, 2007).

La existencia de los intervalos permite la construcción de las *escalas musicales*, las cuales se forman al partir de una nota base y avanzar hasta su octava mediante una secuencia de intervalos definidos, ya sea en *semitonos* o *tonos completos* (Piston, 1987). Un *tono completo* equivale a dos semitonos consecutivos. Por ejemplo, entre las notas **C** y **D** se encuentra la nota **C♯**: el intervalo entre **C** y **C♯** es de un semitono, al igual que entre **C♯** y **D**, por lo que el paso total de **C** a **D** abarca dos semitonos, es decir, un tono completo.

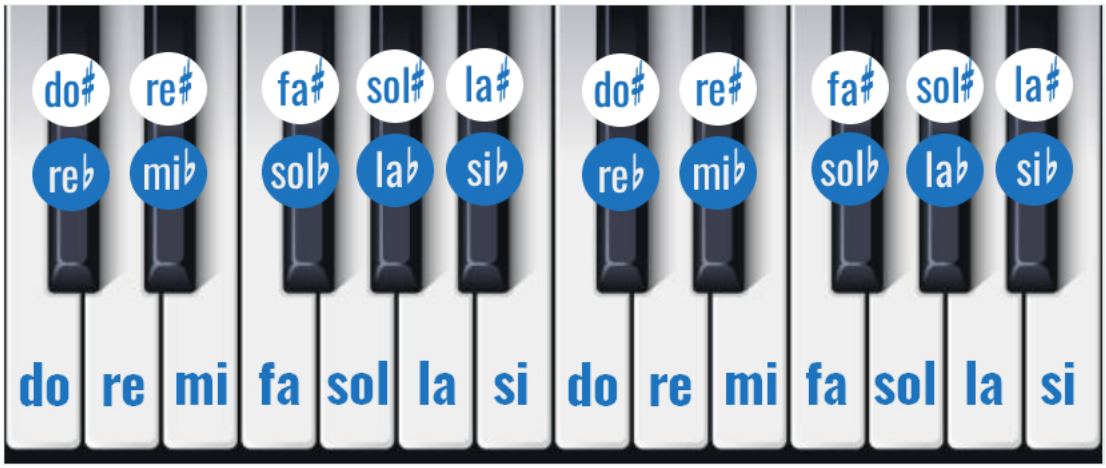

Figura 2.9
Distribución de notasmusicales en el piano. Imagen tomada de Piano (nd).

La intensidad o amplitud es la segunda de las cuatro principales propiedades del sonido en la teoría musical. Esta propiedad hace referencia al volumen del sonido, qué tan fuerte o bajo es percibido, lo cual es conocido en la teoría musical como *dinámicas* y se diferencian unas de otras según el promedio de decibeles que se emiten. La Figura 2.10 muestra las diferentes dinámicas utilizadas en la teoría musical (Benward and Saker, 2007).

La tercera propiedad fundamental del sonido es la **duración**. Desde la teoría musical,

Italian Word	Symbol	Translation	Average Decibels
Pianissimo	*pp*	Very soft	40
Piano	*p*	Soft	50
Mezzo piano	*mp*	Moderately soft	60
Mezzo forte	*mf*	Moderately loud	70
Forte	*f*	Loud	80
Fortissimo	*ff*	Very loud	100

Figura 2.10
Diferenciación de los diferentes volúmenes o dinámicas de sonido clasificadas según la cantidad de decibeles emitidos. Imagen tomada de Benward and Saker (2007).

esta se define a partir de varios elementos (Edward Aldwell, 2003). Uno de ellos es el *beat* o pulso, que representa una unidad rítmica regular a lo largo del tiempo; una sucesión de beats marca el flujo temporal de la música.

Otro concepto clave es el *tempo*, que indica la velocidad a la que ocurren los beats, es decir, cuántos beats hay por minuto. La duración específica de los sonidos se expresa mediante las *Figuras musicales*, que determinan cuántos beats debe mantenerse un sonido, permitiendo incluso fracciones de beat (Edward Aldwell, 2003).

La Figura 2.11 ilustra las distintas Figuras musicales, sus divisiones y equivalencias. Usualmente, la *quarter note* (negra) se toma como unidad base del beat. Así, una *whole note* (redonda) equivale a 4 beats, una *half note* (blanca) a 2 beats, y así sucesivamente (Edward Aldwell, 2003).

La cuarta propiedad principal del sonido es el tiembre, el cual permite diferenciar el instrumento musical que emite el sonido Benward and Saker (2007).

De esta manera, los conceptos fundamentales de la teoría musical —afinación, intensidad, duración y timbre— proporcionan el marco necesario para diseñar estrategias de sonificación. Estos principios permiten establecer correspondencias claras entre parámetros musicales y

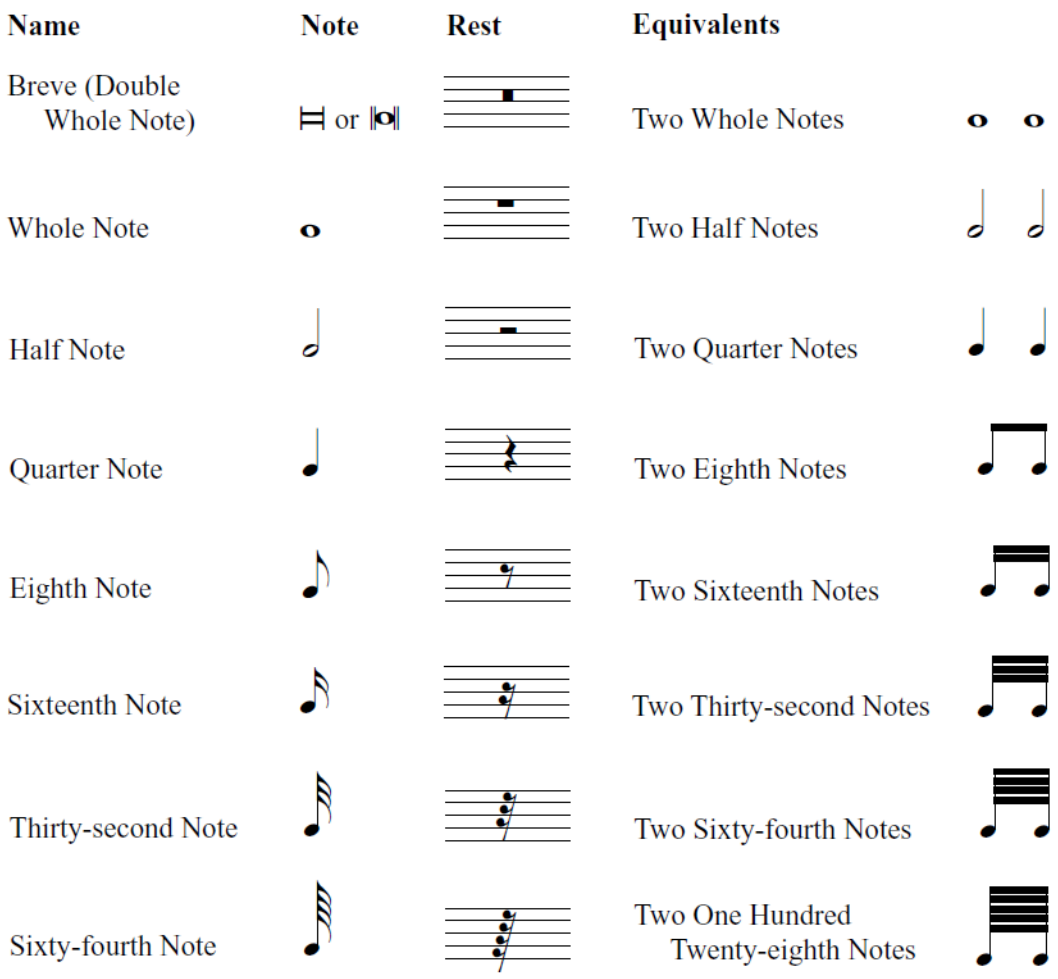

Figura 2.11

Duración y equivalencia de las Figuras musicales. La columna Note muestra las Figuras utilizadas para representar la duración de un sonido. La columna Rest indica la Figura utilizada para representar la duración de un silencio Imagen tomada de Benward and Saker (2007).

datos astronómicos, facilitando que la información espectral de las galaxias pueda representarse de manera auditiva. Con esta base, en el siguiente capítulo se presenta la estrategia metodológica propuesta para aplicar la sonificación al análisis y clasificación galáctica.

Capítulo 3

Estrategia de sonificación aplicada a la clasificación galáctica

Habiendo establecido los fundamentos conceptuales de la sonificación y las bases de la teoría musical, en este capítulo se presenta la manera en que dichos principios se aplican al análisis de espectros galácticos. Se describen los datos empleados y la metodología aplicada para llevar a cabo el proceso de sonificación de las galaxias incluidas en el atlas espectral de Robert C. et al. (1992). Asimismo, se presenta la herramienta desarrollada para realizar dicha sonificación y se detalla el procedimiento implementado para identificar los distintos tipos morfológicos de galaxias a partir del análisis sonoro obtenido.

3.1 Datos para la sonificación

La sonificación se llevó a cabo utilizando espectros provenientes del atlas espectral de galaxias de Robert C. et al. (1992), el cual contiene objetos bien caracterizados y clasificados morfológicamente. Estos datos se obtuvieron a través del NASA/IPAC Extragalactic Database (NED) (NASA/IPAC Extragalactic Database, nd), que recopila imágenes y espectros de objetos extragalácticos observados con distintos instrumentos y por diversos autores.

NED permite acceder a los datos en formato tabular (HTML), los cuales pueden ser exportados a archivos de texto plano, y también ofrece imágenes en formato .FITS (Flexible Image Transport System) (IAU, 2023), el estándar para almacenamiento de imágenes astronómicas. Este formato permite múltiples capas de información dentro del mismo archivo, incluyendo parámetros de observación como fecha, ubicación, exposición, filtros, datos del telescopio y del objeto observado, ya sea en fotometría, espectroscopía o ambos.

Estos archivos FITS corresponden a espectros unidimensionales de galaxias, provenientes del atlas espectral compilado por Robert C. et al. (1992). Cada archivo contiene una única

extensión primaria (`PrimaryHDU`) con un arreglo unidimensional de intensidades, compuesto típicamente por 1726 elementos. Estos valores representan el flujo observado en función de la longitud de onda, y la calibración espectral se establece mediante parámetros que permiten construir una escala desde aproximadamente 3650 Å hasta 7100 Å, con un paso constante de 2 Å por píxel. Las intensidades están almacenadas como enteros de 16 bits, aunque se encuentran acompañadas de información que permite reescalarlas a valores en punto flotante de 32 bits para un análisis más preciso. Este conjunto de archivos resulta especialmente útil para el estudio de líneas espectrales relevantes como H_α, H_β y $[O_{III}]$, las cuales permiten caracterizar procesos físicos claves como la formación estelar, la ionización del gas y la clasificación espectral de distintos tipos de galaxias.

3.2 Proceso de Sonificación

Para llevar a cabo la sonificación, fue necesario seleccionar primero los entornos y herramientas adecuados para este propósito. Aunque existen desarrollos previos como xSonify, una herramienta basada en Java desarrollada por Diaz-Merced et al. (2012), otros trabajos como el de Santaguida and Russo (Santaguida and Russo) emplean el lenguaje Python para realizar la sonificación. Dado que Python ofrece mayor accesibilidad, amplia documentación, y una comunidad activa, además de ser una herramienta flexible para el análisis de datos astronómicos, se eligió como plataforma principal para este estudio. A diferencia de los trabajos mencionados, este enfoque se centra en la sonificación de espectros de galaxias, un área menos explorada. Para esto se creó la herramienta **UAGalaxySon**, la cual contiene todo lo necesario para realizar la sonificación.

Esta herramienta fue desarrollada en Python y su funcionamiento está basado en la técnica de sonificación "Parameter Mapping Sonification" explicada en la sección 2.2. La herramienta recibe de entrada los datos del espectro de la galaxia y realiza una asignación de notas musicales dependiendo del flujo o intensidad de los datos espectrales.

En un primer momento de la sonificación, se reescalaron las longitudes de onda electromagnéticas a longitudes de onda audibles, utilizando la intensidad del espectro como la amplitud del sonido. La intención era generar tonos más agudos e intensos en las galaxias espirales que en las elípticas. Sin embargo, este método no permitió distinguir claramente las líneas espectrales ya que el sonido simplemente se hacía cada vez más agudo en longitudes de onda más cortas, por lo que se percibían sonidos con un volumen mayor en estas regiones del espectro a pesar de no haber ninguna línea de emisión o de tener líneas de absorción

Para corregir esto se adoptó una nueva metodología basada en la técnica de "Parameter Mapping Sonification" descrita en Hermann et al. (2011). Esta consiste en asignar sonidos específicos a determinados parámetros de los datos. En este caso, se asignaron sonidos de acuerdo con la intensidad del espectro, lo que permitió diferenciar con gran facilidad la profundidad de las líneas espectrales basado en la sonoridad aguda o grave conseguida con la sonificación. Esta se detallará más en la siguiente sección.

3.2.1 Parameter mapping sonification

Para representar distintas intensidades se tomaron 5 octavas de la escala musical cromática y se distribuyeron de forma diferente según el tipo morfológico de galaxia. Como se observa en las Figuras 3.1 y 3.2, la distribución de notas se realizó considerando una intensidad normalizada máxima de 8 para las galaxias espirales y de 2 para las galaxias elípticas. En el caso de las galaxias irregulares, como se muestra en la Figura 3.3, las octavas se distribuyeron desde el valor mínimo hasta el valor máximo de intensidad observado. Estos valores se tomaron como referencia para dividir las cinco octavas de la escala cromática (60 notas) para cada tipo de galaxia en el atlas espectral de Robert C. et al. (1992).

Así, a partir de lo planteado en la sección 2.2 y utilizando la ecuación 2.2, se construyó una expresión para el mapa de notas, definida como una función lineal de la forma:

$$Sep_{Not}(I, N) = \frac{I_{\text{máx}}}{N_{\text{notas}}} \tag{3.1}$$

donde $I_{\text{máx}}$ corresponde al valor máximo de intensidad normalizada (por ejemplo, 2 para galaxias elípticas y 8 para galaxias espirales), y N_{notas} representa el número total de notas consideradas en el rango tonal.

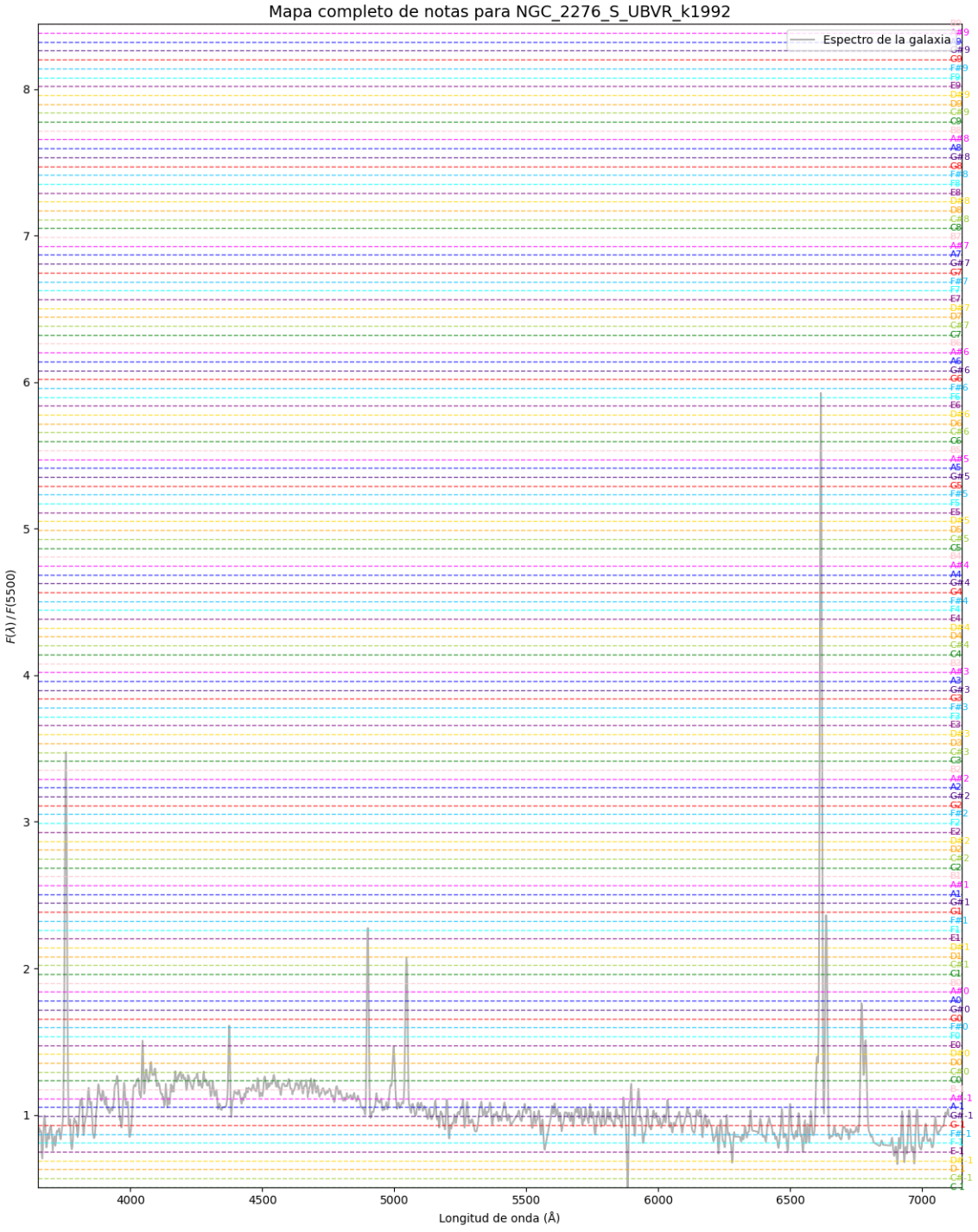

Figura 3.1

Mapa de notas de 5 octavas de la escala musical cromática para las galaxias espirales. Espectro electromagnético corresponde a la galaxia NGC 2276.

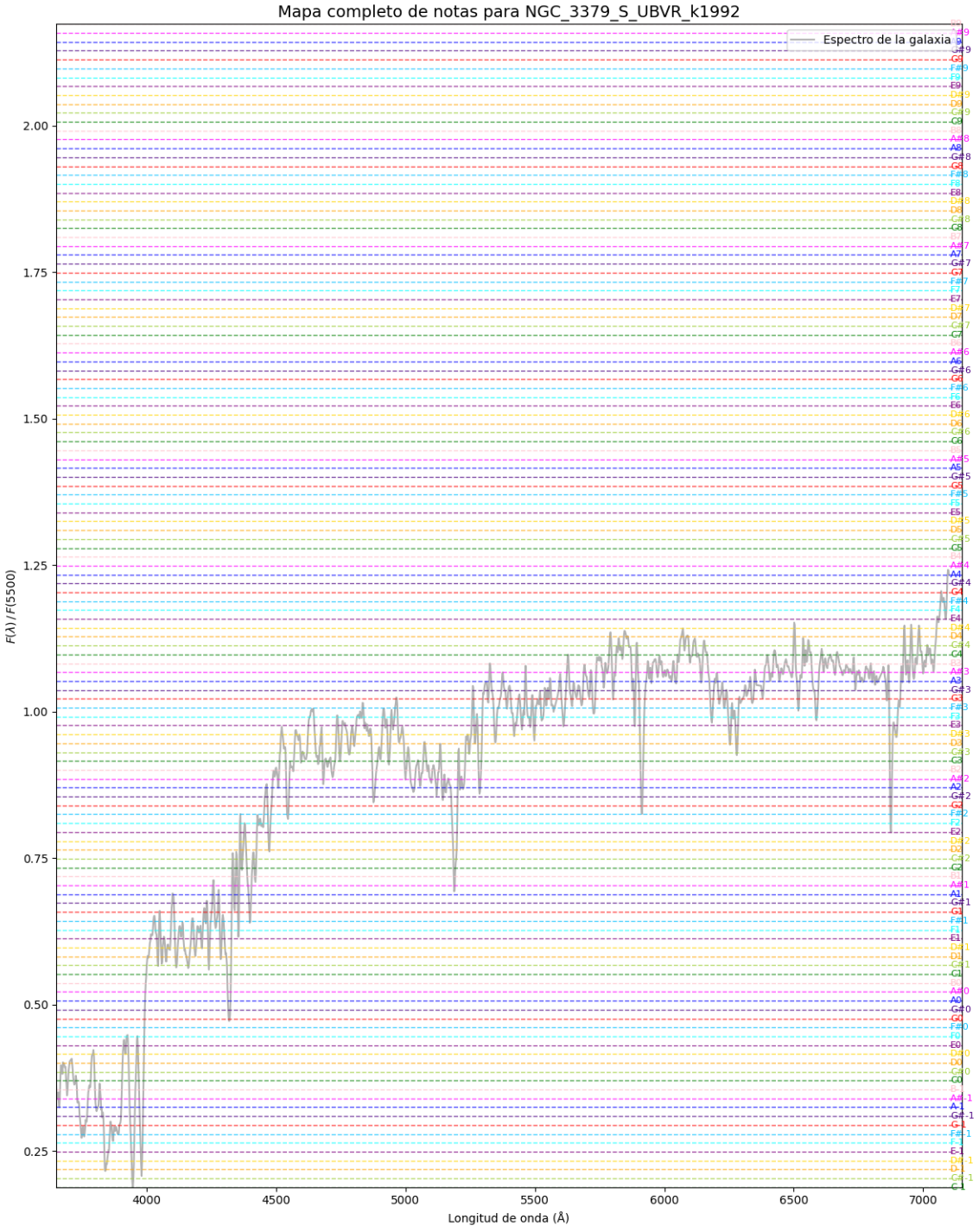

Figura 3.2

Mapa de notas de 5 octavas de la escala musical cromática para las galaxias elíticas. Espectro electromagnético corresponde a la galaxia NGC 3379

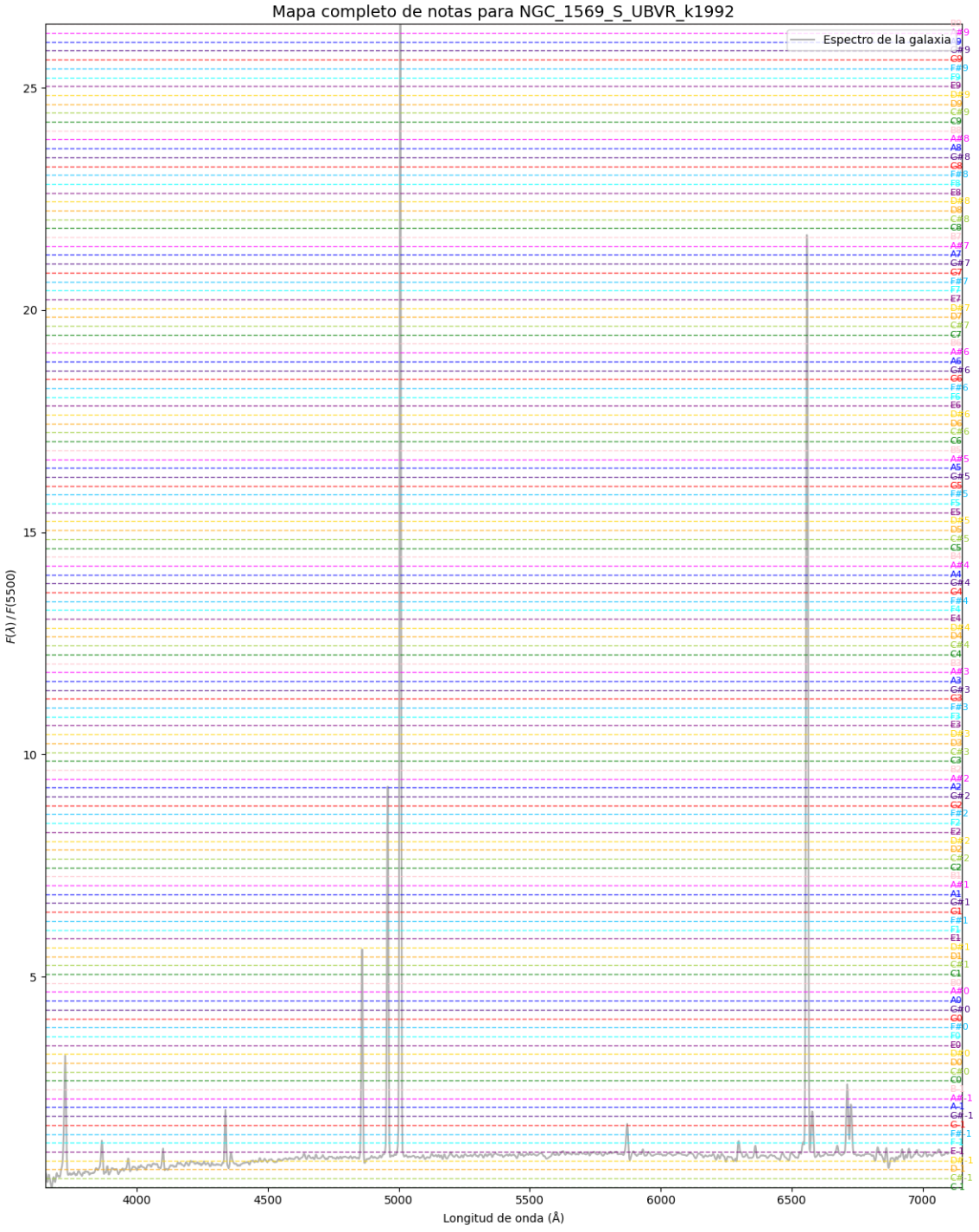

Figura 3.3

Mapa de notas de 5 octavas de la escala musical cromática para las galaxias irregulares. Espectro electromagnético corresponde a la galaxia NGC 1569

La diferenciación de mapeo de notas para cada tipo de galaxia tuvo que llevarse a cabo debido a los rangos de intensidad de los espectros mencionados anteriormente. Este mapeo de notas para cada tipo de galaxia permitió diferenciar con claridad las líneas de emisión prominentes, como H_α en galaxias espirales y facilitó la diferenciación de las líneas de absorción en galaxias elípticas.

Si bien el ruido del espectro generado en el proceso de toma de datos (bias del instrumento, fallos en píxeles, sobrecalentamientos de la CCD) puede afectar negativamente la infomación científica, en este caso se hace necesario mantenerlo ya que al estar presente durante todo el espectro aproximadamente entre los valores de 0.9 y 1.1 de intensidad esto ofrece una nota de base que estará sonando todo el tiempo, lo que permite la correcta identificación de una línea espectral cuando esta nota base cambia. Sin embargo, para evitar saturaciones en el oído y el cansancio auditivo que esto puede generar, este valor del ruido se sonificó con un volumen más bajo.

Para detectar el ruido se desarrolló una herramienta basada en el método de regresión lineal, que permitiera identificar estas regiones planas del espectro. A partir de esta región, se calcularon la media y la desviación estándar para establecer límites superiores e inferiores que definieran una zona de ruido. Estas regiones se sonificaron con un volumen más bajo. En las Figuras 3.4, 3.5 y 3.6 se muestra la aplicación del algoritmo sobre las galaxias NGC 2276 (espiral), NGC 3379 (elíptica) y NGC 1569 (irregular), respectivamente, usando datos de Robert C. et al. (1992) extraídos de NASA/IPAC Extragalactic Database (nd).

Aplicando este algoritmo se encontró que en el caso de las galaxias espirales este ruido se encontraba entre las notas G2 y G♯2, mientras que para las galaxias elípticas se encontró entre las notas D♯4 hasta G4, variando de galaxia en galaxia según los valores en sus espectros.

Otros parámetros relevantes en el proceso de sonificación, como el volumen y la duración de las notas, se mantuvieron constantes para todos los datos espectrales. En particular, la duración fue fijada en 0,5 segundos por nota y el volúmen en 0 decibeles.

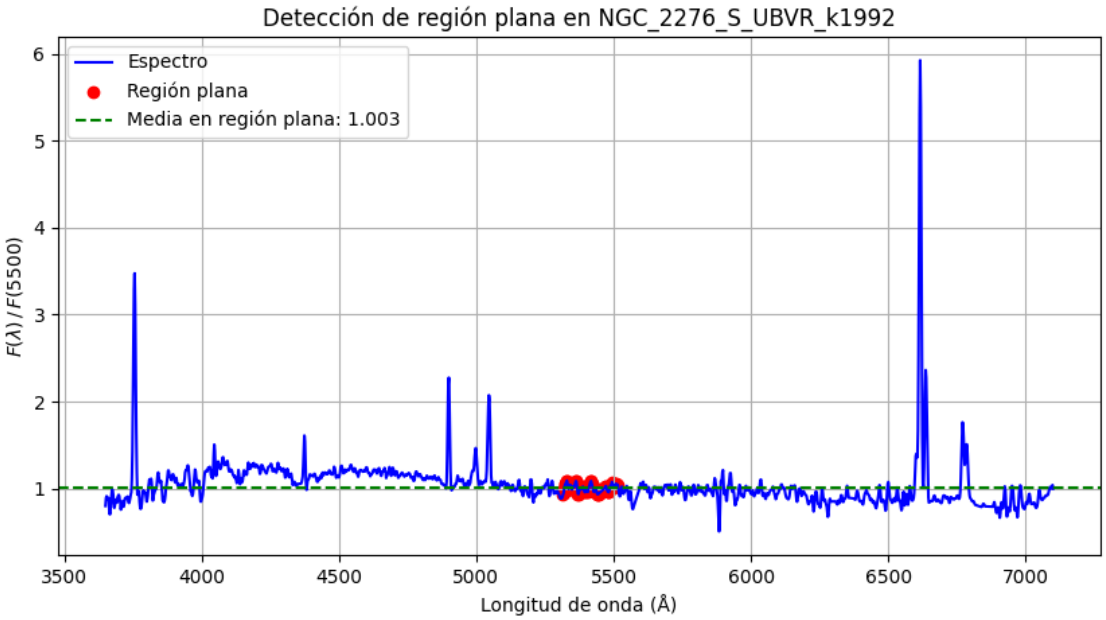

Figura 3.4

Espectro elesctromagnético de la galaxia tipo Sa NGC 2276 tomado de NASA/IPAC Extragalactic Database (nd) del atlas espectral de galaxias estudiados por Robert C. et al. (1992). El espectro pasó por el algoritmo para detectar la región plana que permitió diferenciar entre líneas de absorción, emisión y ruido.

De esta manera, se garantizó un control adecuado del ruido de fondo, evitando que enmascarara la información astronómica más relevante. Una vez implementado este ajuste, el proceso pudo avanzar hacia la creación de los archivos de sonificación, donde se consolidaron los criterios de mapeo y representación sonora.

3.2.2 Creación de archivos de sonificación

El proceso de sonificación genera archivos en formato MIDI (Musical Instrument Digital Interface), el cual un estándar técnico diseñado en la década de 1980 para permitir la comunicación entre distintos dispositivos electrónicos musicales, como sintetizadores, controladores, secuenciadores y computadoras (Huber, 2019). A diferencia de un archivo de audio convencional (como WAV o MP3), un archivo MIDI no contiene sonidos en sí, sino instrucciones digitales que indican qué nota debe tocarse, a qué velocidad (indicada por el tempo en BPM),

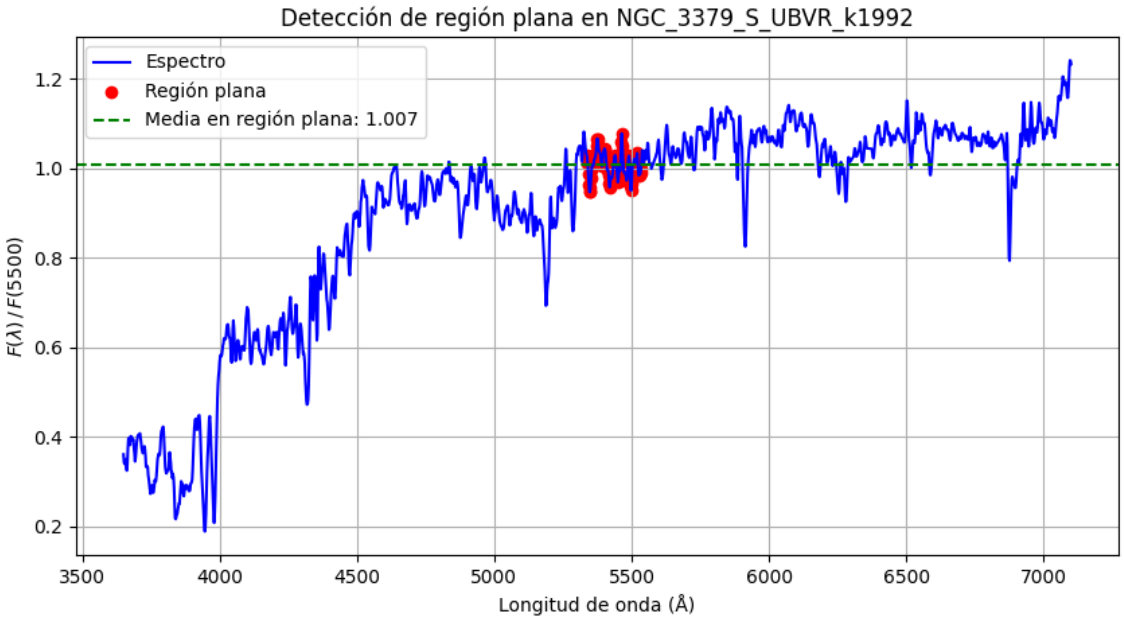

Figura 3.5

Espectro elesctromagnético de la galaxia elíptica NGC 3379 tomado de NASA/IPAC Extragalactic Database (nd) del atlas espectral de galaxias estudiados por Robert C. et al. (1992). El espectro pasó por el algoritmo para detectar la región plana que permitió diferenciar entre líneas de abosrción, emisión y ruido.

con qué duración (Indicada por la Figura musical), y con qué instrumento virtual. Estas instrucciones hacen del MIDI un formato sumamente versátil y liviano, ampliamente utilizado tanto en producción musical como en proyectos educativos y científicos que involucran la manipulación de sonidos generativos o sintéticos.

En el contexto de esta tesis, los archivos MIDI generados permiten representar sonoramente las zonas seleccionadas de los espectros galácticos procesados. Estos archivos pueden ser importados en un DAW (Digital Audio Workstation), como Reaper, Ableton Live o FL Studio, donde es posible asignar diferentes instrumentos virtuales (VSTi o soundfonts) a los canales MIDI. De este modo, se puede personalizar el timbre del sonido según criterios musicales, perceptuales o científicos, facilitando la interpretación auditiva de las líneas espectrales y sus características.

Esta flexibilidad permite, por ejemplo, asignar sonidos brillantes (como campanas o sin-

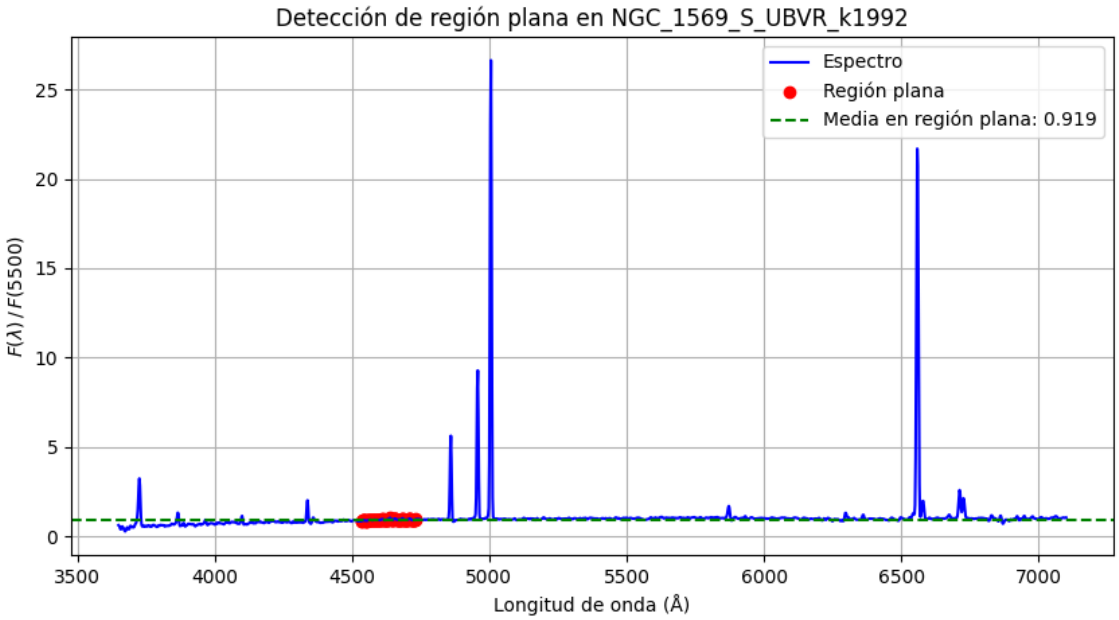

Figura 3.6

Espectro elesctromagnético de la galaxia irregular NGC 1569 tomado de NASA/IPAC Extragalactic Database (nd) del atlas espectral de galaxias estudiados por Robert C. et al. (1992). El espectro pasó por el algoritmo para detectar la región plana que permitió diferenciar entre líneas de abosrción, emisión y ruido.

tetizadores agudos) a las líneas de emisión, y sonidos oscuros o graves (como cuerdas o metales) a las líneas de absorción, creando así una experiencia auditiva más rica y accesible, especialmente útil en proyectos de divulgación o inclusión científica.

La asignación de notas se realizó comenzando con la primera nota de la escala, correspondiente a la frecuencia más baja, la cual se asoció a un valor de intensidad igual a cero. A partir de esta base, y utilizando la separación entre notas establecida previamente, se procedió a asignar el resto de las notas de la escala.

Adicionalmente, se asoció un color específico a cada nota, de manera que, por ejemplo, la nota La (A) fue representada mediante una línea de color azul, sin importar la octava en la que se encontrara. Las Tablas 3.1 y, 3.2 presentan un resumen de la correspondencia entre notas y colores utilizada para las galaxias espirales y elípticas respectivamente. Cabe señalar que en estas tablas se incluyó, además, una representación sonora de cada nota, la cual puede

reproducirse haciendo clic sobre la nota resaltada en azul.

Tabla 3.1

Mapa de correspondencia entre intensidad espectral, nota musical y color en galaxias espirales. Cada nota en la tabla cuenta con un enlace a SoundCloud donde puede reproducirse para una mejor identificación del sonido.

Galaxias Espirales		
Intensidad normalizada	**Nota**	**Color**
0.0	C2	green
0.13333	C♯2	yellowgreen
0.26667	D2	orange
0.4	D♯2	gold
0.53333	E2	purple
0.66667	F2	cyan
0.8	F♯2	deepskyblue
0.93333	G2	red
1.06667	G♯2	indigo
1.2	A2	blue
1.33333	A♯2	magenta
1.46667	B2	pink
1.6	C3	green
1.73333	C♯3	yellowgreen
1.86667	D3	orange
2.0	D♯3	gold
2.13333	E3	purple
2.26667	F3	cyan
2.4	F♯3	deepskyblue
2.53333	G3	red
2.66667	G♯3	indigo
2.8	A3	blue
2.93333	A♯3	magenta
3.06667	B3	pink
3.2	C4	green
3.33333	C♯4	yellowgreen

Continúa en la siguiente página

Tabla 3.1 –Mapa de correspondencia para Galaxias Espirales

Intensidad normalizada	Nota	Color
3.46667	D4	orange
3.6	D♯4	gold
3.73333	E4	purple
3.86667	F4	cyan
4.0	F♯4	deepskyblue
4.13333	G4	red
4.26667	G♯4	indigo
4.4	A4	blue
4.53333	A♯4	magenta
4.66667	B4	pink
4.8	C5	green
4.93333	C♯5	yellowgreen
5.06667	D5	orange
5.2	D♯5	gold
5.33333	E5	purple
5.46667	F5	cyan
5.6	F♯5	deepskyblue
5.73333	G5	red
5.86667	G♯5	indigo
6.0	A5	blue
6.13333	A♯5	magenta
6.26667	B5	pink
6.4	C6	green
6.53333	C♯6	yellowgreen
6.66667	D6	orange
6.8	D♯6	gold
6.93333	E6	purple
7.06667	F6	cyan
7.2	F♯6	deepskyblue
7.33333	G6	red
7.46667	G♯6	indigo
7.6	A6	blue

Continúa en la siguiente página

Tabla 3.1 –Mapa de correspondencia para Galaxias Espirales

Intensidad normalizada	Nota	Color
7.73333	A♯6	magenta
7.86667	B6	pink

Tabla 3.2

Mapa de correspondencia entre intensidad espectral, nota musical y color en galaxias elípticas. Cada nota en la tabla cuenta con un enlace a SoundCloud donde puede reproducirse para una mejor identificación del sonido

Galaxias Elípticas		
Intensidad normalizada	**Nota**	**Color**
0.0	C2	green
0.03333	C♯2	yellowgreen
0.06667	D2	orange
0.1	D♯2	gold
0.13333	E2	purple
0.16667	F2	cyan
0.2	F♯2	deepskyblue
0.23333	G2	red
0.26667	G♯2	indigo
0.3	A2	blue
0.33333	A♯2	magenta
0.36667	B2	pink
0.4	C3	green
0.43333	C♯3	yellowgreen
0.46667	D3	orange
0.5	D♯3	gold
0.53333	E3	purple
0.56667	F3	cyan
0.6	F♯3	deepskyblue
0.63333	G3	red
0.66667	G♯3	indigo
0.7	A3	blue

Continúa en la siguiente página

Tabla 3.2 – Mapa de correspondencia para Galaxias Elípticas

Intensidad normalizada	Nota	Color
0.73333	A♯3	magenta
0.76667	B3	pink
0.8	C4	green
0.83333	C♯4	yellowgreen
0.86667	D4	orange
0.9	D♯4	gold
0.93333	E4	purple
0.96667	F4	cyan
1.0	F♯4	deepskyblue
1.03333	G4	red
1.06667	G♯4	indigo
1.1	A4	blue
1.13333	A♯4	magenta
1.16667	B4	pink
1.2	C5	green
1.23333	C♯5	yellowgreen
1.26667	D5	orange
1.3	D♯5	gold
1.33333	E5	purple
1.36667	F5	cyan
1.4	F♯5	deepskyblue
1.43333	G5	red
1.46667	G♯5	indigo
1.5	A5	blue
1.53333	A♯5	magenta
1.56667	B5	pink
1.6	C6	green
1.63333	C♯6	yellowgreen
1.66667	D6	orange
1.7	D♯6	gold
1.73333	E6	purple
1.76667	F6	cyan

Continúa en la siguiente página

Tabla 3.2 – Mapa de correspondencia para Galaxias Elípticas

Intensidad normalizada	Nota	Color
1.8	F♯6	deepskyblue
1.83333	G6	red
1.86667	G♯6	indigo
1.9	A6	blue
1.93333	A♯6	magenta
1.96667	B6	pink

Para las galaxias irregulares del atlas espectral no fue posible realizar un mapeo de notas como los mostrados en las Tablas 3.2, 3.1 para las galaxias elipticas y espirales, debido a que su mapeo de notas (ver ecuación 3.1) varía de galaxia en galaxia según los valores máximos de intensidad.

De manera simplificada, el proceso de mapeo de notas puede imaginarse como si se rotara un piano en posición vertical, de forma que cada tecla represente la nota asignada según la intensidad del espectro. La Figura 3.7 ilustra una aproximación a este concepto.

Generalmente, los datos de los espectros de Robert C. et al. (1992) no se encuentran específicamente sobre las líneas de las notas musicales. Para solucionar esto, se asignó a estos puntos la nota más cercana a su intensidad; por ejemplo, si el dato de intensidad es un valor de 0.89 (intensidad entre 0.8335 y 1.0002), se otorgaría la nota de F0. Esto puede verse por ejemplo en las Figuras 4.1 y 4.2 donde varios de los puntos sonificados están en espacios entre dos notas consecutivas.

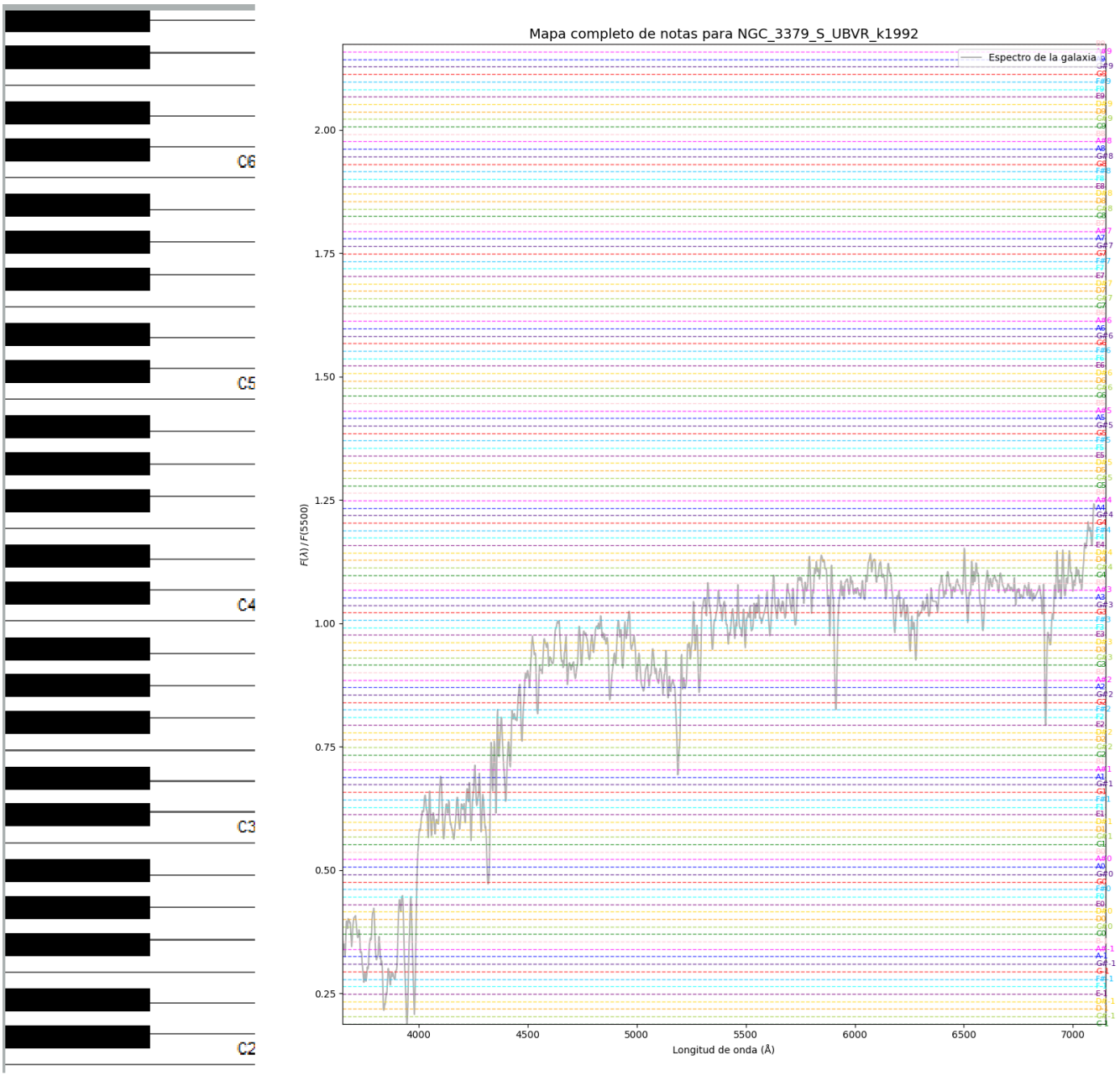

Figura 3.7

Mapa de notas para las galaxias espirales. La imagen se construyó combinando la Figura 3.2 y una captura del editor MIDI de Reaper. Para mayor claridad visual, las notas de las teclas del piano no corresponden exactamente con las líneas de notas mostradas en el mapa.

3.2.3 Clasificación espectral de galaxias

Si bien las galaxias pueden clasificarse morfológicamente a través del diagrama de Hubble, el espectro electromagnético también constituye una herramienta útil para su clasificación. Un ejemplo de ello es el trabajo presentado en el artículo *Spectral Classification of Galaxies Along the Hubble Sequence* (Zaritsky et al., 1995), donde se utilizaron como referencia las galaxias del atlas espectral de Robert C. et al. (1992). En dicho estudio, mediante la medición de las contribuciones del espectro de poblaciones estelares viejas, jóvenes y del componente de emisión al espectro global de cada galaxia, y comparando estas intensidades con las de galaxias previamente clasificadas morfológicamente, se encontró que más del 80 % de las galaxias podían ser clasificadas correctamente de manera espectral de acuerdo con su tipo morfológico.

En este caso se utilizaron las líneas espectrales de H_α y el quiebre de la banda G para realizar la caracterización de las galaxias según su tipo morfológico. Galaxias con línea de H_α marcada recibirán notas más agudas en esta línea, indicando la intensidad, la cual según se muestra en la Figura 2.8 es mayor en galaxias tipo Sc que en Sb, Sa y elípticas, así como se observa la relación contraria para el quiebre de la banda G. Esto se realiza al hacer un análisis en las gráficas de los espectros de Robert C. et al. (1992) en los cuales se observa como la línea de H_α disminuye su intensidad en el orden $Sc > Sb > Sa > E$ y teniendo la relación contraria en el caso del quiebre de la banda G.

Adicionalmente, se sonificó la región entre los 4700Å y los 5100Å donde se encuentran las líneas H_β y $[O_{III}]$ para aumentar la precisión en la caracterización de cada galaxia, pues estas líneas se presentan como emisión en las galaxias espirales e irregulares Mo et al. (2010). De esta forma, la estrategia de sonificación quedó definida y validada, lo que permite avanzar hacia la presentación y el análisis de los resultados obtenidos.

Capítulo 4

Sonificación de Galaxias

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos al aplicar el proceso de sonificación a las galaxias del atlas espectral de Robert C. et al. (1992), implementando la metodología descrita en el capítulo anterior, presentando principalmente los resultados para una galaxia de cada tipo morfológico. Asimismo, se incluyen los análisis correspondientes, las conclusiones finales y una serie de recomendaciones orientadas a optimizar el proceso empleado.

4.1 Clasificación de galaxias

Como se habló en la sección 2.1, la clasificación morfológica de las galaxias del atlas espectral de Robert C. et al. (1992) se realizó utilizando regiones específicas de sus espectros. Considerando la alta actividad de formación estelar que presentan las galaxias espirales y la baja tasa característica de las galaxias elípticas, se optó por utilizar como trazador principal la línea de H_α, debido a que es un marcador confiable de procesos de formación estelar.

Las Figuras 4.1, 4.2 y 4.3 muestran la comparación entre una galaxia espiral (NGC 2276), una elíptica (NGC 3379) y una irregular (NGC 1569).

Es importante establecer la descripción de las siguientes figuras (de la Figura 4.1 a la 4.15, puesto que en los paneles superiores se presenta el espectro completo, la región resaltada y el mapa de distribución de las notas. Las líneas horizontales sólidas representan:

- Negra: Valor medio calculado con el algoritmo para detectar la región planta.
- Verde: Valor medio más la desviación estándar.
- Roja: Valor medio menos la desviación estándar.
- La región delimitada por las líneas verde y roja se encuentran como el ruido del espectro.

Por otro lado, la Figura inferior corresponde con la ampliación de la región sonificada. Las líneas horizontales punteadas representan las diferentes notas musicales dentro de la escala musical cromática, mientras que los puntos indican los datos del espectro sonificados, rojos para emisión, azules para absorsión.

En la Figura 4.1, se observa que la sonificación alcanza notas en octavas más altas que en la Figura 4.2, correspondiente a la galaxia elíptica NGC 3379. Estas diferencias de octava son clave para la identificación morfológica de la galaxia: cuanto más agudas son las notas generadas a partir de la línea de H_α, mayor es la tasa de formación estelar. Por lo tanto, la presencia de notas en octavas elevadas indica una galaxia con alta actividad estelar (Carroll, 2014).

La sonificación correspondiente a esta región se encuentra disponible en los siguientes enlaces:

- Sonificación de la región H_α en la galaxia NGC 2276
- Sonificación de la región H_α en la galaxia NGC 3379
- Sonificación de la región H_α en la galaxia NGC 1569

En todas las galaxias, los valores de intensidad arriba de la media se representan mediante el sonido de un piano, mientras que los valores por debajo se han sonificado utilizando un arpa, con el fin de diferenciarlas claramente, véanse las Figuras 3.4, 3.5, 3.6 para identificar la media.

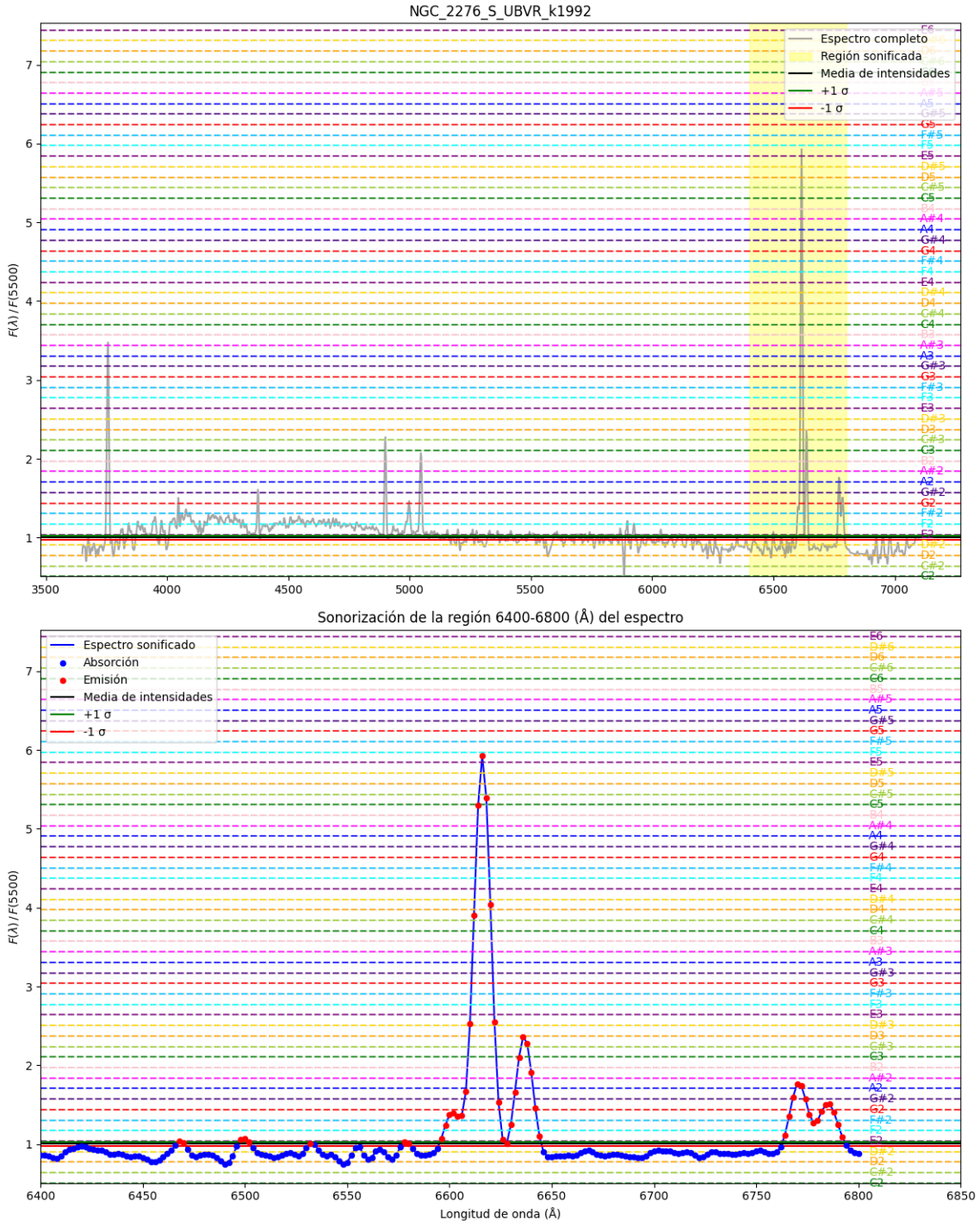

Figura 4.1

Sonificación de la región H_α en la galaxia NGC 2276. Arriba: espectro con la región resaltada. Abajo: sonificación de la región.

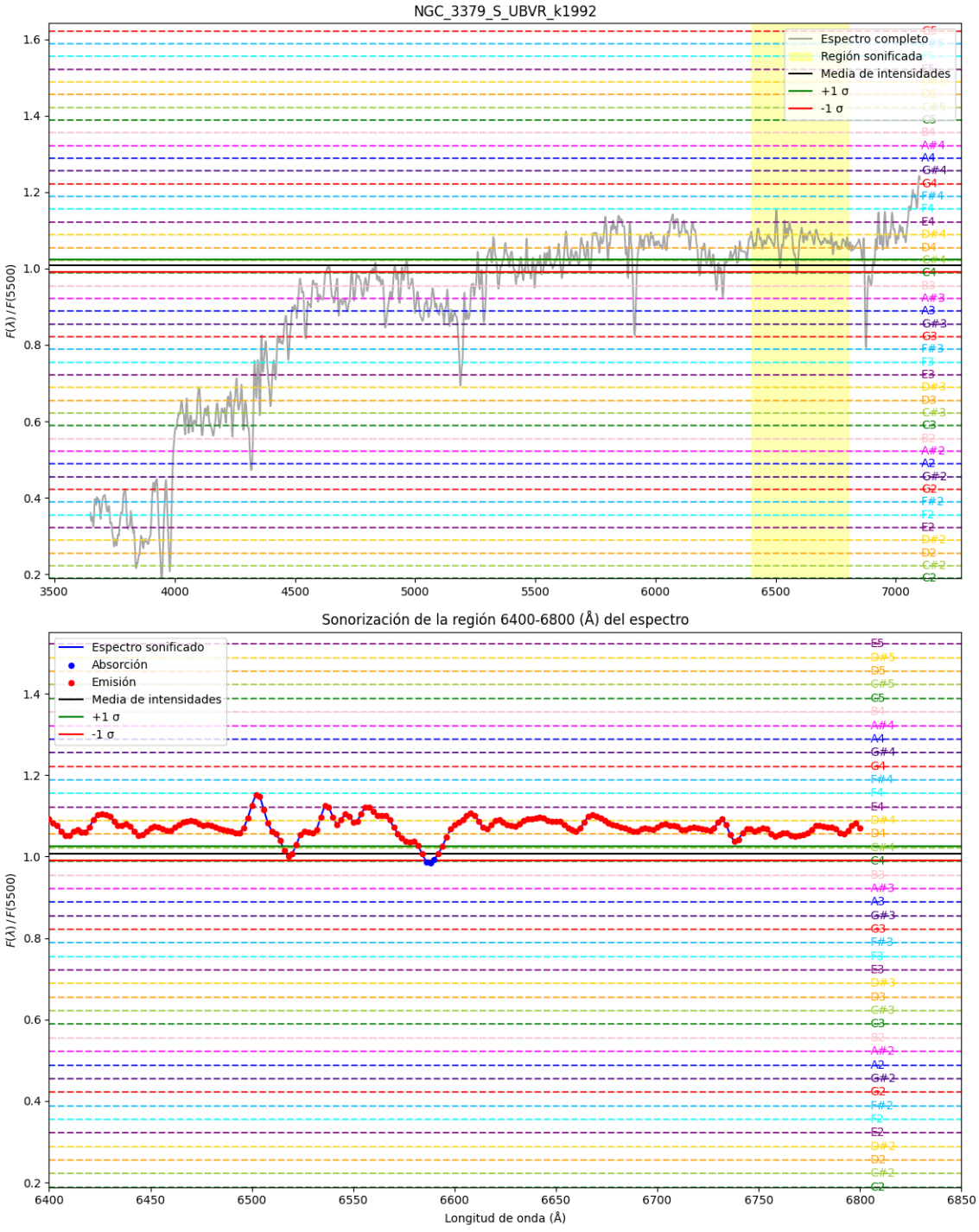

Figura 4.2

Sonificación de la región H_α en la galaxia NGC 3379. Arriba: espectro con la región resaltada. Abajo: sonificación de la región.

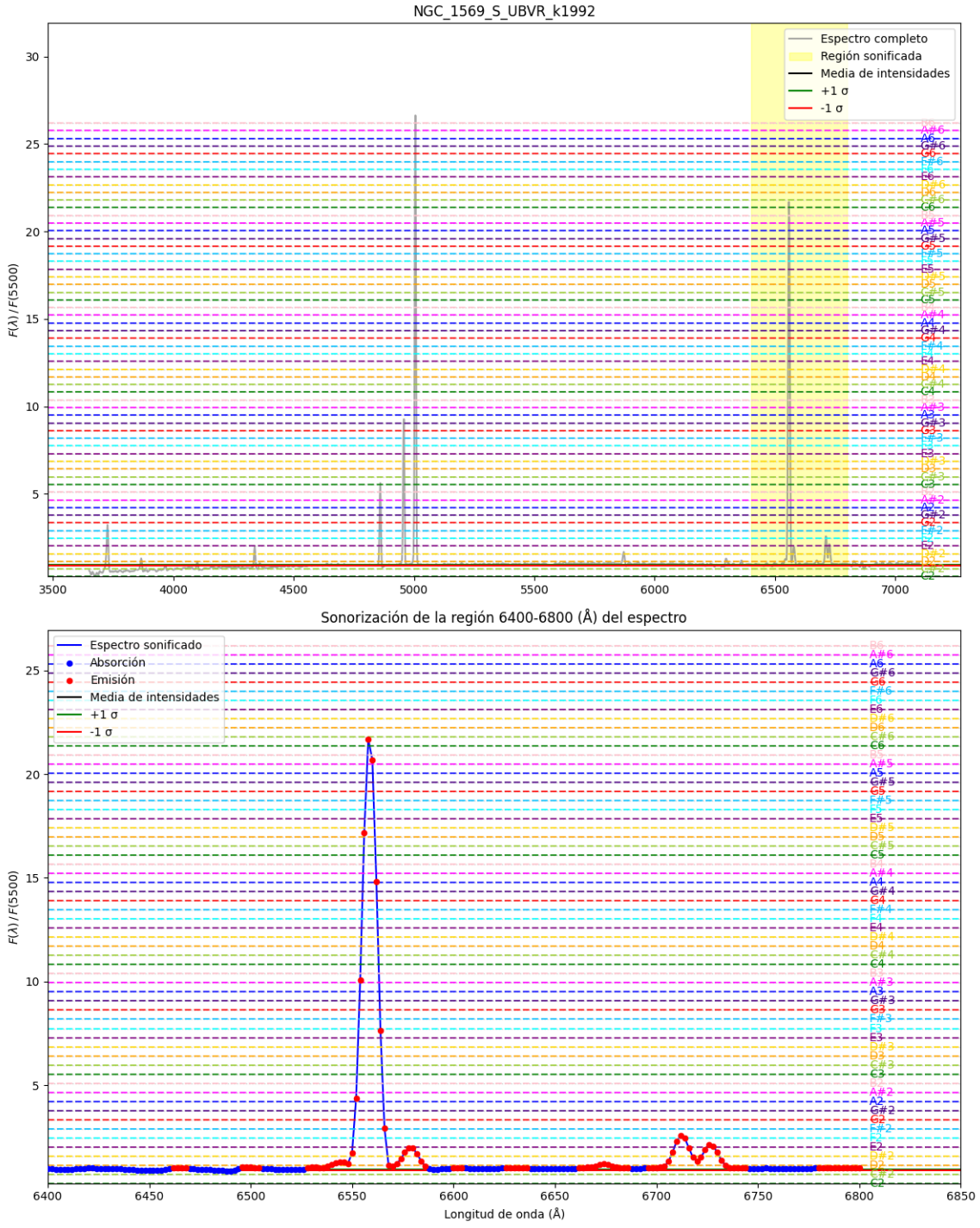

Figura 4.3

Sonificación de la región H_α en la galaxia NGC 1569. Arriba: espectro con la región resaltada. Abajo: sonificación de la región.

A partir de la sonificación, se puede apreciar que en la galaxia NGC 2276 (Figura 4.1), en la región correspondiente a H_α, hacia el segundo 25 de reproducción las notas musicales se tornan progresivamente más agudas, lo cual indica un aumento en la intensidad o la presencia de una línea de emisión. En contraste, en la galaxia NGC 3379 (Figura 4.2) el sonido permanece casi constante, oscilando entre dos o tres notas, lo que sugiere que esta región presenta una intensidad uniforme, sin evidencia de líneas de absorción. En el caso de la galaxia irregular NGC 1569 (Figura 4.3), la sonificación aumenta similarmente a lo observado en la galaxia NGC 2276, sin embargo puede apreciarse se las Figuras y la sonificación, que la nota alcanzada es más aguda (C♯6 para la irregular y F5 para la elíptica)

Las Figuras 4.4, 4.5 y 4.6 muestras la sonificación realizada para la región donde se encuentrasn las líneas de H_β y $[O_{III}]$. De la sonificación se permite lograr una mejor diferencia entre las galaxias espirales e irregulares que únicamente con la línea de H_α, ya que como se ve en las Figuras, las líneas presentadas en esta región tienen una mayor intensidad en las galaxias irregulares que en las espirales, superando en las irregulares la intensidad de la línea de H_α. Adicionalmente, se observa como para las galaxias elípticas esta región se muestra como abosrción sonficada como notas que bajan.

La sonificación correspondiente a esta región se encuentra disponible en los siguientes enlaces:

- Sonificación de la región cercana a la línea espectral de H_β y $[O_{III}]$ para la galaxia NGC 2276
- Sonificación de la región cercana a la línea espectral de H_β y $[O_{III}]$ para la galaxia NGC 3379
- Sonificación de la región cercana a la línea espectral de H_β y $[O_{III}]$ para la galaxia NGC 1569

.

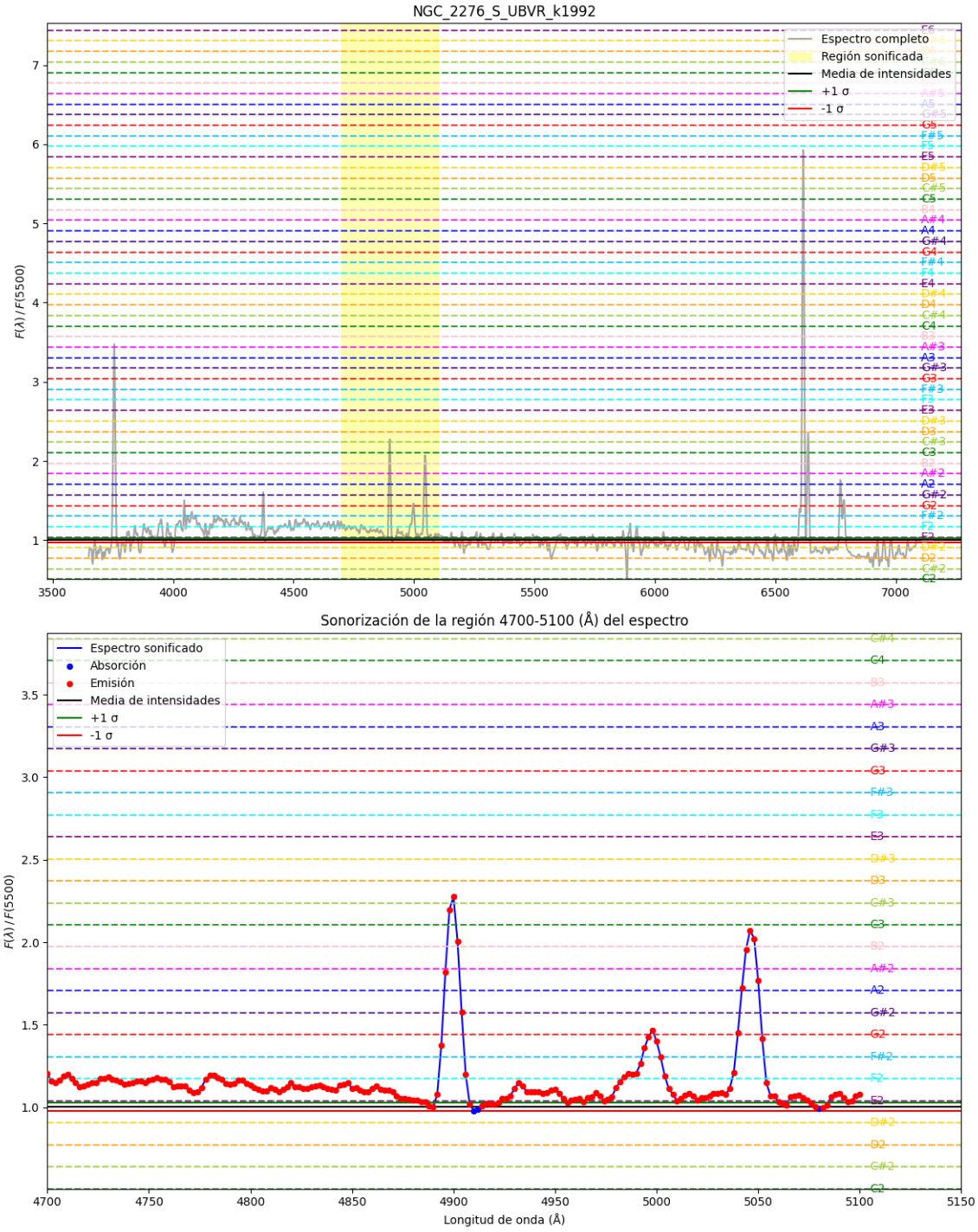

Figura 4.4

Sonificación de la región H_β y $[O_{III}]$ en la galaxia NGC 2276. Arriba: espectro completo con la región resaltada y el mapa de notas. Abajo: ampliación de la región sonificada, con notas cromáticas.

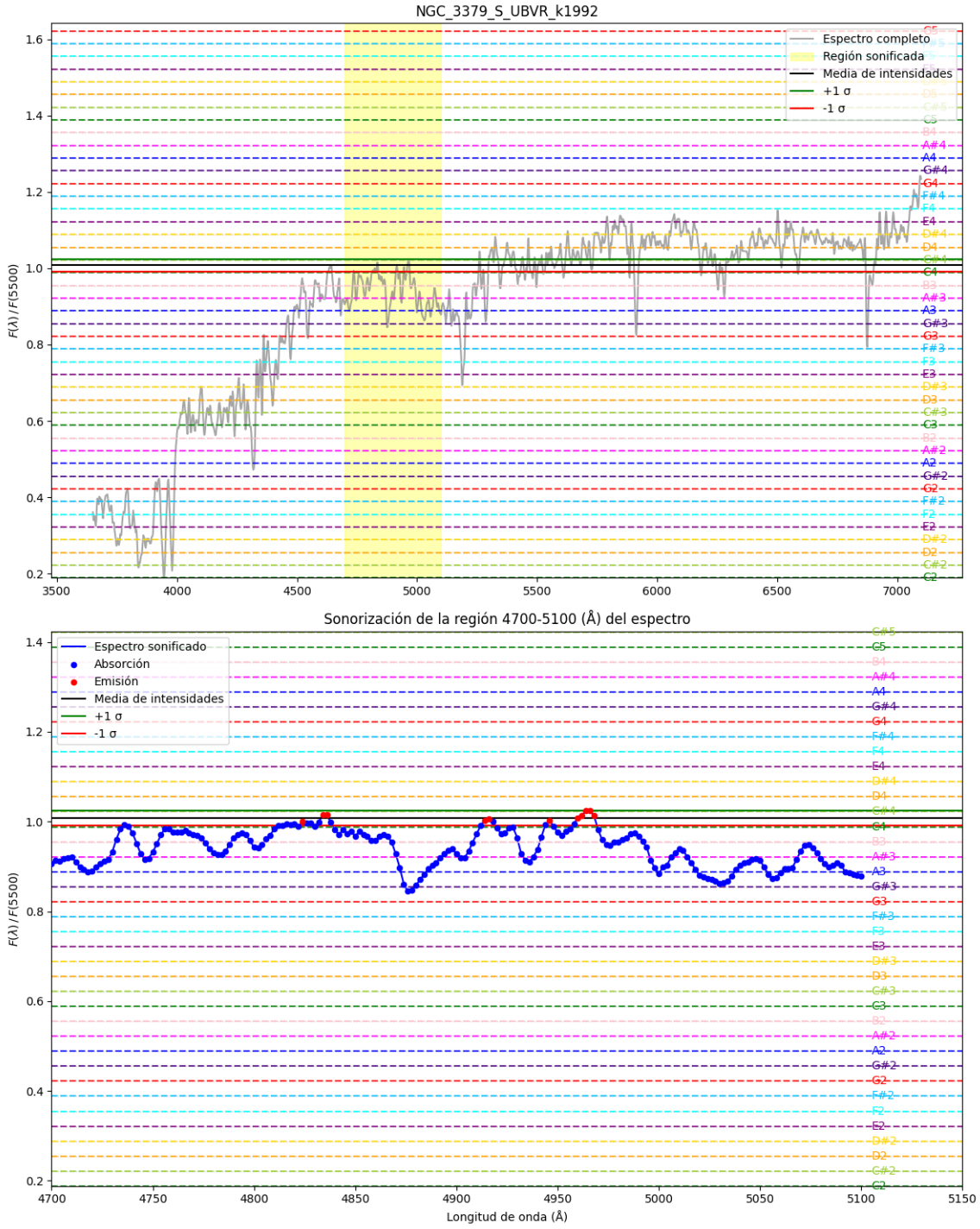

Figura 4.5

Sonificación de la región H_β y $[O_{III}]$ en la galaxia NGC 3379. Arriba: espectro completo con la región resaltada y el mapa de notas. Abajo: ampliación de la región sonificada, con notas cromáticas.

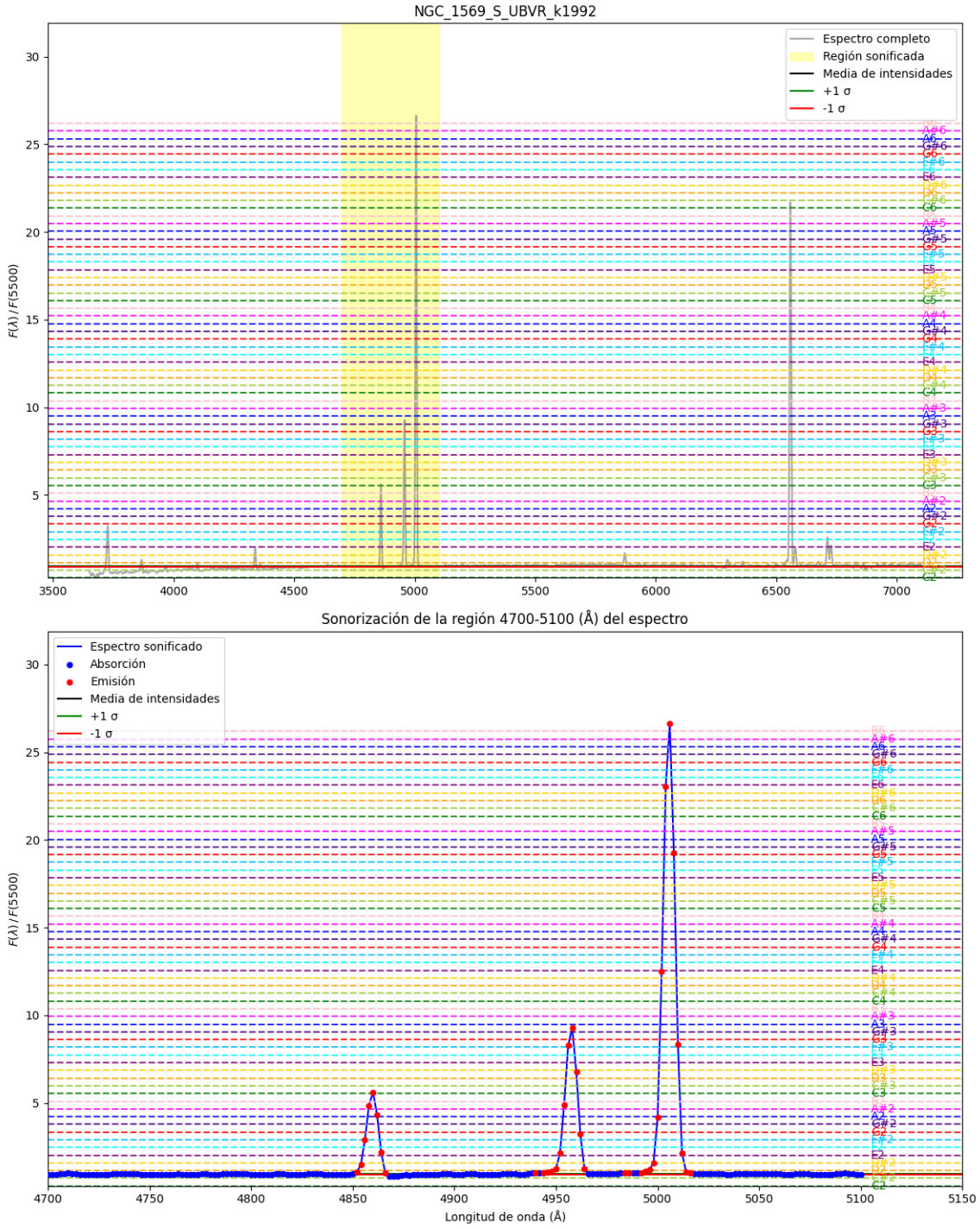

Figura 4.6

Sonificación de la región H_β y $[O_{III}]$ en la galaxia NGC 1569. Arriba: espectro completo con la región resaltada y el mapa de notas. Abajo: ampliación de la región sonificada, con notas cromáticas.

Del mismo modo, en las Figuras 4.7, 4.8 y 4.9 se muestra la sonificación de la región correspondiente al quiebre en la banda G, que ocurre alrededor de los 4000, Å. Este quiebre señala una disminución en la intensidad de los colores azules, relacionada con la escasez de estrellas jóvenes y calientes, y es característico de galaxias con poblaciones estelares más viejas, como las elípticas.

En la sonificación de esta región, dicha pérdida de componentes azules se traduce en un cambio en la altura tonal de las notas musicales. Específicamente, se percibe una transición desde notas en octavas bajas antes del quiebre, hacia notas más altas después de los 4000Å. En la galaxia NGC 3379 esta transición es notable, reflejando una caída pronunciada en la emisión de luz azul. En cambio, en las galaxia NGC 6643 y NGC 1569 esta diferencia es mucho menos pronunciada, lo que sugiere una menor pérdida de azul, coherente con la presencia de una población estelar más joven.

La sonificación correspondiente a esta región se encuentra disponible en los siguientes enlaces:

- Sonificación de la región cercana al quiebre de la Banda G para la galaxia NGC 2276
- Sonificación de la región cercana al quiebre de la Banda G para la galaxia NGC 3379
- Sonificación de la región cercana al quiebre de la Banda G para la galaxia NGC 1569

.

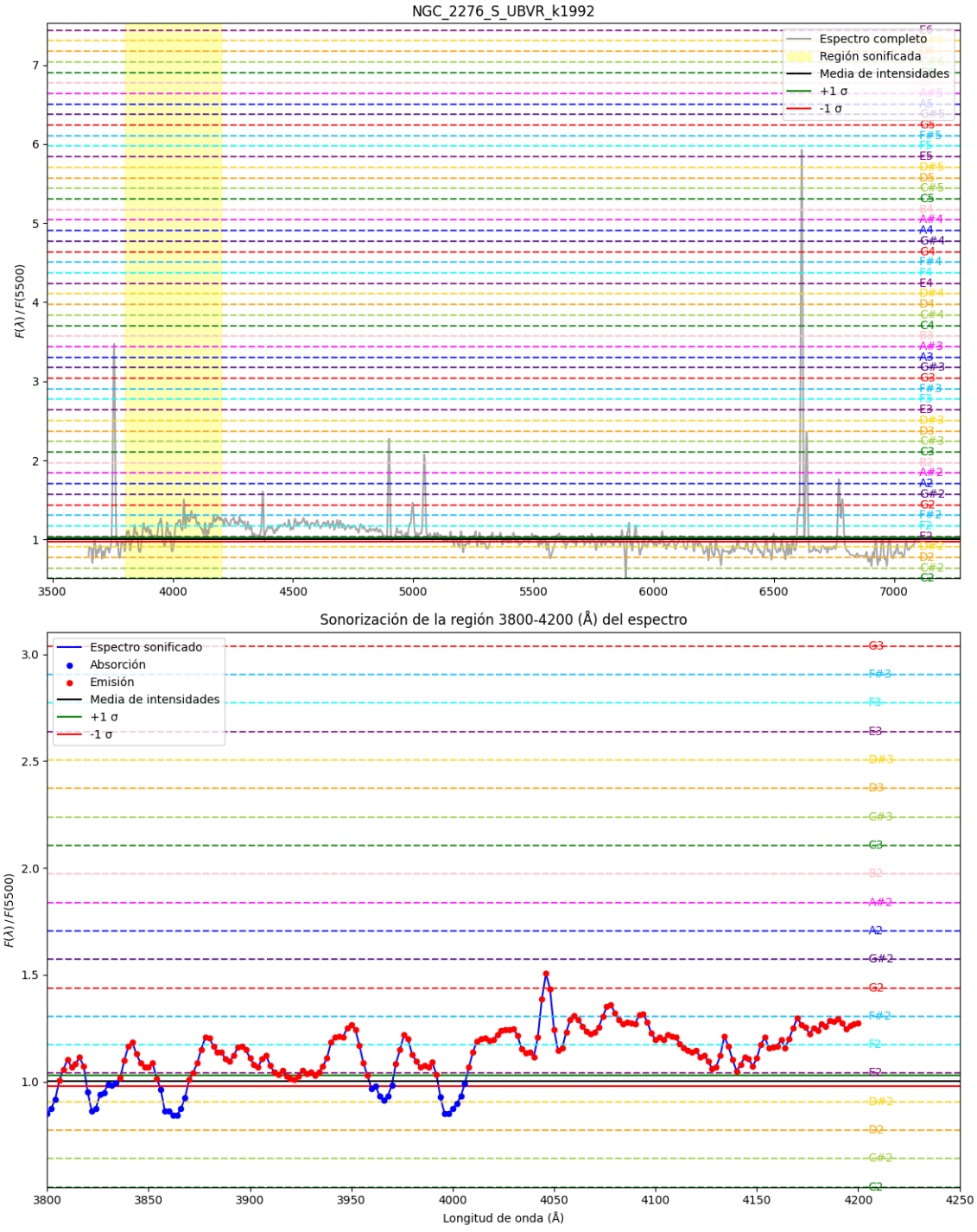

Figura 4.7

Sonificación de la región cercana al quiebre de la Banda G en la galaxia NGC 2276. Arriba: espectro completo con la región resaltada. Abajo: ampliación de la región sonificada.

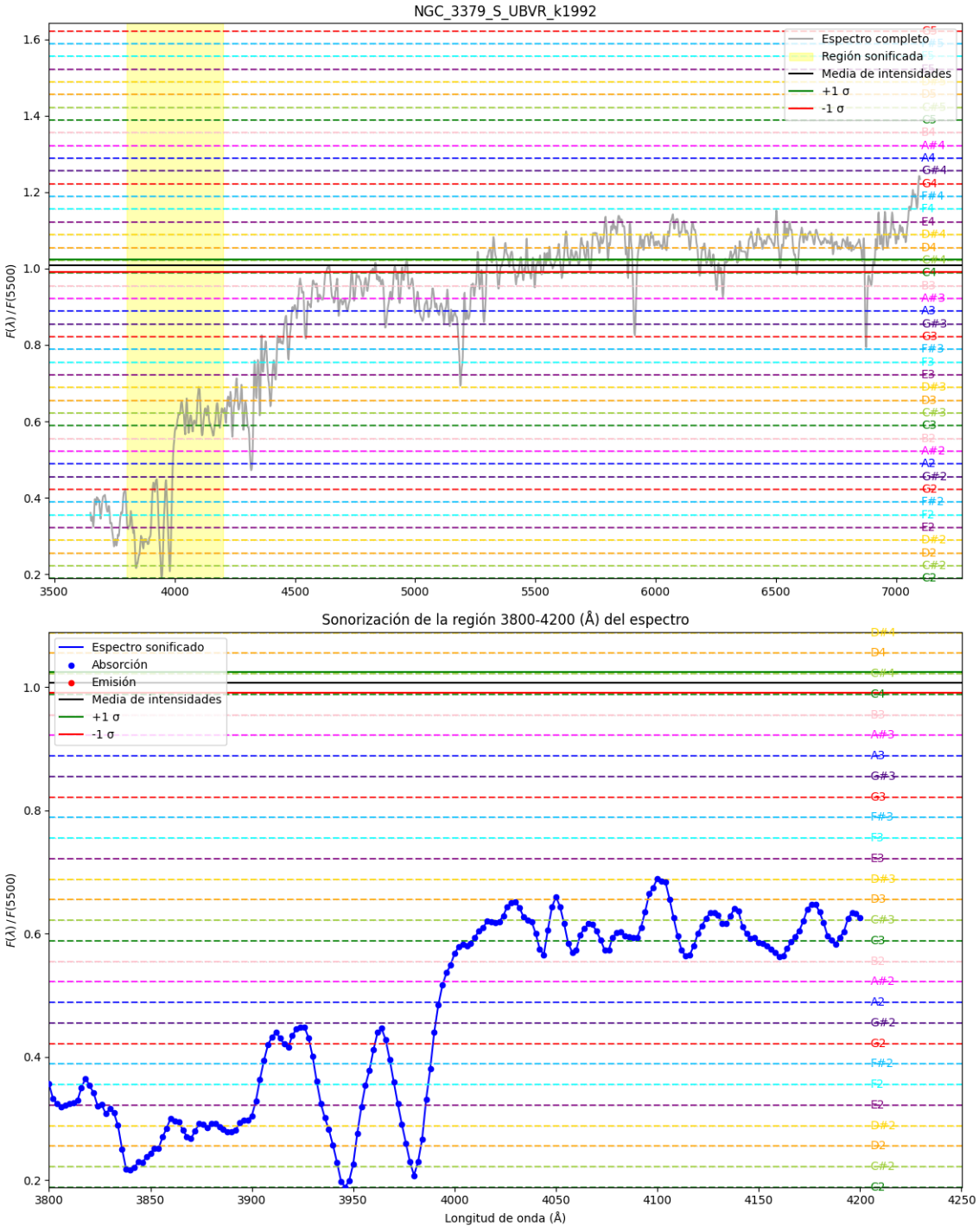

Figura 4.8

Sonificación de la región cercana al quiebre de la Banda G en la galaxia NGC 3379. Arriba: espectro completo con la región resaltada. Abajo: ampliación de la región sonificada.

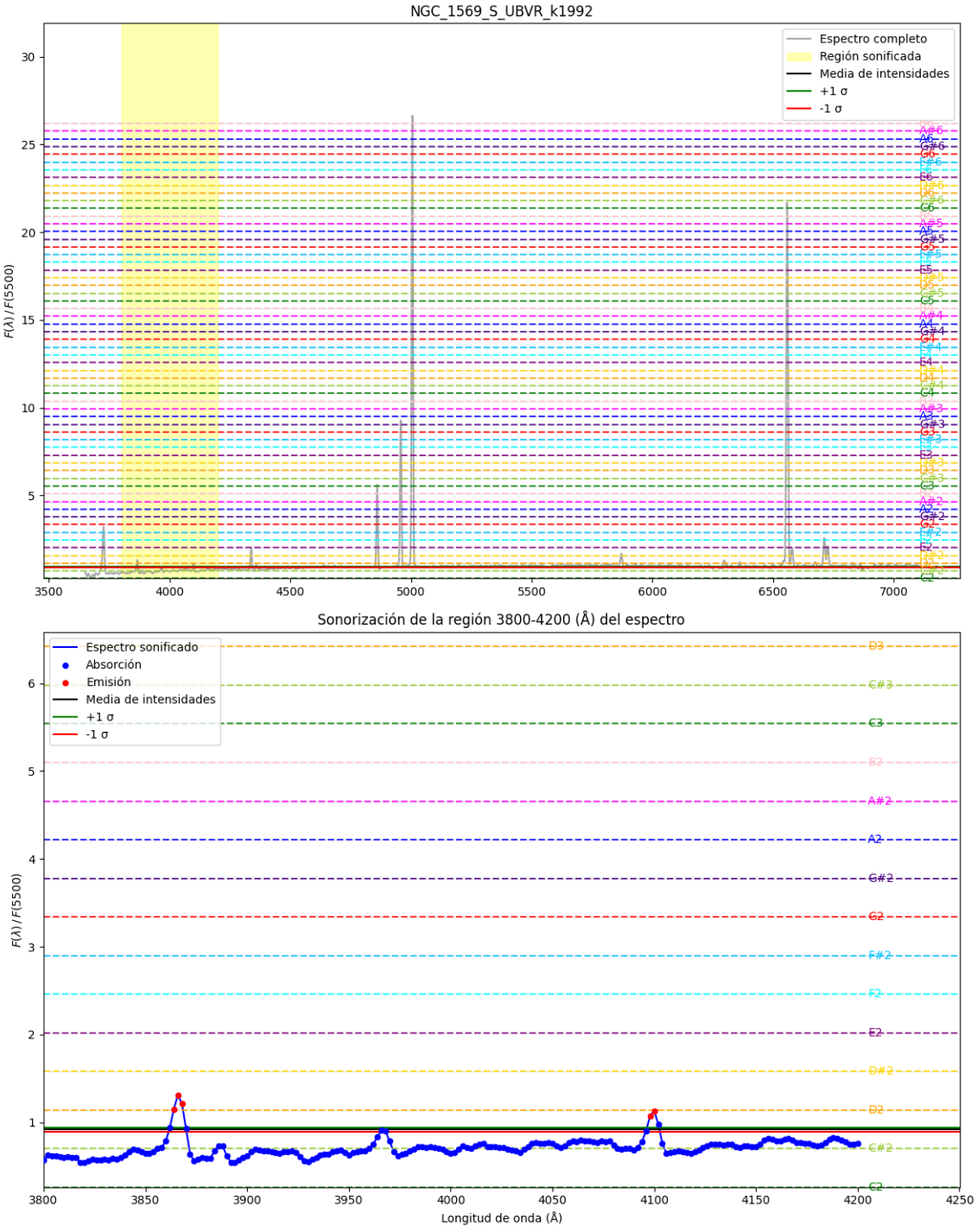

Figura 4.9

Sonificación de la región cercana al quiebre de la Banda G en la galaxia NGC 1569. Arriba: espectro completo con la región resaltada. Abajo: ampliación de la región sonificada.

4.1.1 Subtipos de galaxias espirales

Cómo se mencionó en las secciones 2.1.2 y 2.1.4, existe una diferenciación morfológica y espectran entre los subtipos de galaxias espirales Sa, Sb y Sc. De la Figura 2.8 se observa cómo las galaxias tipo Sa comparten una gran similitud en el espectro de las galaxias tipo elípticas dificultando así su diferenciación mediante el sonido. Un caso de estos se muestra en las Figuras 4.10, 4.11 y 4.12 donde se muestran las regiones de H_α, $[O_{III}]$ y el quiebre de la banda G, respectivamente, para la galaxia tipo Sa - NGC 3623 del atlas espectral de Robert C. et al. (1992), mostrando incluso grandes similitudes con el espectro de una galaxia elíptica como NGC 3379.

La sonificación correspondiente a esta galaxia se encuentra disponible en los siguientes enlaces:

- Sonificación de la Banda G en la galaxia NGC 3623
- Sonificación de la H_β y $[O_{III}]$ en la galaxia NGC 3623
- Sonificación de la H_α en la galaxia NGC 3623

.

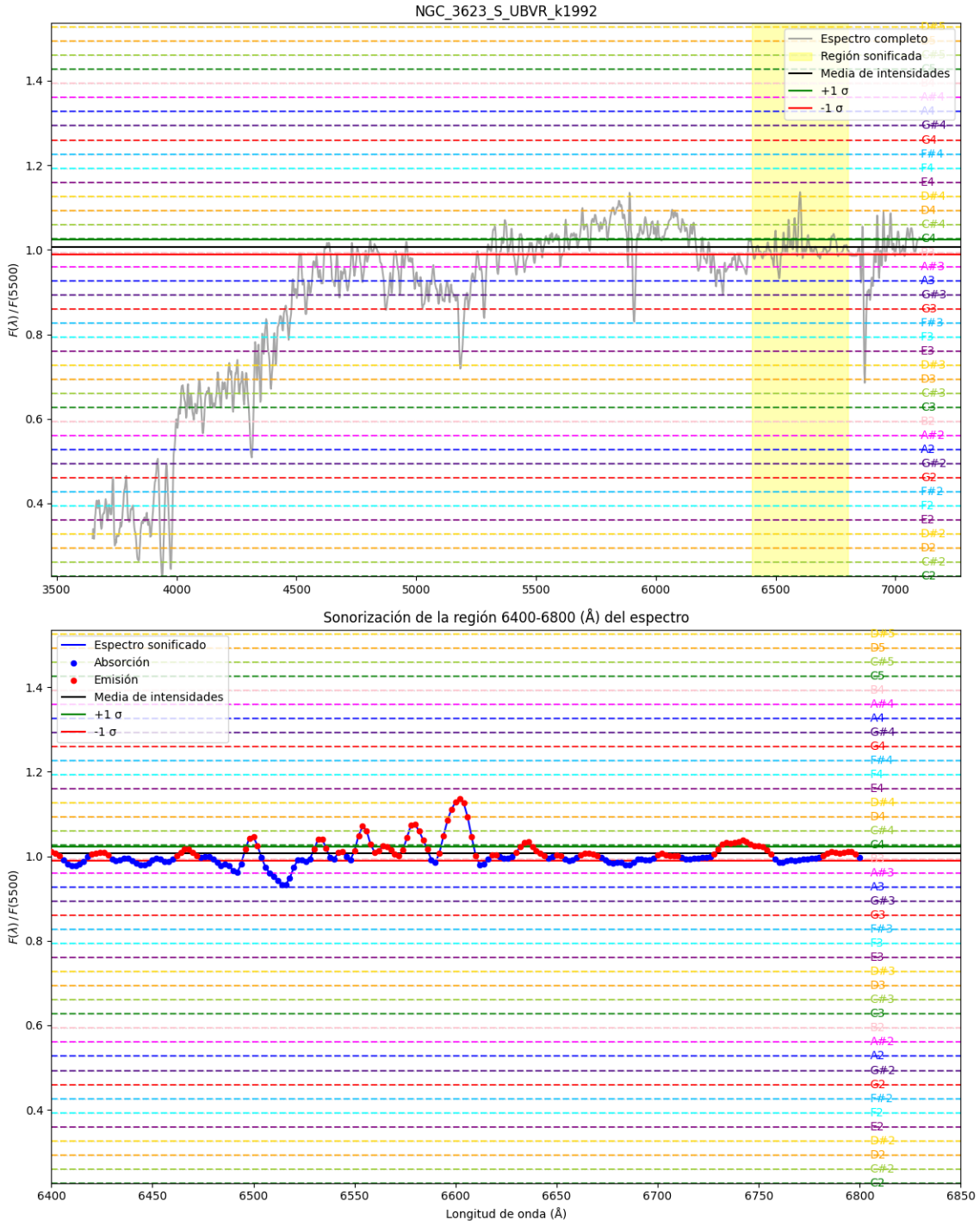

Figura 4.10

Sonificación de la región cercana a la línea H_α en la galaxia NGC 3623. Arriba: espectro completo con la región resaltada y el mapa de notas. Abajo: ampliación de la región sonificada.

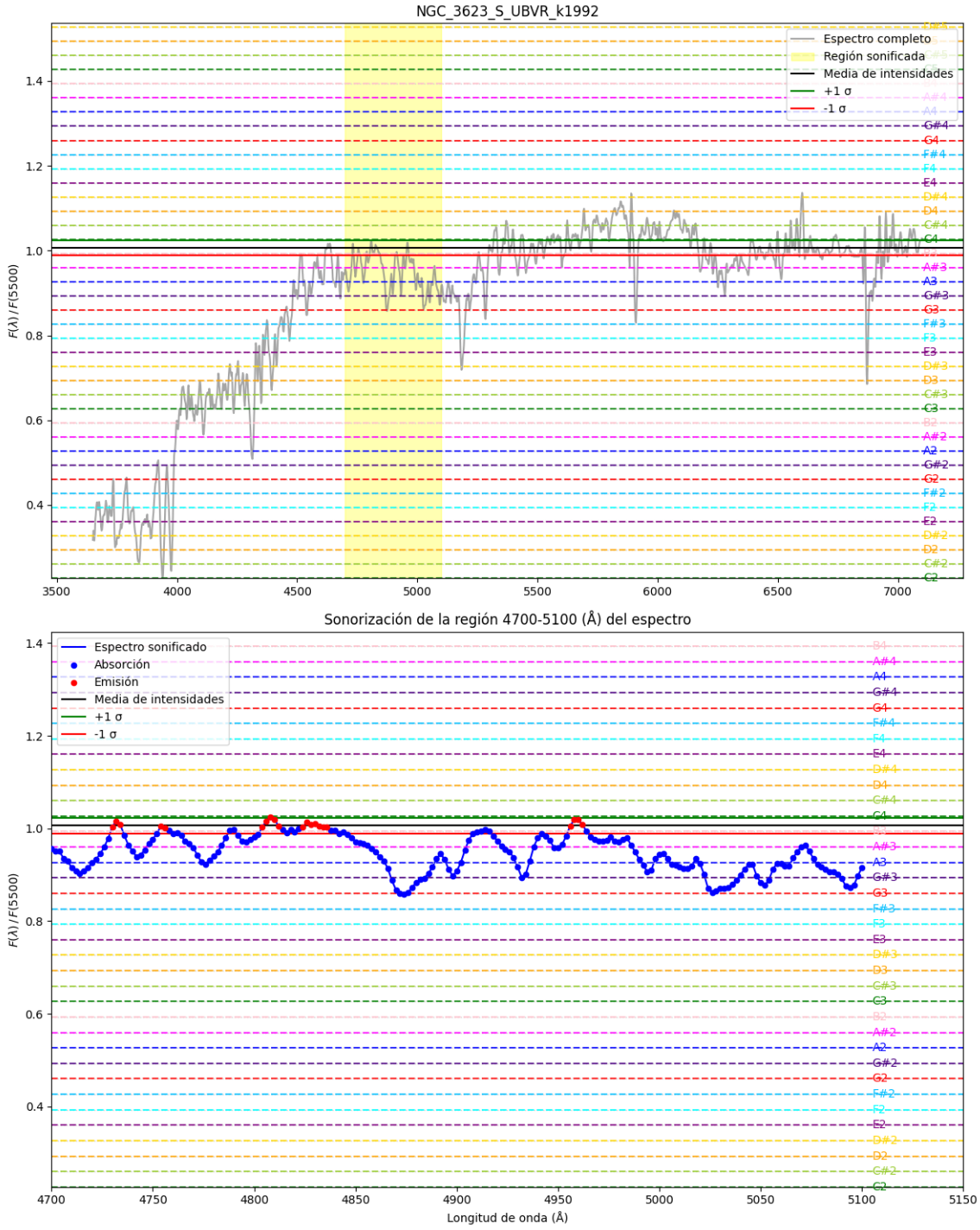

Figura 4.11

Sonificación de la región cercana a las líneas H_β y $[O_{III}]$ en la galaxia NGC 3623. Arriba: espectro completo con la región resaltada y el mapa de notas. Abajo: ampliación de la región sonificada.

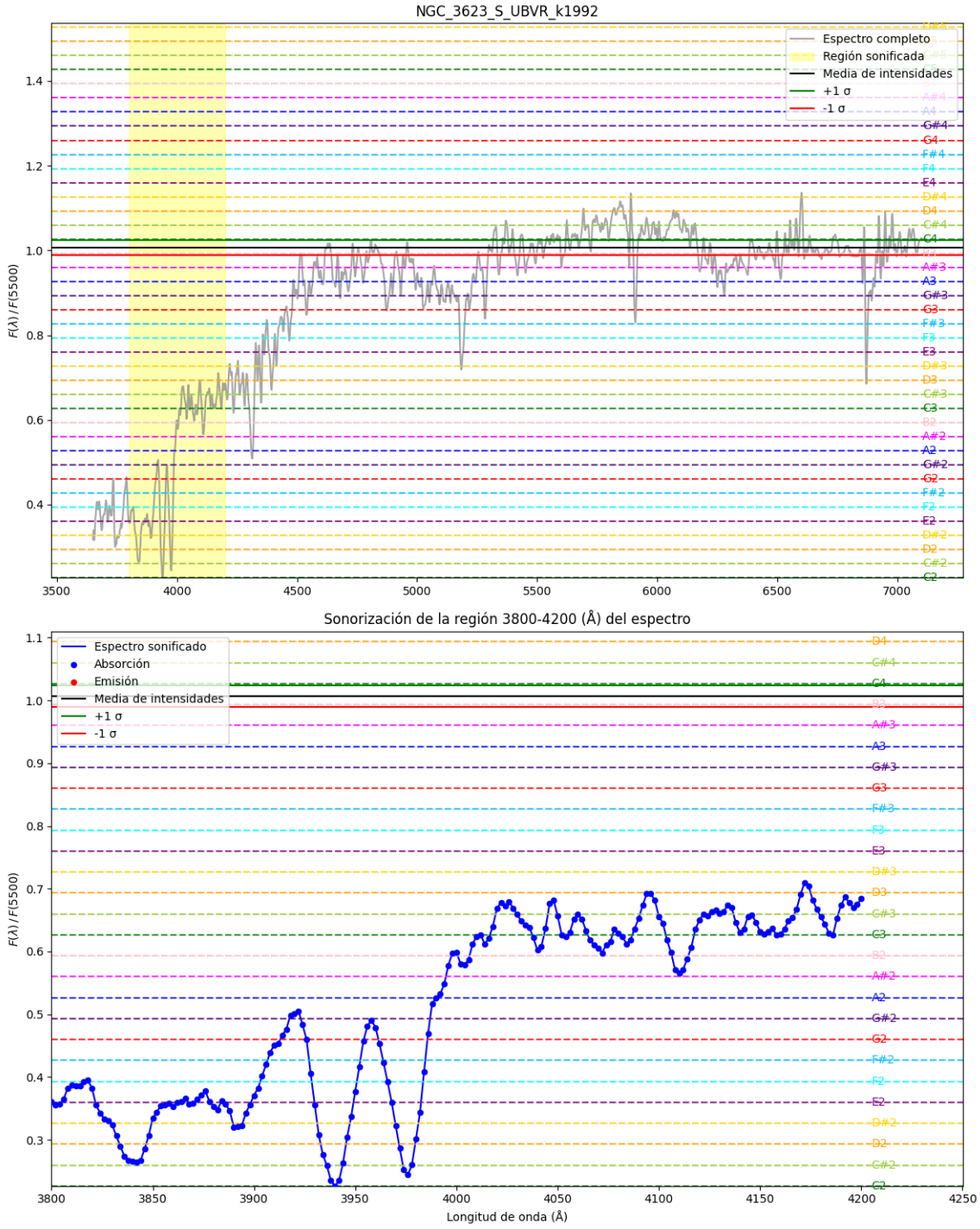

Figura 4.12

Sonificación de la región cercana al quiebre de la banda G en la galaxia NGC 3623. Arriba: espectro completo con la región resaltada y el mapa de notas. Abajo: ampliación de la región sonificada.

En el caso de las galaxias tipo Sb como lo es la galaxia NGC 3147 del atlas espectral de Robert C. et al. (1992), si se logra apreciar una mejor diferenciación con especto a una galaxia elíptica. Esto puede verse en las Figuras 4.13, 4.14 y 4.15 donde se observa la sonificación para las regiones de H_α, $[O_{III}]$ y el quiebre de la banda G, respectivamente. En estas Figuras se observa un quiebre en banda G más pronunciado que en las galaxias tipo Sc, sin embargo se evidencia la presencia de la línea de H_α, la cual podría indicar una tasa de formación estelar mayor que en la galaxia tipo Sa NGC 3623.

La sonificación correspondiente a esta galaxia se encuentra disponible en los siguientes enlaces:

- Sonificación de Banda G en la galaxia NGC 3147
- Sonificación de H_β y $[O_{III}]$ en la galaxia NGC 3147
- Sonificación de H_α en la galaxia NGC 3147

.

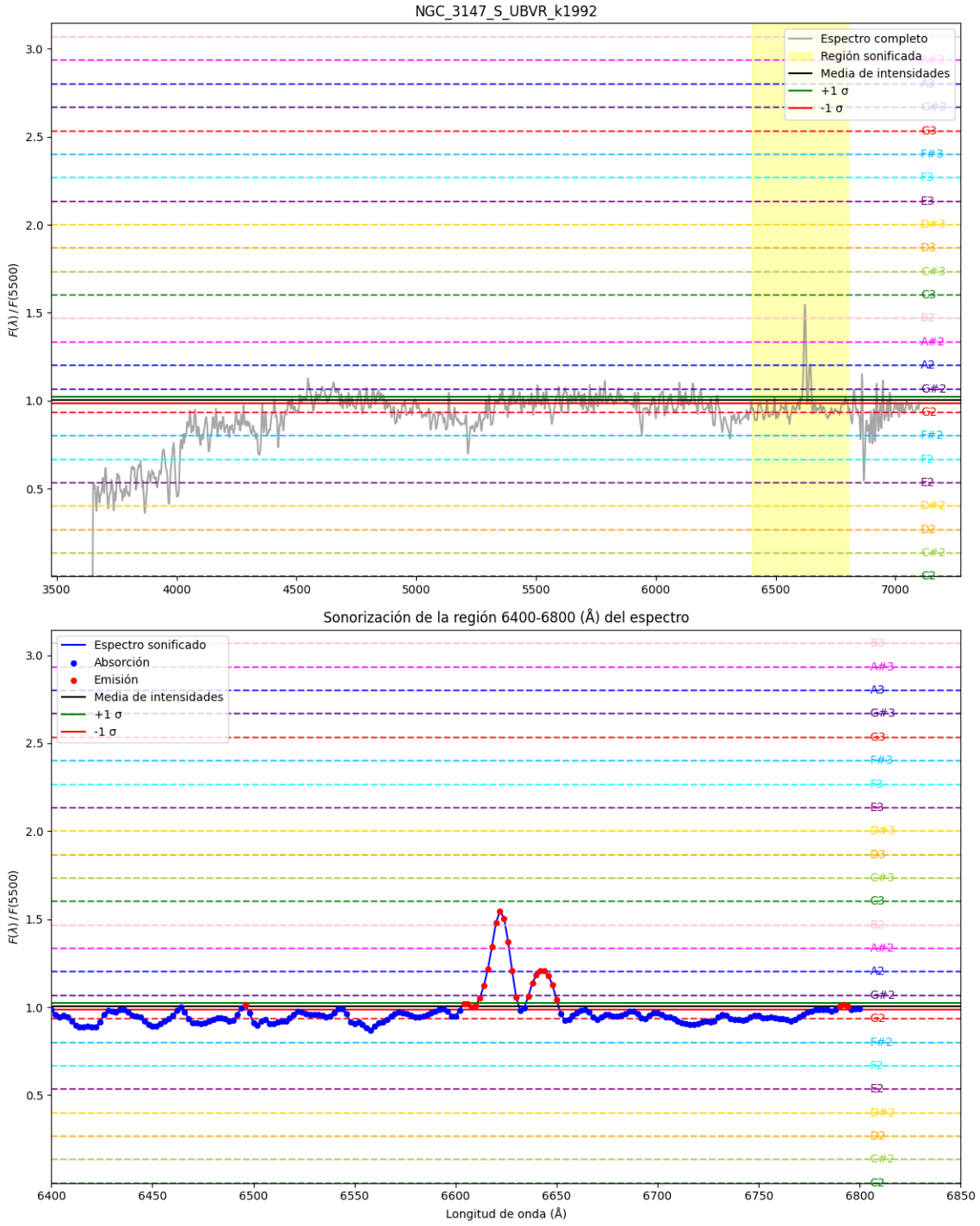

Figura 4.13

Sonificación de la región cercana a la línea H_α en la galaxia NGC 3147. Arriba: espectro completo con la región resaltada y el mapa de notas. Abajo: ampliación de la región sonificada.

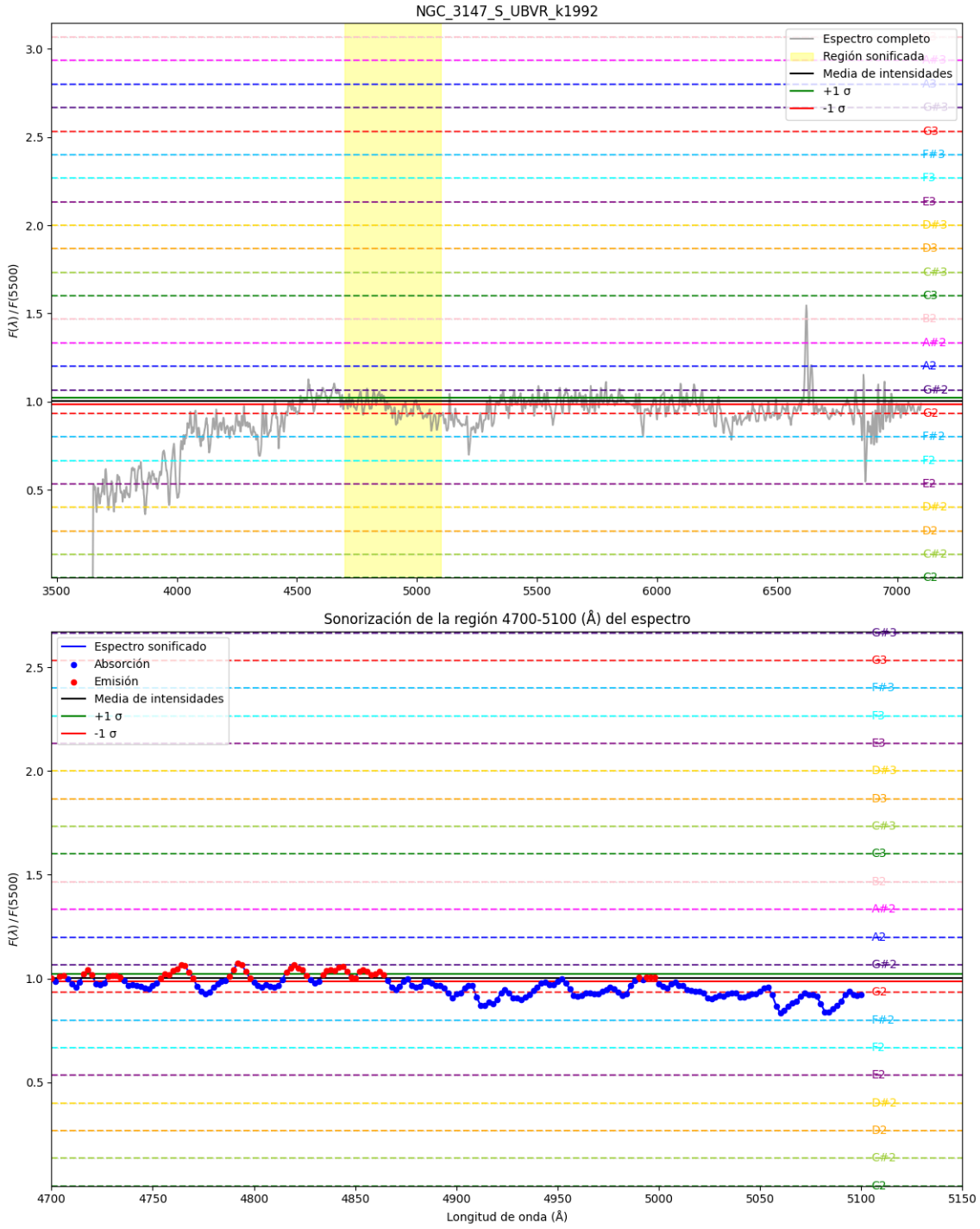

Figura 4.14

Sonificación de la región cercana a las líneas H_β y $[O_{III}]$ en la galaxia NGC 3147. Arriba: espectro completo con la región resaltada y el mapa de notas. Abajo: ampliación de la región sonificada.

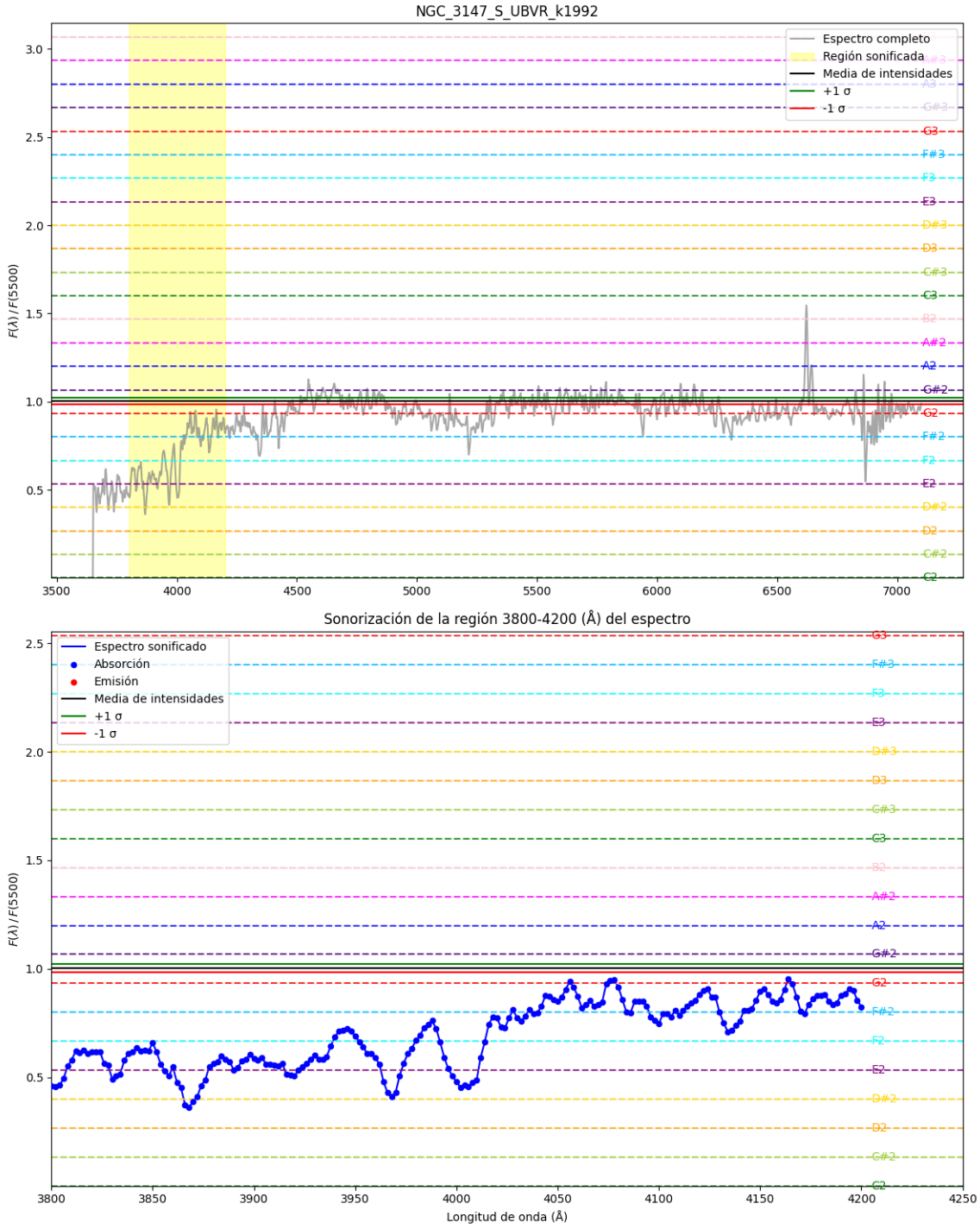

Figura 4.15

Sonificación de la región cercana al quiebre de la Banda G en la galaxia NGC 3147. Arriba: espectro completo con la región resaltada y el mapa de notas. Abajo: ampliación de la región sonificada.

Estos resultados evidencian que la sonificación permite explorar los espectros galácticos desde una perspectiva novedosa, resaltando tanto sus diferencias morfológicas como sus particularidades físicas. Con el fin de ampliar el alcance de esta metodología y ponerla a disposición de la comunidad académica y del público general, se desarrolló una aplicación web interactiva que integra los algoritmos descritos y facilita la experimentación directa con espectros reales.

4.2 Aplicación web - UAGalaxySon

A partir de los algoritmos de sonificación desarrollados, se implementó una aplicación web interactiva (Vélez, nd), utilizando las plataformas **GitHub**, **Streamlit** y **Render**. Esta herramienta permite realizar la sonificación de espectros galácticos, ya sea a partir de espectros predeterminados extraídos del atlas espectral de Robert C. et al. (1992), o mediante la carga de archivos de texto plano (`.txt`) que contengan datos espectrales personalizados.

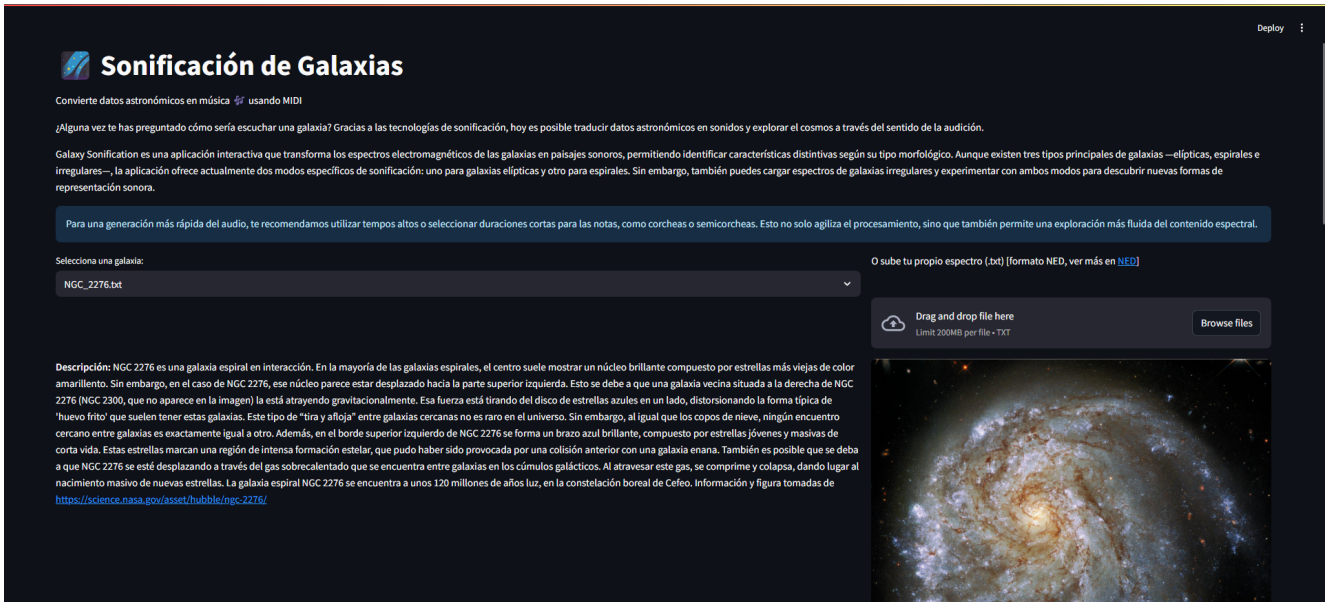

Figura 4.16
Primera sección de la aplicación realizada con base a la herramienta UAGalaxySon, selección de archivo a sonificar.

En la Figura 4.16 se puede observar la sección de bienvenida de la aplicación, en la cual se realiza la selección del espectro a sonificar, ya sea seleccionando de la lista de objetos predeterminados o subiendo un propio espectro en el formato de los espectros de NASA/IPAC

Extragalactic Database (nd) en un archivo de texto plano. La Figura 4.17 indica el formato aceptado de texto plano, el cual debe tener dos columnas, la primera columna debe contener la longitud de onda en Angstrom mientras que la segunda columna debe contaner la intensidad o flujo normalizados.

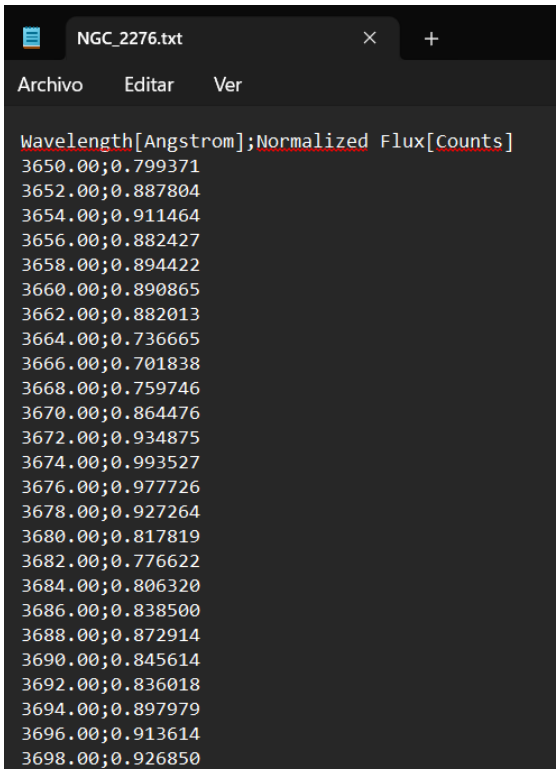

Figura 4.17
Formato de texto plano aceptado por la herramienta UAGalaxySon.

Con el objetivo de brindar flexibilidad al usuario, se incorporaron múltiples opciones de configuración (Figura 4.18). Al cargar un espectro, el usuario puede seleccionar manualmente diversos parámetros de la sonificación, tales como:

- Tipo de galaxia (Espiral, elíptica, irregular)
- Número de octavas (resolución tonal).
- Escala musical (cromática, pentatónica, etc.).
- Instrumento virtual (timbre).
- Tempo.

- Duración de las notas (Figura musical: Redonda, Blanca, etc.).
- Región específica del espectro a sonificar.

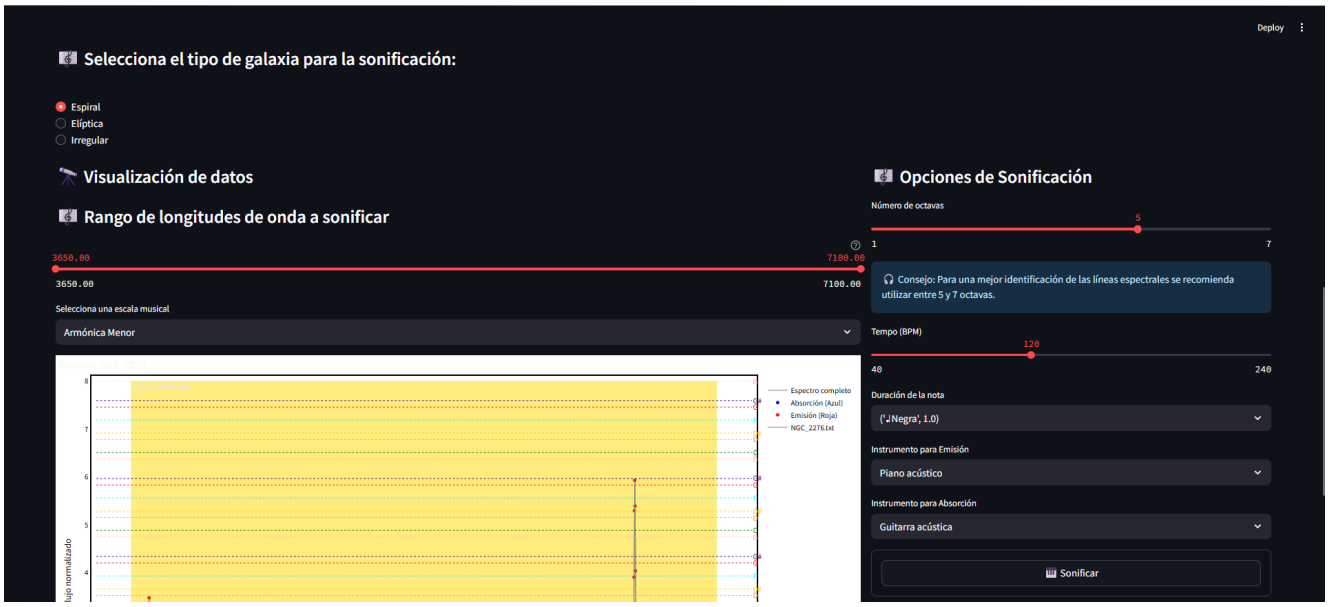

Figura 4.18
Segunda sección de la aplicación realizada con base a la herramienta UAGalaxySon, selección de parámetros para la sonificación

Una vez finalizado el proceso de sonificación, la aplicación ofrece varias opciones para la salida de audio(ver Figura 4.19). En esta aplicación es posible:

- Reproducir el resultado directamente en la web.
- Descargar el archivo en formato **MIDI** (útil para edición o uso con sintetizadores).
- Descargar el archivo en formato **WAV**, que permite escuchar el audio sin necesidad de procesamiento adicional.
- Exportar la sonificación completa o separar las componentes de **emisión** y **absorción** en archivos distintos, permitiendo un análisis sonoro más detallado.

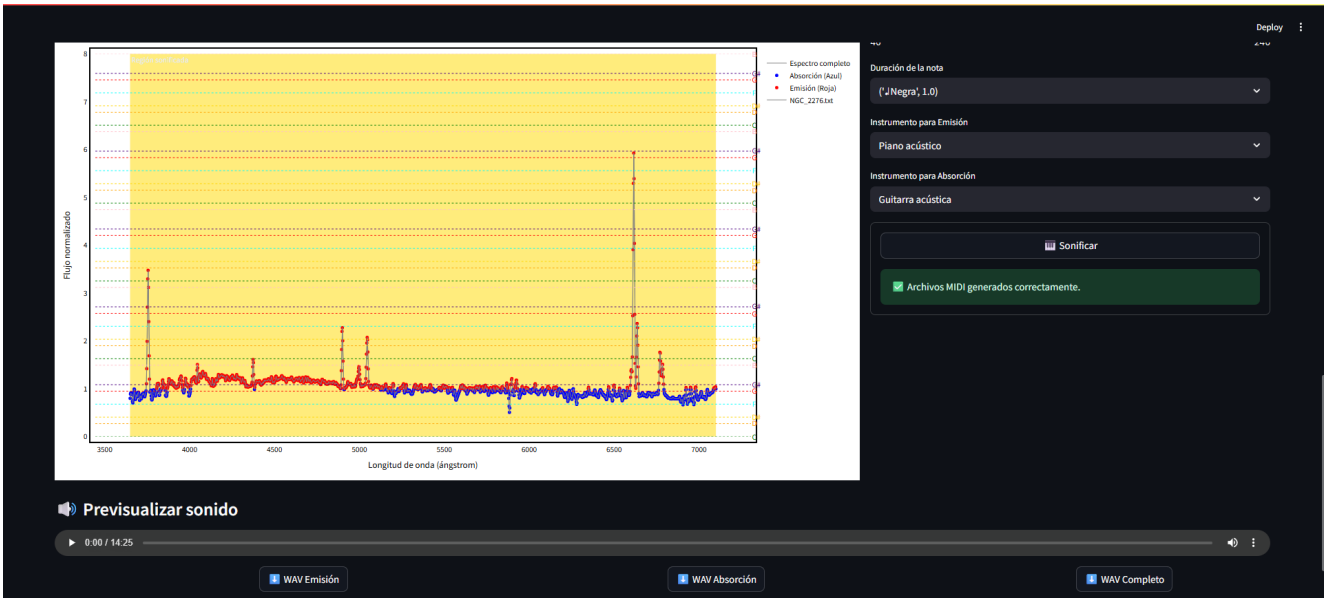

Figura 4.19
Tercera sección de la aplicación realizada con base a la herramienta UAGalaxySon, reproducción y descarga de la sonificación realizada.

4.3 Discusión

Las sonificaciones encontradas para la galaxia NGC 2276 permiten identificar sonoramente regiones de importancia para caracterizar las galaxias, como lo son la línea de H_α, H_β, y $[O_{III}]$ como líneas de emisión. Que la línea de H_α se encuentre presente en las galaxias tipo Sb y Sc y ausente en las galaxias elípticas permite diferenciar sonoramente estas galaxias, ya que en la sonificación realizada se logra identificar esta línea como notas más agudas que el sonido base del ruido. Adicionalmente, que esta línea logre llegar a notas más agudas en la galaxias tipo Sc que en las galaxias Sb podría ser un indicador que permita diferenciar un tipo de otro.

Adicionalmente, la presencia de las líneas de emisión H_β, y $[O_{III}]$ en las galaxias tipo Sc y su ausencia en las galaxias Sb podría ayudar a diferenciar más fácilmente una galaxia de otra. En la sonificación de la zona de H_β, y $[O_{III}]$ para la galaxia Sc NGC 2276 y para la galaxia tipo Sb H_β y $[O_{III}]$ NGC 3147 y 4.14) permite diferenciar claramente estas líneas, ya que mientras en la galaxia NGC 2276 (Figura 4.4) estas líneas alcanzan las notas $C\sharp 3$ y $C3$ mientras que en NGC 3147 esta región se encuentra entre las notas $G\sharp 2$ y $G2$, llegando incluso a estar por debajo se la zona de emisión y pasar a la zona de absorción bajando

incluso hasta la nota $F\sharp 2$.

El caso de las galaxias tipo Sa como es el caso extremo de la galaxia NGC 3623. De la Figura 4.10 y la Figura 3.2 se logra observar que incluso la sonificación encontrada se realizó con el mapeo de notas de las galaxias elípticas, esto debido a su gran similitud. Esto trae como implicación que el método utilizado en ciertas ocasiones, para galaxias espirales con menor contenido de gas para la formación estelar como lo son las galaxias tipo Sa sea más difícil lograr una diferenciación y por lo tanto se requiera a datos extra al espectro.

Según la metodología utilizada por Zaritsky et al. (1995) se realizó una extracción del continuo a cada galaxia con el objetivo de tener una mejor visualización de las líneas espectrales, este procedimiento podría ayudar a tener una mejor identificaciín de las líneas espectrales, lo que podría permitir una sonificación más precisa para cada línea. Sin embargo este proceso provoca que todo el espectro queda ubicado sobre una línea horizontal, lo que podría perjudicar la identificación del quiebre de la banda G.

Según el método utilizado para las galaxias irregulares mencionado en la sección 3.2.1, el mapeo de notas de las galaxias irregulares puede coincidir con las galaxias espirales como es el caso de la sonificación de la línea de H_alpha para galaxias NGC 2276 y NGC 1569 (Figuras 4.1 y 4.3) donde se evidencia que esta línea alcanza notas agudas cercanas que podrían causar confusión en la interpretación. Sin embargo, al observar la región H_β y $[O_{III}]$ en las Figuras 4.4 y 4.6 se puede observar como las línas de esta región en el caso de las galaxias irregulares pueden tener intensidades mayores que la línea de H_alpha, característica que se encuentra presente en las galaxias del atlas espectral de Robert C. et al. (1992).

En la sonificación de la región identificada para ambas galaxias (NGC 2276, NGC 1569), se observa que la reproducción sonora inicia con las notas asociadas al ruido de fondo. En el caso de la galaxia espiral, la primera variación asciende hasta un $C\sharp 3$, desciende nuevamente a la nota base de ruido, asciende a $G2$, vuelve a descender, y finalmente presenta un último ascenso hasta $C3$ antes de retornar al nivel de ruido. En la galaxia irregular, el primer pico alcanza un $C3$, seguido de un descenso a la nota de ruido, luego un ascenso hasta $G\sharp 3$, un nuevo descenso, y un ascenso final que alcanza $B6$, correspondiente a la última nota del rango utilizado.

Estas sucesivas subidas y bajadas, intercaladas con la reproducción del ruido, permiten identificar la presencia de distintas líneas espectrales, las cuales, como se señaló en la sección 2.1.4, aportan información relevante para la caracterización del tipo morfológico de la galaxia.

Por otro lado, el uso de técnicas de preprocesamiento como la extracción del continuo Zaritsky et al. (1995) puede mejorar la identificación de líneas espectrales, y con ello la precisión de la sonificación. Sin embargo, este procedimiento aplana el espectro alrededor de una línea horizontal, lo que dificulta reconocer discontinuidades como el quiebre de la banda G.

A partir de todo lo realizado se puede inferir que la sonificación constituye una herramienta complementaria que permite identificar auditivamente características espectrales clave. Si bien en algunos casos extremos (p.ej. Sa vs elípticas, o Sc vs irregulares) la diferenciación requiere datos adicionales, la metodología propuesta muestra un potencial considerable tanto para la caracterización espectral como para la divulgación científica inclusiva.

Los resultados obtenidos correspondientes a las demás galaxias del atlas espectral de Robert C. et al. (1992) se almacenaron en carpetas de Google Drive, las cuales se encuentran en los siguientes enlaces:

- Imágenes obtenidas: Se encuentran las imágenes obtenidas en el proceso de sonificación organizadas por carpetas con el nombre de cada galaxia.
- Archivos en formato MIDI generados: Se encuentran los archivos en formato MIDI en el proceso de sonificación organizadas por carpetas con el nombre de cada galaxia. Cada carpeta contiene los MIDI generados en las regiones mencionadas, así como MIDI con el espectro completo. Todas las regiones se encuentran separadas por emisión y absorción.

Capítulo 5

Conclusiones

Este trabajo demuestra que la sonificación, implementada mediante *Parameter Mapping Sonification* (PMSon), es una herramienta útil para la caracterización espectral y morfológica de galaxias. La metodología desarrollada incluye (1) el tratamiento del ruido como nota base controlada, (2) la detección de regiones planas por regresión lineal para estimar media y desviación estándar, (3) el mapeo de intensidades a registros (octavas) y (4) la diferenciación instrumental. Esto permitió resaltar auditivamente rasgos espectrales de interés en galaxias representativas del atlas de Robert C. et al. (1992).

Al realizar este trabajo se puede destacar lo siguiente:

- Las líneas de emisión asociadas a procesos de formación estelar, como H_α, así como otras líneas clave para la determinación del tipo de galaxia, como H_β y $[O_{III}]$.
- En galaxias espirales tardías como NGC 2276 (galaxias tipo Sc), las líneas de emisión H_α, H_β y [O III] se manifiestan como notas de octavas altas, coherentes con tasas elevadas de formación estelar. En la región H_β+[O III] se alcanzan registros (p. ej., $C\sharp 3/C3$) superiores a los de espirales tempranas (galaxias tipo Sa, Sb). Esta diferencia en octavas permite identificar el tipo mofológico de las galaxias.
- la representación sonora de la información espectral posibilitó distinguir diferencias de luminosidad, donde frecuencias agudas corresponden a regiones de alta emisión y frecuencias graves a regiones de baja emisión, como en el caso del quiebre de la banda G.
- Los resultados obtenidos para las galaxias del atlas espectral de Robert C. et al. (1992) evidencian que la sonificación no solo es una herramienta alternativa para el análisis científico, sino que también constituye una metodología inclusiva con potencial para acercar la astronomía a personas con discapacidades visuales. Este enfoque ofrece una vía innovadora para complementar el análisis tradicional de espectros, aportando una dimensión perceptual distinta que puede facilitar la identificación de patrones y características sutiles.

- Sin embargo, los hallazgos también ponen de manifiesto que la metodología empleada en esta tesis, por sí sola, no es suficiente para clasificar con precisión todos los tipos morfológicos de galaxias, como ocurre con las galaxias tipo Sa. Esto subraya la necesidad de combinar la sonificación con otros métodos de análisis —tanto visuales como computacionales— para lograr una caracterización más completa y robusta.

- En este sentido, futuras investigaciones podrían optimizar los mapeos de frecuencias, incorporar mayor diversidad de parámetros espectrales y explorar la integración con técnicas de aprendizaje automático, con el fin de potenciar la capacidad de clasificación y el valor didáctico de la sonificación.

Capítulo 6

Recomendaciones

Para realizar una mejor identificación de las líneas espectrales en los espectros galácticos con el proceso de sonificación, una posible solución a los inconvenintes presentados con la diferenciación entre galaxias tipo Sa y galaxias elípticas podría ser realizar procesos de eliminación del continuo de los espectros para que de esta forma se tenga más claridad en las líneas de emisión y absorción.

Adicionallmente, otro enfoque que podría facilitar la identificación de las líneas y su caracterización de formas más robustas por medio de la sonificación es realizar el mapeo de notas no dependiente de la intensidad, sino otorgar notas específicas a las líneas espectrales más características, por ejemplo las líneas espectrales utilizadas por Zaritsky et al. (1995) ([O_{II},], H_β, [O_{III}], H_α, [Ca_{II}], [K] [H])y otorgar una nota de base al ruido para que al reproducir el la sonificación de todo el espectro sea posible identificar estas líneas.

Este procedimiento podría implementarse utilizando las siete notas de una escala musical, asignando cada una de ellas, en orden, a las líneas espectrales según su posición en longitud de onda dentro del espectro y utilizando una octava de la nota base como ruido. Asimismo, la duración de cada nota podría definirse en función de la profundidad de la línea correspondiente, lo que permitiría transmitir no solo la presencia de la línea, sino también información sobre su intensidad relativa.

Bibliografía

Arcand, K. and M. Russo. A universe of sound. https://chandra.harvard.edu/sound/. Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics.

Benward, B. and M. Saker (2007). Music in theory and practice, volume 1. (pp. 407).

Binney, J. and S. Tremaine (2008). *Galactic dynamics*. Princeton University Press.

Carroll, B. W. (2014). *An introduction to modern astrophysics*. Pearson.

Casado, J., B. García, P. Gandhi, and W. Díaz-Merced (2023, 1). A new approach to sonification of astrophysical data: The user centred design of sonouno. *American Journal of Astronomy and Astrophysics, vol. 9, issue 4, p. 42 9, 42.*

Diaz-Merced, W. L., R. M. Candey, N. Brickhouse, M. Schneps, J. C. Mannone, S. Brewster, K. Kolenberg, W. L. Diaz-Merced, R. M. Candey, N. Brickhouse, M. Schneps, J. C. Mannone, S. Brewster, and K. Kolenberg (2012). Sonification of astronomical data. IAUS 285, 133–136.

Edward Aldwell, C. S. (2003). *Workbook: Harmony and Voice Leading, for Aldwell/Schachter's Harmony and Voice Leading Volume 1* (3ed. ed.). Thompson Schirmer.

Esarey, J. and A. R. Wood (2018, 10). Blogs, online seminars, and social media as tools of scholarship in political science. *PS: Political Science & Politics 51, 811–819.*

Explora, P. (2024). Participación comunitaria — portafolio parque explora. https://portafolio.parqueexplora.org/proyectos/participacion-comunitaria.

Harrison, C., J. Trayford, L. Harrison, and N. Bonne (2022, 4). Audio universe: Tour of the solar system. Astronomy and Geophysics 63, 238–240.

Hermann, T., A. Hunt, J. G. Neuhoff, F. Grond, and J. Berger (2011). *The Sonification Handbook*, Volumen 15. Logos Publishing House.

Hernando, M. C. (2006). Objetivos y funciones de la divulgación científica. *Manual formativo de ACTA, ISSN 1888-6051, Nº. 40, 2006, págs. 99-106*, 99–106.

Huber, D. M. (2019). The midi manual : a practical guide to midi in the project studio. (pp. 362).

IAU (2023, 4). Definition of the flexible image transport system (fits). http://fits.gsfc.nasa.gov/iaufwg/.

Llanos, S. F., C. Cruz, I. Dahiana, G. Gómez, V. Cristina, M. Gutiérrez, T. Valentina, R. Cruz, and L. Carime (2024, 4). Educación inclusiva desde la discapacidad visual: Estrategias orientadoras para el profesorado en formación de la primera infancia. *Revista Boletín Redipe 13, 76–99.*

López, H. A. (2007). Física de las ondas. *Editorial Universidad de Antioquia.*

Mo, H., F. C. van den Bosch, and S. White (2010, 5). Galaxy Formation and Evolution. *Cambridge University Press.*

NASA (2008, 11). Starburst galaxy ngc 1569 - nasa science. https://science.nasa.gov/asset/hubble/starburst-galaxy-ngc-1569/.

NASA, ESA, STScI, and C. Sarazin (n.d.). Messier 105 - nasa science. https://science.nasa.gov/mission/hubble/science/explore-the-night-sky/hubble-messier-catalog/messier-105/.

NASA, ESA, STScI, and P. Sell (n.d.). Ngc 2276 - nasa science. https://science.nasa.gov/asset/hubble/ngc-2276/.

NASA, ESA, STScI, and AURA (n.d.). Hubble photographs grand design spiral galaxy m81 - nasa science. https://science.nasa.gov/asset/hubble/hubble-photographs-grand-design-spiral-galaxy-m81/.

NASA/IPAC Extragalactic Database (n.d.). Nasa/ipac extragalactic database (ned). https://ned.ipac.caltech.edu/. Base de datos extragaláctica.

NASA/JPL-Caltech, ESA, and E. medialab (n.d.). Esa - anatomy of the milky way. https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2016/09/Anatomy_of_the_Milky_Way.

Organization, W. H. (2019). World report on vision. World health Organisation 214, 180.

Osterbrock, D. E. and G. J. Ferland (2006). *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei.*

Perdomo, D. B., I. Toulouse, and L. Perú (2024). José-carlos cortÁzar science dissemination on youtube in spanish-speaking countries: Youtubers vs. institutional channels.

Piano, A. (n.d.). Notas en el piano - guia definitiva fácil explicación. https://aprendepiano.com/principiante/como-identificar-las-notas-en-el-piano/.

Piston, W. (1987, 3). Harmony: Fifth edition. (pp. 592).

Robert C., J. K., Kennicutt, R. C., and Jr. (1992, 4). A spectrophotometric atlas of galaxies. *ApJS 79, 255.*

Santaguida, A. and M. Russo. System sounds. Toronto-based science-art outreach project.

Sepúlveda, A. (2013). Bases de Astrofísica*. Universidad de Antioquia.*

Thuan, T. X., C. Balkowski, J. T. T. Van, T. X. Thuan, C. Balkowski, and J. T. T. Van (1992). Physics of nearby galaxies: Nature or nurture?

Vélez, A. (n.d.). Sonificación galáctica. https://galaxysonification.onrender.com/.

Yolaisy, L., S. Fundora, L. Yudit, and R. García (2011). La divulgación científica: una herramienta eficaz en centros de investigación. Bibliotecas. Anales de Investigación, ISSN-e 1683-8947, ISSN 0006-176X, Nº. 7, 2011, págs. 91-94 7, 91–94.

Zaritsky, D., A. I. Zabludoff, and J. A. Willick (1995, 7). Spectral classification of galaxies along the hubble sequence. *AJ 110, 1602.*