



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

Análisis espectroscópico de asteroides cercanos a la Tierra
(NEAs)

Tesis presentada al

Colegio de Física

como requisito parcial para la obtención del grado de

LICENCIADO EN FÍSICA

por

Maximiliano Villatoro López

Asesorado por

Dr. José Ramón Valdés Parra
Dr. Javier Miguel Hernández López

Puebla Pue.
13 de febrero de 2026



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

Análisis espectroscópico de asteroides cercanos a la Tierra
(NEAs)

Tesis presentada al

Colegio de Física

como requisito parcial para la obtención del grado de

LICENCIADO EN FÍSICA

por

Maximiliano Villatoro López

Asesorado por

Dr. José Ramón Valdés Parra
Dr. Javier Miguel Hernández López

Puebla Pue.
13 de febrero de 2026

Título: Análisis espectroscópico de asteroides cercanos a la Tierra (NEAs)

Estudiante: MAXIMILIANO VILLATORO LÓPEZ

COMITÉ

Dra. Rosibel Carrada Legaria
Presidente

Dr. Raúl Mújica Garcia
Secretario

Dra. Ana Aurelia Avilez López
Vocal

Mtro. Luis Enrique Buendía Verdiguél
Vocal

Dr. José Ramón Valdés Parra
Dr. Javier Miguel Hernández López
Asesor

Agradecimientos y dedicatorias

Quiero agradecer a mis profesores que durante la carrera brindaron sus conocimientos y apoyo para mi formación, a mis asesores por su orientación en mi trabajo y en especial al Dr. Raúl Mujica García por ser un apoyo fundamental en el enfoque tanto de mi vocación como del camino por futuro y a el Mtro. Enrique Buendía por brindarme ayuda y atención cuando la necesite. También agradezco al Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) por brindarme las instalaciones necesarias y el apoyo para desarrollar esta investigación.

◦ ◦ ◦ ◦ ◦

Quiero dedicar esta tesis a mis padres Cruz y Laura y a mi hermano Oswaldo por siempre apoyarme e impulsarme dentro de esta profesión.

A Diana Chantres por ser parte dei vida y de mi camino por tanto tiempo.

A Kevin Martínez, Juan Pichardo, Jesús Higuera y Abraham Suárez por ser más que compañeros, mis amigos.

A Mytzi Munguía por haber estado en momentos difíciles tanto académicos como personales, al igual que a mis amigos Hugo Sánchez, Enrique Mayoral, Magda Martínez, Tania Ortiz, Néstor López y Eduardo Vega, quiénes me acompañaron en la última parte de mis estudios y lo volvieron una gran experiencia.

Y finalmente a Fernanda Ortiz por ser una amiga incondicional aún desde antes de las preocupaciones adultas.

"Todo lo que tenemos que decidir es qué hacer con el tiempo que se nos ha dado."
— J. R. R. Tolkien

Índice general

1. Introducción	3
1.1. ¿Qué son los asteroides y dónde se encuentran?	3
1.2. Asteroides Cercanos a la Tierra (NEAs)	3
1.2.1. Amor	4
1.2.2. Apolo	4
1.2.3. Atón	4
1.2.4. Atira	5
1.3. Espectroscopia	5
1.3.1. Espectro de emisión	6
1.3.2. Espectro de absorción	6
1.4. Clasificación y Taxonomía	6
1.4.1. Esquema de clasificación de Bus & Binzel	7
1.4.2. Esquema de clasificación de Bus - DeMeo	8
1.5. La Red internacional de Alerta de Asteroides	9
1.6. Objetivos	9
2. Selección de la muestra y observaciones	11
2.1. La muestra	11
2.2. El OAGH	15
2.3. Espectrógrafo	16
3. Reducción y análisis de datos	19
3.1. Pyraf	19
3.2. Procesado de las imágenes	20
3.2.1. Proceso general	20
3.2.2. Procesado de los objetos	23
4. Análisis y Resultados	27
4.1. Depuración de datos espectrales	27
4.2. Clasificación taxonómica	28
4.2.1. Cálculo de la distancia espectral	28
4.2.2. Asignación de clase	29
4.3. Clasificaciones encontradas	29
4.4. Discusión de los tipos taxonómicos	32
4.4.1. Clasificaciones obtenidas a diferente muestra de comparación	32
4.4.2. Clasificación final propuesta	39
4.5. Clasificaciones anteriores	44
4.5.1. Clasificaciones en trabajos anteriores	48
5. Conclusiones	51
5.1. Trabajo a futuro	51

A. Temporadas de observación utilizadas	53
B. Espectros de los NEAs en nuestra muestra de estudio	57
Bibliografía	69

Resumen

En esta tesis se realizó un análisis espectroscópico de una muestra de Asteroides Cercanos a la Tierra (NEAs, por sus siglas en inglés). Las observaciones fueron obtenidas en temporadas entre 2017 y principios del 2020 en el Observatorio Astrofisico Guillermo Haro (OAGH) ubicado en Cananea, Sonora. Para obtener los espectros de una resolución adecuada se usó un espectrógrafo Boller & Chivens, utilizando una rejilla de difracción de 50 líneas por milímetro.

Para asignar a cada asteroide de la muestra su tipo taxonómico nos basamos principalmente en la clasificación Bus-DeMeo (2009) obtenida del análisis de los espectros, entre 0.45 y 2.45 micras, de 371 asteroides, además del sistema Bus & Binzel (1999), la cual va de 0.44 a 0.92 micras, siendo este sistema el que contempla unicamente longitudes de onda en el visible y que contiene un total de 26 clasificaciones en 4 principales grupos. Este sistema es el más adecuado para clasificar los espectros obtenidos en el OAGH ya que se obtienen datos en el mismo intervalo de longitudes de onda.

Para el procesado de los datos se utilizó el software astronómico Pyraf, el cual consiste en el discontinuado programa IRAF bajo el entorno de Python, de esta forma se limpiarán y reducirán los datos obtenidos, corrigiendo la respuesta del CCD, condiciones del clima y atmósfera, restando contribuciones del espectro del Sol y obteniendo espectros unidimensionales, entre los 4300 y 9300 Å, para poder clasificarlos, calculando la distancia euclidiana, utilizando los espectros del catálogo SMASS-II.

La muestra consiste de un total de 123 objetos de 148 espectros obtenidos, se analizará la distribución de tipos taxonómicos, así como los casos anómalos y posibles causas a estos.

Este trabajo tiene la finalidad de asignar un tipo taxonómico y el complejo al que pertenecen los NEAs observados en estas temporadas, evaluar la calidad de los espectros obtenidos y hacer una comparación con las clasificaciones hechas previamente.

Capítulo 1

Introducción

1.1. ¿Qué son los asteroides y dónde se encuentran?

Recientemente, la importancia del estudio de los cuerpos menores del sistema solar, dentro de los cuales podemos encontrar los asteroides, se ha ido incrementando debido a distintos factores. Principalmente, debido a que estos objetos pueden brindar información importante respecto de la formación de nuestro sistema estelar, ayudando, por ejemplo, a entender su formación y las condiciones en las que se dio. Por otro lado, existe el peligro de un potencial impacto con nuestro planeta que, dependiendo de las propiedades del asteroide, puede causar daños en diferentes escalas, incluyendo una extinción.

Los asteroides son cuerpos rocosos o metálicos que orbitan al Sol, su tamaño y densidad suele variar significativamente, pues estos objetos pueden medir desde unos cuantos metros hasta varios cientos de kilómetros, también rotan, y son de gravedad baja debido a la poca masa, esto mismo provoca que tomen formas irregulares en lugar de esféricas, como es el caso de objetos con mayor masa, aunque tienen la suficiente como para mantener a otro objeto, de menor masa, orbitando, como es el caso de los asteroides binarios.

Hasta mediados del año 2021 se han observado y registrado un total de 1.097.148 asteroides en el Sistema Solar. [19]

La mayoría de estos cuerpos se encuentran en el Cinturón Principal de Asteroides (Main Asteroid Belt), ubicado entre Marte y Júpiter, donde se han catalogado cerca de 800,000 asteroides, sin embargo, existen otros asteroides llamados Troyanos, los cuales comparten órbita con algún planeta del sistema solar, siendo su mayor concentración la órbita de Júpiter.

Más allá de la órbita de Neptuno, se encuentra el Cinturón de Kuiper, el cuál contiene un extenso número de objetos menores congelados, incluyendo planetas enanos y otros objetos trans-neptunianos, además de la nube de Oort. [21]

Finalmente tenemos otro grupo orbital, los Asteroides Cercanos a la Tierra (Near Earth Asteroids, NEAs) que, dada la gran importancia para nuestro planeta, son el objeto de estudio en este trabajo.

1.2. Asteroides Cercanos a la Tierra (NEAs)

Se les conoce como NEAs o cercanos a la Tierra a aquellos asteroides con órbitas similares a la de la Tierra, esto es, valores del perihelio q menores a 1.3 unidades astronómicas (UA), recordando que una unidad astronómica es la distancia media que existe entre la Tierra y el Sol, por lo que, mientras más cercana a la unidad sea la órbita de un objeto dentro del sistema solar, más parecida será a la propia órbita de la Tierra alrededor del Sol.

Podemos encontrar cuatro principales grupos de este tipo de asteroides, diferenciando cada uno por el tamaño y forma de su órbita. Estos asteroides han sido estudiados y caracterizados por varias décadas desde su descubrimiento y distinción, por lo que la mayoría de ellos ya están bien identificados.

La distribución orbital de estos objetos es de la forma en que podemos observar en la Figura 1.1, donde podemos ver su recorrido alrededor del Sol comparado con la Tierra.

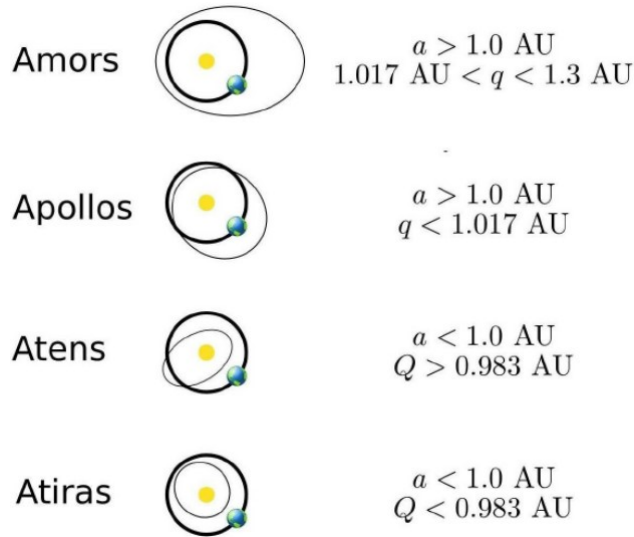


Figura 1.1: Representación orbital de los distintos grupos de los NEAs. Recuperada de https://cneos.jpl.nasa.gov/about/neo_groups.html [13].

1.2.1. Amor

El primer asteroide descubierto de este tipo fue el (1221) Amor o 1932 EA1, en 1932, en el Real Observatorio de Bélgica, estos asteroides no cruzan la órbita de la Tierra, sino que se apartan de su órbita pues su perihelio (su punto más cercano al Sol) se encuentra más allá de la unidad astronómica, por lo que el camino que recorren traza una órbita por fuera de la que posee la Tierra, pasando en el espacio que existe entre Marte y nuestro planeta.

1.2.2. Apolo

Este es el tipo de asteroide es potencialmente más peligroso, debido a que su perihelio es menor a una unidad astronómica, pero su semieje mayor supera la unidad, esto implica que, en algún punto las órbitas de estos objetos coinciden con la órbita terrestre y esto aumenta su probabilidad de impacto.

El primer objeto identificado de este tipo fue (1862) Apollo o 1932 HA, en 1932, en el Observatorio de Heidelberg-Königstuhl, en Alemania, el cual es potencialmente peligroso y es por él que este tipo orbital de asteroides reciben ese nombre.

1.2.3. Atón

Este tipo de asteroides poseen una importante característica que los diferencia de los dos anteriores, dicha característica se trata de un semieje mayor con una magnitud menor a la unidad astronómica, además de un afelio (punto más lejano al Sol) que sí sobrepasa la unidad, por lo

que, en este grupo, podemos encontrar algunos objetos con órbitas que también coincidirían, en algún punto, con la órbita terrestre y pueden representar un peligro para nuestro planeta, aunque el riesgo es menor que el del grupo Apolo, por su trayectoria más corta.

Son nombrados así por el asteroide (2062) Aten (Atón o 1976 AA) el cual fue descubierto en 1976 en el Observatorio de Monte Palomar, en Estados Unidos.

1.2.4. Atira

Este tipo de asteroide se caracteriza porque su órbita es completamente interior a la órbita terrestre, por lo que cualquier punto de la órbita es menor a la unidad astronómica, es por esto que se clasifica como Inner-Earth Object (IEO), que son aquellos que orbitan por dentro del curso terrestre.

Reciben su nombre por el asteroide (163693) Atira descubierto el 11 de febrero de 2003, aunque también suelen ser llamados "apohele" que significa órbita, este tipo de asteroides son los de menor población de los cuatro tipos cercanos a la Tierra.

Otros grupos

Existen otros grupos, como los **Centauros**, aquellos asteroides que orbitan el Sol entre Júpiter y Neptuno; los **Objetos Transneptunianos (TNO)**, aquellos que se encuentran en los límites más lejanos del sistema planetario y, quizá los más importantes, los **Asteroides Potencialmente Peligrosos (PHA)**, por sus siglas en inglés) los cuales son una subcategoría de los Objetos Cercanos a la Tierra (NEOs, por sus siglas en inglés) definidos por su significativa amenaza, ya que al realizar aproximaciones muy cercanas poseen el potencial de colisionar con el planeta.

1.3. Espectroscopia

La espectroscopia es el estudio que relaciona la materia y su interacción con la radiación electromagnética, durante muchos años sólo se pudo estudiar en el intervalo de la luz visible, es decir, entre los 400 y 900 nm. El comportamiento electromagnético que puede observarse es la propiedad de absorber o reflejar diferentes longitudes de onda dependiendo del material del que se trate y su composición. [10]

La propiedad de que un objeto refleje o emita luz es variable dependiendo de los elementos presentes en él, de forma gráfica y cuantificable esto se representa como un gráfico en el que el eje horizontal nos muestra las diferentes longitudes de onda, mientras que el eje vertical es la intensidad de estas ondas. Un espectro puede ser obtenido mediante la dispersión de la luz, si la fuente de luz es blanca obtendremos un espectro continuo (Fig. 1.2), debido a que la luz blanca se compone de todas las frecuencias dentro del intervalo visible, en cambio, si la fuente de luz no es blanca o si la luz dispersada está siendo reflejada o pasa a través de otro material encontraremos que la distribución en las longitudes de onda ya no es tan uniforme por lo que tendremos presencia de bandas correspondientes a los elementos presentes y dependiendo el arreglo que tengamos puede ser un espectro de emisión o de absorción.

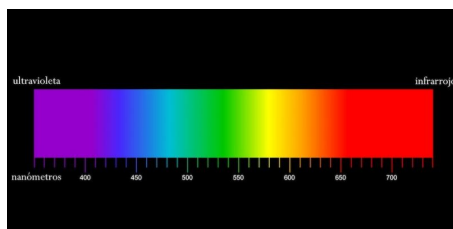


Figura 1.2: Espectro de luz visible continuo. [15]

1.3.1. Espectro de emisión

La materia tiene la propiedad de emitir radiación si es excitada, al aproximarla a una fuente de energía los electrones que la componen se sobrecargan pasando a un orbital mayor, sin embargo esta carga es temporal por lo que los electrones regresan al estado fundamental, es decir, al orbital al que pertenecen, este movimiento provoca la expulsión de fotones desde el objeto.

Este efecto permite que los cuerpos emitan su propia luz, al dispersar y analizar esta luz emitida vemos que se forman bandas que varían en su posición además de su anchura, todo esto dependiendo del elemento o elementos que son nuestra fuente de irradiancia, de esta forma lo que tenemos es una franja oscura en la que en algunos puntos aparecen bandas correspondientes a ciertas longitudes de onda. [16]



Figura 1.3: Líneas de emisión del hidrógeno

1.3.2. Espectro de absorción

Este tipo de espectro es, de cierta forma, el opuesto a lo que es el espectro de emisión, pues en este caso el arreglo que tenemos es el de un objeto que refleja la luz de una fuente externa, o bien, si el material lo permite, los fotones atraviesan completamente al objeto. Debemos recordar que una propiedad importante para los elementos es absorber o reflejar la luz que incide sobre ellos, ya que aquellas longitudes que el elemento rechaza "son reflejadas hacia otro punto desde el objeto, es esta propiedad la que le da el color a todo lo que podemos ver y en este caso da origen a este tipo de espectro. [16]

En un espectro de absorción lo que podemos ver es la gama casi completa de todas las longitudes de onda, salvo por ciertas secciones en las que se forman bandas correspondientes al elemento expuesto a la fuente de luz, este espectro de reflectancia coincide con el espectro de emisión pero de forma inversa, en este caso vemos bandas con ausencia de algunas longitudes mientras que en el otro tenemos un fondo sin luz con presencia de algunas bandas justo en la misma posición y grosor que en el espectro de absorción presenta vacíos.

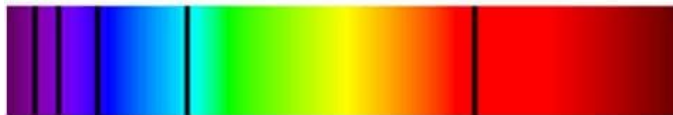


Figura 1.4: Líneas de absorción del hidrógeno

1.4. Clasificación y Taxonomía

La taxonomía es la ciencia que se encarga de agrupar y clasificar organismos u objetos según características en común; anteriormente se mencionó un tipo de clasificación para los asteroides, el cual fue de acuerdo a sus órbitas y su semejanza con la de la Tierra, además podemos también tomar como criterio algunas otras características como su tamaño, su periodo de rotación e incluso su composición, siendo esta última determinada sólo en la superficie ya que los grupos taxonómicos, que se usan para las clasificaciones, están basados en espectros de reflectancia, esto es así debido a que, en la mayoría de los casos, únicamente podemos observar y analizar la luz del Sol que nos llega reflejada de la superficie de los asteroides.

Por lo anterior, esta técnica no es capaz de separar a aquellos objetos o cuerpos primitivos, cuya composición superficial es igual a su composición interna, de los cuerpos diferenciados, cuya composición varía en su superficie respecto de su interior, sin mencionar a aquellos asteroides que tengan una superficie irregular debido a la agrupación de distintas componentes.

Mediante la espectroscopia podemos conocer un poco sobre los materiales que componen la corteza de cada asteroide. Usando un dispersor podemos analizar las diferentes longitudes de onda que componen el haz de luz que reflejan los asteroides hasta nosotros, de esta forma podemos notar que sus distribuciones espectrales tienden a tomar formas características, y es a partir de éstas que se pueden distinguir diferentes clases y grupos. Cabe mencionar que, en el caso de que dos asteroides compartan el mismo complejo, no implica que los materiales que los conforman sean iguales, si no que sus espectros comparten algunas características.

La primera clasificación la dieron Chapman, Morrison y Zellner [6], considerando únicamente tres clasificaciones, estas fueron C (carbonaceous), S (Stony-Metallic) y U (Unclassifiable in the present system), para este entonces sólo se consideraban los asteroides carbonáceos y metálicos, además del grupo de espectros no identificados que aparece en cada sistema. Con el tiempo se desarrollaron diferentes sistemas los cuales añadían o expandían clases respecto de los sistemas anteriores, de esta forma llegamos a uno de los principales sistemas publicado por Tholen [22] en el cual se definen 14 clases taxonómicas agrupadas en las clases principales que consideran nuevamente asteroides carbonáceos, metálicos y en esta ocasión incluyendo asteroides a base de silicio, además de aquellos inclasificables.

El sistema de Tholen es uno de los más usados actualmente, sin embargo, en publicaciones subsecuentes aparecieron otros sistemas más detallados con un mayor número de clases y que son los más adecuados para clasificar los espectros obtenidos en este trabajo, tales como los de Bus & Binzel y Bus-DeMeo, de los que hablaremos a continuación.

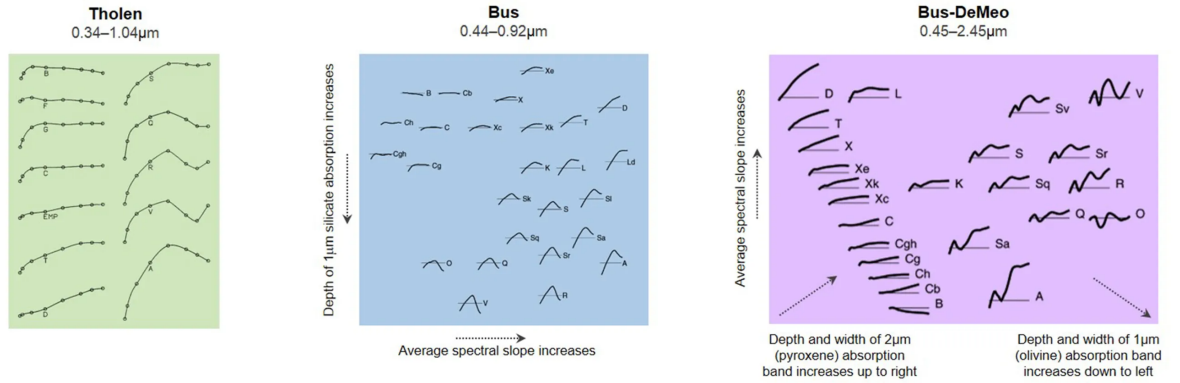


Figura 1.5: Sistemas de clasificación taxonómica

1.4.1. Esquema de clasificación de Bus & Binzel

La base de este esquema de clasificación fue publicado primero por Bus [5], y posteriormente, en otro trabajo, se le dio continuación y se agregaron ligeros cambios, basándose en los espectros de 1447 asteroides [3]. Este sistema considera un total de 26 clases taxonómicas posibles divididas en tres complejos con diferentes características y considerando el intervalo espectral de 4400 a 9200 Å. Estos complejos son parecidos a los mencionados por Tholen pero ahora con una mejor resolución espectral, lo que permite identificar cambios más sutiles en las pendientes, además de que este último utiliza datos fotométricos y usa un intervalo más amplio, de 0.34 a 1.04 μm .

Los tres complejos contemplados en este sistema son C, S y X, además del resto de espectros que no se encuentran dentro de ninguno de estos complejos, llamados "*Otros*"; las diferentes subclases desprendidas de cada complejo se explican a continuación:

- El complejo C contiene las subclases C, Cb, Cg, Ch y Cgh, y contiene a los espectros más oscuros.
- El complejo S contiene las subclases S, Sa, Sk, Sl, Sq y Sr, y contiene a los espectros más brillantes.
- El complejo X contiene las subclases X, Xc, Xe, Xk y B, correspondiendo a los asteroides metálicos.
- Los "*otros*", aquellos que no corresponden a ninguno de los complejos anteriores, son A, D, K, L, Ld, O, Q, R, T y V.

1.4.2. Esquema de clasificación de Bus - DeMeo

Este esquema de clasificación es el más reciente, publicado por DeMeo et al. [8], con una actualización en 2013 [7] en la que se añadió la subclase Sv, dándonos un total de 25 clases. Es importante mencionar que este sistema toma como base a Bus y Binzel [3], añadiendo, y también eliminando, algunas clasificaciones que se tomaban en cuenta en ese trabajo, aunque conservando los mismos complejos usados anteriormente, incluyendo también aquellos que no entran en ninguna clase.

Aunque son similares en varios aspectos, existe una importante diferencia entre ambos sistemas: el esquema Bus - DeMeo abarca un intervalo de longitudes de onda más amplio que Bus & Binzel, entre 4500 y 24500 Å, incluyendo una buena parte del infrarrojo, lo que otros sistemas no consideraban, que puede aportar información importante para determinar la composición mineralógica de los asteroides. Los cambios incorporados, respecto a la clasificación anterior, que se pueden observar en Murphy [18] son:

- Se agrega una nueva sub-clase del tipo S, la clase Sv.
- se elimina la clase Ld para convertirla en L o D.
- Se elimina la clase Sk y Sl, considerando sus características espectrales dentro de la clasificación S.
- Se separa la clase Xc a Xn y nuevamente Xc.

Estos ajustes son posibles gracias al SMASS (Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey)[5], el cual es un proyecto colaborativo entre varias instituciones con el fin de almacenar una gran variedad de datos dentro del intervalo visible de la luz. La primera muestra reunida de estos asteroides se hizo en 1991, en este primer momento no se contaba con espectros de muy alta resolución y serían reducidos con el programa IRAF (Image Reduction and Analysis Facility), teniendo un total de 316 asteroides divididos en 12 clases espectrales.

Para la segunda fase del proyecto (SMASS-II) [4] ya se tiene una mejor resolución en los datos reducidos, aquí comienza el uso Pyraf, que mantendría las funciones de Iraf en un entorno de Python. En SMASS-II se utilizarían 1367 asteroides, usando longitudes de onda en el visible, con 3 complejos bien definidos (S-C-X) y 26 clases taxonómicas, siendo el complejo **S** el más abundante con una marcada diferencia. [20]

La cantidad de objetos por complejo en el SMASS-II mostrados en Bus y Binzel [3] son 655 del complejo **S**, lo que corresponde al 47.9%, 397 del complejo **C** equivalente al 29%, y en el complejo **X** se encuentran 238 objetos, es decir, 17.4% y finalmente los End Members se hallan solo 77 objetos que corresponde al 5.6%.

Esta base de datos ha servido para dar un orden y tener un mejor entendimiento del sistema Bus & Binzel, además de que, al tener curvas mejor definidas, se logró cambiar, eliminar y agregar otras clases, dando origen al sistema Bus - DeMeo.

1.5. La Red internacional de Alerta de Asteroides

La Red internacional de Alerta de Asteroides (International Asteroid Warning Network (IAWN) [11]) es una iniciativa de la Unión Astronómica Internacional (International Astronomical Union, IAU), su objetivo principal es la de observar y detectar posibles amenazas debidas a asteroides u otros cuerpos menores que, ya sea por su cercanía o su composición, representan un peligro para el bienestar del planeta Tierra. Esta red realiza diferentes actividades con el fin de poder responder ante posibles riesgos; además de observar y detectar objetos que orbitan nuestra cercanía, también caracteriza dichos objetos, obteniendo su órbita, periodo de rotación y traslación, tamaño aproximado y sobre todo su composición, siendo estos datos vitales para evaluar y determinar los riesgos de un posible impacto.

Además, mantiene comunicados entre si a diferentes organizaciones, institutos y observatorios, con el fin de mejorar los datos disponibles, compartiendo, discutiendo y comparándolos. Siendo el INAOE miembro fundador de esta organización, sus aportes son importantes para poder monitorear y tener una base de datos confiable sobre los diferentes cuerpos que orbitan en nuestro sistema solar.

En el INAOE se realiza análisis fotométrico con de la Cámara Schmidt en Tonantzintla, Puebla y análisis espectroscópico en el Observatorio Astrofísico Guillermo Haro (OAGH) ubicado en Cananea, Sonora. Desde 2016, en el OAGH se obtienen espectros de NEAs y de MBAs como un programa permanente de observación. De esta forma, el instituto hace uso de sus instalaciones y aprovecha la experiencia de sus investigadores para colaborar en el monitoreo de objetos potencialmente peligrosos, determinando diferentes características vitales para conocer la naturaleza de los asteroides y su papel en el sistema solar.

1.6. Objetivos

En este trabajo asignaremos una clasificación taxonómica para una muestra de NEAs observados en el OAGH de mayo de 2017 a Febrero de 2020. Al momento de ser observados no existía clasificación en la literatura, ya sea debido a que no se tenía un espectro de buena calidad o no habían sido observados.

Existen diferentes factores que pueden dar origen a fallos en la obtención y procesamiento de un espectro y por lo tanto a su debida clasificación, por lo que uno de los objetivos es llevar el proceso de reducción cuidadoso, revisando todos los detalles, y bajo un asesoramiento, con el fin de no cometer errores u omitir partes de la reducción. Todo esto nos permitirá obtener el espectro procesado con la mayor calidad posible.

Una vez procesados y analizados nuestros datos, haremos comparación con los resultados obtenidos en trabajos previos, pero que aparecieron después de que lleváramos a cabo nuestras observaciones. También compararemos con los resultados obtenidos por otros miembros del grupo de cuerpos menores del INAOE mediante procesos independientes.

Capítulo 2

Selección de la muestra y observaciones

2.1. La muestra

Por las coordenadas en las que se encuentra ubicado el OAGH se buscaron objetos que estuvieran en una declinación mayor a -10° y con masas de aire menores a 2, pues en esta posición se tiene una buena altura respecto del horizonte, lo cual permite un tiempo de exposición suficiente para una toma de imágenes completa, ya que para cada asteroide se deben obtener al menos 3 imágenes para eliminar rayos cósmicos, cruces con otro objeto o algún otro evento que interfiera con la luz del asteroide observado.

Se debe tener en cuenta la magnitud del objeto ya que habrá una correspondencia en el aumento/disminución del brillo, y por lo tanto del tiempo de exposición. Para mantener una señal adecuada, y minimizar el ruido, se pone el límite de magnitud de 18.5 en la banda V y con un tiempo adecuado se toman 3 integraciones de 20 minutos cada una.

Considerando de igual forma la ubicación en la que se encuentran los objetos que se quieren observar, la posición y fase de la luna y el clima esperado para las fechas, es como se decide los días en que se hará uso del telescopio, pues estos factores pueden afectar la calidad de las imágenes e incluso provocar que se cancelen las observaciones.

Estos objetos se buscan en [https://cneos.jpl.nasa.gov/ca/\[12\]](https://cneos.jpl.nasa.gov/ca/[12]).

Para la obtención de las imágenes de cada asteroide se programaron noches de observación en el OAGH, considerando los factores antes mencionados, cada temporada de observación tiene una duración de entre cinco y siete días.

Los objetos estudiados en este trabajo se observaron en temporadas que van desde el 30 de Mayo de 2017 hasta el 25 de Febrero de 2020, siendo un total de 19 temporadas de observación distribuidas en 33 meses.

En este trabajo se incluyen 148 observaciones que se procesaron para obtener los espectros y su respectiva taxonomía. La Tabla 2.1 contiene la lista de NEAs observados para este trabajo, así como las fechas de observación y su tipo de órbita (obtenida en [https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/\[14\]](https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/[14])), recuperados de las bitácoras correspondientes a estas fechas.

Selección de la muestra y observaciones

2.1 La muestra

Observaciones			
Clave	Asteroide	Tipo de Órbita	Fecha de observación
a000719	Albert	Amor	9/13/2018
a001864	Daedalus	Apollo	02/12/ 2018
a001865	Cerberus	Apollo	10/22/2017
a001866	Sisyphus	Apollo	4/18/2018
a001981	MIDAS	Apollo	02/09/ 2018
a002059	Baboquivari	Amor	10/24/2019
a002061	Anza	Amor	9/14/2018
a002368	Beltrovata	Amor	11/17/ 2017
a003200	Phaethon	Apollo	11/17/ 2017
a004596	1981 QB	Amor	2/16/2019
a004954	Eric	Amor	6/2/2017
a005131	1990 BG	Apollo	1/19/2019
a005693	1993 EA	Apollo	4/13/2019
a006053	1993 BW3	Apollo	9/22/2017
a006053	1993BW3	Apollo	02/09/ 2018
a006063	Jason	Apollo	5/30/2017
a006178	1986 DA	Amor	01/24/ 2019
a006456	Galombek	Amor	9/12/2018
a007336	Saunders	Amor	10/22/2017
a007889	1994 Lx	Apolo	6/14/2018
a007977	1977QQ5	Amor	02/10/ 2018
a008037	1993 HO1	Amor	10/24/2017
a008567	1996 HW1	Amor	02/07/ 2018
a008567	1996 HW1	Amor	02/08/ 2018
a009856	1991 EE	Apollo	4/20/2018
a012711	Tukmit	Apollo	02/08/ 2018
a013553	Masaakikoyar	Amor	9/13/2018
a014402	1991DB	Amor	02/10/ 2018
a015745	Yuliya	Amor	6/13/2018
a017182	1999 VU	Apollo	11/15/ 2017
a017511	1992 QN	Apollo	11/15/ 2017
a018109	2000 NG11	Amor	9/13/2018
a018172	2000 QL7	Amor	12/21/2019
a018736	1998 NU	Amor	1/17/2019
a021374	1997 WS22	Amor	10/23/2017
a031210	1998 BX7	Amor	2/12/2019
a031345	1998 PG	Amor	9/14/2018
a035107	1991 VH	Apollo	2/24/2020
a040267	1999 GJ4	Apollo	4/18/2018
a053110	1999 AR7	Amor	11/16/ 2017
a054401	2000 LM	Amor	11/4/2018
a054660	2000 UJ1	Amor	11/1/2018
a065679	1989 UQ	Aton	10/23/2017
a065733	1993 PC	Apollo	11/1/2018
a066391	Moshup	Aton	5/30/2017
a066391	Moshup	Aton	6/2/2017
a066391	Moshup	Aton	5/27/2019
a068347	2001 KB67	Aton	6/12/2018

Selección de la muestra y observaciones

2.1 La muestra

Observaciones			
Clave	Astroide	Tipo de Órbita	Fecha de observación
a068950	2002 Qf15	Apollo	6/18/2018
a068950	2002 Qf15	Apollo	9/23/2017
a085628	1998 KV2	Amor	4/17/2018
a085953	1999 FK21	Aton	4/18/2018
a085989	1999 JD6	Aton	6/28/2019
a088254	2001 FM129	Apollo	04/18/2019
a088263	2001 KQ1	Amor	11/1/2018
a090403	2003 YE45	Apollo	1/19/2019
a096315	1997 AP10	Apollo	30/11/ 2018
a096590	1998 XB	Aton	02/08/ 2018
a096631	1999 FP59	Amor	9/22/2017
a099248	2001 KY66	Apollo	10/24/2019
a099907	1989 VA	Aton	10/23/2017
a103067	1999 XA143	Apollo	1/24/2020
a112221	2002 KH4	Amor	6/27/2019
a115052	2003 RD6	Amor	9/15/2018
a136923	1998 JH2	Amor	6/3/2017
a137062	1998 WM	Apollo	11/16/ 2017
a137170	1999 HF1	Aton	6/3/2017
a137199	1999 KX4	Amor	12/21/2019
a137805	1999 YK5	Aton	1/17/2019
a138847	2000 VE62	Amor	4/18/2018
a139345	2001 KA67	Apollo	6/12/2018
a140158	2001 SX169	Apollo	11/15/ 2017
a141079	2001 XS30	Apollo	11/1/2018
a141525	2002 FV5	Apollo	4/13/2019
a141593	2002 HK12	Apollo	10/27/2019
a142040	2002 QE15	Amor	10/23/2017
a142464	2002 TC9	Amor	9/22/2017
a143992	2004AF	Apollo	02/10/ 2018
a144332	2004 DV24	Apollo	9/13/2018
a144898	2004 VD17	Apollo	4/14/2019
a152931	2000 EA107	Aton	4/21/2018
a153814	2001 WN5	Apollo	10/24/2019
a153957	2002 AB29	Apollo	6/13/2018
a159686	2002 LB6	Apollo	6/27/2019
a162004	1991 VE	Aton	12/20/2019
a162082	1998 HL1	Apollo	10/24/2019
a162723	2000 VM2	Apollo	11/2/2019
a163691	2003BB43	Amor	02/12/ 2018
a163696	2003 EB50	Apollo	11/18/ 2017
a163899	2003 SD220	Aton	12/4/2018
a184990	2006 KE89	Apollo	5/27/2019
a190208	2006 AQ	Amor	10/22/2017
a192563	1998 WZ6	Apollo	12/20/2019
a208023	1999AQ10	Aton	02/12/ 2018
a212359	2006 EV52	Apollo	4/18/2018
a220839	2004 VA	Apollo	6/13/2018

Selección de la muestra y observaciones

2.1 La muestra

Observaciones			
Clave	Asteroide	Tipo de Órbita	Fecha de observación
a220909	2005 EO1	Apollo	9/23/2017
a243025	2006 UM216	Amor	12/20/2019
a243025	2006 UM216	Amor	1/24/2020
a248926	2006 WZ2	Amor	10/24/2019
a259802	2004 BJ86	Amor	02/08/ 2018
a265196	2004BW58	Apollo	02/10/ 2018
a265661	2005 UB	Apollo	11/4/2018
a265962	2006 CG	Amor	9/22/2017
a275611	1999XX262	Amor	2/12/2019
a275611	1999 XX262	Amor	4/13/2019
a276033	2002 AJ129	Apollo	02/07/ 2018
a311044	2004 BB103	Apollo	12/21/2019
a326291	1998 HM3	Amor	10/27/2019
a326388	2001 QD96	Apollo	9/23/2017
a333555	2005 VY17	Amor	12/20/2019
a333888	1998 ST4	Amor	10/23/2017
a337084	1998 SE36	Amor	4/21/2018
a338292	2002 UA31	Aton	10/22/2017
a349928	2009 WD106	Apollo	12/20/ 2017
a354030	2001 RB18	Amor	10/24/2019
a381677	2009 BJ81	Apollo	2/16/2019
a395289	2011 BJ2	Apollo	10/26/2019
a411201	2010 LJ14	Amor	10/26/2017
a416584	2004 JB12	Amor	6/3/2017
a419880	2011 AH37	Apollo	2/12/2019
a437316	2013 OS3	Apollo	1/24/2020
a438429	2006 WN1	Amor	9/14/2018
a441987	2010 NY65	Apollo	6/28/2019
a442742	2012 WP3	Amor	11/3/2018
a443923	2002 RU25	Amor	9/14/2018
a444193	2005 SE71	Apollo	4/20/2018
a444584	2006 UK	Apollo	11/15/ 2017
a448818	2011 UU20	Amor	2/25/2020
a454177	2013 GJ35	Amor	1/19/2019
a455176	1999 VF22	Apollo	2/12/2019
a455550	2004 JO2	Apollo	11/3/2018
a457260	2008 RY24	Amor	11/1/2018
a457768	2009 KN4	Apollo	10/24/2017
a467309	1996 AW1	Apollo	6/12/2018
a468481	2004 TP20	Apollo	11/3/2018
a475967	2007JF22	Amor	4/17/2018
a481394	2006 SF6	Aton	11/2/2019
a489486	2007 GS3	Apollo	10/27/2019
a494999	2010 JU39	Aton	6/27/2019
a512245	2016 AU8	Aton	1/24/2019
a518635	2008 HO3	Amor	11/1/2018
a524522	2002 VE68	Aton	11/02/2018
	2018 LK	Apollo	6/14/2018

Observaciones			
Clave	Asteroide	Tipo de Órbita	Fecha de observación
	2018 RQ2	Apollo	9/14/2018
	2018 TF3	Apollo	11/02/2018
	2018 UQ1	Apollo	11/02/2018
	2018CB	Apollo	02/09/ 2018

Tabla 2.1: Objetos observados en las temporadas de 2017 a 2020

Para la tabla anterior se muestran los objetos observados ordenados según su clave de identificación, dejando hasta el final aquellos asteroides que no poseen una.

Para consultar información respecto a fechas revisar el apéndice A donde se encontrarán los objetos agrupados según su fecha de observación.

2.2. El OAGH

En el el estado de Sonora, en la ciudad de Cananea, en la Sierra de la mariquita se encuentra el Observatorio Astronómico Guillermo Haro, nombrado así en memoria de Guillermo Haro Barraza, quién es reconocido por desarrollar significativamente la astronomía en México, desde sus observaciones con la Cámara Schmidt de Tonanzintla, con la cual descubrió, de forma simultanea con George Herbig, la existencia de los ahora llamados objetos Herbig-Haro.



Figura 2.1: Observatorio Astronómico Guillermo Haro

Fue Haro, con sus contribuciones, quien impulsaría la fundación del INAOE y eventualmente comenzarían el proyecto de un observatorio en Cananea. Sería en 1987, un año antes de la muerte de Guillermo Haro, cuando se inauguraría el OAGH, sin embargo, sus operación regular comenzaría hasta 1992.

El OAGH cuenta con un telescopio Ritchey-Chrétien (Fig. 2.3) con un espejo primario de 2.12 m de diámetro y un secundario de 0.5 m. Con este telescopio se captura la luz para generar las imágenes espectroscópicas que nos permiten un análisis de las diferentes longitudes de onda reflejadas sobre la superficie de los asteroides, permitiendo así obtener información sobre la composición de su corteza con el fin de contribuir a la misión del IAWN.

2.3. Espectrógrafo

Un espectrógrafo es un instrumento de medición que nos permite analizar la luz descomponiéndola en diferentes longitudes de onda. Este instrumento puede utilizar un prisma o una rejilla de difracción, pues ambos elementos funcionan de forma similar, dispersando la luz que llega a ellos.

Un espectrógrafo funciona de forma simple, la luz es colectada por el telescopio con el que se hacen las observaciones de un objeto en una determinada región del cielo, esta luz es concentrada y conducida hacia el instrumento, dependiendo si funciona con prisma, puede contener un colimador para poder homogeneizar los rayos de luz y corregir la trayectoria de los haces captados, provenientes de la fuente; es importante asegurarse que el colimador posea el tamaño adecuado para funcionar óptimamente, estando correctamente alineado .

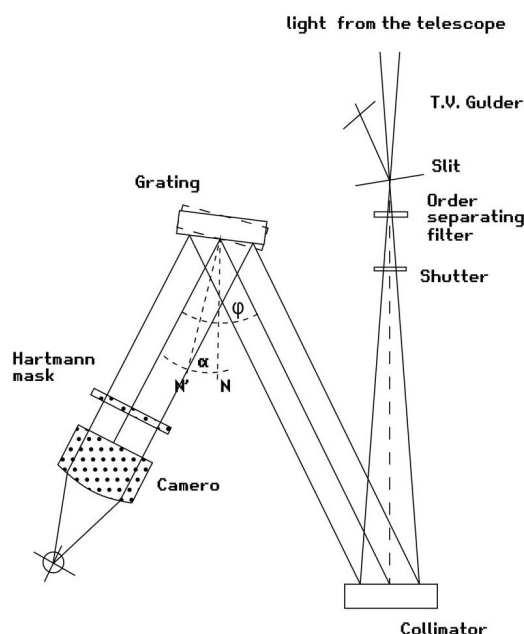


Figura 2.2: Arreglo óptico del espectrógrafo Boller & Chivens [9]

Una forma alternativa es utilizar rejillas de difracción, las cuales pueden obtener imágenes a diferentes niveles de resolución (entendiendo resolución como la capacidad de diferenciar claramente entre distintas longitudes de onda de valor cercano), esto dependiendo de la separación de la rendija, siendo mayor mientras menor distancia las separe.

En el OAGH se cuenta con diferentes instrumentos para poder obtener las imágenes espectroscópicas en las diferentes temporadas de observación, donde se estudian no sólo los cuerpos menores cercanos a nosotros, sino también estrellas, galaxias y otros objetos externos a nuestro sistema solar. En las instalaciones de Cananea podemos utilizar el espectrógrafo Boller & Chivens que se coloca sobre el foco f/12 Cassegrain del telescopio, como detector cuenta con un Dispositivo de Carga Acoplada (CCD, por sus siglas en inglés) E2V42-40 de 2,048 x 2,048 pixeles, el tamaño de cada pixel es de 13.5 x 13.5 micras.

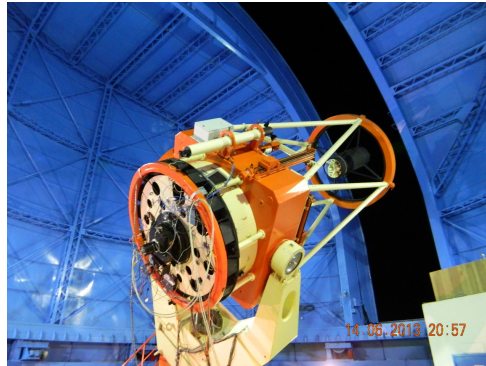


Figura 2.3: Telescopio de 2.12 metros

La rejilla de difracción del espectrógrafo Boller & Chivens (Fig. 2.4) se puede cambiar de forma manual, para las observaciones de los asteroides presentados en este trabajo se utilizó una rejilla de 50 líneas por milímetro, lo que corresponde a una resolución baja, que dispersa los haces de luz a 10 Angstrom por pixel, de esta forma nos permite realizar observaciones desde los 4000 hasta los 9500 $\text{\AA}$.

Además, utilizando una rendija de máximo 1000 micras con un ancho de 250 micras, lo cual corresponde a 2 segundos de arco en el cielo.

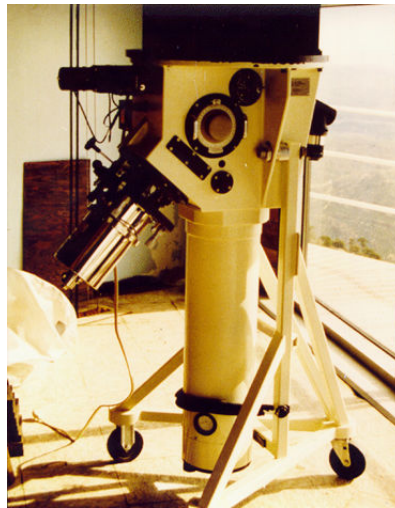


Figura 2.4: Espectrógrafo Boller & Chivens. [9]

Capítulo 3

Reducción y análisis de datos

3.1. Pyraf

En la década de 1980, en el Observatorio Nacional de Astronomía Óptica (NOAO, por sus siglas en inglés), se desarrolló una paquetería de software llamado Utilidad de Reducción y Análisis de Imágenes (Image Reduction and Analysis Facility, IRAF) [24], con la finalidad de reducir imágenes astronómicas, permitiendo hacer un procesamiento detallado pixel a pixel de las imágenes compatibles obtenidas por diferentes observatorios, además de realizar operaciones a cada una y entre las propias imágenes, facilitando tareas de limpieza y reducción para los astrónomos [23]. A pesar de su utilidad, en 2012, se dejó de actualizar debido al surgimiento de nuevas herramientas que, para nuevos usuarios, resultarían más intuitivas, además de poseer funciones más diversas, por lo que, a mediados de la década, el software terminaría por ser discontinuado.

Fue el equipo del Instituto Científico del Telescopio Espacial (STScI, por su siglas en inglés) quien desarrollaría una interfaz en Python que retomaría las herramientas y funciones de IRAF para añadirles una interfaz propia. Este nuevo lenguaje permitiría hacer uso de las capacidades anteriores de IRAF, pero con un sistema más intuitivo para usuarios nuevos y sobre todo para aquellos que estén familiarizados con Python. Además, sería posible usar otras librerías afines, principalmente Astropy, e incluyendo otras como NumPy o Matplotlib. De esta forma se combinarían las diferentes capacidades de procesamiento de imágenes que aportan Python y IRAF [25].

Al usar Pyraf nos damos cuenta que los archivos admitidos son de un cierto tipo, pues requieren de características especiales para ser procesadas adecuadamente, estas son las imágenes CCD que podemos identificar por su extensión fits (Flexible Image Transport System), las cuales, para observatorios profesionales, que incluyen tanto información del observatorio como datos relevantes en las condiciones de observación, además de la matriz de píxeles, resultado de la observación, que es con la que se trabaja. Estas imágenes contienen información de diferentes intervalos, desde el infrarrojo cercano hasta longitudes de onda ultravioletas, dependiendo de la instrumentación y el CCD utilizado. Los detectores tienen un valor límite en el nivel de intensidad que pueden registrar de manera correcta, por lo que se debe tener cuidado en no exponerlos por tiempos muy largos o a fuentes de luz muy intensas, y que excedan este nivel máximo, ya que además de saturar la imagen, podrían provocar daños al equipo y, desde luego, la imagen sería inservible.

Con la finalidad de corregir las señales no deseadas en nuestros espectros, es necesario obtener imágenes que sirvan para eliminarlos o minimizarlos, pero también de otras que sirvan para calibrar, tanto la respuesta en intensidad como en longitud de onda. Estas imágenes se pueden agrupar en cinco tipos diferentes, según la información que deseamos corregir.

- **Zero o Bias**, son un tipo de imágenes que sirven para eliminar el ruido electrónico, esto es, las señales electrónicas propias del CCD que pueden alterar los resultados de las observaciones. Para tomar estas imágenes se debe tener cubierto el telescopio o protegido de la luz y con

un tiempo de exposición cero, pues debe tomar sólo la respuesta electrónica intrínseca del detector.

- **Dark**, que sirven de igual forma para corregir ruido electrónico, en este caso producido por los electrones desprendidos debido a la temperatura, naturalmente este ruido aumenta mientras más larga sea la exposición del detector. El tiempo requerido para obtenerlas es igual al que tendremos en la toma de imágenes (objects), pero con el obturador cerrado, para evitar que detecte luz de otras fuentes y procurando que estén a la misma temperatura que durante las observaciones.
- **Flat fields**, generalmente llamadas flats, estas imágenes nos sirven para corregir las variaciones en la sensibilidad pixel a pixel de los detectores ante las fuentes de luz. Estas imágenes se toman apuntando a una superficie uniformemente iluminada durante un tiempo suficiente para evitar saturar los CCD, pero con suficiente señal para no generar más ruido. También sirven para eliminar distorsiones por polvo, fringing o imperfecciones en el equipo.
- **Objects**, que son aquellas imágenes obtenidas al apuntar a los objetos astronómicos de estudio, estos pueden ser desde cuerpos menores como asteroides hasta cuerpos de gran tamaño como galaxias. Estas imágenes capturadas contienen los datos de la fecha, la hora, tiempo de exposición y otros relevantes, todos se incluyen dentro del archivo, el cual puede visualizarse con ayuda de Pyraf o alguna otra herramienta astronómica. En nuestro caso, además de los asteroides, obtenemos también espectros de análogos solares, de los cuales hablamos más adelante.
- **Other** Aquí podríamos situar a aquellos archivos que tienen funciones distintas a las mencionadas anteriormente, como las usadas para calibrar las imágenes por longitud de onda o por flujo y que usaremos durante el proceso de reducción.

3.2. Procesado de las imágenes

Para poder hacer uso de las imágenes mencionadas anteriormente debemos identificar si es una corrección general para todos los objetos de la noche (por las condiciones y respuesta del telescopio) o si es que las modificaciones se deben realizar de manera individual, dependiendo de la masa de aire, condiciones del cielo, etc.

De esta forma podemos separar el proceso de reducción en dos partes, los procesos que se aplican a todos los archivos de la noche y aquellos que son diferentes, dependiendo del objeto que se trate.

3.2.1. Proceso general

Cada noche de observación se deben tomar las imágenes de Bias, Flat y las lámparas de Helio-Argón para poder hacer las correcciones por noche. Además de las tomas del asteroide, se debe obtener de igual forma, capturas de los análogos solares, los cuales son propios para cada asteroide y dependen de la ubicación y las condiciones del asteroide para su asignación. Es importante seleccionar cuidadosamente el análogo solar pues es una parte crucial de la reducción y una mala toma podría alterar los resultados y su posterior clasificación.

Recorte de imágenes

El primer paso para corregir, juntar o alterar nuestros archivos es estandarizar el tamaño de ellas y más importante aún, dejar solamente aquellas partes que contienen información. Esto se puede hacer desde Pyraf usando la opción *Trimsec* de la función CCDPROC con la que recortaremos la parte de interés de nuestras imágenes. Para indicarle correctamente los márgenes a utilizar,

podemos usar la función *implot* en la que aparecerá una gráfica donde podremos identificar fácilmente las partes que contienen información. Es importante mencionar que, si bien, se puede hacer el proceso individualmente, resulta más eficiente crear un archivo que contenga los nombres de los archivos de interés, de esta manera se podrá hacer el recorte a todas las imágenes en un sólo paso.

Otra herramienta que puede ser útil en esta parte y en el procedimiento en general es el software SAO Image DS9 que sirve para visualizar imágenes astronómicas, con lo cual es posible realizar un estudio más dinámico, al poder visualizar los archivos en dos dimensiones, teniendo la opción de resaltar partes o superponer imágenes, la revisión de nuestros archivos resulta mucho mas sencilla.

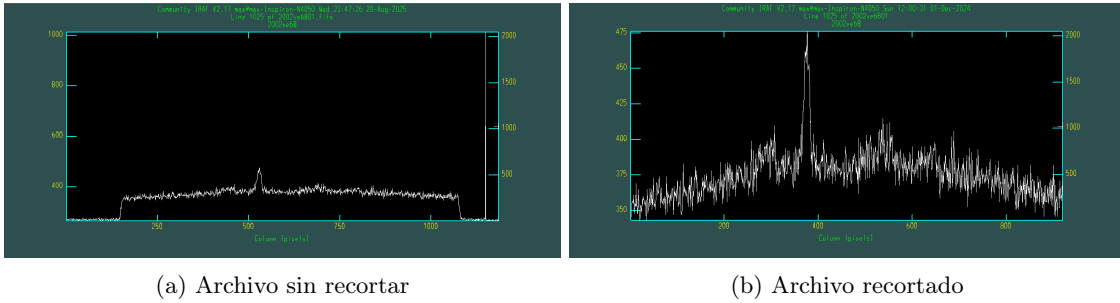


Figura 3.1: Archivos visualizados en Pyraf

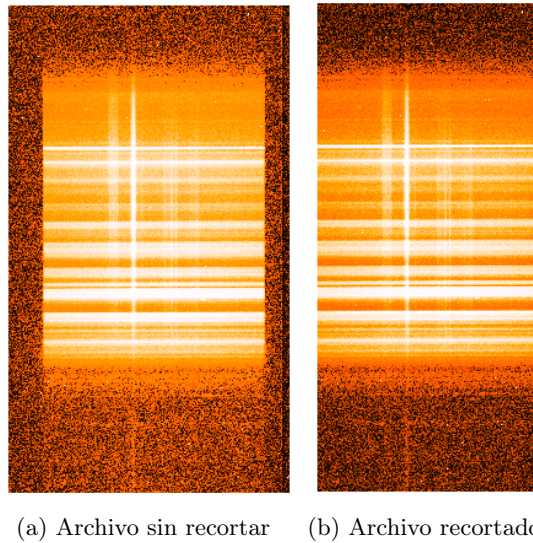


Figura 3.2: Archivos visualizados en DS9

Corrección por Bias

Para corregir el ruido electrónico de las muestras debemos combinar todos los archivos Bias.fits tomados de esa noche, generalmente se cuenta con 10 bias. Para la combinación se requiere de la función *Imcombine* con la que realizaremos una media de estas imágenes en un sólo archivo, que nos dará el ruido intrínseco de los instrumentos de medición.

Para aplicar esta corrección usamos la función *CCDPROC*, la misma que se usó en el corte pero en esta ocasión con la opción *Zerocor* la cual, aplicada a la lista, resta las aportaciones electrónicas

del detector a todas las imágenes capturadas, debemos asegurarnos que el archivo que contiene la combinación de los Bias lleve el nombre de *Zero.fits*, pues es el que tomará en cuenta para corregir.

Corrección por Flats

En esta parte usaremos los archivos *halog.fits*, obtenidos mediante la iluminación, mediante una lámpara de halógeno, en una pantalla colocada en la cúpula del telescopio, lo que nos permitirá conocer la sensibilidad de los pixeles a una misma fuente de luz. En una noche de observación se suelen obtener cinco imágenes flat (halog), con un mismo tiempo de exposición.

Lo primero que debemos hacer es obtener el promedio de las imágenes *halog.fits* de forma similar al realizado en los archivos *Bias.fits*. Este nuevo archivo lo nombraremos como *Flatmed.fits*, que nos servirá para obtener un archivo normalizado de los flats, dicho archivo se obtendrá dividiendo los archivos *Flat.fits* (con la función *Imarit*) sobre *Flatmed.fits* lo que nos dará como resultado *Flatnorm.fits*.

Con la función *illumination* en la que se hace un ajuste a las variaciones de la luz recibidas por el telescopio y que nos arrojará de vuelta la imagen *Flatillum.fits* que multiplicaremos por la imagen normalizada. El resultado final llamado *Flatfinal.fits* será usado nuevamente en la función CCDPROC en la opción *Flatcor* para aplicar las correcciones al resto de imágenes.

Lámparas de comparación

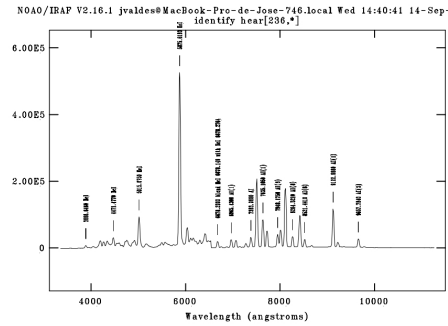
El archivo resultante de este proceso nos servirá de forma general para cada objeto de la noche, sin embargo, nos servirá para examinar individualmente cada objeto observado y análogo solar.

Para obtener las lámparas de comparación se utilizan imágenes de lámparas de Helio, Argón o Neón obtenidas con diferentes tiempos de exposición, generalmente se les denomina *Hear.fits*. A diferencia de los casos anteriores no se promediarán las imágenes sino que se crea una nueva, la cual estará compuesta de un par de estos archivos, asegurándonos que el nivel de intensidad lumínica no esté cerca de las 60,000 cuentas, ya que cerca de este nivel las imágenes se saturan, en particular en el máximo de las líneas, lo que las inutiliza para ser procesadas al ya tener información sobre la longitud de onda central de las líneas, no es útil para convertir el valor de la posición del pixel a longitud de onda.

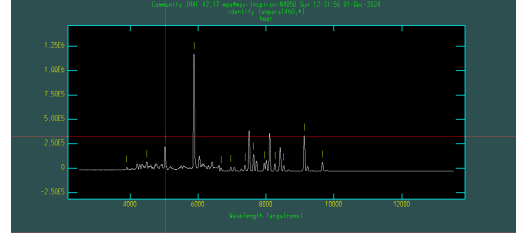
Para obtener nuestra lámpara de calibración debemos, después de identificar aquellas que no estén saturadas, usar la función *Imreplace* marcando en la lámpara de menor tiempo de exposición el punto en el que ya no presenta una buena respuesta. Esta función nos sirve para reemplazar los valores de los pixeles en una región determinada por un valor constante, es importante tomar en cuenta que no es una tarea reversible por lo que es recomendable trabajar con copias de los archivos originales.

Terminado el paso anterior debemos encontrar el valor mínimo que toman las líneas de nuestra imagen y llevarlo a cero, de esta forma estará nivelado con el otro archivo lámpara y nos permitirá unir ambas lámparas para formar la imagen final que llamaremos *Lampara.fits* y que es con la cual se calibrarán los objetos.

Para poder usar este archivo se deben identificar las líneas de emisión y guardar la información en una carpeta que se usará para calibrar en longitud de onda. Usaremos un archivo de referencia (Fig. 3.3) para la identificación de las líneas con el que manualmente se irán ajustando con la función *Identify*, una vez terminado se usará *reidentify* pues nuestro ajuste abarca de los 4000 a los 10,000 Angstroms y esta función lo extenderá para el resto de longitudes de onda y para terminar con la tarea *fitcoord* para obtener la calibración en la lámpara bidimensional.



(a) Archivo guía



(b) Archivo desplegado en Pyraf de nuestra lam-
para

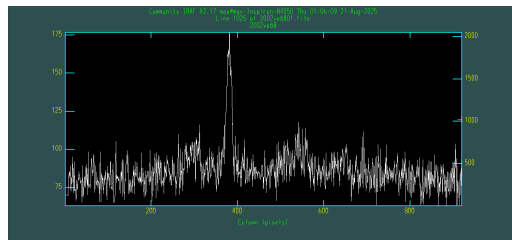
Figura 3.3: Proceso de identificación de longitudes de onda en lámparas de Helio-Argón.

3.2.2. Procesado de los objetos

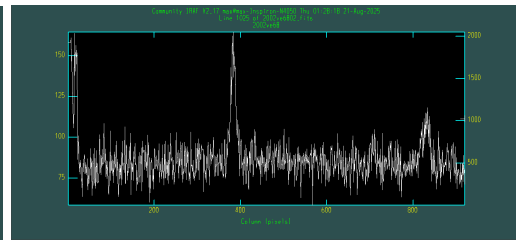
Para comenzar debemos obtener las imágenes de los asteroides previamente seleccionados, en este caso los mostrados en la Tabla 2.1, en las noches de observación se obtienen 3 espectros de cada objeto, llevando el registro en una bitácora, la cual contendrá datos relevantes para realizar adecuadamente la reducción.

Limpieza de rayos cósmicos y ruido

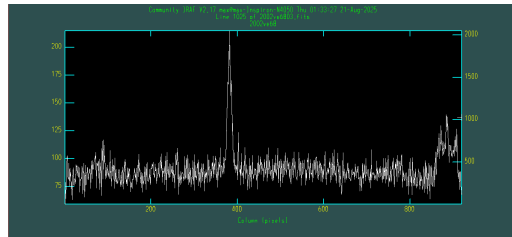
En esta primera parte debemos obtener la imagen del espectro principal del asteroide al que estemos reduciendo, la cual formaremos uniendo las observaciones que se hayan realizado en esa misma noche, para esto se deben centrar las imágenes del asteroide (usualmente son tres) tomando de referencia el pico máximo del haz del espectro, para posteriormente combinarse. De esta manera se conservará la información del objeto y eliminaremos rayos cósmicos y otras fuentes de luz que interfieran con el espectro, aunque de igual forma pueden eliminarse manualmente aquellas interferencias que persistan después de la combinación.



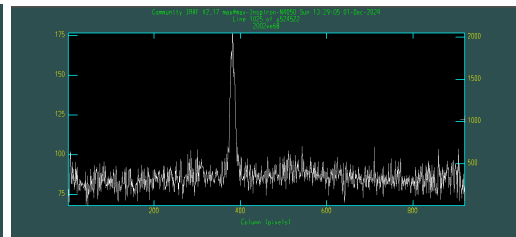
(a) Primera observación



(b) Segunda observación



(c) Tercera observación



(d) Espectro combinado

Figura 3.4: Combinación de imágenes para reducir el ruido y eliminar rayos cósmicos.

Ahora se le debe hacer un último ajuste a la imagen del asteroide, se debe modificar el encabezado para cambiar los valores de la masa de aire y el UT (que representa el tiempo de observación en el estándar de Tiempo Universal), al que cambiaremos por el de la segunda imagen obtenida en los archivos originales. El parámetro UT debe actualizarse dos veces por una cuestión de formato, por lo que se repetirá el proceso con los nuevos datos y nos dará como resultado la imagen final, que será la que se utilizará para obtener el espectro final a ser estudiado.

Calibración en longitud de onda

Para poder calibrar las imágenes de los asteroides obtenidos usaremos la función *Transform*, la cual llamará a la carpeta donde está contenida la información obtenida de la lámpara de calibración y la información del ajuste que le daremos, la carpeta es llamada *database*.

Durante el ajuste de los valores se debe examinar el tamaño de la línea para diferentes longitudes de onda, es decir, la intensidad registrada en esa parte del espectro, por lo que se tomará un tamaño de paso de 100 píxeles en los que se revisará el espectro un total de 20 veces (Empezando por el valor de 100 hasta 2000). Una vez concluido, la imagen calibrada se nombrará con el sufijo *.wc* al nombre anterior del archivo.

Sustracción del cielo y espectro unidimensional

Además de las interferencias propias de los instrumentos de medición que ya se han corregido, también debemos corregir las interferencias externas, como las de objetos cercanos o rayos cósmicos, que son las que se ajustaron en la sección anterior, sin embargo, la luz del cielo es recibida también por todo el CCD, incluyendo la zona en la que se ubica el objeto de estudio, esto es, el objeto contiene también la señal del cielo, es por esto que se corrige con la función *Background* que nos dará un archivo con extensión *.bg*

Ahora, los espectros reducidos hasta este punto, deben convertirse en archivos unidimensionales, pues los obtenidos por el telescopio son una matriz de información que para los siguientes procedimientos no nos servirá de esa forma. La función *Apall* nos generará el espectro del asteroide que ya hemos corregido y calibrado en una sola dimensión, lo que nos permitirá continuar con la obtención del espectro que se puede clasificar.

Extinción de la atmósfera y Normalización

Es necesario hacer una última corrección al espectro y esta es por extinción de la atmósfera. Cuando la luz atraviesa las diferentes capas de gas que rodean a el planeta, esta se dispersa, además de absorber algunas longitudes de onda por los elementos contenidos en ella.

Después de las correcciones al espectro nos quedará un archivo con terminación *.ext*, al cual debemos normalizar su flujo. La normalización debe hacerse a 5500 Angstroms, ya que, como se explicó en capítulos anteriores, se encuentra dentro de la región de la banda V de Johnson y es el punto donde no existe ninguna línea telúrica o banda de absorción. Una vez ubicada la longitud de onda en cuestión, revisamos el valor del espectro en ese punto (como se ve en la Figura 3.5) y posteriormente dividimos el espectro sobre este valor encontrado, de forma que la imagen normalizada tiene un valor de 1 en los 5500 Angstroms y es sobre este estándar en el que pondremos el resto de asteroides.



0

Suavizado y limpieza

Antes de asignar una clasificación a los asteroides se debe hacer una limpieza de las líneas telúricas y suavizar las líneas causadas por ruido. Las líneas telúricas son causadas por las bandas de absorción pertenecientes a los gases y partículas presentes en la atmósfera terrestre y que en los espectros aparecen como pronunciados picos que pueden estar presentes por encima, pero que usualmente podemos verlos por debajo de la curva.

Para poder corregir la presencia de líneas telúricas existen dos maneras, en este caso no se trata de tareas en Pyraf sino de comandos que pueden corregir sólo un punto del espectro o aplanar toda una sección seleccionada. Dependiendo del tamaño de la línea no corregida, es la opción que usaremos, es importante mencionar que no es recomendable usar ninguna de estas opciones en caso de presentar una gran cantidad de ruido pues pueden alterar la forma real de la curva.

Para que el ruido interfiera menos en la clasificación, así como para depurar las forma y características de espectro, se usa otro tipo de comando que reduce las fluctuaciones a lo largo de todas las longitudes de onda. Para este proceso contamos con diferentes niveles de suavizado pero es necesario utilizar el mismo para todos los espectros que se clasifiquen, pues diferentes suavizados pueden alterar la asignación de un tipo taxonómico. En la Figura 3.7 podemos ver la comparación de un espectro antes y después de este proceso.

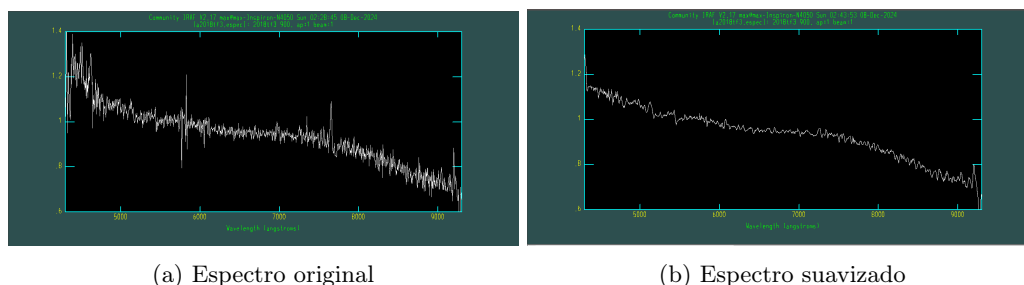


Figura 3.7: Comparación del espectro del asteroide 2018 tf3, obtenido originalmente, contra el espectro después de la limpieza y suavización.

Capítulo 4

Análisis y Resultados

En este capítulo se describe el análisis realizado con los datos obtenidos, presentamos la estadística de las clasificaciones obtenidas y llevamos a cabo una comparación con clasificaciones hechas previamente con, casi, la misma muestra de los objetos estudiados en este trabajo.

Para este análisis se tomaron en cuenta 127 objetos de los 148 iniciales debido a que algunos de los espectros se descartaron debido a diferentes motivos que se abordarán durante el capítulo.

4.1. Depuración de datos espectrales

Antes de iniciar el proceso de reducción se llevó a cabo la revisión de las bitácoras de observación para verificar que existieran imágenes correspondientes a cada uno de los objetos registrados. Luego de esta revisión preliminar, se identificaron objetos cuyas imágenes no se encontraron dentro de las carpetas del archivo de observaciones, por lo que no se cuenta con ninguna imagen con la cual trabajar, por lo que estos objetos se descartaron de nuestra muestra. Tal es el caso de **(3200) Phaethon**, **(6456) Galombek**, **(13553) Masaakikoyar** y **(275611) 1999 XX262**, para los cuales no tenemos mayor información, sólo que se anotaron en las bitácoras como observados. Además, en el caso del objeto **(7977) 1977 QQ5**, que también se encuentra en la bitácora, los espectros no corresponden a los de un asteroide, por lo que probablemente se trata de otro tipo de objeto observado, por error, en lugar del que se había planificado.

Previo al proceso de clasificación se determina la calidad de los espectros obtenidos. Para aquellos que poseen una calidad de media a baja, se hace una revisión de los archivos capturados en la observación, es decir, las tres o cuatro imágenes tomadas del asteroide. Si durante esta revisión se encuentra que todas las imágenes poseen una baja señal en relación del ruido, se descarta por completo dicho objeto. Si una o dos de las imágenes del objeto tienen buena señal, sólo se usan éstas, en lugar de unir todas las imágenes capturadas, limpiando manualmente rayos cósmicos que pudieran interferir, obteniendo así una mejor señal en comparación a la primera reducción.

Encontramos que los objetos que se encuentran en la primera situación, los que presentan alto nivel de ruido o muy baja señal, son **(4596) 1981 QB**, **(7336) Saunders**, **(31210) 1998 BX7**, **(54401) 2000 LM**, **(68950) 2002 Qf15**, **(88254) 2001 FM129**, **(90403) 2003 YE45**, **(142040) 2002 QE 15**, **144898) 2004 VD17**, **(220909) 2005 EO1**, **(265661) 2005 UB**, **(419880) 2011 AH37**, **(448818) 2011 UU20** para los cuales no fue posible obtener un espectro reducido de buena calidad.

Para los objetos **(35107) 1991 VH**, **(85628) 1998 KV2**, **(136923) 1998 JH2**, **(243025) 2006 UM216**, **(248926) 2006 WZ2**, se utilizaron sólo algunas de las imágenes capturadas, como se mencionó anteriormente. Para **1998 KV2** y **2006 WZ2** se logró obtener un espectro de calidad suficiente, descartando el resto de estos objetos, al no poder obtener un espectro de buena calidad.

Cabe mencionar que de los asteroides anteriormente mencionados, el objeto **2002 Qf15**, es el observado el 18 de Junio de 2018, **1999 XX262** pertenece a la noche del 13 de Abril de 2019 y el objeto **2006 UM216** es el observado el 24 de Enero de 2020, ya que estos objetos fueron observados en diferentes fechas, pero en el caso del otro objeto anteriormente mencionado, sí fue posible conseguirse buen resultado.

De esta, forma obtenemos un total de 21 asteroides descartados, cuyos espectros no se han podido clasificar, o ni siquiera obtener,. De ellos, 17 tienen una calidad demasiado baja, 3 que no se encuentran en las carpetas y un objeto que no es el mencionado en la correspondiente bitácora.

En la tabla 4.1 se listan los objetos descartados y la razón por la que se descartaron.

Objeto	Razón para descartar
(3200) Phaethon	Archivo no localizado
(4596) 1981 QB	Mala calidad
(6456) Galombek	Archivo no localizado
(7336) Saunders	Mala calidad
(7977) 1977 QQ5	No es un asteroide
(13553) Masaakikoyar	Archivo no localizado
(31210) 1998 BX7	Mala calidad
(35107) 1991 VH	Mala calidad
(54401) 2000 LM	Mala calidad
(68950) 2002 Qf15	Mala calidad
(88254) 2001 FM129	Mala calidad
(90403) 2003 YE45	Mala calidad
(136923) 1998 JH2	Mala calidad
(142040) 2002 QE15	Mala calidad
(144898) 2004 VD17	Mala calidad
(220909) 2005 EO1	Mala calidad
(243025) 2006 UM216	Mala calidad
(265661) 2005 UB	Mala calidad
(275611) 1999 XX262	Archivo no localizado
(419880) 2011 AH37	Mala calidad
(448818) 2011 UU20	Mala calidad

Tabla 4.1: Objetos descartados de las temporadas de observación

4.2. Clasificación taxonómica

4.2.1. Cálculo de la distancia espectral

El método de clasificación que usaremos es a través de la distancia espectral, que consiste en calcular la diferencia punto a punto de un espectro respecto a otro, esto nos dejará saber que tan similar o diferentes son estos dos espectros entre si.

Haciendo uso del catalogo SMASS-II, el cual contiene 1447 espectros de referencia para las diferentes clases taxonómicas, podemos comparar los espectros reducidos de nuestras observaciones con cada una de los registrados en esta base de datos, asignándole el tipo taxonómico con el que presente la menor diferencia.

Esta comparación se basa en el principio de la distancia euclidiana, la cual no es más que la distancia cuadrática entre dos puntos, que en nuestro caso estaríamos comparando la intensidad por longitud de onda en ambos espectros, de aquí que sea importante la normalización del flujo.

A continuación se muestra el calculo necesario para obtener esta diferencia.

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^k (X_i - Y_i)^2} \quad (4.1)$$

Podemos usar esta expresión para la distancia espectral si tomamos D como la distancia entre ambos puntos, K siendo el número de puntos que toma en los espectros y los puntos X y Y como los puntos de la base de datos y nuestro objeto, respectivamente.

4.2.2. Asignación de clase

Tomando en cuenta los 1447 asteroides clasificados en el SMASS-II, se hace la prueba de la distancia espectral con cada uno de ellos mediante un programa diseñado en Python por Buendía [2], dicho programa toma en cuenta el tipo más frecuente entre las menores distancias espectrales y será éste el que recibirá el asteroide que estamos analizando, además de calcular la función de peso.

Para entender la función de peso debemos definir primero el peso, el cual se refiere a la importancia del tipo taxonómico, tanto por la frecuencia con la que aparezca, como en la ponderación de la clase, conociendo este valor podemos realizar una normalización a cada uno de los pesos mediante la expresión 4.2.

$$Fp_i = \frac{P_i}{\sum_{j=1}^N P_j} \quad (4.2)$$

Esto se conoce como Función de Peso, donde P_i es el valor del peso de una de las clasificaciones encontradas dentro de las menores distancias espectrales y P_j es la suma de todas las clasificaciones presentes, de esta forma tendremos que el valor máximo posible será **1** para el caso en el que todos los espectros considerados pertenezcan a la misma clase, de esta forma a nuestro espectro se le asignará el que posea el mayor valor en su función de peso.

La muestra de objetos que se toma para clasificar a los espectros reducidos es de tres tamaños diferentes, siendo de 10, 30 y 50 objetos con las distancias mínimas. De esta forma podemos probar la consistencia y fiabilidad de los resultados pues al ir variando este valor, la clasificación asignada no debería cambiar.

En el caso de que se obtuvieran los mismos valores para dos clases distintas, se debe utilizar el albedo geométrico para darle prioridad a alguna de las clasificaciones empatadas.

Entendemos el albedo geométrico como la cantidad de luz reflejada respecto de la cantidad incidente sobre un cuerpo, este valor depende las características de la superficie y posee un rango específico para los diferentes tipos taxonómicos con los que podemos clasificar un asteroide.

4.3. Clasificaciones encontradas

En la Tabla 4.2 están listados los objetos que se encontró una clasificación, para los cuales se les asignó un tipo taxonómico con valores de k de 10, 30 y 50, además de incluir la función de peso, tomando esto en cuenta, se propone una clasificación final para el asteroide estudiado.

Clasificaciones								
No.Asteroide	Nombre	k=10	FP	k=30	FP	k=50	FP	Clas. Propuesta
a000719	Albert	O	0.97	O	0.54	Q	0.38	O
a001864	Daedalus	A	0.89	A	0.71	A	0.53	A
a001865	Cerberus	Ld	0.96	Ld	0.83	Ld	0.63	Ld
a001866	Sisyphus	Sl	0.97	Sl	0.78	Sl	0.71	Sl
a001981	MIDAS	V	1	V	0.99	V	0.87	V

Análisis y Resultados
4.3 Clasificaciones encontradas

Clasificaciones								
No.Asteroides	Nombre	k=10	FP	k=30	FP	k=50	FP	Clas. Propuesta
a002059	Baboquivari	Sq	0.99	Sq	1	Sq	0.97	Sq
a002061	Anza	Sq	0.46	Sq	0.62	Sq	0.76	Sq
a002368	Beltrovata	Ld	0.54	Ld	0.44	A	0.36	Ld
a004954	Eric	Sa	0.95	Sa	0.89	Sa	0.76	Sa
a005131	1990 BG	Cg	0.54	Cg	0.55	Cg	0.36	Cg
a005693	1993 EA	Sr	0.84	S	0.63	S	0.61	S
a006053	1993 BW3	Sr	0.75	Sr	0.74	Sr	0.59	-
a006053	1993BW3	S	1	S	1	S	1	S
a006063	Jason	S	1	S	0.99	S	0.99	S
a006178	1986 DA	T	0.9	T	0.83	T	0.73	T
a007889	1994 Lx	V	1	V	0.97	V	0.88	V
a008037	1993 HO1	L	0.99	L	0.98	L	0.9	L
a008567	1996 HW1	D	0.74	T	0.43	T	0.42	-
a008567	1996 HW1	S	1	S	0.97	S	0.94	S
a009856	1991 EE	Q	0.84	Q	0.74	Q	0.56	Q
a012711	Tukmit	S	1	S	1	S	1	S
a014402	1991DB	O	0.85	O	0.64	O	0.52	O
a015745	Yuliya	Sa	0.85	Sa	0.8	Sa	0.6	Sa
a017182	1999 VU	B	0.91	B	0.87	B	0.85	B
a017511	1992 QN	B	0.97	B	0.77	B	0.63	B
a018109	2000 NG11	Xk	0.78	Xk	0.81	Xk	0.81	Xk
a018172	2000 QL7	Sa	0.98	Sa	0.95	Sa	0.82	Sa
a018736	1998 NU	Sq	1	Sq	0.88	Sq	0.76	Sq
a021374	1997 WS22	D	0.87	D	0.49	L	0.34	D
a031345	1998 PG	S	1	S	1	S	1	S
a040267	1999 GJ4	O	0.98	O	0.55	Q	0.36	O
a053110	1999 AR7	C	0.97	C	0.86	C	0.73	C
a054660	2000 UJ1	S	0.87	S	0.79	S	0.82	S
a065679	1989 UQ	B	0.97	B	0.92	B	0.89	B
a065733	1993 PC	C	0.96	C	0.64	C	0.48	C
a066391	Moshup	O	0.84	Q	0.51	Q	0.52	-
a066391	Moshup	O	0.85	Q	0.55	Q	0.52	-
a066391	Moshup	O	0.99	O	0.72	O	0.47	O
a068347	2001 KB67	S	1	S	1	S	1	S
a068950	2002 Qf15	Ld	0.81	Ld	0.65	Ld	0.53	Ld
a085628	1998 KV2	Sq	0.96	Sq	0.99	Sq	0.98	Sq
a085953	1999 FK21	Sq	0.58	Sq	0.72	Sq	0.73	Sq
a085989	1999 JD6	Cg	0.44	Xk	0.31	Xk	0.31	Xk
a088263	2001 KQ1	Cgh	0.94	Cgh	0.8	Cgh	0.57	Cgh
a096315	1997 AP10	A	0.9	A	0.84	A	0.6	A
a096590	1998 XB	Sr	0.65	Sq	0.52	Sq	0.56	Sq
a096631	1999 FP59	Sk	0.93	Sk	0.78	Sk	0.65	Sk
a099248	2001 KY66	Xc	0.36	X	0.59	X	0.46	X
a099907	1989 VA	Cg	0.51	Cg	0.38	Cg	0.35	Cg
a103067	1999 XA143	Sl	0.94	Sl	0.91	Sl	0.88	Sl
a112221	2002 KH4	O	0.78	O	0.46	Q	0.43	Q
a115052	2003 RD6	Sq	0.53	Sq	0.59	Sq	0.61	Sq
a137062	1998 WM	Sr	0.96	Sr	0.76	Sr	0.66	Sr

Análisis y Resultados
4.3 Clasificaciones encontradas

Clasificaciones								
No.Asteroide	Nombre	k=10	FP	k=30	FP	k=50	FP	Clas. Propuesta
a137170	1999 HF1	C	0.68	C	0.72	C	0.8	C
a137199	1999 KX4	Sq	0.97	Sq	0.88	Sq	0.85	Sq
a137805	1999 YK5	B	1	B	0.99	B	0.99	B
a138847	2000 VE62	S	1	S	1	S	1	S
a139345	2001 KA67	C	0.66	C	0.77	C	0.79	C
a140158	2001 SX169	B	0.99	B	0.97	B	0.93	B
a141079	2001 XS30	Sa	0.52	Sa	0.66	Sa	0.7	Sa
a141525	2002 FV5	O	0.84	Q	0.5	Q	0.55	Q
a141593	2002 HK12	Xc	0.89	X	0.7	X	0.81	X
a142464	2002 TC9	O	0.98	O	0.63	O	0.48	O
a143992	2004AF	A	0.72	A	0.5	Sa	0.47	A
a144332	2004 DV24	S	0.63	S	0.38	S	0.49	S
a152931	2000 EA107	S	0.78	S	0.85	S	0.83	S
a153814	2001 WN5	X	0.86	X	0.7	X	0.67	X
a153957	2002 AB29	R	0.75	Sr	0.57	Sr	0.57	Sr
a159686	2002 LB6	Sq	0.96	Sq	0.99	Sq	0.97	Sq
a162004	1991 VE	Cgh	0.77	Ch	0.71	Ch	0.78	Ch
a162082	1998 HL1	Sr	0.87	Sq	0.46	Sq	0.52	Sq
a162723	2000 VM2	Q	0.86	Q	0.67	Q	0.59	Q
a163691	2003BB43	Cg	0.58	Cg	0.53	Cg	0.43	Cg
a163696	2003 EB50	V	0.95	V	0.76	V	0.75	V
a163899	2003 SD220	Sa	0.54	Sa	0.66	Sa	0.53	Sa
a184990	2006 KE89	Q	0.5	Sq	0.68	Sq	0.77	Sq
a190208	2006 AQ	B	0.97	B	0.85	B	0.8	B
a192563	1998 WZ6	S	0.65	S	0.84	S	0.89	S
a208023	1999AQ10	Ld	0.97	Ld	0.8	Ld	0.56	Ld
a212359	2006 EV52	S	1	S	1	S	0.97	S
a220839	2004 VA	B	0.56	B	0.55	B	0.62	B
a243025	2006 UM216	S	0.9	S	0.86	S	0.89	S
a248926	2006 WZ2	B	0.86	B	0.8	B	0.72	B
a259802	2004 BJ86	Xk	0.77	Xk	0.65	Xk	0.65	Xk
a265196	2004BW58	Cg	0.91	Cg	0.71	Cg	0.5	Cg
a265962	2006 CG	C	0.64	C	0.55	C	0.44	C
a275611	1999XX262	B	0.87	B	0.9	B	0.85	B
a276033	2002 AJ129	O	0.98	O	0.79	O	0.53	O
a311044	2004 BB103	S	0.9	S	0.95	S	0.89	S
a326291	1998 HM3	S	1	S	1	S	1	S
a326388	2001 QD96	X	0.85	X	0.93	X	0.92	X
a333555	2005 VY17	Sl	0.7	Sl	0.65	Sl	0.54	Sl
a333888	1998 ST4	X	0.63	X	0.49	X	0.47	X
a337084	1998 SE36	Ld	0.31	L	0.32	L	0.45	L
a338292	2002 UA31	O	0.96	O	0.6	Q	0.47	O
a349928	2009 WD106	Sk	0.49	S	0.7	S	0.8	S
a354030	2001 RB18	B	0.94	B	0.92	B	0.87	B
a381677	2009 BJ81	Q	0.5	Q	0.5	Q	0.46	Q
a395289	2011 BJ2	Cg	0.81	Cg	0.4	X	0.34	Cg
a411201	2010 LJ14	B	1	B	0.99	B	0.99	B
a416584	2004 JB12	Ld	0.95	Ld	0.82	Ld	0.62	Ld

Clasificaciones								
No.Asteroide	Nombre	k=10	FP	k=30	FP	k=50	FP	Clas. Propuesta
a437316	2013 OS3	T	0.76	T	0.54	T	0.37	T
a438429	2006 WN1	Xc	0.59	Xc	0.5	X	0.41	Xc
a441987	2010 NY65	Sl	0.83	Sl	0.8	Sl	0.7	Sl
a442742	2012 WP3	Ch	0.74	Ch	0.63	Ch	0.51	Ch
a443923	2002 RU25	Xk	0.63	Xk	0.73	Xk	0.73	Xk
a444193	2005 SE71	S	0.84	S	0.92	S	0.86	S
a444584	2006 UK	O	0.91	O	0.53	Q	0.45	O
a454177	2013 GJ35	V	0.53	V	0.6	V	0.68	V
a455176	1999 VF22	B	0.99	B	0.99	B	0.96	B
a455550	2004 JO2	Sq	0.71	Sq	0.91	Sq	0.91	Sq
a457260	2008 RY24	Sq	0.97	Sq	0.92	Sq	0.93	Sq
a457768	2009 KN4	O	0.98	O	0.72	O	0.49	O
a467309	1996 AW1	Xk	0.64	Xk	0.44	Xk	0.46	Xk
a468481	2004 TP20	Q	0.92	Q	0.62	Q	0.39	Q
a475967	2007JF22	Cb	0.88	Cb	0.73	Cb	0.55	Cb
a481394	2006 SF6	Q	0.6	Q	0.71	Q	0.54	Q
a489486	2007 GS3	B	0.98	B	0.91	B	0.76	B
a494999	2010 JU39	Sr	0.55	Sr	0.49	Sr	0.4	Sr
a512245	2016 AU8	O	0.97	O	0.58	Q	0.46	O
a518635	2008 HO3	Cgh	0.5	Cgh	0.5	Cgh	0.45	Cgh
a524522	2002 VE68	Xk	0.55	Xk	0.49	X	0.52	Xk
	2018 LK	V	0.7	V	0.63	V	0.65	V
	2018 RQ2	Ld	0.92	Ld	0.71	Ld	0.56	Ld
	2018 TF3	K	0.99	K	0.97	K	0.93	K
	2018 UQ1	Sl	0.67	Sl	0.71	Sl	0.68	Sl
	2018CB	K	0.9	K	0.84	K	0.76	K

Tabla 4.2: Clasificación de los asteroides a diferentes K con menores distancias espectrales, con su respectiva función de peso, además de la clasificación final propuesta.

4.4. Discusión de los tipos taxonómicos

4.4.1. Clasificaciones obtenidas a diferente muestra de comparación

La clase asignada a los espectros puede tener variaciones al tomar una mayor cantidad de espectros de comparación, ya que podemos encontrar que alguna otra clase está presente más frecuentemente en esta nueva muestra, de esta forma podemos tener por ejemplo que al tomar $k=10$ el tipo taxonómico más frecuente sea **S** pues aparece en 6 de las 10 menores distancias espectrales, sin embargo, al cambiar a $k=30$ vemos que ahora son 10 en **S** pero aparecen 11 en **Sr** por lo que en este caso el tipo asignado cambiará.

En estos casos también cambia la función de Peso pues la proporción de las clasificaciones y su correspondiente peso varían, siendo las primeras 10 las más confiables pues son las que tienen una distancia espectral más pequeña y por lo tanto son los espectros más parecidos, por lo que es en este intervalo donde mayor peso tiene.

Al clasificar los 127 espectros obtenidos se encontró que en 28 de estos la taxonomía cambia al variar K y en 5 de estos también varía el complejo correspondiente.

El cambio de complejo puede deberse a diferentes motivos, uno de los más habituales es el ruido presente en los espectros, ya que esto cambia drásticamente los valores de un punto a otro y debido a que es ruido intrínseco a la observación, este no puede limpiarse sin el riesgo de alterar

la pendiente propia del asteroide. Es por esta variabilidad que si tomamos un mayor intervalo de distancias espectrales la clasificación puede cambiar, incluso de complejo.

En la Figura 4.1c podemos ver la comparación en la cantidad de cada tipo taxonómico para los tres diferentes intervalos de comparación, si bien la distribución no cambia, en el sentido de que el complejo predominante es **S**, seguido del grupo de los Otros, y siendo menos presentes los complejos **C** y **X** en ese orden, la cantidad encontrada para varias de las clasificaciones son diferentes.

Encontramos que la mayoría de los tipos presentan variaciones, en el caso de solamente ocho de los tipos no se altera el valor para ninguna de estas, las cuales son **C**, **Cb**, **B**, **Sl**, **Xe**, **A**, **K** y **V**.

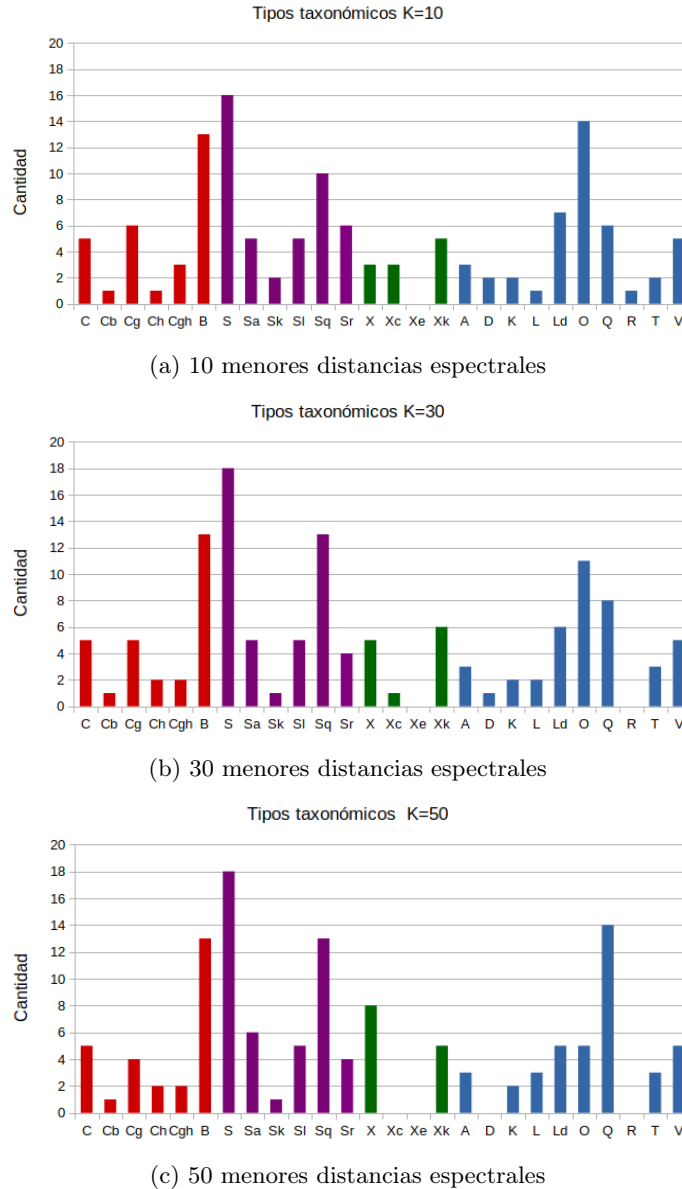


Figura 4.1: Todos los tipos taxonómicos encontrados

Podemos observar en la Tabla 4.3 que la cantidad de espectros por complejo es de igual forma cambiante, sin embargo, la proporción de los complejos se mantiene. El grupo **S** es el más predominante, a medida que aumentamos K más espectros se integran dentro de este, de forma contraria los Otros, siendo el segundo más presente y disminuyendo su cantidad. El complejo **X** también se ve beneficiado por el aumento en K pero siguiendo por debajo de el complejo **C** a pesar de que este último disminuye.

Complejo	K=10	K=30	K=50
S	44	46	47
C	29	28	27
X	11	12	13
Otros	43	41	40

Tabla 4.3: Cantidad de espectros encontrados dentro de los distintos complejos

A continuación se muestran las gráficas de los complejos encontrados para los espectros reducidos, donde se aprecia de forma más visible las características antes descritas.

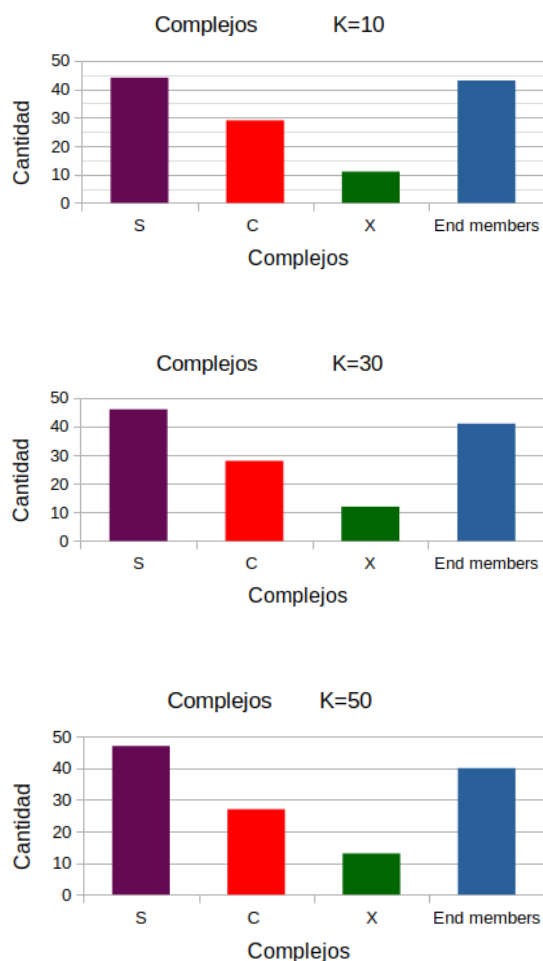


Figura 4.2: Tipos taxonómicos agrupados por complejos

De igual forma tenemos las estadística por cada complejo, donde podemos observar los cambios para cada clasificación de forma más clara, notando que varias clasificaciones no son asignadas a ningún espectro para $K=50$ pues aparecen con un valor de cero en las gráficas, estos son los casos de **Xc**, **D** y **R**, omitiendo el caso de **Xe** el cual no aparece en ninguna de las gráficas. Terminando con las gráficas que muestran los tres valores de K de forma simultanea.

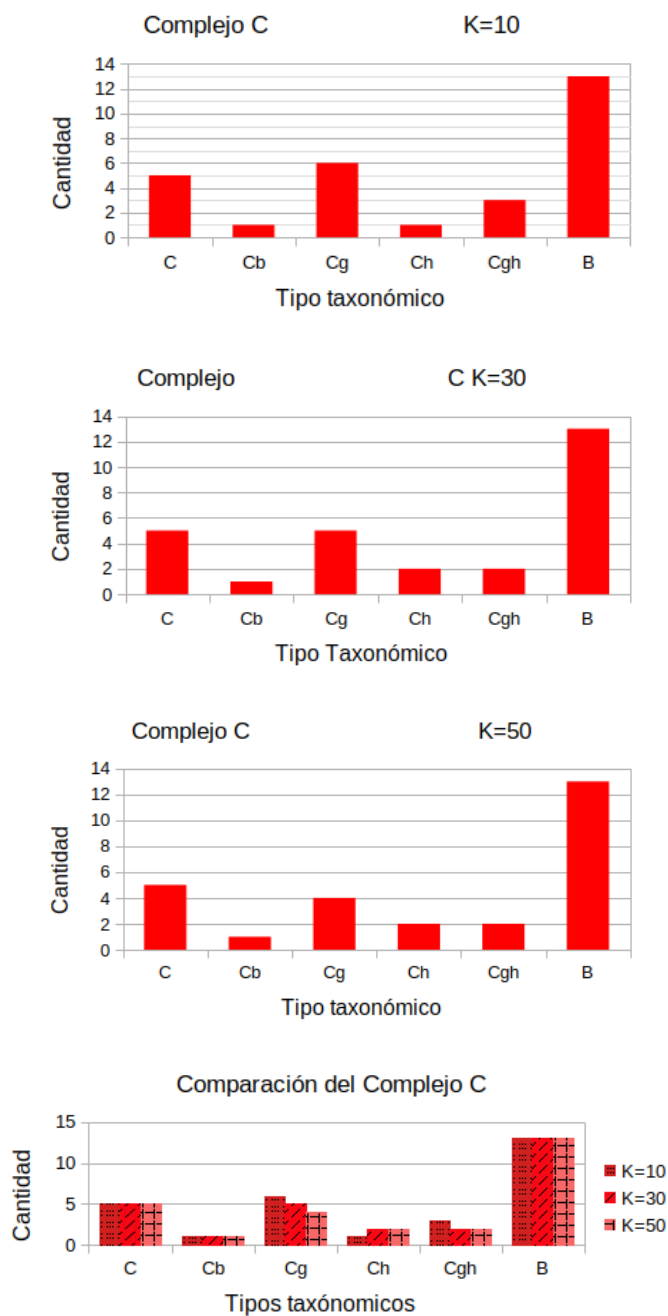


Figura 4.3: Tipos taxonómicos del complejo C

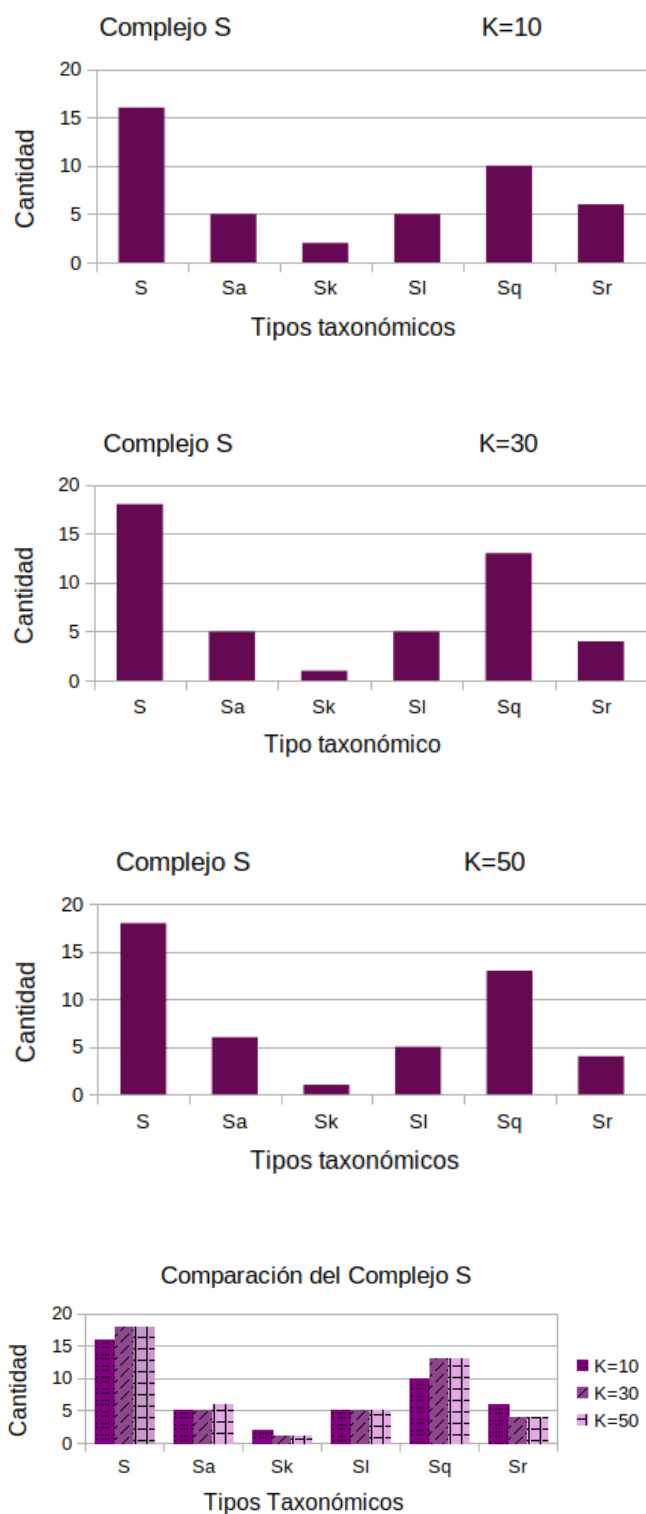


Figura 4.4: Tipos taxonómicos del complejo S

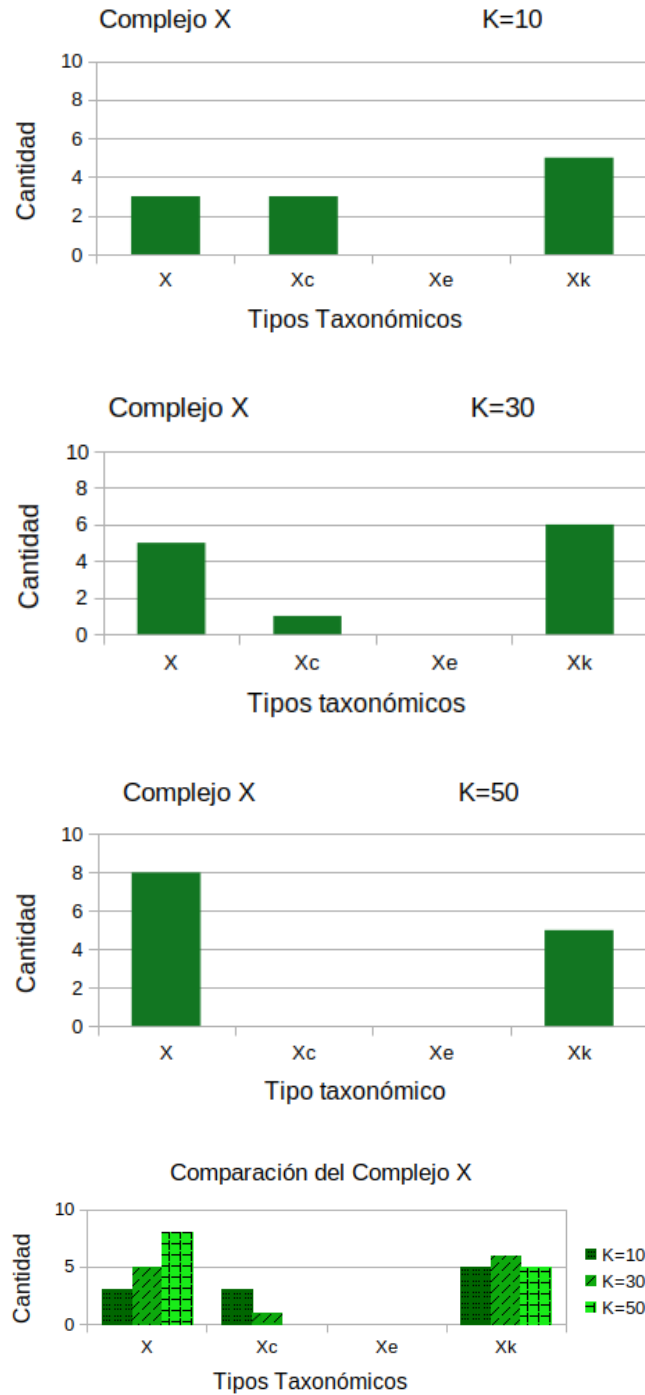


Figura 4.5: Tipos taxonómicos del complejo X

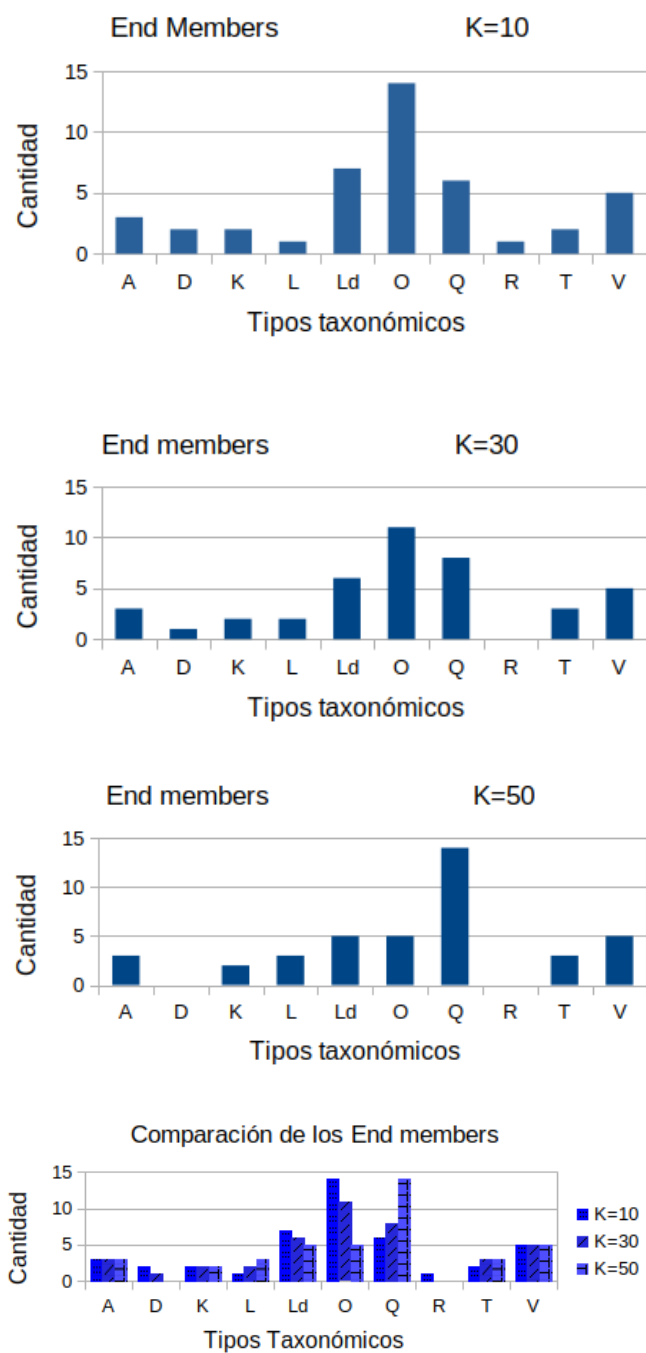


Figura 4.6: Tipos taxonómicos de los Otros

4.4.2. Clasificación final propuesta

Para determinar la clasificación final propuesta debemos basarnos en los datos obtenidos anteriormente y los criterios mencionados.

En la Tabla 4.2, además de observar las clasificaciones podemos notar que algunas de ellas varían cuando aumentamos K, cambiando incluso de un complejo a otro. En estos casos tomaremos en cuenta si es que se repite el tipo taxonómico asignado y cuales son las que tienen un mayor valor en su función de peso. Encontramos que un total de 28 espectros cambian su clasificación de esta manera, siendo solamente cinco de ellos los que varían respecto a complejo.

Revisando primero los de este grupo, encontramos que el objeto **(143992) 2004 AF**, el cual tiene asignado el tipo A para las dos primeras pruebas y tipo Sa para K=50, en este caso tomaremos la clasificación final como aquella que se repite, es decir **A**, siendo la de mayor peso.

En el caso de **(153957) 2002 AB29** sucede el caso contrario, pues es durante la primera prueba (K=10) se le asignó el tipo **R**, en cambio en las dos restantes se le pudo asignar **Sr** y fue este el que se le dió como clasificación final.

De forma parecida **(184990) 2006 KE89** obteniendo primero **Q** a K=10 y **Sq** para el resto y como clasificación final.

También tenemos a **(395289) 2011 BJ2** el cual para los dos primeros valores de K pudo clasificarse como **Cg**, sin embargo, para la tercer clasificación obtenemos **X**, clasificando al objeto de forma final como **Cg**.

Finalmente está el objeto **(85989) 1999 JD6** el cual se clasifica primero como **Cg** para después tener las otras dos en **Xk**, siendo ésta la final propuesta.

Clave	Nombre	K=10	FP	K=30	FP	K=50	FP	Clas. Propuesta
143992	2004AF	A	0.72	A	0.5	Sa	0.47	A
a153957	2002 AB29	R	0.75	Sr	0.57	Sr	0.57	Sr
a184990	2006 KE89	Q	0.5	Sq	0.68	Sq	0.77	Sq
a395289	2011 BJ2	Cg	0.81	Cg	0.4	X	0.34	Cg
a085989	1999 JD6	Cg	0.44	Xk	0.31	Xk	0.31	Xk

Tabla 4.4: Espectros con Taxonomía variante en complejos.

Además de la variación de complejo, también es necesario revisar aquellos objetos que se observaron en más de una noche, pues las clasificaciones obtenidas para un mismo objeto resultan útiles para determinar una clasificación final.

De la muestra original de objetos encontramos que seis de estos fueron observados en más de una ocasión, tres de estos no pudieron obtener una segunda clasificación como se explicó a principios de este capítulo, así que determinaremos una clasificación para el resto.

El primero es el objeto **(6053) 1993 BW3** observado el 22 de septiembre de 2017, fecha en que el espectro obtenido se clasificó uniformemente para los tres valores como **Sr**, observado también el 9 de febrero de 2018 en esta ocasión la clasificación obtenida fue **S**, igualmente obtenida en las tres ocasiones.

Para determinar la clasificación de este objeto nos fijaremos en la Función de Peso, la cual es mayor en la segunda observación pues en esta alcanza su valor máximo como podemos ver en la Tabla 4.5 por lo que el tipo propuesto para este objeto será **S**.

Fecha	K=10	FP	K=30	FP	K=50	FP
09/22/2017	Sr	0.75	Sr	0.74	Sr	0.59
02/09/2018	S	1	S	1	S	1

Tabla 4.5: Clasificaciones del objeto 1993 BW3.

Podemos ver en la Figura 4.7 la diferencia entre las pendientes de los espectros obtenidos. [22]

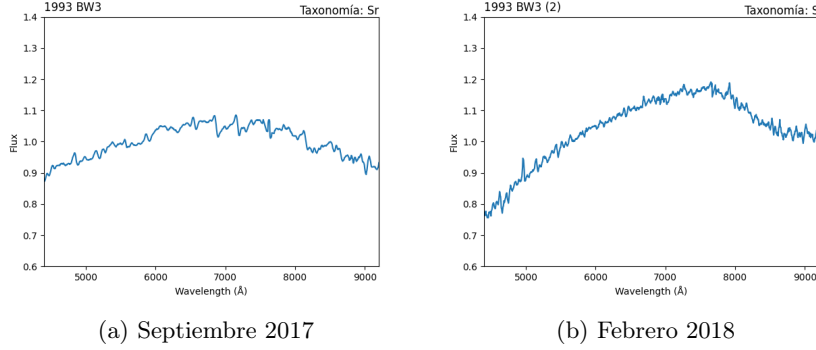


Figura 4.7: Espectros obtenidos del objeto 1993 BW3

El objeto **(8567) 1996 HW1** fue observado por dos días consecutivos, el 7 de Febrero y el 8 de Febrero de 2018, sin embargo, sus espectros obtenidos y respectiva clasificación son notablemente diferentes. La observación realizada el día 8 parece ser más estable obteniendo una clasificación de **S** con un alto valor en la función de peso en las tres pruebas realizadas, pero para las observaciones del día 7 no solo aparece una clasificación diferente, si no que ahora se ubica en un complejo diferente, siendo para $k=10$ la clasificación **D** y de clasificación **T** para los otros dos.

Vemos en la tabla 4.6 que en la primera fecha las funciones de peso se ven considerablemente reducidas en comparación con las de la otra fecha, además revisando la bitácora de esa noche se hizo la anotación de que las imágenes capturadas presentaban interferencias de otras fuentes de luz por lo que no es muy confiable. Por los motivos antes mencionados es que este objeto recibe una clasificación final de **S**.

Fecha	K=10	FP	K=30	FP	K=50	FP
02/07/2018	D	0.74	T	0.43	T	0.42
02/08/2018	S	1	S	0.97	S	0.94

Tabla 4.6: Clasificaciones del objeto 1996 HW1.

Vemos en la Figura 4.8 que el cambio de un espectro a otro es notorio, no solo el cambio en la pendiente si no que el primer espectro es bastante más ruidoso, reduciendo así su confiabilidad.

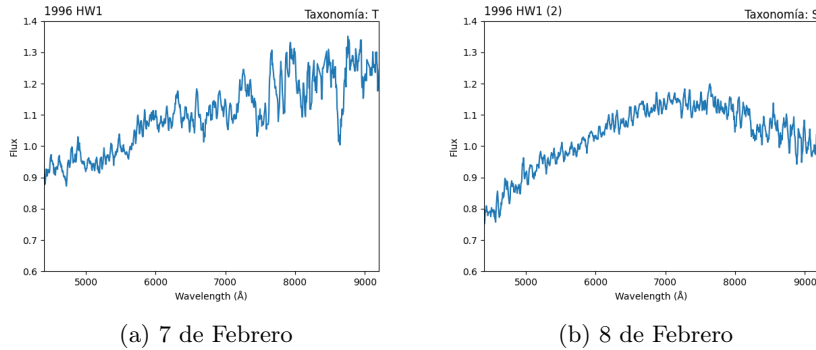


Figura 4.8: Espectros obtenidos del objeto 1996 HW1

Por último tenemos a **(66391) Moshup** el cual a diferencia del resto fue observado en tres momentos diferentes, el 30 de Mayo de 2017, el 2 de Junio de 2017 y el 27 de Mayo de 2019.

Afortunadamente este objeto no presenta una gran variación pues aunque cambia la clasificación dada de los espectros, ninguna de las encontradas cambia en su complejo, siendo todos parte de los Otros. Las dos primeras observaciones son casos muy parecidos, ambos presentan una primera clasificación de **O** para el primer valor de K, cambiando para K con valor de 30 y 50 clasificándose como **Q**. El tercer momento nos presenta un espectro más estable que obtiene una clasificación de **O** en las tres pruebas realizadas.

Para poder proponer una clasificación final tenemos que fijarnos en la función de peso, que como vemos en la Tabla 4.7 los valores para los primeros objetos son mayores en la clasificación **O** y reduciéndose para **Q**, tomando en cuenta que el tercer objeto tiene un valor más alto podemos decir que lo más adecuado es dejar a este objeto con una clasificación final **O**.

Fecha	K=10	FP	K=30	FP	K=50	FP
05/30/2017	O	0.84	Q	0.51	Q	0.52
06/02/2017	O	0.85	Q	0.55	Q	0.52
05/27/2019	O	0.99	O	0.72	O	0.47

Tabla 4.7: Clasificaciones del objeto Moshup.

En la siguiente figura podemos ver los tres espectros obtenidos pertenecientes a este objeto.

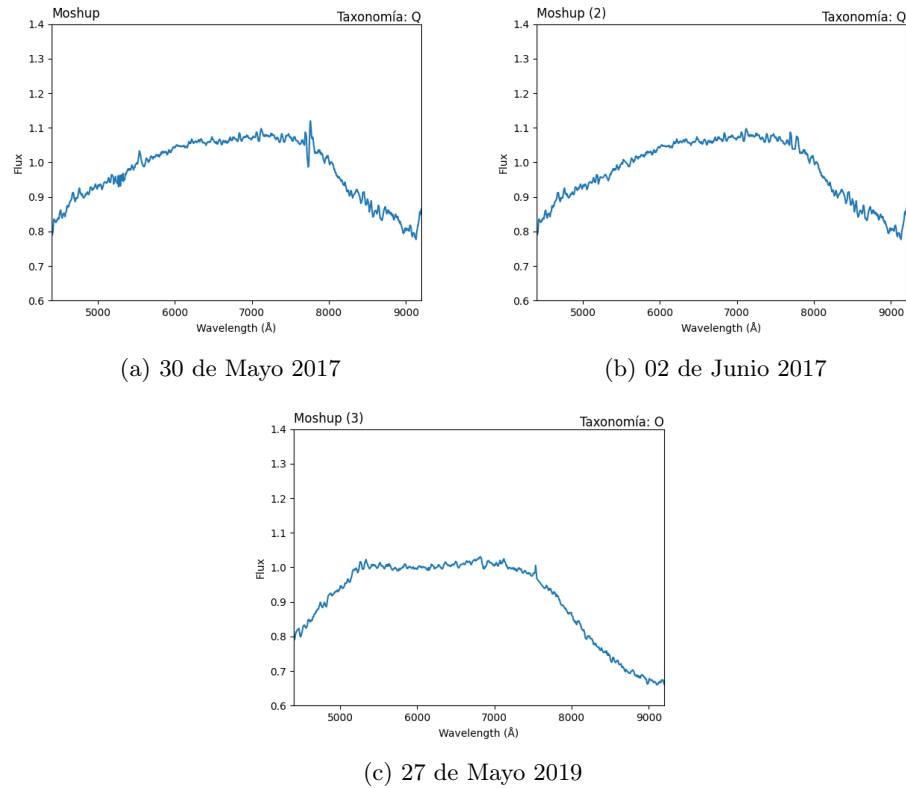


Figura 4.9: Espectros obtenidos del objeto Moshup

Después de obtener las clasificaciones finales para objetos repetidos, queda un conteo final de 123 objetos con clasificación propuesta.

En la Tabla 4.8 podemos observar el conteo final de cada clasificación, así como en la Tabla 4.9 la distribución final de los complejos, podemos notar que los cambios no son significativos respecto de la distribución de estos, por lo que el complejo **S** sigue siendo el de mayor presencia entre los objetos observados de igual forma que el tipo **S** es el que más veces aparece.

Tipo Taxonómico	Objetos clasificados
C	5
Cb	1
Cg	5
Ch	2
Cgh	2
B	13
S	18
Sa	5
Sk	1
Sl	5
Sq	13
Sr	3
X	5
Xc	1
Xe	0
Xk	6
A	3
D	1
K	2
L	2
Ld	6
O	11
Q	6
R	0
T	2
V	5

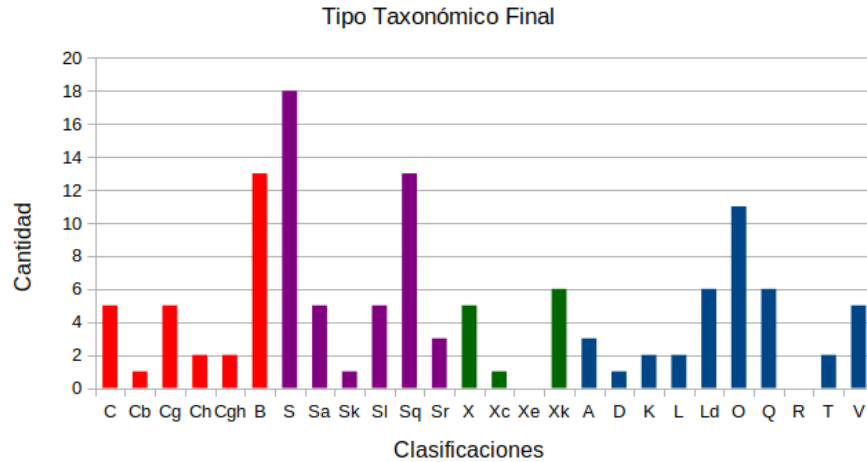
Tabla 4.8: Clasificaciones finales por tipo taxonómico

Complejo	Conteo Final
S	45
C	28
X	12
Otros	38

Tabla 4.9: Clasificaciones finales por complejo

Finalmente tenemos la gráfica que nos muestra de forma más visual las distribuciones de los tipos taxonómicos encontrados así como también el de los complejos. Como se menciono anteriormente el de mayor presencia es el complejo **S**, pero también podemos observar que los Otros ocupan una fracción considerable del conteo. Esto podría deberse a que los espectros de estos asteroides muestran mayor ruido o alguna interferencia que no nos permite producir los espectros con buena calidad, y que, al momento de clasificarse, las distancias espectrales no son las mejores, por lo que una nueva observación a futuro de algunos de estos objetos podría ayudar a confirmar u objetar las clasificaciones propuestas en este trabajo.

Como se puede observar del análisis anterior, los objetos observados en más de una ocasión pueden presentar variaciones en su tipo taxonómico, sin embargo, las variaciones no son significativas por lo que su complejo sigue siendo el mismo, esto podría deberse a que el asteroide se encuentra en un ángulo de fase distinto para cada fecha provocando que su espectro sea diferente al presentar una cara distinta del objeto.



(a) Taxonomías finales



(b) Complejos finales asignados

Figura 4.10: Resultados finales

De los objetos clasificados vemos que el complejo **S** es el más presente, como podría esperarse, representando el 36.59 % de los objetos, el segundo grupo más abundante es el de los Otros con un 30.89 %, dicho porcentaje es muy elevado comparado con la proporción de estos objetos en el SMASS-II que es de 5.6 %, esto puede deberse a la alta cantidad de ruido en varias de las observaciones pues esto puede cambiar la forma del espectro o alterar las distancias espectrales durante la clasificación.

Con los complejos **C** y **X** se obtuvieron los porcentajes 22.76 % y 9.76 % respectivamente.

4.5. Clasificaciones anteriores

Algunos de los objetos han sido observados y clasificados anteriormente en otros observatorios.

Tomando en cuenta la taxonomía registrada en JPL SSD [14], se encontraron las coincidencias mostradas en la Tabla 4.10.

Clave	Objeto	Clasificación	Literatura	Morales (2023)
a000719	Albert	O	S*	S
a001864	Daedalus	A	Sr*	
a001865	Cerberus	Ld	S*	
a001866	Sisyphus	Sl	S*	
a001981	MIDAS	V	V*	
a002059	Baboquivari	Sq		Sq
a002061	Anza	Sq		Sq
a002368	Beltrovata	Ld		
a004954	Eric	Sa	S*	
a005131	1990 BG	Cg	S*	Xc
a005693	1993 EA	S		A
a006053	1993BW3	S	Sq*	Sq
a006063	Jason	S		Sq
a006178	1986 DA	T		
a007889	1994 Lx	V	V*	
a008037	1993 HO1	L		L
a008567	1996 HW1	S		
a009856	1991 EE	Q		Sq
a012711	Tukmit	S	Sr*	
a014402	1991DB	O	C*	
a015745	Yuliya	Sa	S*	Ld
a017182	1999 VU	B		
a017511	1992 QN	B	X*	
a018109	2000 NG11	Xk		T
a018172	2000 QL7	Sa		S
a018736	1998 NU	Sq	Sk*	Sq
a021374	1997 WS22	D		
a031345	1998 PG	S	Sq*	Cg
a040267	1999 GJ4	O	Sq*	
a053110	1999 AR7	C		
a054660	2000 UJ1	S		Sq
a065679	1989 UQ	B	B*	
a065733	1993 PC	C		B
a066391	Moshup	O	S*	B
a068347	2001 KB67	S		Sq

Análisis y Resultados
4.5 Clasificaciones anteriores

Clave	Objeto	Clasificación	Literatura	Morales (2023)
a068950	2002 Qf15	Ld		
a085628	1998 KV2	Sq		O
a085953	1999 FK21	Sq	S*	Sq
a085989	1999 JD6	Xk	K*	Xc
a088263	2001 KQ1	Cgh		C
a096315	1997 AP10	A		
a096590	1998 XB	Sq	S*	
a096631	1999 FP59	Sk		S
a099248	2001 KY66	X		
a099907	1989 VA	Cg	Sq*	
a103067	1999 XA143	Sl		
a112221	2002 KH4	O		Sq
a115052	2003 RD6	Sq		Sk
a137062	1998 WM	Sr	Sq*	
a137170	1999 HF1	C	X*	Cb
a137199	1999 KX4	Sq		Cb
a137805	1999 YK5	B	X*	B
a138847	2000 VE62	S		S
a139345	2001 KA67	C		C
a140158	2001 SX169	B		
a141079	2001 XS30	Sa	Xc*	R
a141525	2002 FV5	Q		Sq
a141593	2002 HK12	X		Xc
a142464	2002 TC9	O		Sq
a143992	2004AF	A		
a144332	2004 DV24	S		O
a152931	2000 EA107	S	Q*	S
a153814	2001 WN5	X		Cb
a153957	2002 AB29	Sr		V
a159686	2002 LB6	Sq		Sq
a162004	1991 VE	Ch		B
a162082	1998 HL1	Sq		Sq
a162723	2000 VM2	Q		O
a163691	2003BB43	Cg		
a163696	2003 EB50	V		
a163899	2003 SD220	Sa		S
a184990	2006 KE89	Sq		Sq
a190208	2006 AQ	B		C
a192563	1998 WZ6	S	V*	V
a208023	1999AQ10	Ld	S*	
a212359	2006 EV52	S		S
a220839	2004 VA	B		B
a243025	2006 UM216	S		S
a248926	2006 WZ2	B		B
a259802	2004 BJ86	Xk		
a265196	2004BW58	Cg		
a265962	2006 CG	C		C
a275611	1999XX262	B		B
a276033	2002 AJ129	O		

Clave	Objeto	Clasificación	Literatura	Morales (2023)
a311044	2004 BB103	S		S
a326291	1998 HM3	S		S
a326388	2001 QD96	X		X
a333555	2005 VY17	Sl		Xe
a333888	1998 ST4	X		X
a337084	1998 SE36	L		A
a338292	2002 UA31	O		Sq
a349928	2009 WD106	S		
a354030	2001 RB18	B		Cgh
a381677	2009 BJ81	Q		V
a395289	2011 BJ2	Cg		S
a411201	2010 LJ14	B		B
a416584	2004 JB12	Ld		Ld
a437316	2013 OS3	T		
a438429	2006 WN1	Xc		Xk
a441987	2010 NY65	Sl		Sl
a442742	2012 WP3	Ch		Ch
a443923	2002 RU25	Xk		X
a444193	2005 SE71	S		S
a444584	2006 UK	O		
a454177	2013 GJ35	V		V
a455176	1999 VF22	B		B
a455550	2004 JO2	Sq		Sq
a457260	2008 RY24	Sq		O
a457768	2009 KN4	O		Ld
a467309	1996 AW1	Xk		Cgh
a468481	2004 TP20	Q		O
a475967	2007JF22	Cb		
a481394	2006 SF6	Q		Sq
a489486	2007 GS3	B		Cgh
a494999	2010 JU39	Sr		V
a512245	2016 AU8	O		Sq
a518635	2008 HO3	Cgh		B
a524522	2002 VE68	Xk		
	2018 LK	V		
	2018 RQ2	Ld		L
	2018 TF3	K		
	2018 UQ1	Sl		Sa
	2018CB	K		

Tabla 4.10: Clasificaciones obtenidas comparadas con las obtenidas en trabajos anteriores.

Vemos que la mayoría de los objetos no han recibido una clasificación previa, mientras que aquellos que se han clasificado son 13 aquellos que coinciden en complejo y 16 que no coinciden, por lo que al ser cantidades pequeñas podemos decir que tienen proporciones similares como se ve en la Figura 4.11

Sin clasificar	No coincide	Coincide complejo
94	16	13

Tabla 4.11: Coincidencias encontradas de los espectros clasificados

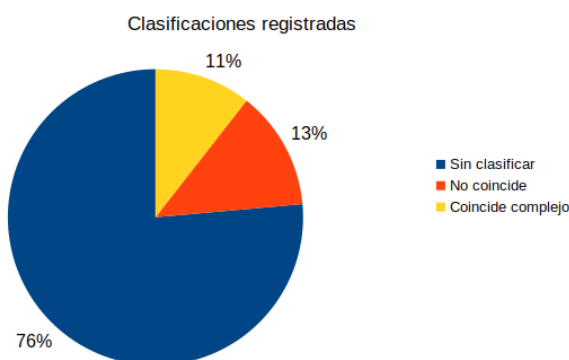


Figura 4.11: Proporciones de las clasificaciones coincidentes

A continuación se muestra la tabla 4.12, la cual contiene aquellos objetos cuyas clasificaciones no coinciden con la literatura.

Clave	Objeto	Clasificación	Clasificación registrada
a000719	Albert	O	S
a001864	Daedalus	A	Sr
a001865	Cerberus	Ld	S
a005131	1990 BG	Cg	S
a014402	1991DB	O	C
a017511	1992 QN	B	X
a040267	1999 GJ4	O	Sq
a066391	Moshup	O	S
a085989	1999 JD6	Xk	K
a099907	1989 VA	Cg	Sq
a137170	1999 HF1	C	X
a137805	1999 YK5	B	X
a141079	2001 XS30	Sa	Xc
a152931	2000 EA107	S	Q
a192563	1998 WZ6	S	V
a208023	1999AQ10	Ld	S

Tabla 4.12: Objetos cuya clasificación no coincide con la literatura.

Revisando en las gráficas de los espectros (Apéndice B), se puede notar que los objetos **(1864) Daedalus**, **(1865) Cerberus**, **(141079) 2001 XS30** y **(208023) 1999AQ10** presentan una

considerable cantidad de ruido en algunas secciones del espectro, por lo que estos tramos pueden cambiar el valor de las distancias espectrales obtenidas y en consecuencia resultar con una clasificación diferente.

Con el objeto **(17511) 1992 QN** la pendiente aplanada puede generar confusiones en su clasificación, la distinción entre miembros del complejo **C** y el complejo **X** suele dificultarse por tener características similares en longitudes de onda del infrarrojo cercano [1].

Los objetos **(99907) 1989 VA** y **(192563) 1998 WZ6** tienen una forma parecida a la de la clasificación en la literatura, por lo que las pequeñas variaciones en las distancias euclidianas pudieron alterar la clasificación final.

Finalmente, aquellos clasificados como **O** pueden presentar diferencias ya que al ser una clasificación con muy pocos elementos su peso aumenta sobre el resto de clasificaciones, esto provoca que el programa lo clasifique de esta forma.

Así que podemos concluir que si bien una parte considerable de los objetos tuvieron dificultades al ser clasificados, el método utilizado es adecuado.

4.5.1. Clasificaciones en trabajos anteriores

En 2023, Morales [17] se realizó una clasificación con algunas de las temporadas utilizadas en este trabajo para su Tesis de maestría, en ese trabajo se manejo un rango de tiempo parecido y se aplicaron métodos similares por lo que es un referente adecuado con el que se puede comparar resultados.

Vemos en la Tabla 4.10 que los resultados obtenidos presentan diferencias considerables, en la Tabla 4.13 se muestra la distribución de las coincidencias, si bien la mayoría de los objetos coinciden en tipo taxonómico, aquellos que coinciden en complejo y los que no lo hacen son casi la misma cantidad, siendo el 31.32 % de los objetos que no coinciden en ambas clasificaciones.

Coincide Taxonomía	Coincide complejo	No coincide	Total
30	27	26	83
36.14 %	32.53 %	31.32 %	100 %

Tabla 4.13: Resultados de la comparación de clasificaciones con trabajos anteriores.

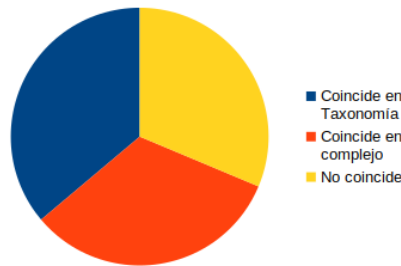


Figura 4.12: Distribución de las coincidencias en las distintas clasificaciones.

Como se mostró anteriormente la distribución en cada caso es casi homogénea, acercándose a ser un tercio de los objetos en cada criterio.

Una posible causa de una clasificación tan distante podría deberse al proceso de suavizado, ya que en el trabajo anterior se usó un suavizado variable que en varios casos pudo alterar la clasificación al cambiar las distancias espectrales.

Como en el caso de **(141525) 2002 FV5** que para este trabajo se le asignó la clasificación de **Q** y en la Tesis de Morales se clasificó como **Sq**, ambas curvas correspondientes a estas clasificaciones

son, en realidad, bastante parecidas por lo que sutiles cambios en el espectro final cambiarían las distancias espectrales provocando que el tipo taxonómico asignado se incline más por un lado que el otro y siendo esta la posible razón de las discrepancias en nuestros resultados.

Capítulo 5

Conclusiones

Dada la cercanía de los NEAs, es importante un monitoreo constante para conocer sus propiedades, ya que varios de estos son potencialmente peligrosos. Por esta razón llevamos a cabo un estudio espectroscópico de una muestra de más de un centenar de estos objetos.

De las 148 observaciones realizadas en el periodo comprendido entre mayo de 2017 y febrero de 2020 se utilizaron 127 de estas observaciones.

Considerando aquellos objetos que se observaron en más de una ocasión, se determinó el tipo taxonómico de solamente 123 objetos en alguno de los 26 tipos de la clasificación Bus & Binzel.

Durante el proceso de reducción de las imágenes se procuró que fuera llevado a cabo de la mejor forma posible, cuidando no omitir ningún paso y descartando aquellas imágenes en las que el ruido no permite obtener un resultado confiable.

Luego de clasificar los objetos se encontró que, al igual que en estudios previos, la mayoría pertenecen al complejo **S** conformando el 36.59 % del total de objetos, sin embargo, el segundo grupo más presente es el de los End Members, siendo el caso con mayor contraste respecto a la proporción esperada, pues mientras en la población total de asteroides representan menos del 6 %, en la muestra de los objetos clasificados en este trabajo representan el 30.89 %. Esto podría deberse al ruido presente en las imágenes, ya que la información de baja calidad puede afectar a la correcta clasificación de los objetos.

A estos dos complejos le sigue el complejo **C** con el 22.76 % y finalmente para el complejo **X** se encontró la menor proporción de objetos, de solamente el 9.76 %.

La mayoría de estos objetos no presentan una clasificación previa mientras que el resto tiene una buena proporción de coincidencias respecto de la Literatura.

Este trabajo contribuye a las obligaciones que el INAOE contrajo al ser miembro fundador de la IAWN, ya que el análisis de la composición de estos objetos nos ayuda a conocer la evolución del sistema solar, además de estar prevenidos ante una posible amenaza de impacto, y así, conociendo las propiedades de algunos asteroides, tomar las medidas adecuadas para la defensa de nuestro planeta.

5.1. Trabajo a futuro

Dentro de los posibles trabajos a desarrollar a partir de esta Tesis se propone la re-observación y clasificación de objetos que en las temporadas procesadas sus espectros resultaron con una calidad media a baja, concentrándose sobre todo en aquellas clasificaciones que tuvieron la menor función de peso, y de esta forma tener una nueva referencia con la cual comparar las clasificaciones.

Otro tema que se puede desarrollar es el análisis detallado de las diferentes reducciones realizadas a estas temporadas, revisando atentamente las posibles causas de haber obtenido diferentes clasificaciones a pesar de tratarse de los mismos objetos observados.

Además, se propone continuar el análisis de la distribución de los tipos taxonómicos de los asteroides cercanos a la Tierra, reduciendo y clasificando los objetos observados en las fechas posteriores a las realizadas aquí, obteniendo así un panorama más amplio al revisar la clasificación de un mayor número de objetos.

Continuar con el análisis de estos objetos es importante pues de esta forma contribuimos al entendimiento de nuestro sistema solar y de futuras amenazas, incluyendo también la obtención de minerales y otros materiales valiosos que pueden estar presentes en los asteroides. Aunque la minería espacial es un área poco desarrollada, este tipo de estudios brinda información importante para conocer los objetos de interés y desarrollar proyectos viables para obtener estos recursos.

Apéndice A

Temporadas de observación utilizadas

Aquí podemos observar las temporadas de observación utilizadas para este trabajo, con año, mes, día y la cantidad observada en cada uno de ellos.

2017		
Mes	Día	Objetos
Mayo	30	2
Junio	2	2
Junio	3	3
Septiembre	22	4
Septiembre	23	3
Octubre	22	4
Octubre	23	5
Octubre	24	2
Octubre	26	1
Noviembre	15	4
Noviembre	16	2
Noviembre	17	2
Noviembre	18	1
Diciembre	9	1

Tabla A.1: Temporadas de observación 2017

2018		
Mes	Día	Objetos
Febrero	7	2
Febrero	8	4
Febrero	9	3
Febrero	10	4
Febrero	12	3

Temporadas de observación utilizadas

2018		
Mes	Día	Objetos
Abril	17	2
Abril	18	5
Abril	20	2
Abril	21	2
Junio	12	3
Junio	13	3
Junio	14	2
Junio	18	1
Septiembre	12	1
Septiembre	13	3
Septiembre	14	5
Septiembre	15	1
Noviembre	1	6
Noviembre	2	3
Noviembre	3	3
Noviembre	4	2
Noviembre	30	1
Diciembre	4	1

Tabla A.2: Temporadas de observación 2018

2019		
Mes	Día	Objetos
Enero	17	2
Enero	19	3
Enero	24	2
Febrero	12	4
Febrero	16	2
Abril	13	3
Abril	14	1
Abril	18	1
Mayo	27	2
Junio	27	3
Junio	28	2
Julio	1	1
Octubre	23	1
Octubre	24	5
Octubre	26	1
Octubre	27	3
Noviembre	9	2
Diciembre	20	4
Diciembre	21	3

Tabla A.3: Temporadas de observación 2019

Temporadas de observación utilizadas

2020		
Mes	Día	Objetos
Enero	24	3
Febreo	24	1
Febrero	25	1

Tabla A.4: Temporadas de observación 2020

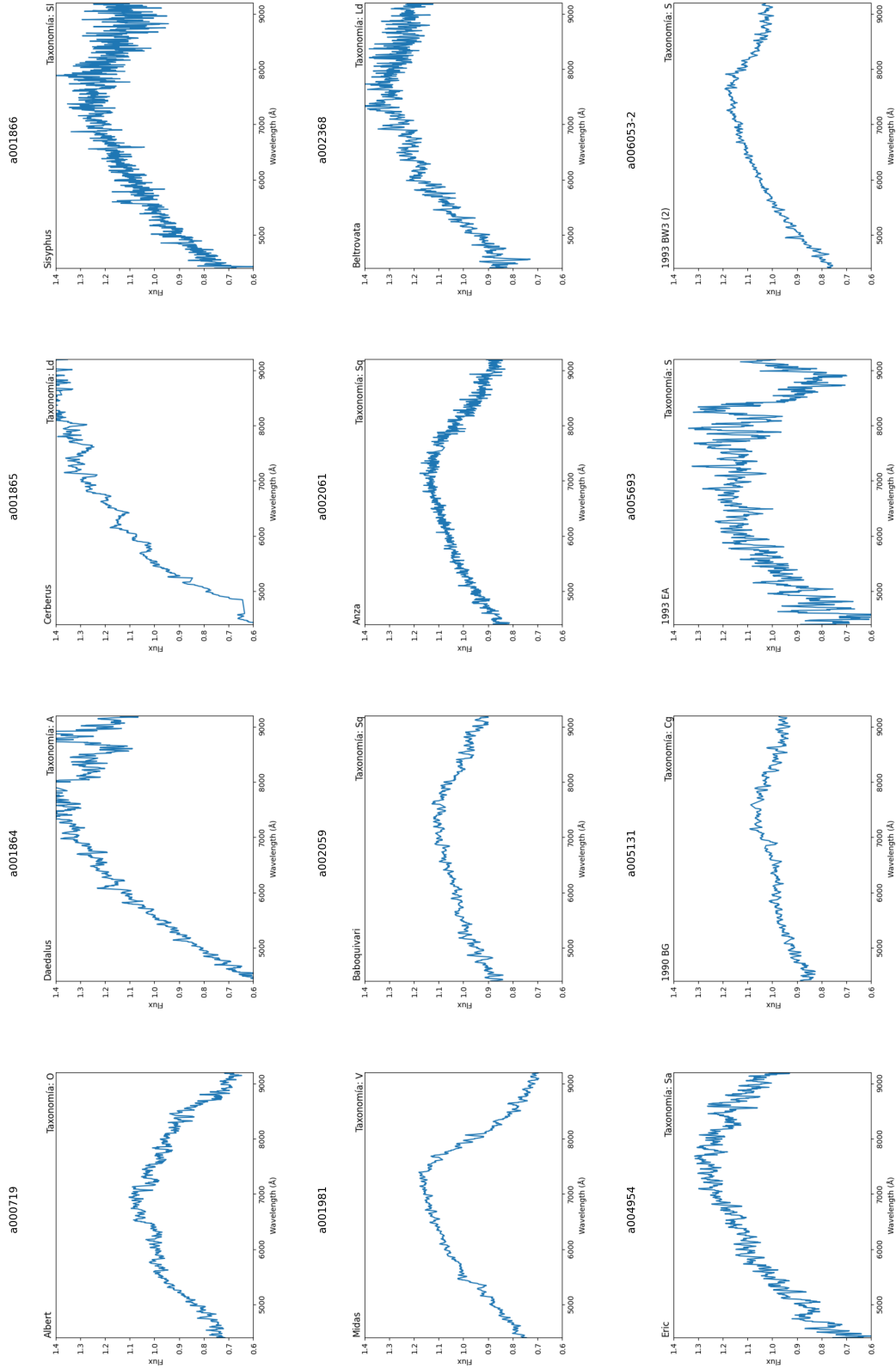
Objetos observados	
Año	Cantidad
2017	36
2018	62
2019	45
2020	5
Total de objetos	148

Tabla A.5: Total de objetos observados

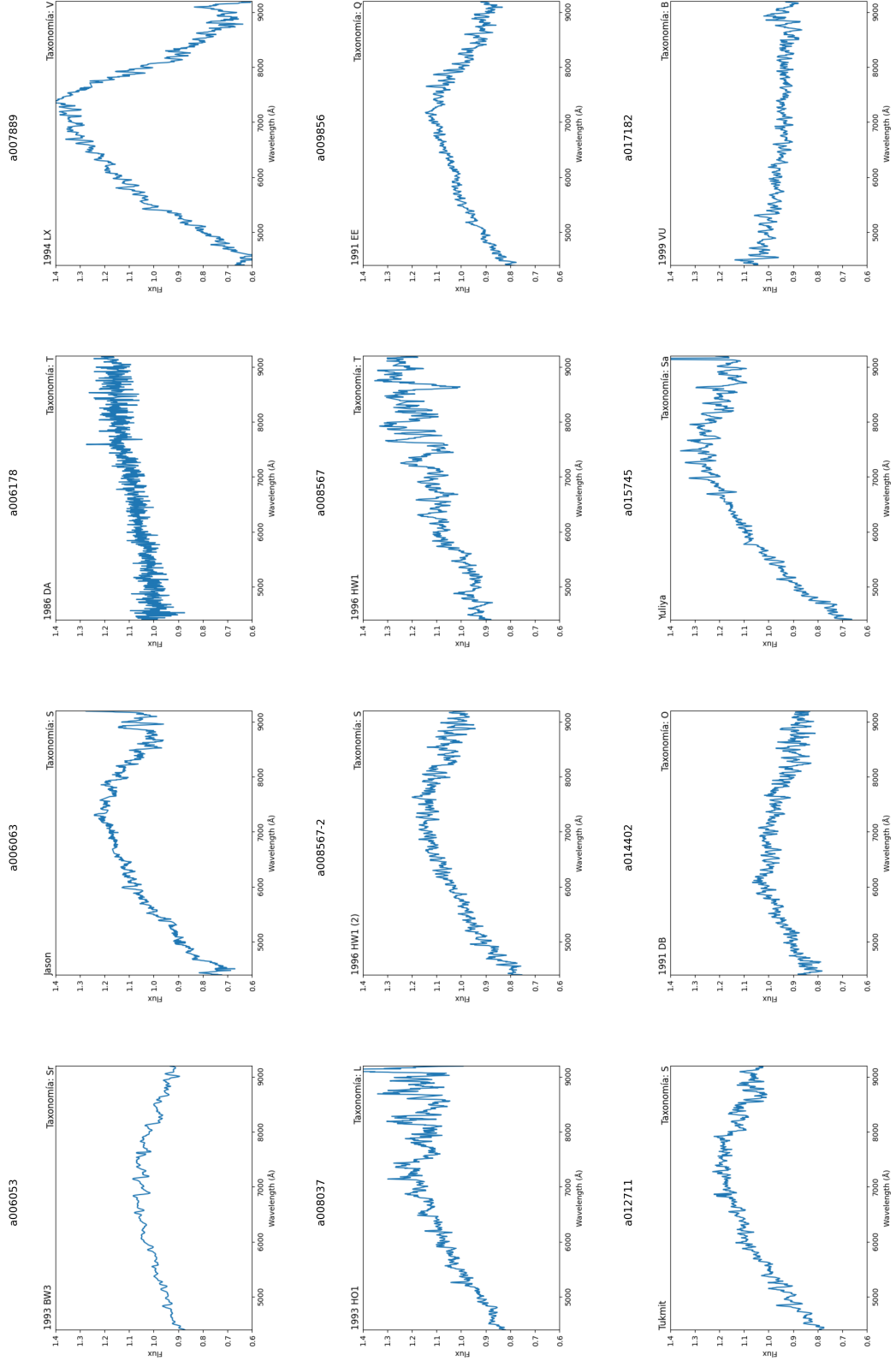
Apéndice B

Espectros de los NEAs en nuestra muestra de estudio

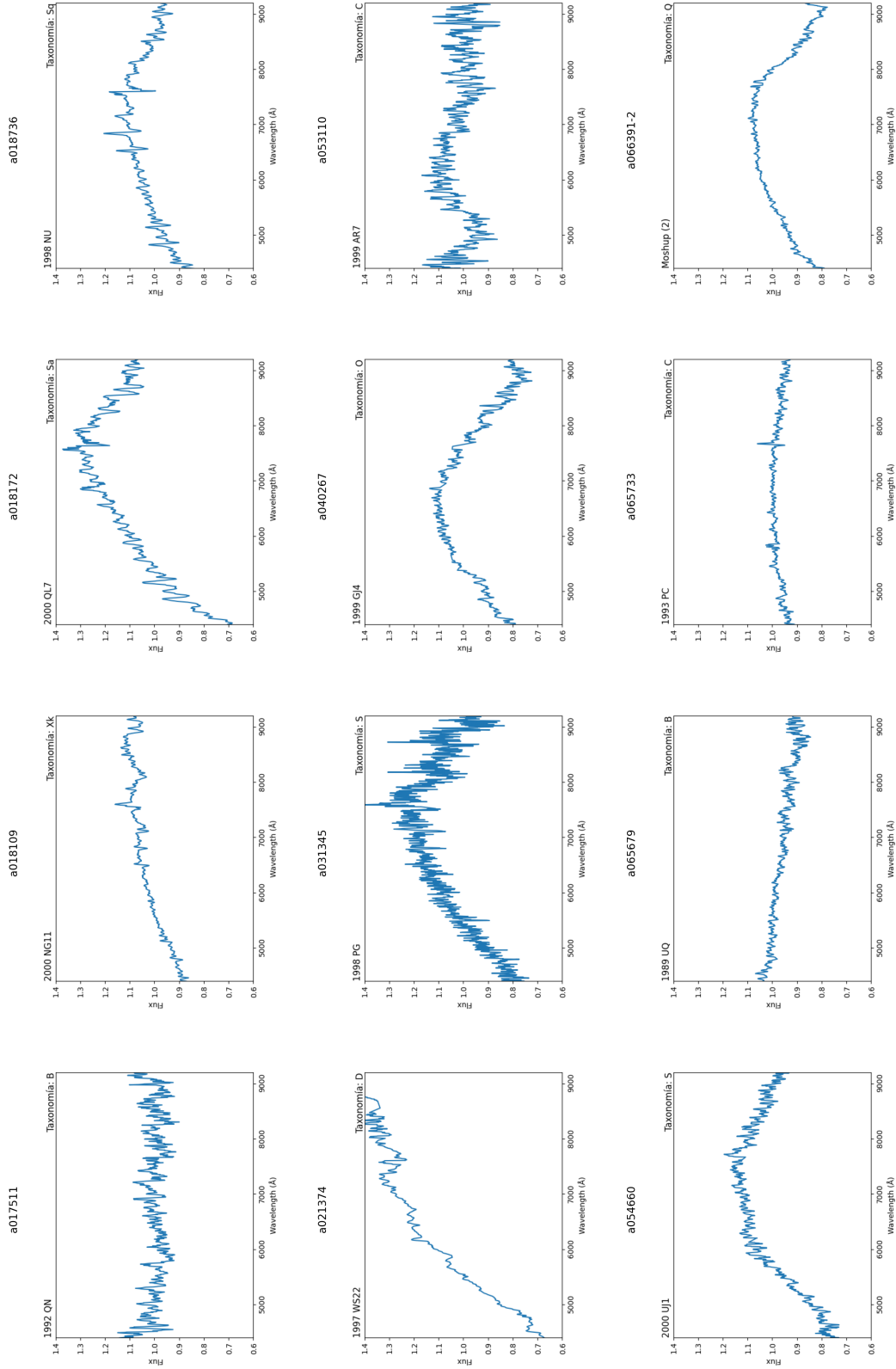
Espectros de los NEAs en nuestra muestra de estudio



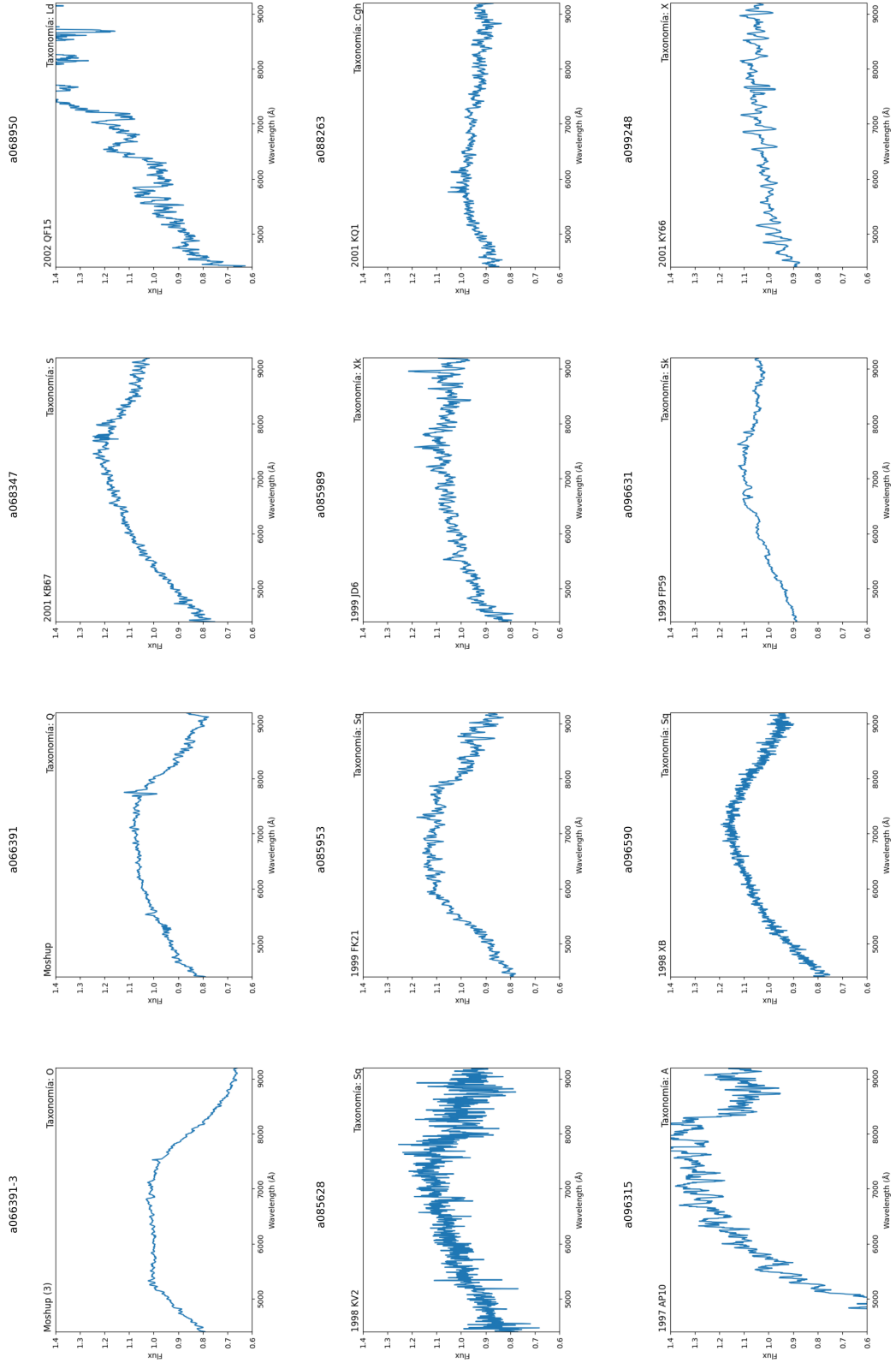
Espectros de los NEAs en nuestra muestra de estudio



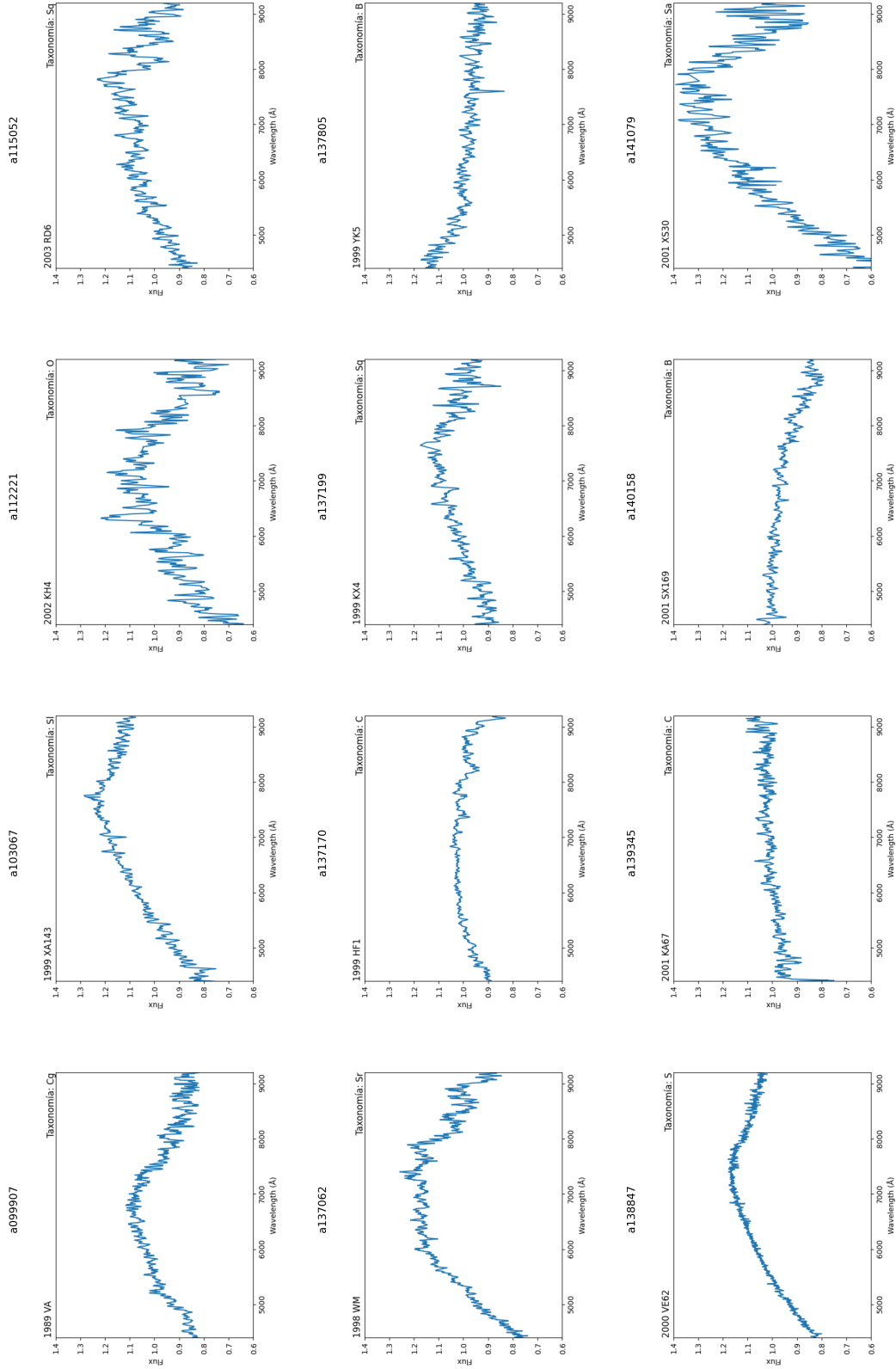
Espectros de los NEAs en nuestra muestra de estudio



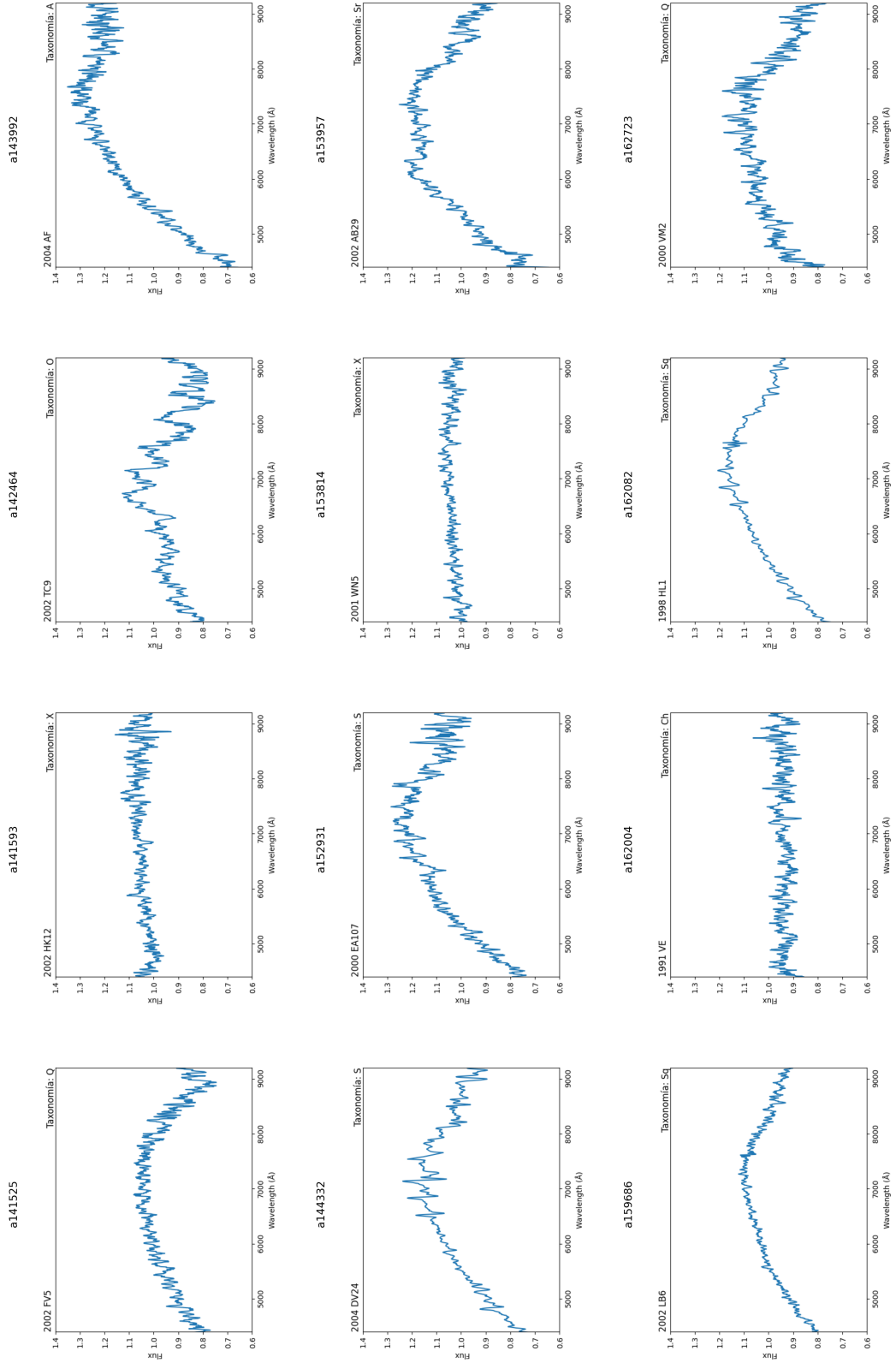
Espectros de los NEAs en nuestra muestra de estudio



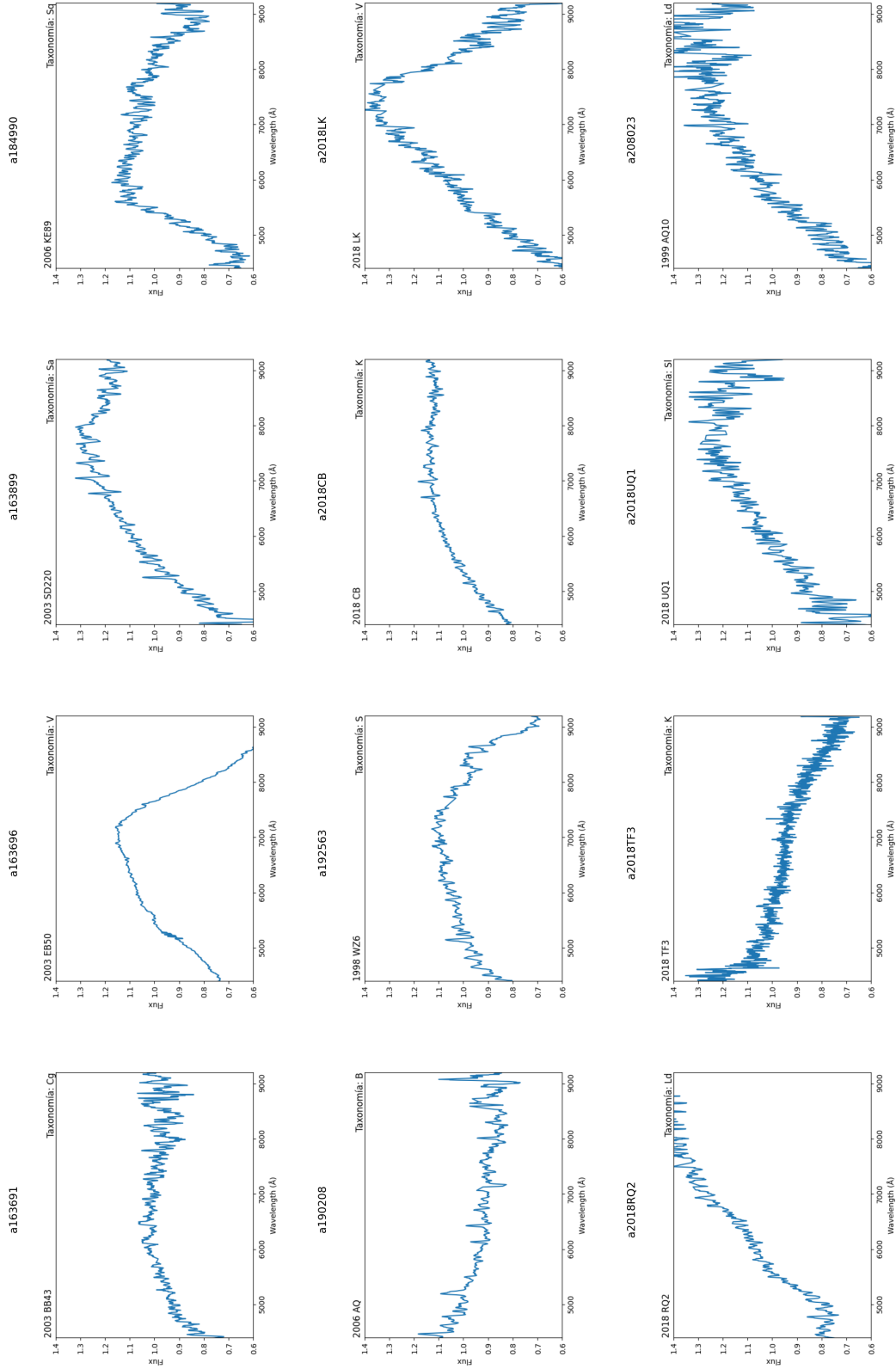
Espectros de los NEAs en nuestra muestra de estudio



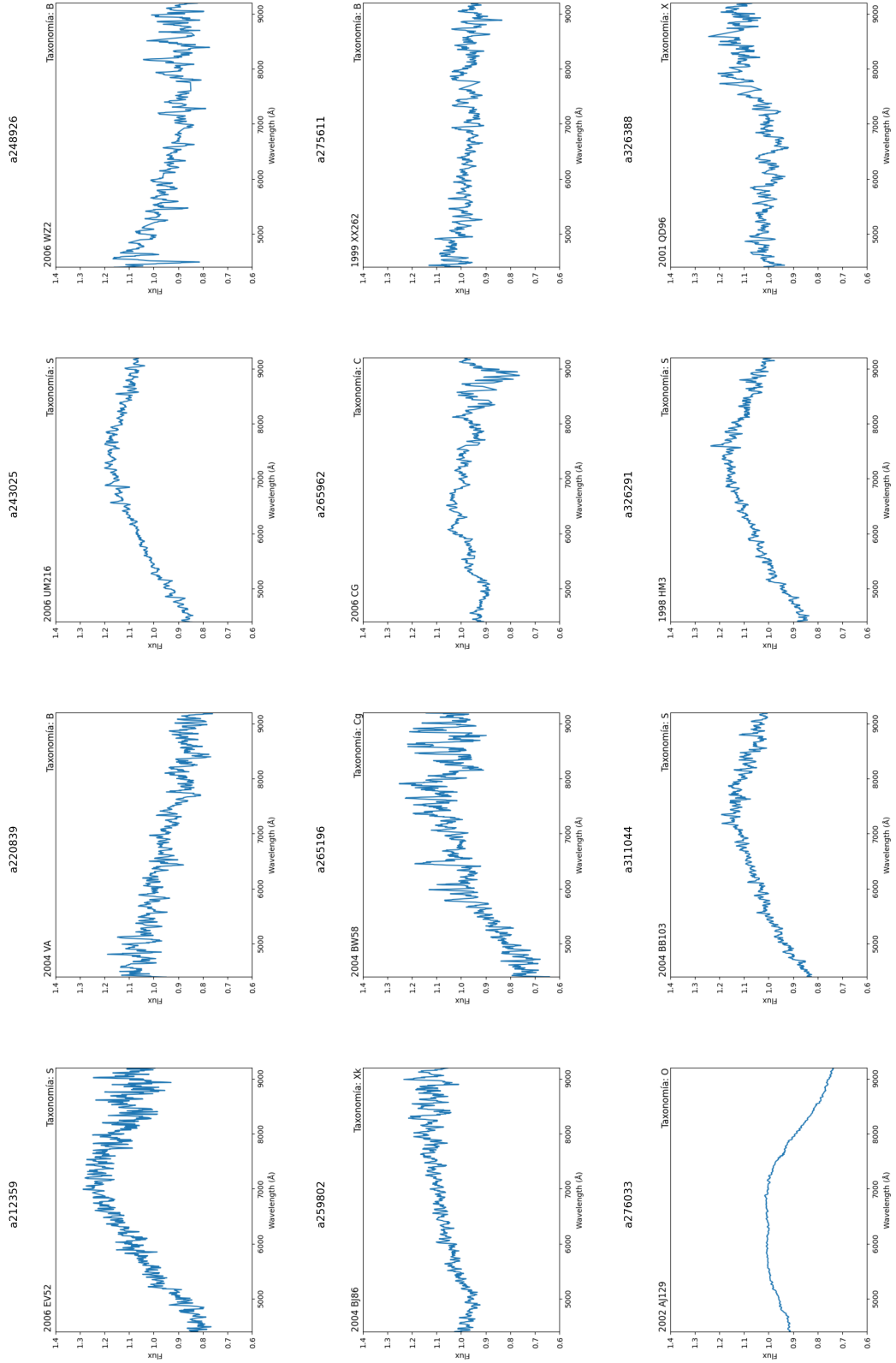
Espectros de los NEAs en nuestra muestra de estudio



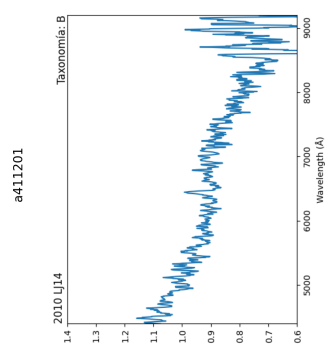
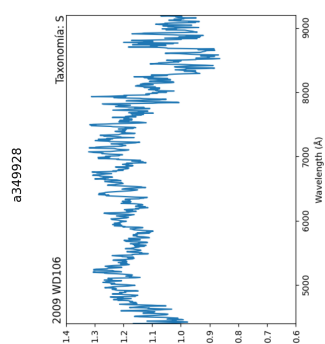
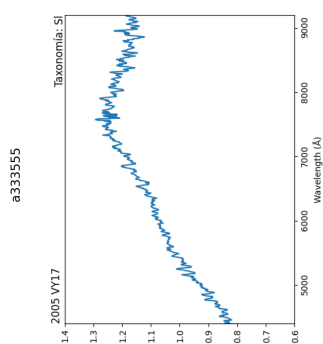
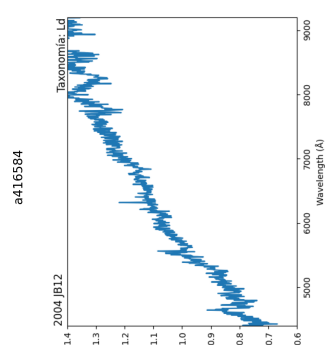
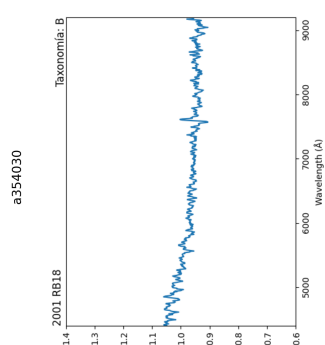
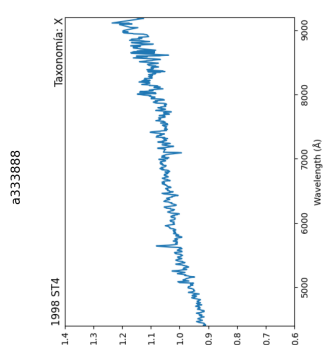
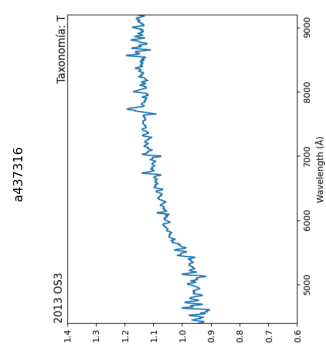
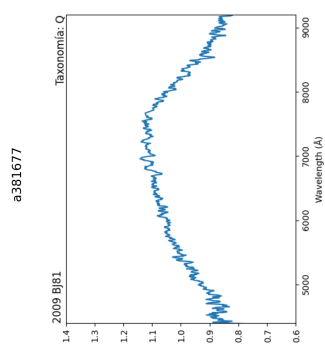
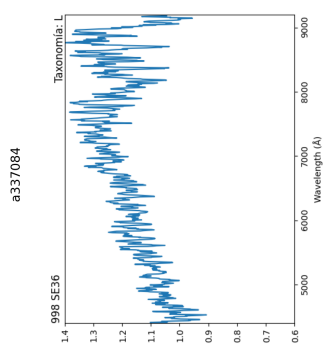
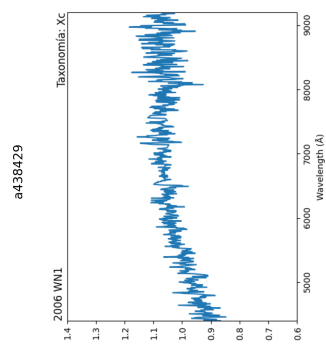
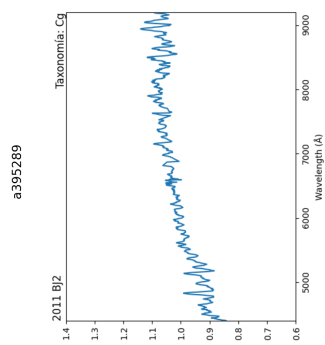
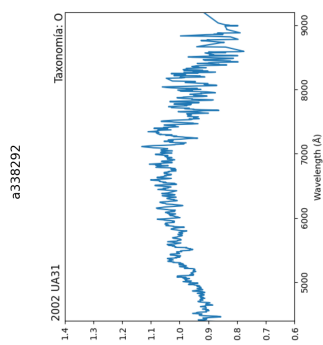
Espectros de los NEAs en nuestra muestra de estudio



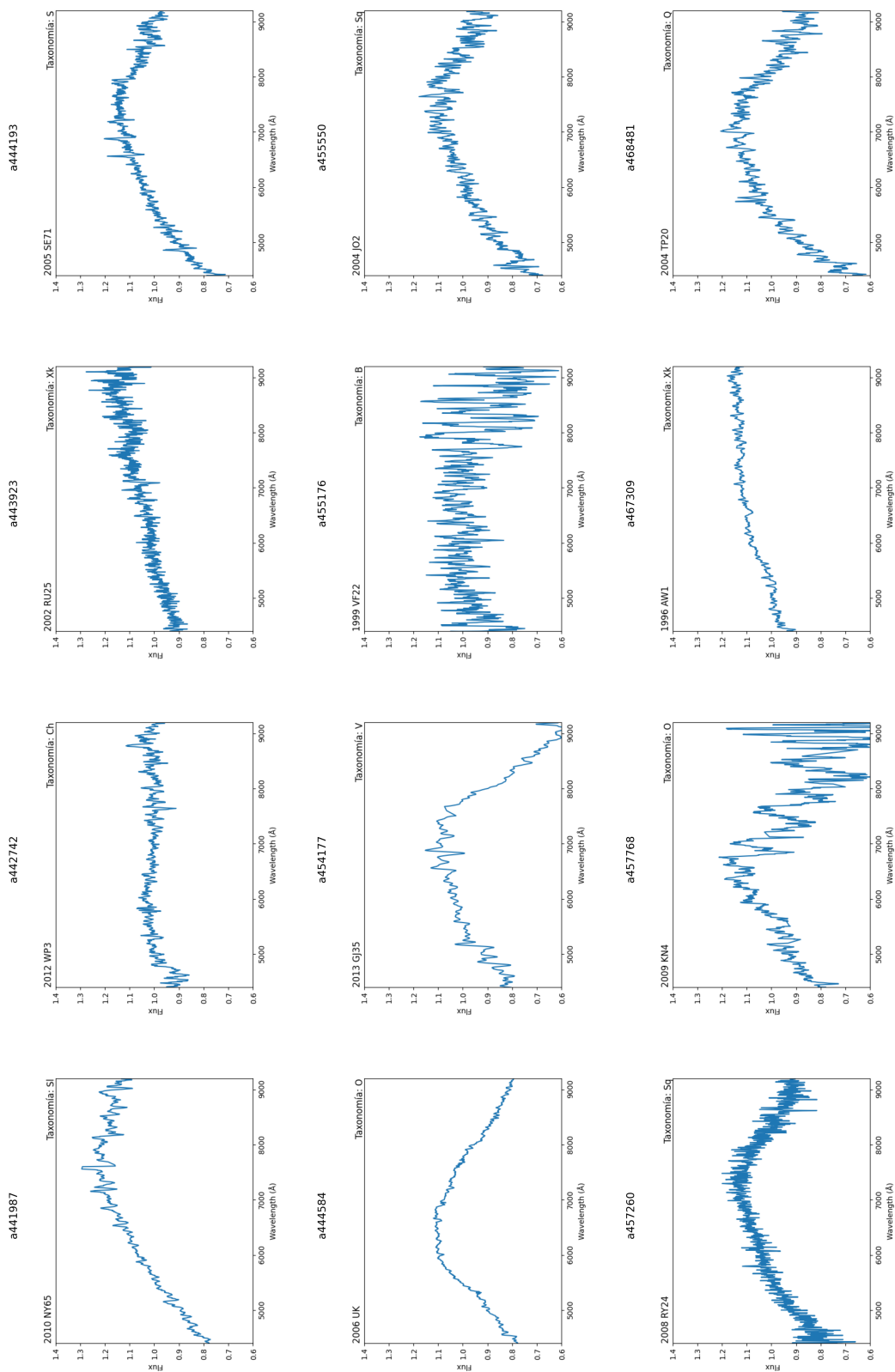
Espectros de los NEAs en nuestra muestra de estudio



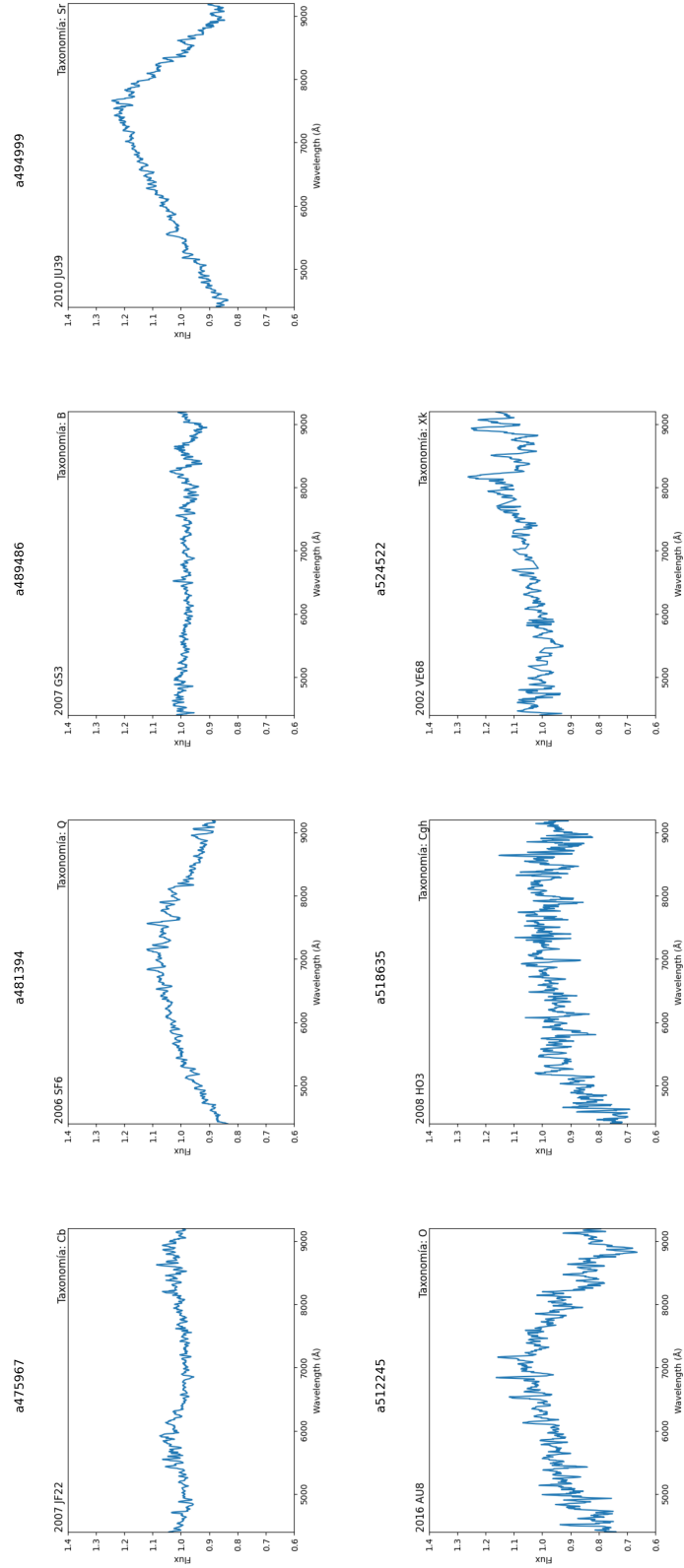
Espectros de los NEAs en nuestra muestra de estudio



Espectros de los NEAs en nuestra muestra de estudio



Espectros de los NEAs en nuestra muestra de estudio



Bibliografía

- [1] Marcel Popescu et. al. “Taxonomic classification of asteroids based on MOVIS near-infrared colors”. En: *Astronomy & Astrophysics* 617 (2018). DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833023>. URL: https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2018/09/aa33023-18/aa33023-18.html.
- [2] Enrique Buendía. “Clasificación taxonómica de asteroides de la familia Flora”. Tesis de Maestría. Puebla, México: Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, 2021.
- [3] Schelte J. Bus y Richard P. Binzel. “Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey: A Feature-Based Taxonomy”. En: *Icarus* 158.1 (2002), págs. 146-177. DOI: 10.1006/icar.2002.6856.
- [4] Schelte J. Bus y Richard P. Binzel. “Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey: The Observations”. En: *Icarus* 158 (2002), págs. 106-145. DOI: 10.1006/icar.2002.6857.
- [5] Schelte. J. Bus. “Compositional structure in the asteroid belt”. Ph.D. thesis. Tesis doct. University of Hawaii, 1999. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1999PhDT.....50B/>.
- [6] Clark R. Chapman, David Morrison y Ben Zellner. “Surface properties of asteroids: A synthesis of polarimetry, radiometry, and spectrophotometry”. En: *Icarus* 25 (1975), págs. 104-130. DOI: 10.1016/0019-1035(75)90191-8.
- [7] Francesca E. DeMeo y Benoît Carry. “The Taxonomic Distribution of Asteroids from Multi-Filter All-Sky Photometric Surveys”. En: *Icarus* 226.1 (sep. de 2013). Provided by the SAO/NASA Astrophysics Data System, págs. 723-741. DOI: 10.1016/j.icarus.2013.06.027. arXiv: 1307.2424 [astro-ph.EP]. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2013Icar..226..723D>.
- [8] Francesca E. DeMeo et al. “An extension of the Bus asteroid taxonomy into the near-infrared”. En: *Icarus* 202.1 (jul. de 2009). Provided by the SAO/NASA Astrophysics Data System, págs. 160-180. DOI: 10.1016/j.icarus.2009.02.005. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2009Icar..202..160D>.
- [9] INAOE. *Espectrógrafo Boller & Chivens - OAGH*. Consultado en Diciembre de 2024. URL: <https://astro.inaoep.mx/observatorios/oagh/espectrografo-boller>.
- [10] Instituto Europeo de Química, Física y Biología (IEQFB). *¿Qué es la espectroscopia?: Tipos y técnicas principales*. consultado en agosto de 2024. URL: <https://ieqfb.com/que-es-la-espectroscopia-tipos-y-tecnicas/>.
- [11] International Asteroid Warning Network (IAWN). *International Asteroid Warning Network*. Consultado en agosto de 2024. URL: <https://iawn.net/>.
- [12] JPL CNEOS. *NEO Earth Close Approaches*. 2024. URL: <https://cneos.jpl.nasa.gov/ca/>.
- [13] JPL CNEOS. *NEO Groups (Atira, Aten, Apollo, Amor)*. Consultado en diciembre de 2024. URL: https://cneos.jpl.nasa.gov/about/neo_groups.html.

- [14] JPL SSD. *Small-Body Database Lookup Tool*. Consultado durante 2024. URL: https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html.
- [15] Estefanía Leskow. *Espectro visible – Qué es, longitud de onda y colores*. Consultado en agosto de 2024. URL: <https://concepto.de/espectro-visible/>.
- [16] LibreTexts Español. 7.2: *Espectros atómicos*. Última actualización: octubre de 2022; consultado en agosto de 2024. URL: https://espanol.libretexts.org/Bookshelves/Quimica/.../7.02:_Espectros_at%C3%B3micos.
- [17] Judith G. Morales. “Taxonomía de Asteroides Cercanos a la Tierra (NEAs)”. Tesis de Maestría. Puebla, México: Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, 2023.
- [18] Margaret Murphy. *The A to Z of Classes — Evolution of Asteroid Taxonomy*. Consultado en agosto de 2024. URL: <https://vissiniti.com/asteroid-classification/#the-A-to-Z-of-classes>.
- [19] NASA Ciencia. *¿Qué es un asteroide?* Consultado en agosto de 2024. URL: <https://ciencia.nasa.gov/sistema-solar/que-es-un-asteroide/>.
- [20] Juan A. Sanchez et al. “The Population of Small Near-Earth Objects: Composition, Source Regions, and Rotational Properties”. En: *The Planetary Science Journal* 5.6 (jun. de 2024), pág. 131. DOI: 10.3847/PSJ/ad445f. URL: <https://doi.org/10.3847/PSJ/ad445f>.
- [21] Edward F. Tedesco y The Editors of Encyclopaedia Britannica. *Small Body*. Consultado en agosto de 2024. URL: <https://www.britannica.com/science/small-body>.
- [22] David James Tholen. “Asteroid Taxonomy from Cluster Analysis of Photometry”. Provided by the SAO/NASA Astrophysics Data System. Tesis doct. University of Arizona, sep. de 1984. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1984PhDT.....3T>.
- [23] Doug Tody. “IRAF in the Nineties”. En: *Astronomical Data Analysis Software and Systems II*. Ed. por R. J. Hanisch, R. J. V. Brissenden y J. Barnes. Vol. 52. Astronomical Society of the Pacific Conference Series. Ene. de 1993, pág. 173.
- [24] Doug Tody. “The IRAF Data Reduction and Analysis System”. En: *Instrumentation in astronomy VI*. Ed. por David L. Crawford. Vol. 627. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. Ene. de 1986, pág. 733. DOI: 10.1117/12.968154.
- [25] Richard L. White, Perry Greenfield y Ole Streicher. *The PyRAF Tutorial*. Consultado en agosto de 2024. URL: <https://pyraf.readthedocs.io/en/latest/>.