



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

Clasificación taxonómica de asteroides de la familia Flora

Tesis presentada al

Colegio de Física

como requisito parcial para la obtención del grado de

LICENCIADO EN FÍSICA APLICADA

por

José Eduardo Vega García

Asesorado por

Dr. Raúl Mújica García y Dr. Javier Miguel Hernández López

Puebla Pue.
3 de septiembre de 2024



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

Clasificación taxonómica de asteroides de la familia Flora

Tesis presentada al

Colegio de Física

como requisito parcial para la obtención del grado de

LICENCIADO EN FÍSICA APLICADA

por

José Eduardo Vega García

Asesorado por

Dr. Raúl Mújica García y Dr. Javier Miguel Hernández López

Puebla Pue.
3 de septiembre de 2024

Título: Clasificación taxonómica de asteroides de la familia Flora
Estudiante: JOSÉ EDUARDO VEGA GARCÍA

COMITÉ

Dra. Ana Aurelia Avilez López
Presidente

Dr. José Ramón Valdés Parra
Secretario

Dra. Rosibel Carrada Legaria
Vocal

M.C. Luis Enrique Buendía Verdiguél
Vocal

Dr. Raúl Mújica García y Dr. Javier Miguel Hernández López
Asesor

Dedicatoria

A mi bisabuela Lucina, por sus invaluable enseñanzas, que han dejado una huella imborrable en mi vida.

A mis abuelos Isaura y José, por su constante apoyo y amor incondicional, que me han acompañado siempre.

A mis tíos Armando y Omar, por ser modelos a seguir, inspirándome a esforzarme y superarme cada día.

A mi madre Claudia y a mi hermano Ramsés, por ser los pilares fundamentales en mi vida, brindándome fuerza y estabilidad en cada paso que he dado.

A mi pareja Magda, por ser mi motor y mi inspiración diaria, siempre alentándome a alcanzar mis metas y sueños.

Agradecimientos

A mi asesor Raúl Mújica, por su apoyo incondicional, por sus enseñanzas, que han sido esenciales en mi formación, y por su infinita paciencia a lo largo de este camino.

A todos los profesores de la facultad, quienes han sido grandes docentes y guías en mi trayectoria académica, iluminando el camino con su sabiduría y dedicación.

Índice general

Resumen	xv
1. Introducción	1
1.1. ¿Qué es un asteroide?	2
1.2. Familias de asteroides	3
1.2.1. Clústeres, grupos, clanes y tribus	5
1.3. La familia Flora y su importancia	5
1.4. Taxonomía de asteroides	8
1.4.1. Sistemas de Clasificación Taxonómica	9
1.5. Objetivos y plan de la tesis	11
1.5.1. Plan de la tesis	12
2. Selección de la muestra y observaciones	13
2.1. Selección de la muestra	13
2.2. Las observaciones	14
2.2.1. Telescopio, instrumentación y detector	14
2.2.2. Temporadas de observación	16
3. Procesamiento de datos	19
3.1. Entorno PyRAF: fundamentos y utilidad	19
3.2. Proceso de reducción de imágenes astronómicas	20
3.2.1. Obtención de datos	20
3.2.2. Preparación de los datos	20
3.2.3. Recorte de imágenes	20
3.2.4. Corrección por bias	20
3.2.5. Corrección por flat fields	21
3.2.6. Calibración e identificación	21
3.3. Reducción de espectros de asteroides	21
3.3.1. Centrado del asteroide: eliminación de rayos cósmicos y ruido	21
3.3.2. Calibración de la longitud de onda del espectro del asteroide	22
3.3.3. Sustracción del fondo de cielo	22
3.3.4. Extracción del espectro unidimensional	23
3.3.5. Corrección por extinción atmosférica	23
3.3.6. Calibración del espectro del análogo solar	23
3.3.7. Corrección de la contribución solar en el espectro del asteroide mediante un análogo solar	23
3.3.8. Suavizado de Espectros	23

4. Resultados	27
4.1. Clasificación taxonómica de los asteroides de la familia Flora	27
4.2. Método de la distancia espectral	27
4.2.1. Distancia Euclidiana	27
4.2.2. Conjuntos de Control	28
4.2.3. Implementación del Conjunto de control SMASSII-A	31
4.3. Estadística simple de la clasificación	33
4.3.1. Asteroides con Función de Peso (FP) Consistente en Todas las Categorías .	33
4.3.2. Asteroides con variación en su taxonomía	34
4.3.3. Resultados del análisis estadístico simple	34
5. Análisis y discusión de los resultados	37
5.1. Tipos taxonómicos	37
5.1.1. Tipo S	38
5.1.2. Tipo C	39
5.1.3. Tipo X	40
5.1.4. Miembros Menores (MM)	40
5.1.5. Asteroides que presentan un cambio en su complejo taxonómico	41
5.1.6. Principales hallazgos	42
5.1.7. Implicaciones del estudio	43
6. Conclusiones	45
A. Tablas de información	47
A.1. Condiciones de observación	47
A.2. Espectros de reflectancia de los asteroides de nuestra muestra	53
A.3. Taxonomías	56
Bibliografía	61

Índice de figuras

1.1. El asteroide (16) Psyche [3] es uno de los objetos más grandes del cinturón de asteroides, con un diámetro aproximado de 226 km. Descubierto en 1852, Psyche es único por su alta composición metálica, principalmente de níquel y hierro, sugiriendo que podría ser el núcleo expuesto de un protoplaneta. El número que se coloca antes del nombre de un asteroide, como en (16) Psyche, corresponde al orden en que fue descubierto. Este sistema de numeración se inició cuando se descubrió el primer asteroide, Ceres, que recibió el número 1. Cada nuevo asteroide descubierto se numera de forma secuencial.	2
1.2. Ilustración del Cinturón principal de Asteroides [4]: El Cinturón Principal de Asteroides es una región del sistema solar ubicada entre las órbitas de Marte y Júpiter. Contiene numerosos asteroides y cuerpos menores que varían en tamaño desde pequeños guijarros hasta grandes objetos como Ceres, que tiene un diámetro de aproximadamente 940 km. Esta región es el remanente de la formación del sistema solar, y sus cuerpos están compuestos principalmente de roca y metal.	3
1.3. Familias de Asteroides [7]: Diagrama que muestra la distribución de los asteroides pertenecientes a distintas familias. Cada uno de estos grupos de asteroides comparten características orbitales similares. Se muestra principalmente su semieje mayor (a_p): distancia media al Sol, e inclinación (i_p): ángulo respecto al plano de la eclíptica. En la sección de color azul encontraremos a la Familia Flora.	4
1.4. Modelo tridimensional de (8) Flora obtenido a partir de su curva de luz. [12]: El asteroide (8) Flora es uno de los más grandes del cinturón de asteroides, con un diámetro de aproximadamente 140 km. Descubierto en 1847 por John Russell Hind, Flora es el asteroide principal de la familia Flora. Compuesto principalmente de silicatos y metales, su órbita se encuentra entre Marte y Júpiter. Flora es un objeto clave para el estudio de la composición y evolución de los cuerpos en el cinturón de asteroides.	6
1.5. Ilustración de la Familia Flora de Asteroides [14]: muestra cómo se vería su posición con las resonancias 3:1 con Júpiter y con la resonancia secular ν_6 con Saturno (no es una ilustración precisa).	7
1.6. Esquemas de clasificación para espectros de reflectancia de asteroides. [15]	9
1.7. Promedios de los espectros de reflectancia normalizados para los complejos S, C y X según el esquema de Bus & Binzel, obtenidos de la base de datos SMASSII. Los espectros en el visible destacan las diferencias en la composición superficial de los asteroides, con diferentes pendientes espectrales para cada complejo, mientras que en el IR aparecen bandas de absorción, también características de cada complejo.	11
2.1. Diagrama esquemático del espectrógrafo Boller & Chivens , utilizado para las observaciones espectroscópicas en el Observatorio Astrofísico Guillermo Haro.	15

3.1. Espectro del asteroide (2841) Pujio luego de centrar y combinar los 3 espectros observados. De esta forma se eliminan rayos cósmicos y el ruido, obteniendo un espectro funcional.	22
3.2. Comparación del espectro del asteroide (2841) Pujio antes y después del proceso de suavizado. En la figura 3.2a observamos el espectro obtenido en bruto antes de ser suavizado y corregido de las regiones con bandas telúricas, mientras que en la figura 3.2b observamos el espectro ya suavizado y corregido.	24
3.3. Espectro final del asteroide (2841) Pujio después de la corrección solar y el proceso de suavizado. Este espectro es utilizado para la clasificación taxonómica.	25
3.4. Diagrama de flujo que muestra todo el proceso de reducción de datos espectroscópicos previamente explicado. Este diagrama proporciona una visión general de los pasos clave, desde la corrección inicial hasta la normalización final, asegurando la calidad y precisión de los espectros obtenidos.	25
4.1. Distribución de clases taxonómicas en el conjunto SMASSII-A individual de las clases taxonómicas (Figura 4.1a y agrupadas en los complejos (Figura 4.1b en S, C, X y MM usando el análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés) [1]. Los colores representan diferentes complejos taxonómicos: Rojo para el complejo S (A, K, L, Q, R, S, Sa, Sk, Sl, Sq, Sr), Azul para el complejo C (B, C, Cb, Cg, Cgh, Ch), Amarillo para los Miembros Menores (D, Ld, O, T, V), y Verde para el complejo X (X, Xc, Xe, Xk).	30
4.2. Distribución de las clases obtenidas en el estudio con $k = 10$: individual de las clases taxonómicas (Figura 4.2a) y agrupadas en los complejos S, C, X y MM (Figura 4.2b).	33
4.3. Distribución de las clases obtenidas en el estudio con $k = 30$: individual de las clases taxonómicas (Figura 4.3a) y agrupadas en los complejos S, C, X y MM (Figura 4.3b).	34
4.4. Distribución de las clases obtenidas en el estudio con $k = 50$: individual de las clases taxonómicas(Figura 4.4a) y agrupadas en los complejos S, C, X y MM (Figura 4.4b).	34
5.1. Espectro (1314) Paula, perteneciente a los espectros con clasificación taxonómica "S" con función de peso de 1.00.	38
5.2. Sistemas de clasificación para espectros de reflectancia de asteroides en el esquema Bus-Binzel, podemos observar la similitud entre (1314) Paula, figura 5.1, y el espectro base "S" (encerrado en un marco color rojo).	38
5.3. Espectro del asteroide (3953) Perth, clasificado dentro del complejo C, específicamente en la clase B. Este asteroide mostró una clasificación robusta con más del 90 % de consistencia en los tres casos analizados ($k=10$, $k=30$, $k=50$), destacando la coherencia de su clasificación.	39
5.4. Espectro del asteroide (1387) Kama, clasificado dentro del tipo X. Este asteroide presentó un cambio en su clasificación de Xk a X, manteniéndose dentro del complejo X. Aunque este cambio fue menor, refuerza la variabilidad espectral y la necesidad de un análisis detallado dentro de este complejo.	40
5.5. Espectro del asteroide (3657) Ermolova, clasificado como miembro del conjunto MM con un factor de probabilidad (FP) de 1.00 para $k=10$ y $k=30$, dentro de la taxonomía de Vesta. Aunque para $k=50$ no alcanza un FP=1.00, pero mantiene un FP de 0.93, destacándose entre los asteroides con alta consistencia en su clasificación.	41

Índice de tablas

2.1. Temporadas de observación. En las columnas se encuentran el año, mes y días observados, respectivamente.	16
4.1. Asteroides cuya taxonomía cambia al usar diferentes k-valores. En la primera columna se encuentra el nombre del asteroide y en el resto la taxonomía encontrada para cada valor de k utilizado (10, 30 y 50, respectivamente). Entre paréntesis el valor de la función de peso.	35
5.1. Asteroides que experimentan cambios en su complejo taxonómico al menos una vez. La primera columna muestra el nombre y número de designación del asteroide. La segunda columna describe el cambio de complejo, mientras que la última columna detalla el cambio de taxonomía asociado. Los cambios se indican con flechas que representan las transiciones.	41
5.2. Función de Peso (FP) de asteroides que cambian de complejo taxonómico. La primera columna muestra el nombre y número de designación de los asteroides. La segunda columna indica el cambio en su función de peso con distinto valor de k (10, 30 y 50, respectivamente), los cambios se indican con flechas que representan las transiciones.	42
A.1. Condiciones de observación. La información que cada columna nos proporciona del asteroide en orden es: su nombre, análogo solar utilizado, fecha de observación (Tiempo Universal), ascensión recta (AR) y declinación (DEC), magnitud visible (V), así como su distancia heliocéntrica (Δ), distancia observador-asteroide (r), ángulo de fase (α°), diámetro (D), magnitud absoluta (H) y albedo (ρ_v).	48
A.2. Espectros de reflectancia de los asteroides de nuestra muestra. Cada asteroide cuenta con su nombre y número de designación en la parte inferior del mismo. El eje x es la longitud de onda en \AA y el eje y es la reflectancia normalizada.	53
A.3. Comparación de las distancias euclidianas determinadas con un diferentes número de objetos de la base de datos SMASS-II A. En las columnas 1 y 2 se encuentra el número de designación y el nombre de los asteroides, en la columna 3 se encuentra el tipo taxonómico propuesto en las literatura, aquellos que aun no han sido confirmados están marcados por un asterisco (*), en las columnas 4, 5 y 6 se encuentra la taxonomía propuesta en este trabajo para diferentes k-valores, 10, 30 y 50. Entre paréntesis el valor de la función de peso.	57

Resumen

Esta tesis tiene como objetivo principal realizar la clasificación taxonómica de una muestra de asteroides pertenecientes a la familia Flora, con la finalidad de aportar al estudio de su origen, evolución y estructura. Se analizaron 163 observaciones espectroscópicas, de 158 asteroides, obtenidas entre los años 2020 y 2021, en el Observatorio Astrofísico Guillermo Haro (OAGH), ubicado en Cananea, Sonora, y operado por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). La metodología está basada en el procesamiento y análisis de estos espectros de reflectancia, aplicando los esquemas de clasificación propuestos por Bus & Binzel (2002) [1]. A cada asteroide le será asignado un tipo taxonómico específico según estos esquemas. La composición mineralógica superficial promedio de la familia Flora nos permite sugerir asteroides candidatos a ser miembros “intrusos” o “atrapados” en la misma familia. La investigación desarrollada en esta tesis es parte de las responsabilidades del INAOE como miembro fundador de la Red Internacional de Alerta de Asteroides (IAWN, por sus siglas en inglés).

Palabras clave: *Asteroides, clasificación taxonómica, familia Flora, composición mineralógica, espectroscopía, origen, evolución, estructura.*

Capítulo 1

Introducción

La exploración y clasificación de asteroides han sido áreas de interés y estudio continuo en la astronomía moderna. Desde los primeros esquemas de clasificación en la década de 1970 hasta los sistemas taxonómicos actuales, como los propuestos por Bus & Binzel [1] y Bus-DeMeo [2], se ha avanzado significativamente en la clasificación de estos cuerpos menores en función de sus propiedades físicas y composicionales.

En el contexto actual, los asteroides, descubiertos hace poco más de dos siglos, han pasado de ser simplemente elementos dinámicos en nuestro sistema solar a objetos de un interés creciente, investigados a fondo para comprender su estructura y composición. Este incremento en el interés se debe en gran parte a dos temas populares y de relevancia actual: la Defensa Planetaria y la Minería Espacial.

La **Defensa Planetaria** se refiere a los esfuerzos destinados a proteger la Tierra de posibles impactos de asteroides y cometas que puedan representar una amenaza para nuestra seguridad. Estos esfuerzos pueden incluir la detección temprana de Objetos Cercanos a la Tierra (NEOs, por sus siglas en inglés), así como la investigación de técnicas para desviar su trayectoria o destruirlos de manera controlada si representan una amenaza inminente. Por otro lado, la **Minería Espacial** involucra la exploración y explotación de recursos minerales y materiales preciosos presentes en asteroides y otros cuerpos celestes. Se busca aprovechar estos recursos para abastecer futuras misiones espaciales, así como para impulsar industrias emergentes en el espacio.

En este contexto, la espectroscopía se ha convertido en una herramienta esencial para determinar la composición mineralógica de estos cuerpos celestes, brindando información valiosa sobre su naturaleza y origen.

De entre todos los asteroides, nos centraremos en la familia Flora que, al igual que otras familias, está compuesta por un grupo de asteroides con características y órbitas similares, y nos ofrece la oportunidad para comprender algunos aspectos de la evolución y dinámica del sistema solar. Por esta razón, exploraremos los parámetros que definen a esta familia y su relevancia en la comprensión de la historia y formación del sistema solar.

La clasificación taxonómica es el paso fundamental en nuestro análisis, ya que a través de esta metodología comprendemos la diversidad de asteroides en función de sus propiedades físicas. Para llevarla a cabo, nos basaremos en el esquema de clasificación propuesto por Bus & Binzel (2002) [1], utilizando datos espectroscópicos para asignar a cada asteroide un tipo taxonómico. Esta clasificación nos permitirá no solo catalogar los asteroides, sino también comprender mejor su naturaleza y origen.

Gracias a esta investigación, podremos comprender un poco más sobre la familia Flora y obtener información sobre los procesos evolutivos que han dado forma a nuestro sistema solar. Este estudio no solo contribuirá al conocimiento científico actual, sino que también continuará sentando las bases para futuras investigaciones que exploren aún más la naturaleza y el origen de estos cuerpos celestes. Esta investigación es parte de un trabajo continuo realizado desde el INAOE como parte de las obligaciones contraídas al unirse a la Red Internacional de Alerta de Asteroides (IAWN).

1.1. ¿Qué es un asteroide?

Un asteroide se define como un cuerpo rocoso de tamaño variable que orbita alrededor del Sol, principalmente localizado en el cinturón de asteroides entre las órbitas de Marte y Júpiter. Estos cuerpos celestes son considerados remanentes de la formación del sistema solar, representando cápsulas de tiempo que ofrecen valiosa información sobre la evolución y composición del cosmos.

Desde pequeñas rocas hasta cuerpos de varios cientos de kilómetros de diámetro 1.1, los asteroides exhiben una diversidad de formas, tamaños y composiciones mineralógicas. Aunque suelen ser cuerpos de forma irregular y dentada, compuestos mayormente por diferentes tipos de roca, algunos también contienen materiales como arcilla o metales, incluyendo níquel y hierro.

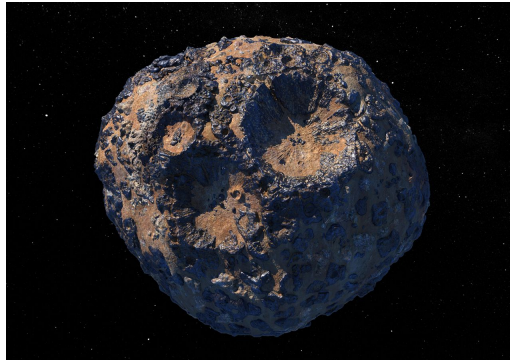


Figura 1.1: El asteroide (16) Psyche [3] es uno de los objetos más grandes del cinturón de asteroides, con un diámetro aproximado de 226 km. Descubierta en 1852, Psyche es único por su alta composición metálica, principalmente de níquel y hierro, sugiriendo que podría ser el núcleo expuesto de un protoplaneta. El número que se coloca antes del nombre de un asteroide, como en (16) Psyche, corresponde al orden en que fue descubierta. Este sistema de numeración se inició cuando se descubrió el primer asteroide, Ceres, que recibió el número 1. Cada nuevo asteroide descubierta se numera de forma secuencial.

La ubicación principal de los asteroides se encuentra en el Cinturón Principal de Asteroides 1.2 entre las órbitas de Marte y Júpiter, en una región relativamente estable del sistema solar. Sin embargo, algunos asteroides tienen órbitas que los acercan a la Tierra, siendo clasificados como Asteroides Cercanos a la Tierra (NEAs, por sus siglas en inglés). Dentro de esta categoría, existen los Asteroides Potencialmente Peligrosos (PHAs, por sus siglas en inglés), que son aquellos que tienen órbitas que los llevan lo suficientemente cerca de la Tierra como para representar un riesgo potencial de impacto.

Los asteroides se pueden clasificar en función de su composición, dividiéndolos en tres tipos principales: tipo C, compuestos de carbonáceos; tipo S, rocosos y compuestos de silicatos; y tipo X,

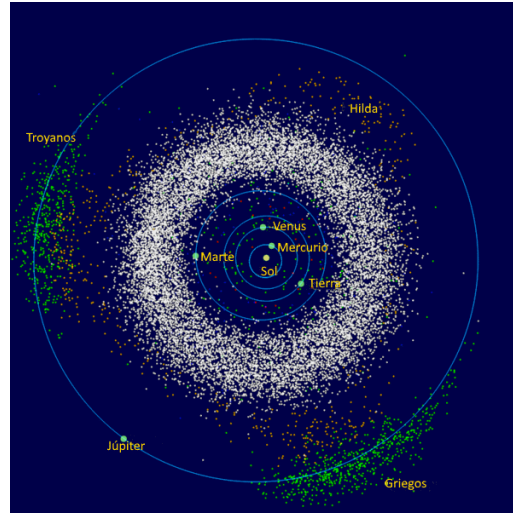


Figura 1.2: Ilustración del Cinturón principal de Asteroides [4]: El Cinturón Principal de Asteroides es una región del sistema solar ubicada entre las órbitas de Marte y Júpiter. Contiene numerosos asteroides y cuerpos menores que varían en tamaño desde pequeños guijarros hasta grandes objetos como Ceres, que tiene un diámetro de aproximadamente 940 km. Esta región es el remanente de la formación del sistema solar, y sus cuerpos están compuestos principalmente de roca y metal.

que engloba a los metálicos y compuestos de níquel-hierro. Estas categorías reflejan la diversidad mineralógica presente en los asteroides y proporcionan pistas sobre su formación y evolución.

Como ya mencionamos, además de su importancia científica como testigos de la historia del sistema solar, los asteroides también representan un potencial peligro para la Tierra. Aquellos con órbitas que los acercan a nuestro planeta plantean la posibilidad de impactos catastróficos, lo que subraya la necesidad de estudiar y monitorear estos objetos celestes con atención.

Podemos decir entonces que los asteroides son componentes fundamentales de nuestro sistema solar, proporcionando información clave sobre su formación, evolución y dinámica. Su estudio y clasificación son cruciales para comprender mejor nuestra posición en el cosmos y para evaluar posibles riesgos para nuestro planeta.

1.2. Familias de asteroides

Las familias de asteroides representan grupos cohesionados de cuerpos celestes que comparten características orbitales y composicionales similares, sugiriendo un origen común a partir de la fragmentación de un cuerpo progenitor más grande debido a impactos catastróficos. El nombre de una familia de asteroides generalmente se asigna según el nombre del miembro de mayor tamaño, considerado como el remanente principal del cuerpo progenitor [5].

Las familias juegan un papel crucial en la comprensión de la composición mineralógica de los asteroides en el Cinturón Principal, y su estudio ofrece una ventana única para investigar la historia y evolución del sistema solar. La asignación de los miembros de las familias de asteroides se basa en observaciones espectroscópicas, que ayudan a identificar similitudes en la composición mineralógica.

Entre las familias más destacadas se encuentran 1.3:

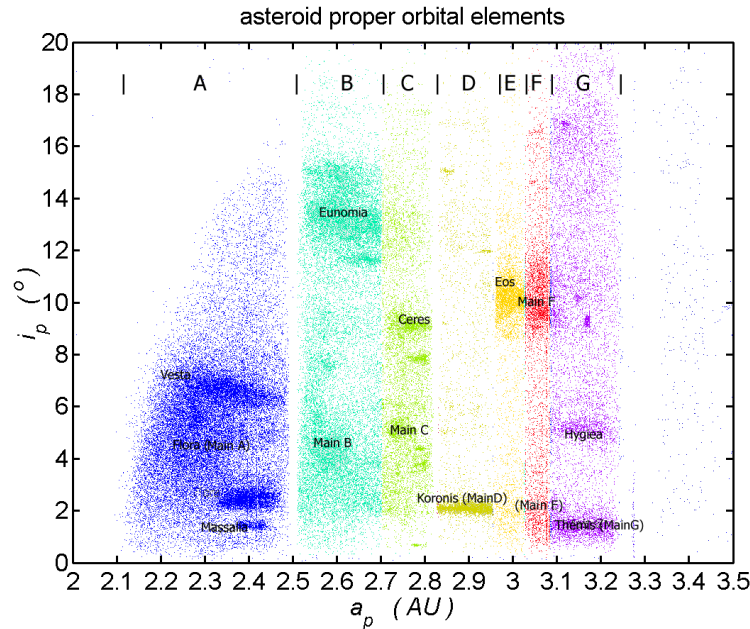


Figura 1.3: Familias de Asteroides [7]: Diagrama que muestra la distribución de los asteroides pertenecientes a distintas familias. Cada uno de estos grupos de asteroides comparten características orbitales similares. Se muestra principalmente su semieje mayor (a_p): distancia media al Sol, e inclinación (i_p): ángulo respecto al plano de la eclíptica. En la sección de color **azul** encontraremos a la Familia Flora.

1. **Familia Eos:** surgida hace aproximadamente 1.5-1.9 mil millones de años, con 9789 miembros conocidos, la familia Eos (denominada así por (221) Eos) está mayormente compuesta por asteroides de tamaño mediano con direcciones de giro estables desde su formación y predominan las clases taxonómicas K y S.[8]
2. **Familia de Eunomia:** con 5670 miembros conocidos, denominada así por (15) Eunomia, es una familia de tipo S. Es la que más destaca en el cinturón de asteroides y la sexta familia más grande con aproximadamente el 1.4% de todos los asteroides del cinturón principal.[8]
3. **Familia Vesta:** Originada a partir de eventos de impacto en el asteroide (4) Vesta y que le da su nombre a la familia, exhibe evidencia de evolución colisional y cambios significativos en las direcciones de rotación de sus miembros. Cuenta con 15 252 miembros conocidos. Compuesta principalmente por asteroides de tipo espectral V, que están relacionados con los meteoritos eucritas y diogenitas.[6, 8]

Los miembros de una misma familia de asteroides suelen conservar albedos (la medida de la reflectividad de sus superficies) y espectros notablemente homogéneos, lo que facilita su identificación y clasificación. No obstante, pueden existir asteroides intrusos cuyos espectros no coincidan con los del resto de la familia. Estos intrusos pueden ser detectados utilizando características superficiales, como el albedo, y criterios espectroscópicos como elementos discriminantes entre familias. La espectroscopía es una herramienta eficaz para esta tarea, permitiendo distinguir con precisión las diferencias entre los asteroides y asegurando una clasificación más confiable.

Estas variaciones se pueden deber a diferentes procesos, entre ellos la meteorización espacial, que se refiere al proceso de transformación que experimentan las superficies de los objetos celestes, como planetas, lunas, asteroides y cometas, debido a la exposición constante a la radiación y el

entorno del espacio exterior. Este proceso puede cambiar la apariencia y la composición de las superficies de estos cuerpos celestes a lo largo del tiempo.

También están los efectos Yarkovsky y YORP. Estos describen fuerzas pequeñas, pero significativas que afectan el movimiento orbital y la rotación de meteoroides y asteroides debido a la interacción con la luz solar. El efecto Yarkovsky se produce cuando estos cuerpos absorben energía solar y la reemiten en forma de calor, generando una pequeña fuerza de empuje que puede alterar sus órbitas a lo largo del tiempo. Por otro lado, el efecto YORP incluye un torque térmico que, junto con la luz solar dispersa, puede modificar las tasas de rotación y oblicuidades de los cuerpos pequeños. Estos efectos tienen aplicaciones importantes en la ciencia planetaria y han sido utilizados para explorar y resolver misterios relacionados con los cuerpos pequeños en nuestro sistema solar [9].

1.2.1. Clústeres, grupos, clanes y tribus

Los términos clústeres, grupos, clanes y tribus se utilizan para describir diferentes agrupaciones de asteroides en el cinturón principal. Los clústeres se refieren a familias pequeñas de asteroides, como el clúster Karin. Los grupos tienen relativamente pocos miembros, pero son claramente distintos del fondo (por ejemplo, el grupo Juno). Los clanes son agrupaciones que se fusionan gradualmente con la densidad de fondo y/o tienen una estructura interna compleja que dificulta decidir si son un grupo complejo o varios grupos superpuestos no relacionados (por ejemplo, la familia Flora ha sido llamada un clan). Las tribus son agrupaciones menos seguras en cuanto a su significancia estadística contra el fondo, ya sea debido a una densidad pequeña o a una gran incertidumbre en los parámetros orbitales de los miembros [8].

Como se mencionó antes, la familia Flora ha sido identificada como un clan o un gran subgrupo dentro de una zona de alta concentración de asteroides que contiene varias subestructuras. La existencia de subgrupos dentro de esta familia ha sido objeto de estudio, y se han propuesto varios subcúmulos intermezclados dentro de la familia principal [10]. En la siguiente sección hablaremos más a fondo de su importancia.

Para cerrar esta sección, y citando a Dermott (2021) [6], *"Las familias de asteroides proporcionan información valiosa sobre la evolución dinámica a largo plazo del cinturón de asteroides."*

1.3. La familia Flora y su importancia

La familia Flora, con 13,786 miembros conocidos, es la tercera familia de asteroides más grande del Cinturón Principal. Destacada por su tamaño y la cantidad de miembros identificados, es una de las más prominentes y mejor estudiadas, compartiendo características orbitales y espectrales similares [6, 11].

Esta familia debe su nombre a su miembro más grande y representativo, el asteroide (8) Flora 1.4, considerado el progenitor más probable con un diámetro aproximado de 140 kilómetros. Se estima que esta familia se formó hace aproximadamente 1-2 mil millones de años, posiblemente debido a la fragmentación de (8) Flora como resultado de un impacto catastrófico [6]. Este evento es considerado responsable de la creación de la mayoría de los miembros de la familia, contribuyendo a su gran tamaño y diversidad.

Como podemos ver en la figura 1.3, los **parámetros orbitales** de la Familia Flora incluyen un **semieje mayor** (la distancia promedio del asteroide al Sol a lo largo de su órbita), que

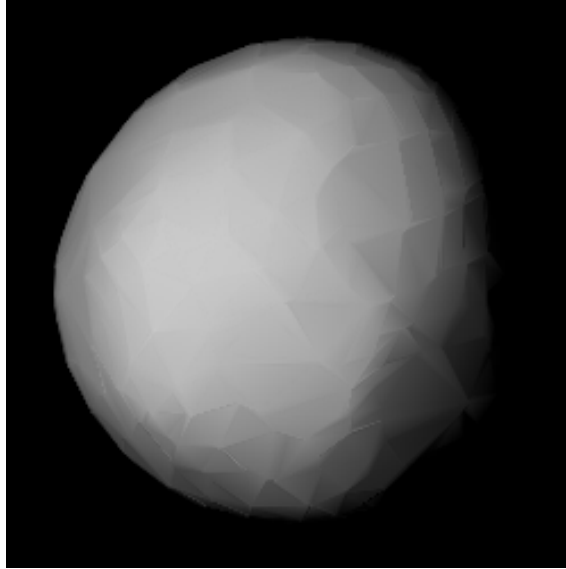


Figura 1.4: Modelo tridimensional de (8) Flora obtenido a partir de su curva de luz. [12]: El asteroide (8) Flora es uno de los más grandes del cinturón de asteroides, con un diámetro de aproximadamente 140 km. Descubierto en 1847 por John Russell Hind, Flora es el asteroide principal de la familia Flora. Compuesto principalmente de silicatos y metales, su órbita se encuentra entre Marte y Júpiter. Flora es un objeto clave para el estudio de la composición y evolución de los cuerpos en el cinturón de asteroides.

varía entre **2.1 y 2.5 unidades astronómicas (UA)**. Además, estos asteroides presentan una **excentricidad** que varía entre **0.1 y 0.25**, indicando que sus órbitas son ligeramente elípticas. Por último, sus órbitas tienen **inclinaciones inferiores a 11 grados** respecto al plano de la eclíptica, lo que sugiere un origen común. Estos parámetros orbitales sitúan a los asteroides de la Familia Flora en una región cercana al borde interior del cinturón de asteroides.

Además, la proximidad de la familia Flora con la **resonancia 3:1 con Júpiter** y la **resonancia secular ν_6 con Saturno**, cerca del borde interior del cinturón de asteroides a una distancia media de 2.2 UA 1.5, amplifica su importancia como una fuente de potenciales objetos cercanos a la Tierra (NEAs). [10]

La **resonancia 3:1 con Júpiter** significa que por cada tres órbitas de un asteroide alrededor del Sol, Júpiter completa una, generando tirones gravitacionales que pueden desestabilizar al asteroide de su órbita y redirigirlo hacia el sistema solar interior. Este fenómeno es responsable de crear los Huecos de Kirkwood, regiones del cinturón de asteroides donde la resonancia gravitacional con Júpiter impide la estabilidad de asteroides, dejando vacíos en la distribución de sus órbitas. [9]

Por otro lado, la resonancia secular ν_6 con Saturno afecta de manera gradual la excentricidad de los asteroides, incrementando las probabilidades de que se conviertan en NEAs. La resonancia ν_6 se refiere a una interacción gravitacional a largo plazo entre un asteroide y Saturno, en la que la precesión del perihelio del asteroide (el punto más cercano al Sol en su órbita) se alinea con la de Saturno. El término "**secular**" indica que estos cambios son acumulativos y ocurren de manera gradual a lo largo de millones de años, esto es, no son inmediatos. El subíndice 6 en ν_6 se utiliza específicamente porque se trata de Saturno, el sexto planeta del Sistema Solar, mientras que la letra griega ν se usa tradicionalmente para designar resonancias seculares. Como resultado, la

resonancia ν_6 puede aumentar progresivamente la excentricidad de la órbita de un asteroide, llevándolo desde el Cinturón de Asteroides hacia una órbita que cruza la de la Tierra, convirtiéndolo en un asteroide cercano a la Tierra (NEA). Esto es especialmente relevante para los asteroides tipo LL condrita, que contienen altos niveles de hierro y magnesio, y cuya presencia en la familia Flora proporciona información valiosa sobre la historia de los impactos en la Tierra y la Luna.

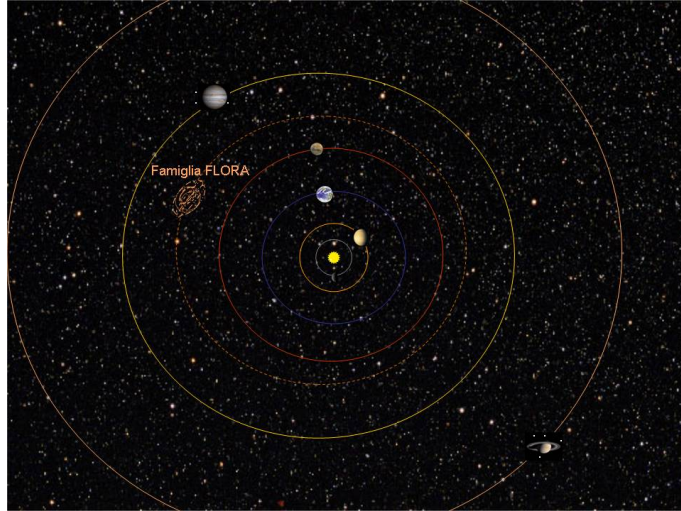


Figura 1.5: Ilustración de la Familia Flora de Asteroides [14]: muestra cómo se vería su posición con las resonancias 3:1 con Júpiter y con la resonancia secular ν_6 con Saturno (no es una ilustración precisa).

La evolución orbital de los miembros más pequeños de la familia Flora, incluidos los efectos del cambio secular de la tasa de rotación debido a YORP, es un aspecto complicado de modelar debido a que el ciclo de YORP es más corto que la edad de la familia [5]. Esto plantea desafíos en la precisión de los modelos de evolución orbital de los asteroides más pequeños en familias moderadamente antiguas como la familia Flora.

En cuanto a su composición, los miembros de la familia Flora se caracterizan por tener espectros **tipo LL condrita**, lo que indica una composición mineralógica particular. Las condritas LL son un tipo de meteorito que contiene bajos niveles de hierro metálico libre y un alto contenido de hierro en silicatos. Esto es especialmente importante porque sugiere que los asteroides de la familia Flora son una de las fuentes principales de los meteoritos LL que han caído en la Tierra. La relación entre estos asteroides y los meteoritos encontrados en nuestro planeta refuerza la relevancia de la familia Flora en el estudio de la formación y evolución del sistema solar. Se estima que estos asteroides han perdido cerca del 90% de sus miembros de tamaño kilométrico desde su formación, y que, en su punto máximo, aproximadamente 1,000 cuerpos de 1 km de diámetro llenaban el espacio de NEAs antes de disminuir a su contribución actual de 35-50 NEAs de ese tamaño. Aunque actualmente no es una fuente importante de grandes NEAs, la familia Flora ha tenido un papel significativo en proporcionar impactos a la Tierra en el pasado, lo que sugiere una historia dinámica y evolutiva interesante [10]. Es claro que las observaciones espectroscópicas de la familia Flora ofrecen información invaluable sobre su composición química y física, proporcionando pistas sobre su origen y evolución.

La composición de la familia Flora ha sido objeto de estudio a través de observaciones espectroscópicas y análisis de albedos. Se ha encontrado que los asteroides de la familia Flora son

principalmente del tipo espectral S, lo que sugiere una composición rica en silicatos y metales [5]. Estos asteroides muestran características espectrales similares a los meteoritos de condrita ordinaria, lo que respalda la idea de que la familia Flora se originó a partir de la fragmentación de un cuerpo progenitor de este tipo, (8) Flora.

Podemos concluir entonces que la importancia de la familia Flora radica en varios aspectos. En primer lugar, su tamaño la convierte en una de las estructuras más prominentes dentro del cinturón de asteroides, lo que la convierte en un objetivo clave para estudiar la dinámica y evolución de estos cuerpos celestes. Su formación catastrófica y su antigüedad ofrecen una ventana única para comprender los procesos de fragmentación y evolución dentro del sistema solar.

La investigación sobre la familia Flora se enmarca dentro del contexto más amplio de la exploración y comprensión del cinturón de asteroides y la dinámica del sistema solar. Esta familia ofrece una oportunidad única para estudiar la formación y evolución de los asteroides, así como su interacción con los planetas interiores y exteriores. Además, la proximidad de la familia Flora con la resonancia secular ν_6 amplifica su importancia como una fuente potencial de objetos cercanos a la Tierra y para comprender la historia de impactos en nuestro planeta y la Luna.

En resumen, la familia Flora desempeña un papel crucial en la comprensión de la dinámica y evolución del sistema solar, así como en la identificación de posibles riesgos de impacto de asteroides en la Tierra. Su estudio continuo a través de observaciones y análisis detallados proporciona suficiente información sobre la historia y el funcionamiento del sistema solar.

1.4. Taxonomía de asteroides

La taxonomía de asteroides es un proceso que busca categorizar y organizar estos cuerpos celestes en función de sus propiedades físicas, en particular de su composición. Inspirada en los principios de la taxonomía biológica, esta metodología permite agrupar asteroides que comparten similitudes en sus características, proporcionando una visión más ordenada y comprensible de la diversidad presente entre los asteroides. A lo largo de la historia, se han propuesto varios sistemas de clasificación para organizar y caracterizar los asteroides en función de sus propiedades físicas y composición química. Dos de los esquemas de clasificación más influyentes son el desarrollado por S.J. Bus y R.P. Binzel, conocido como el esquema de Bus y Binzel [1], y el segundo es el esquema conocido como Bus-DeMeo [2], es una extensión hecha por DeMeo al esquema desarrollado por Bus y Binzel.

En el contexto de los asteroides, la clasificación taxonómica se basa en características observables, como las propiedades espectrales, para identificar patrones y agrupar asteroides que comparten similitudes en su composición y origen. A través de este proceso, los asteroides se organizan en tipos taxonómicos que reflejan diferencias significativas en su composición mineralógica y propiedades físicas.

En el estudio de asteroides, la clasificación taxonómica es esencial para comprender su diversidad y evolución en el sistema solar. Permite identificar relaciones entre asteroides individuales y grupos de asteroides, como las familias dinámicas, que comparten un origen común, o experiencias evolutivas similares, como los efectos de meteorización espacial o los efectos Yarkovsky y YORP. Además, la clasificación taxonómica proporciona información clave sobre la historia y la formación del sistema solar, así como perspectivas sobre la composición y distribución de materiales en las zonas de asteroides.

1.4.1. Sistemas de Clasificación Taxonómica

En la taxonomía de asteroides, los cuerpos celestes se agrupan en **complejos y clases**. Un complejo es un conjunto amplio que agrupa varias clases de asteroides que comparten características espectrales y por lo tanto en su composición. Dentro de un complejo, las clases representan subgrupos definidos por detalles más específicos en sus espectros de reflectancia. Este enfoque permite organizar a los asteroides según similitudes amplias y diferencias sutiles en su composición superficial.

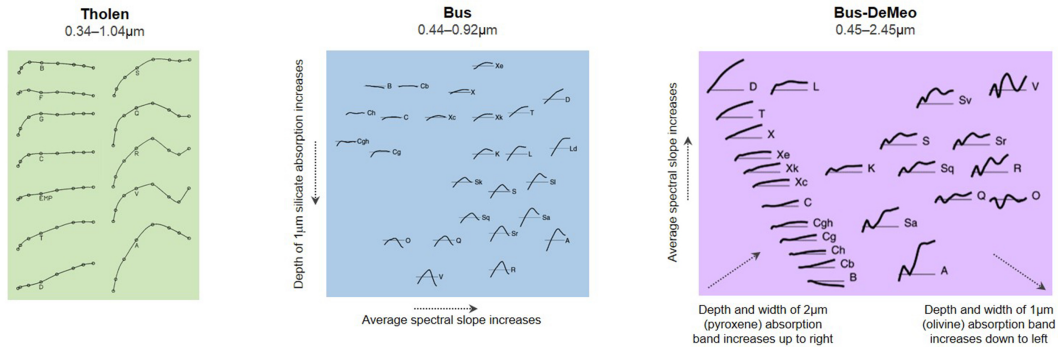


Figura 1.6: Esquemas de clasificación para espectros de reflectancia de asteroides. [15]

Esquema de Bus y Binzel

El esquema desarrollado por Bus y Binzel utiliza un conjunto de datos consistentes internamente (SMASSII)[1] 1.6, lo que representa un hito importante en la clasificación taxonómica de asteroides. Este esquema se basa en características espectrales y morfológicas para clasificar asteroides en diferentes tipos taxonómicos. La clasificación se realiza principalmente mediante la observación de los espectros de reflexión de los asteroides que cubren el rango de longitud de onda visible ($0,44 - 0,92\mu m$) y se basa en el análisis de componentes principales de los espectros.

El esquema de Bus y Binzel define 26 clases, incluyendo los **complejos C** (B, C, Cb, Cg, Ch, Cgh), **S** (A, K, L, Q, R, S, Sa, Sk, Sl, Sq, Sr), y **X** (X, Xc, Xe, Xk), así como clases adicionales o **miembros menores (MM)** como D, Ld, O, T, y V. Este esquema abarca varios tipos principales de asteroides, los cuales representan diferencias en la composición mineralógica y las propiedades físicas de los asteroides. Por ejemplo, los asteroides de tipo C tienden a ser ricos en carbono y presentan espectros de reflexión característicos de materiales orgánicos, mientras que los asteroides de tipo S muestran espectros similares a los de los silicatos metálicos y rocas ígneas.

La clasificación de Bus y Binzel [1] proporciona una taxonomía detallada que ha sido ampliamente adoptada por la comunidad astronómica. Esta taxonomía no sólo ayuda a comprender la diversidad de asteroides en el cinturón principal, sino que también puede ofrecer información sobre su origen y evolución. Además, el esquema de Bus y Binzel ha servido como base para el desarrollo de otros sistemas de clasificación más avanzados, como la extensión realizada por Bus y DeMeo [2].

El esquema de Bus y Binzel ha sido fundamental para clasificar y organizar la enorme cantidad de datos espectrales obtenidos de observaciones telescópicas. Su aplicación ha permitido identificar patrones en la composición de los asteroides y ha contribuido significativamente a nuestra comprensión de la diversidad de estos cuerpos celestes en el sistema solar.

Extensión de Bus y DeMeo

Realizada en 2009 (con revisión en 2013) por F.E. DeMeo, R.P. Binzel, S.M. Slivan y S.J. Bus, esta extensión amplía el esquema de clasificación de Bus incorporando datos del infrarrojo cercano. Presentada en el artículo “An extension of the Bus asteroid taxonomy into the near-infrared” [2], introduce una mayor precisión en la clasificación de asteroides al considerar datos adicionales 1.6.

Esta clasificación extiende la clasificación de Bus al rango de longitud de onda NIR ($0,45 - 2,45\mu m$). Mantiene muchas de las clases del esquema de Bus, con algunos ajustes y adiciones. Introduce clases como Sv, Xn y un subíndice 'w' para espectros enrojecidos debido a la intemperización espacial.

Estos sistemas de clasificación, especialmente el desarrollado por Bus y Binzel y su extensión por Bus y DeMeo, han contribuido significativamente a la comprensión de la diversidad de asteroides en función de sus propiedades espectrales y morfológicas.

Además de los sistemas de clasificación propuestos por Bus y Binzel, y la ampliación llevada a cabo por Bus y DeMeo, un artículo de revisión sobresaliente sobre los sistemas de clasificación [16], hace referencia a otros tipos taxonómicos empleados en la clasificación de asteroides. A continuación, se ofrece un resumen de algunos de estos tipos taxonómicos:

Esquema de Tholen

Introducido en 1984 por David J. Tholen [17], este esquema se basa en datos espectrales de alta calidad en el rango de longitud de onda de $0,34 - 1,04\mu m$ del 8-Color Asteroid Survey (ECAS), complementado con albedo visual para mejorar la separación de clases. Este sistema clasificó los asteroides en 14 clases distintas, como A, B, C, D, E, entre otras, e introdujo las clases V y Q. 1.6

Esquema de Gaffey

Este esquema se enfoca en los asteroides tipo S y se basa en la relación entre el centro de la banda de absorción de $1\mu m$ y la relación de áreas de bandas de $2\mu m$ a $1\mu m$, proporcionando subgrupos para la clase S basados en la proporción de olivino/clinopiroxeno y la composición de piroxeno. Define siete clases (S(I) a S(VII)) que van desde composiciones dominadas por olivino hasta composiciones dominadas por piroxeno.[18]

Espectros de Reflectancia y su Importancia en la Clasificación Taxonómica

Los espectros de reflectancia son una herramienta fundamental en la clasificación taxonómica de asteroides, ya que proporcionan información directa sobre la composición mineralógica de su superficie. Cuando la luz solar incide en un asteroide, ciertos minerales absorben luz en longitudes de onda específicas, creando características conocidas como *bandas de absorción*. Por ejemplo, las bandas alrededor de 1 y 2 micrómetros son típicas de minerales como el olivino y el piroxeno, los cuales son comunes en meteoritos como las condritas ordinarias.

Además de las bandas de absorción, la *pendiente espectral* de un asteroide, que describe cómo cambia la reflectancia con la longitud de onda, también es crucial. Una pendiente espectral pronunciada puede indicar la presencia de materiales metálicos o efectos de intemperización espacial, mientras que una pendiente más suave puede sugerir un material más primitivo. Estas características espectrales permiten agrupar asteroides en tipos taxonómicos, ayudando a identificar relaciones composicionales entre ellos.

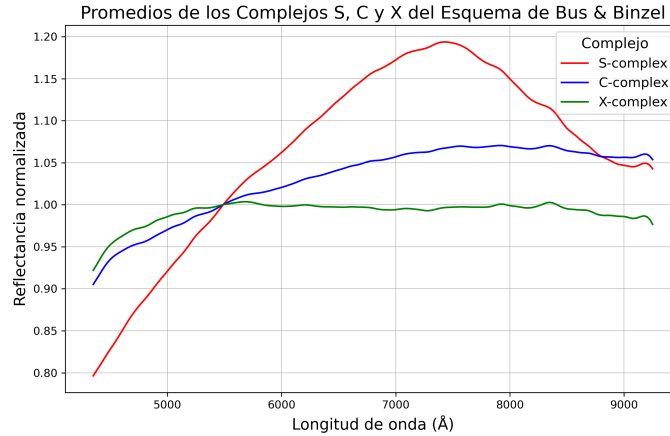


Figura 1.7: Promedios de los espectros de reflectancia normalizados para los complejos S, C y X según el esquema de Bus & Binzel, obtenidos de la base de datos SMASSII. Los espectros en el visible destacan las diferencias en la composición superficial de los asteroides, con diferentes pendientes espectrales para cada complejo, mientras que en el IR aparecen bandas de absorción, también características de cada complejo.

La importancia de los espectros de reflectancia en la clasificación se ve reflejada en los esquemas de Bus y Binzel [1] y la extensión llevada a cabo por DeMeo [2], los cuales se basan en el análisis detallado de estos espectros. Comparando los espectros de asteroides con los de meteoritos, como las condritas, es posible inferir no solo la composición de los asteroides, sino también su origen y evolución, consolidando así el vínculo entre observaciones astronómicas y muestras físicas.

Estos espectros han sido y continúan siendo una base sólida para los sistemas de clasificación actuales, permitiendo una comprensión más profunda de la diversidad y la historia de los asteroides en nuestro sistema solar.

En conclusión, la taxonomía de asteroides, representada por sistemas como el esquema de Bus y Binzel [1] y sus extensiones, proporciona una estructura fundamental para comprender la diversidad y evolución de estos objetos en el sistema solar. En la siguiente sección, se detallarán los objetivos y el plan de trabajo de esta investigación, centrados en la clasificación taxonómica de una muestra de asteroides pertenecientes a la familia Flora, con el propósito de ampliar nuestra comprensión de esta familia y contribuir al estudio de su origen, evolución y estructura.

1.5. Objetivos y plan de la tesis

El objetivo principal de esta investigación es llevar a cabo la clasificación taxonómica de una muestra de asteroides pertenecientes a la familia Flora, con el propósito de ampliar y fortalecer la base de datos existente sobre esta familia, así como para obtener resultados más robustos sobre su composición y características. Esto es parte de los compromisos asumidos del INAOE al formar parte de la IAWN.

Como objetivos particulares podemos mencionar los siguientes:

- **Aplicar el método de la Distancia Espectral (DE) para la clasificación taxonómica de los espectros obtenidos.** Se asignará una de las 26 clases taxonómicas de Bus & Binzel

(2002) [1] a cada uno de los espectros de asteroides de la muestra estudiada, utilizando el método de la DE para su clasificación. Este enfoque cuantitativo permitirá una asignación precisa de los tipos taxonómicos, minimizando la subjetividad y dando consistencia a los resultados. La DE implica la comparación de los espectros de los asteroides de nuestra muestra con los espectros de referencia existentes, ampliando el entendimiento de la composición y características de la familia Flora ya que podremos:

- **Diferenciar entre miembros de la familia y miembros intrusos.** Se determinará si en nuestra muestra hay miembros intrusos o atrapados en la familia de asteroides Flora utilizando principalmente el tipo taxonómico promedio de la misma.
- **Contribuir al estudio de la familia Flora.** Ampliar la comprensión del origen, evolución y estructura de esta familia de asteroides mediante el análisis de una muestra amplia de sus miembros.

1.5.1. Plan de la tesis

Esta tesis se fundamenta en el análisis previo realizado por Buendía, E. (2021)[5], quien examinó espectroscópicamente 139 asteroides pertenecientes a la familia Flora. El motivo principal de este trabajo consiste en ampliar significativamente la base de datos existente mediante la inclusión de 158 nuevos objetos de esta misma familia. Al construir sobre los resultados obtenidos por Buendía, esta tesis no solo busca ampliar el conocimiento sobre la familia Flora, sino también robustecer y complementar los resultados previos.

Para lograr los objetivos mencionados, se utilizarán espectros de reflectancia adquiridos entre los años 2020 y 2021 en el Observatorio Astrofísico Guillermo Haro (OAGH), operado por el INAOE y ubicado en Cananea, Sonora. En el Capítulo 2 mencionamos todos los detalles referentes a las observaciones y la manera en que seleccionamos los objetos a estudiar, mientras que en el capítulo 3 describimos cómo fueron procesados estos datos, la metodología utilizada, que se basará en el procesamiento y análisis de estos espectros, siguiendo los esquemas de clasificación propuestos por Bus & Binzel (2002) [1].

En el Capítulo 4 describimos los resultados obtenidos. Discutimos cómo fue asignado el tipo taxonómico específico a cada asteroide a según los esquemas propuestos. Esto nos permitirá obtener una visión más completa de la composición de la familia Flora y sus características. Además de la clasificación taxonómica, se realizará un análisis detallado de cada taxonomía obtenida, lo que se describe en el Capítulo 5, para diferenciar entre los miembros genuinos de la familia Flora y posibles miembros intrusos o atrapados. Utilizaremos el tipo taxonómico promedio de la familia Flora, lo que ayudará a identificar y caracterizar adecuadamente estos asteroides. Al final, en el Capítulo 6, presentamos nuestras conclusiones.

Capítulo 2

Selección de la muestra y observaciones

En este capítulo se aborda el proceso que se siguió para seleccionar la muestra de los objetos de estudio, así como las observaciones espectroscópicas llevadas a cabo. La selección cuidadosa de los objetivos y la ejecución precisa de las observaciones son pasos críticos en la investigación astronómica, ya que proporcionan la base para el análisis y la interpretación de los datos obtenidos. En este sentido, en este capítulo se detallan los criterios utilizados para la selección de los objetivos, así como la instrumentación empleada y los parámetros observacionales definidos para garantizar la calidad y la relevancia de los datos recopilados.

2.1. Selección de la muestra

La muestra de objetos para este estudio se seleccionó con el objetivo principal de clasificar taxonómicamente a asteroides de la familia Flora. La muestra consiste en un conjunto de 158 de esos cuerpos menores para los cuales se obtuvieron espectros de reflectancia entre los años 2020 y 2021 en el Observatorio Astrofísico Guillermo Haro (OAGH), ubicado en Cananea, Sonora, y operado por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE).

La selección de los asteroides se llevó a cabo considerando varios criterios para garantizar la representatividad y la relevancia de la muestra. Los asteroides de la muestra fueron identificados como miembros de la familia Flora a través de análisis previos y de la literatura.

Para la asignación a una familia de asteroides, los parámetros orbitales son lo mínimo indispensable, ya que definen las características comunes que unen a sus miembros. Como se explicó anteriormente, estos parámetros incluyen la excentricidad, el semieje mayor y la inclinación orbital. Utilizamos los correspondientes a la familia Flora para seleccionar nuestra muestra. La principal base de datos utilizada fue la del Minor Planet Center: One Asteroid Info [22], mientras que otras fuentes, como ALCDEF (Asteroid Lightcurve Data Exchange Format) [20] y JPL (Jet Propulsion Laboratory) [21], sirvieron como apoyo para complementar la información y asegurar la precisión de la selección.

Cuando los asteroides fueron observados, en los años 2020 y 2021, se verificaba que no tuvieran una clase taxonómica designada. Sin embargo, un par de años después, al reducir y clasificar la muestra, se encontró que a algunos ya les habían asignado taxonomía. Este aspecto se discutirá con mayor detalle más adelante.

Además, al seleccionar los objetos a observar, se consideraron parámetros observacionales como la declinación, la masa de aire y la posición de los asteroides en relación con su oposición. La declinación es la coordenada que mide la posición de un objeto en el cielo en dirección norte-sur, similar a la latitud en la Tierra. Se estableció un límite en la declinación mayor a -10° para garantizar que los asteroides estuvieran lo suficientemente altos en el cielo durante la observación. La masa de aire, por otro lado, se refiere a la cantidad de atmósfera que la luz de un objeto debe atravesar antes de llegar al telescopio, por lo que, para minimizar los efectos de la atmósfera en los datos espectroscópicos, se seleccionaron asteroides que pudieran observarse con una masa de aire inferior a 2.0, lo que mejora la calidad de las observaciones al reducir la dispersión y absorción de la luz por la atmósfera.

Adicionalmente, se priorizó la observación de asteroides que estuvieran cerca de su oposición. Un asteroide en oposición se encuentra directamente opuesto al Sol desde la perspectiva de la Tierra, lo que significa que está más cerca de la Tierra y es más brillante. Esta configuración permite que los asteroides sean visibles durante toda la noche y mejora la calidad de los datos espectroscópicos.

Las observaciones se realizaron durante las temporadas astronómicas asignadas y que están listadas en la tabla 2.1, aprovechando las condiciones climáticas favorables y la disponibilidad de tiempo de observación en el OAGH. Como se hace de manera estándar, se llevaron registros detallados en bitácoras para documentar información relevante sobre la toma de espectros, incluyendo detalles como la fecha y hora de observación, las condiciones atmosféricas, y cualquier anomalía o evento significativo durante el proceso.

En la tabla A.1, se detallan los datos obtenidos de los asteroides observados durante el periodo mencionado. Estos datos servirán como base tanto para el análisis individual de cada asteroide como para el análisis general de la familia Flora. Cada fila proporciona información específica sobre un asteroide, incluyendo su nombre, análogo solar utilizado, fecha de observación (Tiempo Universal), coordenadas de ascensión recta (AR) y declinación (DEC), así como su distancia heliocéntrica (Δ), distancia observador-asteroide (r), ángulo de fase (α), y magnitud visual (V). Para la obtención del diámetro (D), albedo (ρ) y magnitud absoluta (H), se recopilieron los datos de cada asteroide de la página Minor Planet Center One Asteroid Info [22].

2.2. Las observaciones

Con la muestra definida, se realizaron las observaciones espectroscópicas necesarias para este estudio. A continuación, se describe la instrumentación utilizada, junto con los detalles de las campañas de observación llevadas a cabo entre los años 2020 y 2021 en el Observatorio Astrofísico Guillermo Haro (OAGH).

2.2.1. Telescopio, instrumentación y detector

Para llevar a cabo las observaciones se empleó un telescopio reflector Ritchey-Chrétien, con un espejo primario de 2.12 metros de diámetro y un espejo secundario hiperbólico de 50 centímetros. Este telescopio ofrece una resolución espacial y capacidad de captación de luz ideales para la observación de los objetos astronómicos de nuestro interés.

En combinación con el telescopio, se utilizó un espectrógrafo **Boller & Chivens 2.1** equipado con una rejilla de difracción de 50 líneas por milímetro, lo que nos proporciona la capacidad de obtener espectros con suficiente resolución y precisión para lo requerido en nuestro estudio. Este

espectrógrafo, cuenta con una lámpara de He-Ar para calibrar los espectros en longitud de onda. Como detector se utilizó un CCD E2V42-40 de 2048x2048 píxeles con un tamaño de píxel de 13.5 micras y un bajo nivel de ruido de lectura, garantizando la sensibilidad necesaria para detectar incluso cuando las condiciones observacionales no son las mejores.

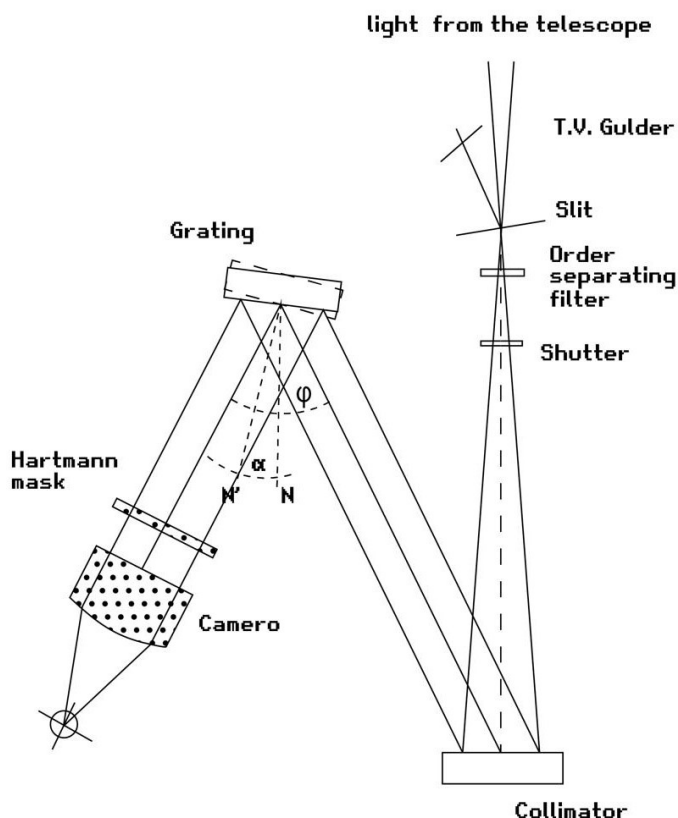


Figura 2.1: Diagrama esquemático del **espectrógrafo Boller & Chivens**, utilizado para las observaciones espectroscópicas en el Observatorio Astrofísico Guillermo Haro.

Durante el proceso de observación, se establecieron parámetros específicos para garantizar la calidad de los datos recopilados. El ancho de la rendija del espectrógrafo se fijó en 400 micras, lo que equivale a 3.2 segundos de arco en el cielo, permitiendo una óptima captura de la luz de los objetos observados. La dispersión espectral se mantuvo en $5.37 \text{ \AA}/\text{pixel}$, con una cobertura espectral que abarca aproximadamente de 4,000 a 9,500 \AA ($0.40 - 0.95 \mu\text{m}$), lo que optimiza el intervalo de respuesta del detector.

Además, se impuso un límite en la magnitud V de 18.5 para los objetos seleccionados, de esta forma se asegura que la señal a ruido en los espectros es la necesaria para nuestro análisis. Este límite de magnitud, además, ayuda a optimizar el tiempo de observación y con esto los recursos del observatorio.

2.2.2. Temporadas de observación

Las observaciones en el OAGH, entre los años 2020 y 2021, fueron principalmente conducidas de manera remota bajo la supervisión del Dr. José Ramón Valdés. Sin embargo, cuando comenzaba con el trabajo de investigación de esta tesis, me incorpore a las observaciones, esto fue durante el año de 2023, de la mano del M.C. Enrique Buendia, esta colaboración me permitió adquirir un mejor conocimiento del proceso de la obtención de datos. Durante las sesiones de observación, se exploraron diversos aspectos relacionados con la adquisición de espectros, como la configuración del espectrógrafo, el enfoque del telescopio y el control de la exposición.

Además, se analizó la respuesta del detector electrónico utilizado, el CCD E2V42-40 de 2048x2048 píxeles. Se discutieron aspectos relacionados con la calibración, la sensibilidad y el ruido de lectura del detector. Se destacó la importancia de mantener la estabilidad del sistema durante las observaciones para garantizar la homogeneidad de los datos obtenidos. Participar en las observaciones proporcionó una comprensión más completa del proceso de toma de datos.

Como ya mencionamos antes, las observaciones para este trabajo se llevaron a cabo durante diferentes temporadas astronómicas, las marcadas en la tabla 2.1:

Tabla 2.1: Temporadas de observación. En las columnas se encuentran el año, mes y días observados, respectivamente.

Año	Mes	Días observados
2020	Enero	24 y 25
2020	Febrero	24, 25 y 26
2020	Septiembre	20, 21, 22, 23 y 24
2020	Octubre	10, 11, 12 y 13
2020	Diciembre	17, 18, 19, 20 y 21
2021	Enero	7, 8, 9, 10 y 11
2021	Febrero	5, 6, 7, 8 y 9
2021	Marzo	6, 7, 8, 9, 10 y 11
2021	Abril	5, 6, 7, 8 y 9
2021	Junio	8, 9 y 10
2021	Septiembre	27 y 29
2021	Octubre	1, 28, 29 y 30
2021	Noviembre	29 y 30
2021	Diciembre	1

Para identificar de manera más eficiente los objetos estudiados, en la tabla A.1 se ha incluido la fecha de observación.

La asignación de las temporadas de observación la lleva a cabo un comité que, luego de revisar las solicitudes semestrales, en función de diversos factores, incluidas las condiciones climáticas previstas y la disponibilidad de tiempo en el observatorio, distribuye las noches de observación. En el caso de que durante una temporada de observación no se presenten condiciones favorables o surja algún problema técnico con el telescopio, se interrumpe la observación en esa noche particular. Sin embargo, se hace todo lo posible para reanudar las observaciones en cuanto sea factible, ya sea al día siguiente o en cuanto se resuelva el inconveniente técnico.

Aunque los días de observación pueden no ser continuos, se mantiene un registro detallado de cada sesión en las bitácoras, lo que resulta esencial para documentar la información relevante de

cada noche de observación. Es gracias a esto que las bitácoras desempeñan un papel fundamental al registrar detalles cruciales, como la fecha y hora de inicio y finalización de cada sesión de observación, las condiciones atmosféricas prevalecientes durante la noche, cualquier incidencia técnica o problema que pueda surgir, y cualquier otro evento relevante que pueda afectar la calidad de los datos obtenidos.

A través de las bitácoras, se logra mantener un registro completo y preciso de las observaciones realizadas durante cada temporada astronómica, lo que garantiza un respaldo para la reducción de los datos y el análisis subsiguiente de los resultados obtenidos.

Capítulo 3

Procesamiento de datos

La clasificación taxonómica de los asteroides, incluidos aquellos pertenecientes a la familia Flora, requiere de un meticuloso proceso de reducción de imágenes astronómicas. Este proceso, consiste en una serie de correcciones y ajustes destinados a corregir o minimizar los ruidos e imperfecciones inherentes a los detectores utilizados para capturar la señal colectada por los telescopios.

En este capítulo, describimos el proceso de reducción de imágenes, destacando su importancia en la obtención de datos fiables y precisos para la clasificación taxonómica de los asteroides. La reducción de imágenes astronómicas se divide en varios pasos clave, cada uno dirigido a corregir aspectos específicos de las imágenes capturadas. Examinaremos los principales pasos involucrados en el proceso de reducción, desde la corrección de bias hasta la eliminación de los efectos de los rayos cósmicos y la sustracción del fondo del cielo. Además, discutiremos la calibración en longitud de onda y la normalización de los espectros, pasos esenciales para llevar a acabo el análisis de los datos obtenidos.

Luego de llevar a cabo cada uno de estos pasos, estaremos en condiciones de realizar el cálculo de la distancia euclidiana para cada espectro y con esto obtener el mejor resultado al clasificar taxonómicamente a los asteroides de la familia Flora de nuestra muestra.

3.1. Entorno PyRAF: fundamentos y utilidad

PyRAF (Python-based IRAF) es un entorno de software diseñado específicamente para el análisis y procesamiento de datos astronómicos. Basado en el popular lenguaje de programación Python, PyRAF combina la flexibilidad y potencia de Python con las capacidades de IRAF (Image Reduction and Analysis Facility), un conjunto de herramientas utilizado ampliamente en astronomía para el análisis de datos.

PyRAF ofrece una serie de ventajas significativas para los astrónomos y científicos que trabajan con imágenes y espectros astronómicos, una de las principales ventajas de PyRAF es su capacidad para realizar una amplia gama de tareas de procesamiento de imágenes y espectros de manera eficiente y efectiva. Con PyRAF, los usuarios pueden acceder a un conjunto completo de herramientas para corregir imperfecciones en las imágenes, realizar calibraciones precisas y extraer información valiosa de los datos observacionales.

La instalación de PyRAF es relativamente sencilla y se puede realizar en una variedad de plataformas, incluyendo sistemas como Ubuntu - GNU/Linux. Además, PyRAF es compatible con

una amplia variedad de paquetes y bibliotecas de Python, lo que facilita su integración en flujos de trabajo existentes y la implementación de análisis personalizados.

Otra característica destacada de PyRAF es su capacidad para automatizar tareas repetitivas mediante scripts y rutinas personalizadas. Esto permite a los usuarios optimizar su flujo de trabajo y aumentar la eficiencia en el análisis de datos astronómicos, reduciendo el tiempo necesario para obtener resultados significativos.

3.2. Proceso de reducción de imágenes astronómicas

La reducción de imágenes astronómicas es un procedimiento esencial para mejorar la calidad de los datos obtenidos durante una observación. A continuación, detallaremos cada paso del proceso de reducción, siguiendo una metodología donde el entorno de software principal de trabajo es PyRAF:

3.2.1. Obtención de datos

El proceso comienza con la obtención de las observaciones espectroscópicas de los asteroides. Estos datos se adquieren durante temporadas de observación previamente establecidas (véase tabla 2.1), y cada noche de observación se procesa de forma independiente. Para llevar un registro detallado de cada sesión de observación, utilizamos una bitácora de información que explicamos anteriormente.

Es importante recalcar el uso de esta bitácora, aparte de lo que ya mencionamos anteriormente acerca de las temporadas y las fechas observadas, también nos ayudan en la toma de imágenes, ya que sirve como un respaldo para el proceso de reducción posterior. Registra detalles esenciales que pueden influir en la calidad de los datos, como la adecuada captura de imágenes tipo flats o bias.

3.2.2. Preparación de los datos

Un paso importante antes de iniciar la reducción, es crucial revisar los datos espectroscópicos. Esto implica asegurarse de que los archivos de datos estén en el formato adecuado y que se tenga acceso a la información relevante en los encabezados de los archivos FITS, como el tiempo de exposición, la fecha de la observación y la masa de aire.

3.2.3. Recorte de imágenes

Después de esta revisión, el primer paso de la reducción consiste en recortar las imágenes astronómicas para eliminar áreas no deseadas y dejar sólo el área efectiva. Especificamos los límites inferior y superior de la región que contiene datos óptimos. Estos límites se insertan en los parámetros de la tarea que se usa para recortar las imágenes, asegurando que solo se conserven las regiones de interés.

3.2.4. Corrección por bias

Una vez recortadas, las imágenes se someten a la corrección por bias. Este bias es una señal constante presente en todas las lecturas de píxeles debido al propio ruido electrónico del detector. Para corregirlo, se combinan múltiples imágenes de bias obtenidas con tiempos de integración cero, en este caso usamos 10 imágenes Bias, las cuales se obtienen al inicio de cada noche de observación. Este bias combinado, es restado de cada imagen objetivo, ya que promedia numérica y espacialmente estas variaciones.

3.2.5. Corrección por flat fields

Después de corregir el bias, se procede con la corrección por flat fields. Los flat fields son imágenes obtenidas para caracterizar la respuesta individual de cada píxel del detector. En este proceso, se promedian varias imágenes flat obtenidas mediante la iluminación uniforme de una pantalla con una fuente de luz. En nuestro caso, utilizamos cinco imágenes flat, obtenidas al inicio de cada noche de observación, de manera similar a los bias. La fuente de iluminación empleada es una lámpara de halógeno. Este flat promedio se normaliza para corregir las imágenes astronómicas, compensando las diferencias en la sensibilidad de los píxeles.

La normalización de los flats es fundamental para la calibración de imágenes astronómicas, ya que corrige las variaciones en la respuesta de cada píxel. El proceso de normalización consiste en dividir cada píxel de la imagen flat por un factor de normalización, que se calcula como la mediana o la media de la imagen flat. Esto garantiza que la respuesta de cada píxel se ajuste adecuadamente y se eliminen las variaciones no deseadas.

3.2.6. Calibración e identificación

Una vez completada la corrección de flats y su normalización, se procede a la calibración de las imágenes en longitud de onda mediante la identificación de líneas en los espectros de las lámparas de comparación. En el espectrógrafo Boller & Chivens, se cuenta con una lámpara de He-Ar o Helio-Argón, la cual fue utilizada para la calibración de los espectros reducidos. Este proceso, nos ayuda a determinar la correspondencia entre píxeles y longitudes de onda. Con este paso, calibramos las imágenes de nuestros asteroides tomadas durante la noche.

Siguiendo estos pasos se puede lograr una reducción efectiva de las imágenes astronómicas. Esta primera reducción se contempla para las imágenes tomadas en cada noche de observación de cada temporada. Posteriormente, se debe realizar la reducción de imágenes de cada asteroide para, de esta forma, determinar correctamente su taxonomía.

3.3. Reducción de espectros de asteroides

Continuamos con la reducción de espectros de cada asteroide, este proceso es importante para obtener datos espectroscópicos precisos, esencial en la obtención de la taxonomía de cada uno, y siendo parte de lo que buscamos para el análisis de esta familia. A continuación, se detallan los pasos para llevar a cabo este proceso:

3.3.1. Centrado del asteroide: eliminación de rayos cósmicos y ruido

Una vez concluido el proceso de reducción por noche, se procede a la eliminación de rayos cósmicos y ruido en cada imagen del asteroide. El ruido en imágenes astronómicas incluye cualquier señal no deseada que distorsiona la imagen original, y puede originarse en la electrónica del detector, fluctuaciones térmicas, o interferencias externas.

Los rayos cósmicos son partículas de alta energía provenientes del espacio exterior que impactan los detectores CCD, generando artefactos en las imágenes. Debido a su naturaleza aleatoria, la probabilidad de que un mismo píxel sea afectado en múltiples imágenes es baja.

Para mitigar el ruido como los rayos cósmicos, se alinean las imágenes obtenidas durante la noche de observación. Posteriormente, se combinan utilizando la mediana, lo que ayuda a suprimir el

ruido aleatorio y proporciona datos más precisos. En nuestro estudio, se emplean tres imágenes para este proceso. Además de la combinación por mediana, se puede aplicar un script de Python como PyCosmic para la corrección, siguiendo la metodología propuesta por Husemann et al. (2012)[24].

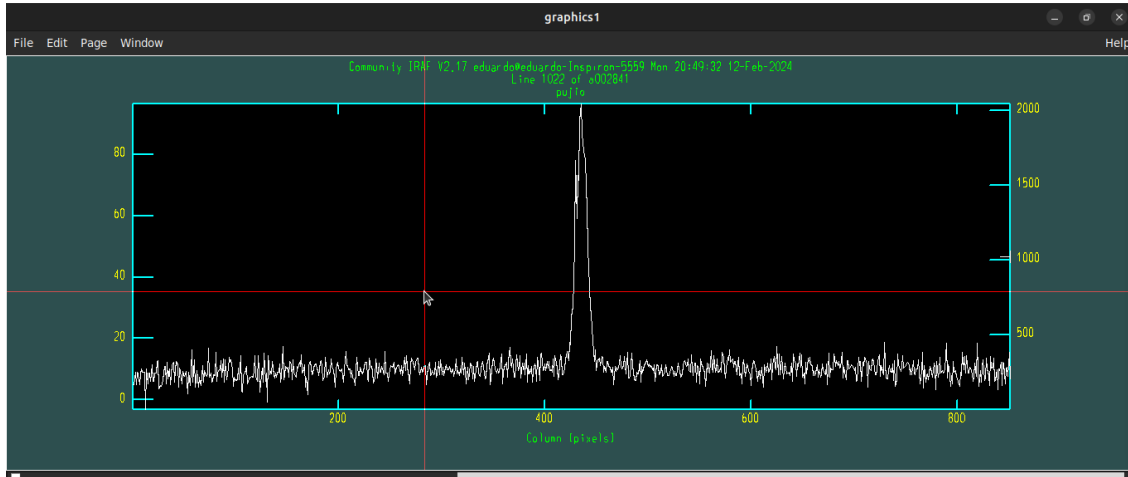


Figura 3.1: Espectro del asteroide (2841) Pujio luego de centrar y combinar los 3 espectros observados. De esta forma se eliminan rayos cósmicos y el ruido, obteniendo un espectro funcional.

3.3.2. Calibración de la longitud de onda del espectro del asteroide

Después de la eliminación del ruido y los rayos cósmicos, se procede a calibrar el espectro del asteroide en longitud de onda. Este paso es una continuación del proceso descrito en la sección **Calibración e identificación**. Utilizando las líneas espectrales conocidas de las lámparas de calibración para establecer la correspondencia entre los píxeles del detector y las longitudes de onda, se genera una función de transformación, misma que se utiliza para calibrar los espectros de los asteroides en longitud de onda, permitiendo un análisis preciso de sus características espectrales.

3.3.3. Sustracción del fondo de cielo

Parte de la luz contenida en la rendija del espectrógrafo es dispersada por el cielo nocturno debido a factores como la contaminación lumínica y las condiciones atmosféricas. Esta luz adicional debe ser restada de las imágenes capturadas para asegurar la precisión de los datos obtenidos.

Una vez calibrado el espectro del asteroide, se procede a la sustracción del fondo de cielo. Este proceso es crucial para eliminar la contribución del brillo del cielo, que puede distorsionar la precisión de la información en nuestros espectros. Para llevar a cabo esta tarea, se utiliza una extrapolación del fondo de cielo (background) para cada longitud de onda. Esto implica modelar y restar la contribución de la luz del cielo en cada longitud de onda de la imagen del objeto.

Al considerar factores como la contaminación lumínica y las condiciones atmosféricas, la correcta sustracción del fondo de cielo asegura que los espectros reflejen con mayor exactitud las características intrínsecas del asteroide, eliminando cualquier contribución externa. Este paso es esencial para obtener la información que llega únicamente del asteroide, permitiendo su comparación con otros objetos.

3.3.4. Extracción del espectro unidimensional

Después de corregir por el fondo de cielo, se procede a la extracción del espectro unidimensional del asteroide. Esto implica seleccionar una región específica de la imagen bidimensional y sumar las columnas en esa región para obtener un espectro unidimensional que represente con mejor señal las características del asteroide. Realizamos este paso para poder tratar los espectros como datos vectoriales en el lenguaje de programación elegido para su tratamiento, este caso el nuestro es PyRaf.

3.3.5. Corrección por extinción atmosférica

Posteriormente, se aplica una corrección por extinción atmosférica al espectro del asteroide. Esta corrección es necesaria para compensar los efectos de absorción y dispersión de la luz por la atmósfera terrestre, que dependen de la masa de aire atravesada por la luz del asteroide.

La masa de aire es un factor que depende de la “cantidad de atmósfera” que la luz atraviesa antes de llegar al observador, y varía según la altitud del asteroide en el cielo. Cuando el asteroide se observa a diferentes altitudes, la cantidad de atmósfera atravesada cambia, afectando la intensidad de la luz debido a la extinción atmosférica.

En nuestras observaciones, la masa de aire para cada imagen se registró en las bitácoras de observación.

3.3.6. Calibración del espectro del análogo solar

Una vez completados los pasos anteriores con el espectro del asteroide, se repiten los mismos procedimientos para el espectro del análogo solar. Esto incluye el alineado del espectro, la calibración en longitud de onda, la sustracción del fondo de cielo y la extracción del espectro unidimensional.

Un análogo solar es una estrella cuyas características espectrales son similares a las del Sol. Se utiliza como referencia en estudios espectroscópicos para calibrar y comparar los espectros de otros objetos celestes, como los asteroides, eliminando la contribución de la luz solar. En este estudio, el análogo solar se observó inmediatamente después de haber obtenido los espectros del asteroide, y en una región del cielo muy próxima, lo que permite una comparación adecuada dado que las condiciones de observación serán casi las mismas que las del asteroide.

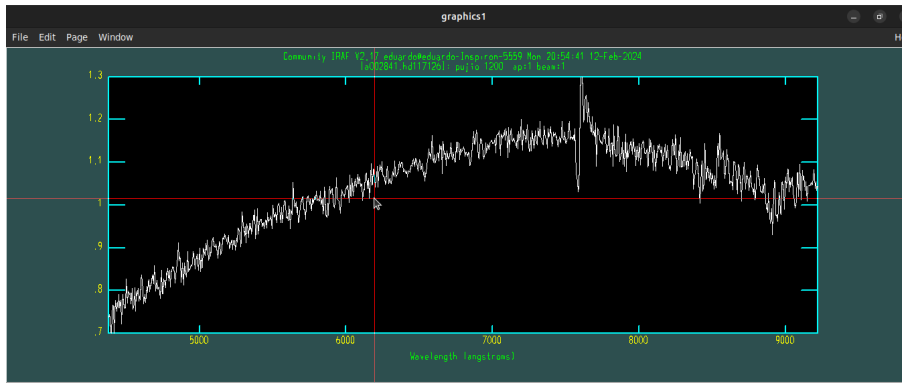
3.3.7. Corrección de la contribución solar en el espectro del asteroide mediante un análogo solar

Finalmente, eliminamos la contribución del Sol en el espectro del asteroide usando su correspondiente análogo solar. Esto se realiza normalizando las cuentas del análogo solar y del espectro del asteroide a 5500 Å. Posteriormente, dividimos el espectro del asteroide normalizado por el espectro del análogo solar normalizado. Este proceso permite eliminar la contribución del Sol al espectro del asteroide, revelando así sus propias características espectrales.

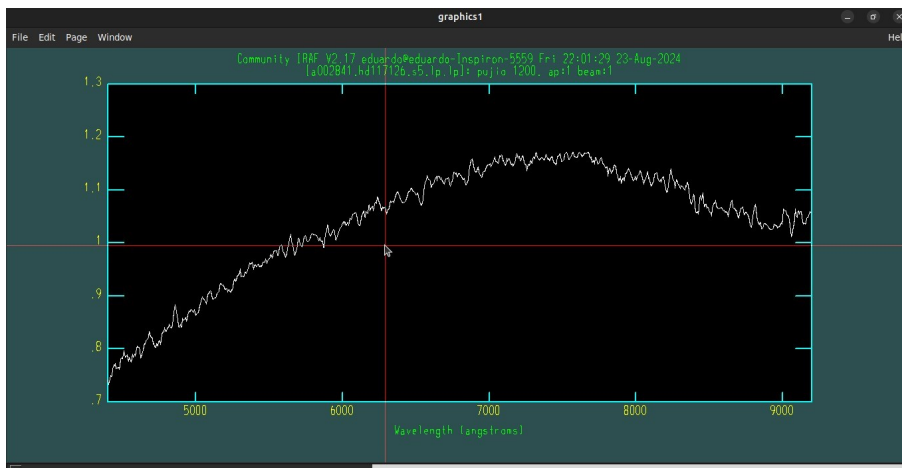
3.3.8. Suavizado de Espectros

Una vez corregida la contribución solar, se procede a suavizar los espectros de los asteroides. Este paso es crucial para reducir el ruido presente en los datos observacionales y resaltar las características espectrales auténticas del asteroide. El suavizado permite eliminar pequeñas

fluctuaciones que no están asociadas con la estructura real del espectro, garantizando que las características observadas reflejen con mayor precisión la composición mineralógica del asteroide.



(a) Espectro del asteroide (2841) Pujio antes de aplicar el suavizado. Se observa la presencia de ruido que puede afectar la interpretación de las características espectrales.



(b) Espectro del asteroide (2841) Pujio después de aplicar el suavizado. El ruido ha sido reducido, permitiendo una mejor identificación de las características espectrales.

Figura 3.2: Comparación del espectro del asteroide (2841) Pujio antes y después del proceso de suavizado. En la **figura 3.2a** observamos el espectro obtenido en bruto antes de ser suavizado y corregido de las regiones con bandas telúricas, mientras que en la **figura 3.2b** observamos el espectro ya suavizado y corregido.

El proceso de suavizado es fundamental para obtener espectros más claros y menos ruidosos, lo que facilita su análisis y posterior clasificación taxonómica, como podemos ver en la figura 3.3. Este paso asegura que los espectros representen de manera fidedigna las propiedades del asteroide, permitiendo así clasificaciones más confiables y consistentes.

Podemos cerrar este capítulo concluyendo que, si realizamos con cuidado y de manera exitosa ambas etapas de la reducción, podremos tener los espectros de los asteroides listos para proceder a determinar la taxonomía de cada uno de los 158 espectros de la muestra. A continuación expondremos los resultados obtenidos de esta investigación.

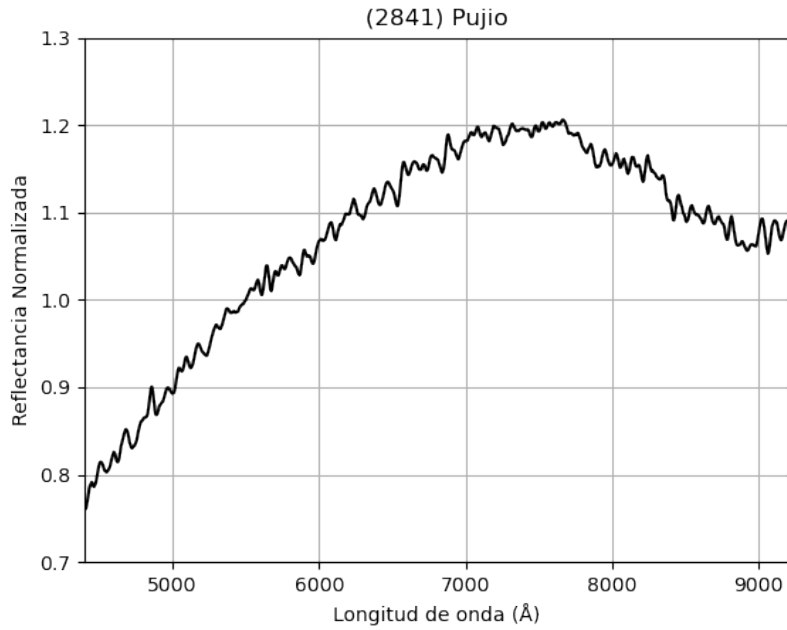


Figura 3.3: Espectro final del asteroide (2841) Pujio después de la corrección solar y el proceso de suavizado. Este espectro es utilizado para la clasificación taxonómica.

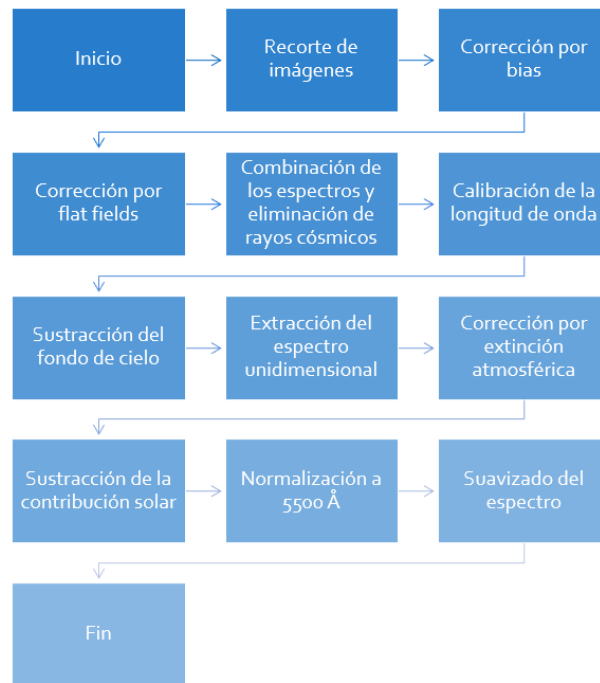


Figura 3.4: Diagrama de flujo que muestra todo el proceso de reducción de datos espectroscópicos previamente explicado. Este diagrama proporciona una visión general de los pasos clave, desde la corrección inicial hasta la normalización final, asegurando la calidad y precisión de los espectros obtenidos.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Clasificación taxonómica de los asteroides de la familia Flora

La clasificación taxonómica en astronomía, específicamente en el estudio de asteroides, se apoya en el análisis de los espectros de reflectancia de estos cuerpos celestes. Una técnica comúnmente utilizada es el Método de Distancia Espectral, que se basa en comparar la similitud entre espectros de asteroides para asignarles una clasificación taxonómica.

La Distancia Espectral permite cuantificar la diferencia entre dos espectros en función de sus características espectrales. Este concepto se explicará en detalle más adelante.

El análisis de las distancias espectrales entre los espectros de asteroides es una herramienta clave en la clasificación taxonómica de estos cuerpos celestes, permitiendo identificar patrones, similitudes y diferencias en sus propiedades espectrales que son fundamentales para comprender su composición y evolución en el sistema solar.

4.2. Método de la distancia espectral

El método de la distancia espectral es una técnica fundamental en la clasificación taxonómica de asteroides, está basada en el análisis comparativo de los espectros de reflectancia de estos cuerpos celestes. Esta metodología se aplica para determinar la similitud entre el espectro de un asteroide no clasificado y los espectros de referencia de asteroides previamente categorizados, lo que permite asignar al asteroide un tipo taxonómico.

4.2.1. Distancia Euclidiana

La métrica de la distancia euclidiana se refiere a la medida de la diferencia entre dos espectros. Esta distancia se calcula como la raíz cuadrada de la suma de las diferencias cuadráticas entre las intensidades de los puntos espectrales correspondientes en los dos espectros.

$$Dx = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}$$

Donde:

- Dx es una medida de la diferencia entre los espectros. Esta cantidad es similar al error cuadrático, permite cuantificar la similitud entre espectros, determinando su clasificación taxonómica.
- X y Y son los dos espectros que se están comparando, X (observado) y Y (de referencia).
- X_i es la intensidad de la luz reflejada en la longitud de onda i para el espectro observado (en este caso dentro del rango de 4400 Å a 9200 Å).
- Y_i es la intensidad correspondiente en la misma longitud de onda i para el espectro de referencia en la base de datos.
- n es el número total de puntos de datos o longitudes de onda en el espectro que se están comparando.

A lo largo de este documento, D.E simboliza la Distancia Euclidiana o Espectral. Ambos términos se utilizarán de manera intercambiable y se referirán simplemente como DE.

4.2.2. Conjuntos de Control

Para aplicar el método de las distancias espectrales, se utilizan conjuntos de control que contienen espectros de referencia de asteroides clasificados previamente. Estos conjuntos incluyen una casi toda la variedad de clases taxonómicas y se procesan de acuerdo con los requerimientos de la investigación, como la suavización de los espectros y la segmentación en puntos discretos en longitud de onda. En nuestro estudio usaremos el conjunto proporcionado por la base de datos SMASS.

Base de datos SMASS

La base de datos de SMASS (Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey) es una colección de datos espectroscópicos detallados sobre asteroides del Cinturón Principal del sistema solar. Este cinturón, situado entre las órbitas de Marte y Júpiter, alberga una gran cantidad de asteroides y es objeto de intenso estudio para comprender la composición y evolución de estos cuerpos celestes.

La base de datos SMASS se divide en dos grandes fases: SMASS I y SMASS II, cada una con sus propias características y contribuciones significativas al campo de la astronomía asteroidal.

SMASS II

Nosotros utilizaremos la base datos SMASS II [1] la cual es una versión actualizada y ampliada de la base de datos SMASS original que proporciona una cantidad mucho mayor de observaciones espectroscópicas de asteroides del cinturón principal. Esta fase del estudio ha sido fundamental para profundizar nuestra comprensión de la diversidad en la composición de los asteroides y su relevancia en la historia y evolución del sistema solar. Fue llevada a cabo, al igual que SMASS I, por el equipo liderado por Schelte J. Bus y Richard P. Binzel en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT).

La base de datos SMASS II es el resultado de la segunda fase del Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey, que produjo un conjunto de 1447 espectros obtenidos con CCD en longitud de onda visible. Estos datos proporcionan una base para desarrollar una nueva taxonomía de asteroides que utiliza más información contenida en los espectros de CCD.

La base de datos SMASS II es significativa por su tamaño, ya que incluye espectros para más de tres veces la cantidad de asteroides utilizados en la formulación de la taxonomía de Tholen. La consistencia interna dentro del conjunto de datos es fundamental para la creación de una

taxonomía efectiva. La base de datos SMASS II ha permitido la clasificación de asteroides en tres grandes grupos (complejos S, C y X) que siguen las definiciones clásicas de los asteroides de tipo S, C y X.

El objetivo principal del SMASS II era caracterizar la composición mineralógica de los asteroides del cinturón principal mediante la obtención de espectros visibles e infrarrojos de una amplia muestra de asteroides. Estos espectros proporcionan información sobre la reflectancia de la superficie de los asteroides en función de la longitud de onda de la luz.

SMASS II utilizó un método de observación y análisis sistemático para clasificar los asteroides en diferentes tipos taxonómicos, lo que ayuda a comprender la diversidad y evolución de estos cuerpos en el sistema solar. Los datos recopilados por SMASS II han sido fundamentales para estudios posteriores sobre la composición y origen de los asteroides en el cinturón principal.

Además, SMASS II ha servido como una referencia importante para comparar y validar otros estudios espectroscópicos de asteroides, contribuyendo significativamente al conocimiento científico sobre la naturaleza de estos cuerpos celestes.

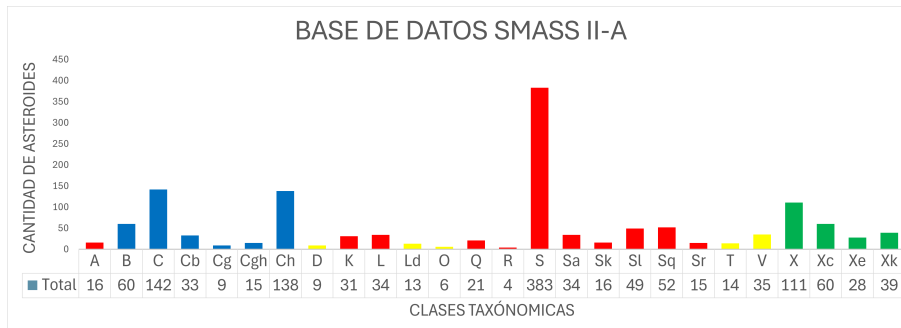
Conjunto de control SMASSII Aumentado

En este caso, en específico del SMASS II, nos centraremos en el conjunto de control aumentado llamado SMASSII-A ([5]).

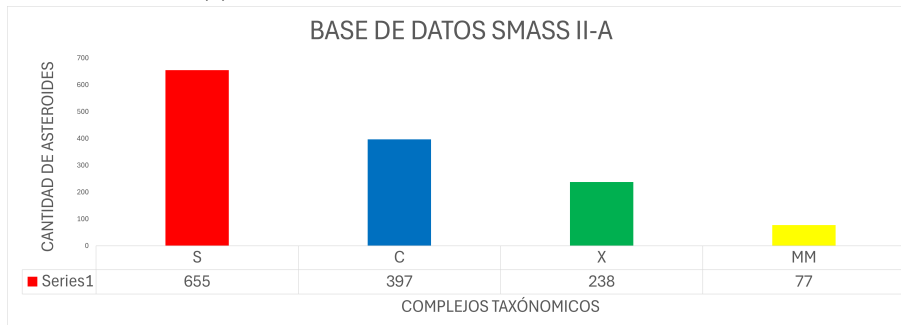
El conjunto SMASS II aumentado incluye 1367 espectros de asteroides clasificados y procesados bajo la taxonomía de Bus & Binzel. De estos espectros, 1341 proceden de la segunda fase del SMASS II (Bus & Binzel 2002 [1]). Los espectros del SMASS II tienen la característica de ser suavizados mediante una función spline de tercer orden y fraccionarse en 49 puntos distanciados por $0.01 \mu\text{m}$. Al realizar un análisis de las distribuciones para todas las clases taxonómicas incluidas en el conjunto SMASS II, se notó que las dos taxonomías menos representadas eran las clases Q y O (con uno y cero especies, respectivamente). Debido a esto, se decidió adicionar espectros de estas clases, resultando en un total de 6 espectros de la clase O y 20 de la Q. Los espectros adicionados a este conjunto de control pertenecen a distintas etapas de los estudios SMASS y se procesaron de forma análoga al resto de las entidades de esta colección.

En la **figura 4.1** se muestra la distribución taxonómica, contemplando la adición de espectros en el conjunto SMASSII-A. La **Figura 4.1a** presenta la distribución de las **clases taxonómicas** específicas que describen con detalle las propiedades espectrales de los asteroides, como por ejemplo, las clases **A, S, O, Q, V**, entre otras. Por otro lado, la **Figura 4.1b** ilustra la agrupación de estas clases en **complejos taxonómicos** más amplios, que son conjuntos de clases que comparten características espectrales y composicionales similares. Estos complejos, como **C, S, X y MM**, son categorías más generales que permiten simplificar el análisis al agrupar clases con propiedades comunes.

La agrupación en complejos taxonómicos es de gran importancia, ya que facilita la interpretación y el análisis de los datos espectrales al reducir la complejidad inherente de las numerosas clases individuales. Al agrupar las clases en complejos, se pueden identificar tendencias generales y patrones en la composición de los asteroides, lo que es esencial para estudios de distribución, evolución y origen dentro de las familias de asteroides. En el caso de este estudio, se ha seguido la agrupación propuesta por Bus & Binzel (2002) [1] quienes utilizaron el análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés), lo cual no solo permite un análisis más estructurado, sino que también facilita la comparación con otros estudios taxonómicos, asegurando una mayor consistencia y coherencia en la clasificación de los asteroides.



(a) Muestra individual de las clases taxonómicas



(b) Muestra agrupada en los complejos C, S, X y MM

Figura 4.1: Distribución de clases taxonómicas en el conjunto SMASSII-A individual de las clases taxonómicas (**Figura 4.1a** y agrupadas en los complejos (**Figura 4.1b** en S, C, X y MM usando el análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés) [1]. Los colores representan diferentes complejos taxonómicos: Rojo para el complejo S (A, K, L, Q, R, S, Sa, Sk, Sl, Sq, Sr), Azul para el complejo C (B, C, Cb, Cg, Cgh, Ch), Amarillo para los Miembros Menores (D, Ld, O, T, V), y Verde para el complejo X (X, Xc, Xe, Xk).

4.2.3. Implementación del Conjunto de control SMASSII-A

La implementación del conjunto SMASS II-Aumentado (SMASS II-A) para la taxonomía de asteroides se basa en una Función de Peso (FP) que considera las k menores distancias espectrales (DE) en comparación con el espectro del asteroide de interés y el recuento de cada clase taxonómica dentro del SMASS II-A. La elección de los valores de k y la determinación de una Función de Peso son cruciales en nuestro estudio, por lo que explicaremos detalladamente ambos conceptos en esta sección.

Para evitar subjetividades derivadas de la intervención humana, hemos desarrollado un sistema de puntaje que se utilizará para la determinación de las clases taxonómicas de los espectros de asteroides analizados en esta tesis. Este sistema de puntaje engloba los conceptos de puntaje, media, frecuencia y peso, los cuales serán explicados en detalle más adelante también en esta sección.

Menores Distancias Espectrales

El **valor de k** representa la cantidad de espectros de comparación que mantienen la distancia espectral más pequeña con respecto al espectro del asteroide que se estudia. En otras palabras, cuando se menciona $k = 10, 30$ o 50 , significa que se están considerando los 10, 30 o 50 espectros patrón más similares al espectro del asteroide en estudio. Estos valores de k permiten analizar diferentes niveles de similitud y obtener una clasificación taxonómica más precisa al analizar los resultados.

La selección de los valores de $k = 10, k = 30$ y $k = 50$ en nuestro estudio tiene como objetivo observar si la clasificación taxonómica varía en función de la cantidad de objetos considerados en el cálculo de la distancia euclidiana de cada espectro. Se espera que la clasificación no varíe significativamente, o al menos no varíe entre los complejos taxonómicos principales (S, C, X y MM). Sin embargo, es posible que algunos objetos presenten variaciones entre clases taxonómicas y dentro de los mismos complejos taxonómicos dependiendo del valor de k utilizado.

Estas variaciones pueden indicar anomalías en el espectro, que podrían deberse a una calidad no óptima de los datos. No obstante, también existe la posibilidad de que el espectro sea de calidad óptima, lo que requeriría un análisis más detallado para identificar otras causas de la variabilidad observada. Por lo tanto, es fundamental en este estudio analizar la clasificación obtenida para cada objeto utilizando estos tres valores de k , para evaluar la consistencia de la clasificación taxonómica y discutir posibles anomalías espectrales.

Sistema de Puntaje

El sistema de puntaje es un método cuantitativo utilizado para determinar la clasificación taxonómica de los espectros de asteroides. Este sistema asigna una puntuación a cada clase taxonómica basada en la frecuencia con la que aparecen entre los k espectros más similares al espectro del asteroide en estudio. Posteriormente, se calcula la media de estos puntajes, que refleja la consistencia de la clase a través de los diferentes valores de k . Este enfoque permite una evaluación objetiva y estructurada de las similitudes espectrales, eliminando subjetividades en la clasificación y proporcionando una base sólida para determinar la pertenencia taxonómica de un asteroide. Ya hemos hablado de k y su importancia en la selección de espectros patrón. A continuación, se explicarán en detalle los conceptos y pasos utilizados en este método, incluyendo el cálculo de frecuencias, puntajes, medias, pesos y la función de peso final.

- **Puntaje:** En el sistema de puntaje se asigna una puntuación a cada clase taxonómica

basada en la cantidad de veces que aparece entre los k espectros más cercanos.

- **Media:** La media se calcula como el promedio de los puntajes obtenidos para una clase taxonómica específica. Por ejemplo, si una clase tiene puntajes de 3, 7 y 10 para diez valores de k , la media sería:

$$\text{Media} = \frac{3 + 7 + 10}{10} = 2$$

- **Frecuencia:** La frecuencia se refiere a la cantidad de veces que una clase taxonómica específica aparece entre los k espectros patrón más cercanos. Por ejemplo, si para $k = 10$ se encuentran 3 espectros patrón pertenecientes a la clase taxonómica S, la frecuencia de la clase S sería 3.
- **Peso:** El peso es una medida de la importancia de una clase taxonómica en la clasificación final del asteroide. Se calcula multiplicando la frecuencia de aparición de una clase por algún factor de ponderación que puede incluir la media de los puntajes. Por ejemplo, si la frecuencia de la clase S es 3 y la media es 0,8, el peso sería $3 \times 0,8 = 2,4$.

Es importante aclarar en este punto que en el conjunto de control SMASSII-A se añaden espectros en las clases taxonómicas Q y O dado que en el caso de tener menos espectros, pueden afectar al peso que se le daría en la clasificación al tener una menor frecuencia que otras clases y dado los valores k utilizados, es por ello que se añaden 6 y 20 espectros respectivamente.

- **Función de Peso:** La función de peso es una normalización de los pesos calculados para todas las clases taxonómicas. Se obtiene sumando todos los pesos y dividiendo cada peso individual por esta suma. Esto convierte los pesos en una escala relativa que suma 1, permitiendo comparar la importancia relativa de cada clase taxonómica. La fórmula es:

$$\text{FP}_i = \frac{P_i}{\sum_{j=1}^N P_j}$$

donde FP_i es la función de peso de la clase i , P_i es el peso de la clase i , y $\sum_{j=1}^N P_j$ es la suma de los pesos de todas las clases taxonómicas consideradas.

Siguiendo este proceso podemos designar una función de peso para las clases taxonómicas. Siendo que la función de peso con mayor porcentaje será la designada.

Criterios de Desempate

En situaciones donde las funciones de peso para dos o más clases taxonómicas son muy similares (diferencia menor a 0.10), se aplica el siguiente criterio de desempate:

1. Albedo Geométrico (p_v):

- El albedo geométrico (p_v) es una medida de la reflectividad de la superficie del asteroide. Se define como la fracción de la luz solar incidente que es reflejada directamente hacia el observador.
- En caso de empate, se selecciona la clase taxonómica del asteroide objetivo que tenga el albedo geométrico más cercano al valor promedio de albedo de su clase taxonómica esperada. Este valor, en caso de estar disponible, puede ser obtenido de fuentes como la base de datos NEOWISE y otras bases de datos astronómicas especializadas [5].

Este parámetro minimiza la intervención subjetiva permite una mayor exactitud en la identificación de las clases taxonómicas, sin embargo, dadas las características de la muestra, no fue necesario utilizarlo.

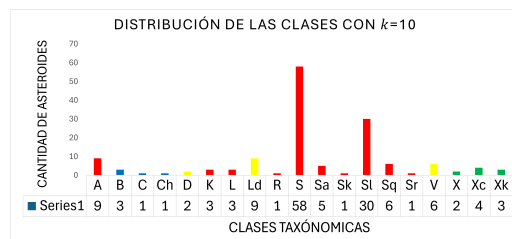
Resultados del Análisis Comparativo

En el Apéndice A, en la tabla A.3 se presenta una comparación de las distancias euclidianas obtenidas al designar taxonomías utilizando el conjunto de control de SMASS II-A, considerando el valor de k para 10, 30 y 50 DE para cada asteroide. Se incluye también la designación taxonómica encontrada en la literatura como referencia para la comparación entre esta última y lo obtenido en esta tesis. Con un asterisco se marcaron aquellas taxonomías no confirmadas y que son únicamente las propuestas del autor que le asignó esa taxonomía al asteroide. Se observa una comparación directa de las distancias euclidianas obtenidas en función del número de objetos utilizados para la asignación taxonómica.

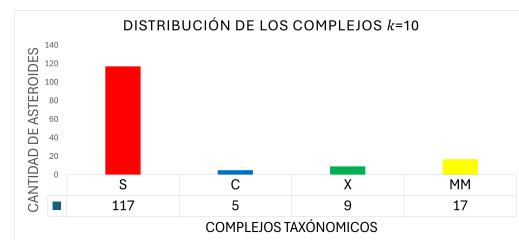
Para seleccionar la muestra a observar, el criterio principal fue que no tuvieran clasificación taxonómica previa. No obstante, para la fecha en que se llevó a cabo el análisis de los datos, se encontró que, de los 148 asteroides evaluados, 67 ya habían sido clasificados, como se muestra en la tabla A.3 (estos asteroides no tienen un asterisco). Por otro lado, 81 asteroides se clasifican por primera vez en este estudio siguiendo los protocolos y metodologías establecidos (marcados con un asterisco). Este hallazgo subraya la contribución significativa de este trabajo al ampliar el conocimiento taxonómico de la familia Flora.

4.3. Estadística simple de la clasificación

En esta sección, se llevará a cabo un análisis estadístico sencillo de la clasificación taxonómica de los asteroides utilizando los resultados obtenidos de las distancias espectrales calculadas con conjuntos de datos usando valores de k de 10, 30 y 50 para cada asteroide, estos mismos resultados los podemos ver en las figuras 4.2, 4.3 y 4.4. Los espectros obtenidos los clasificamos y agrupamos siguiendo la designación que se vio en el SMASSII-A en la figura 4.1.



(a) Muestra individual las clases taxonómicas.

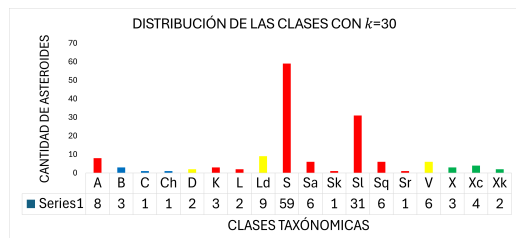


(b) Muestra agrupada en los complejos S, C, X y MM.

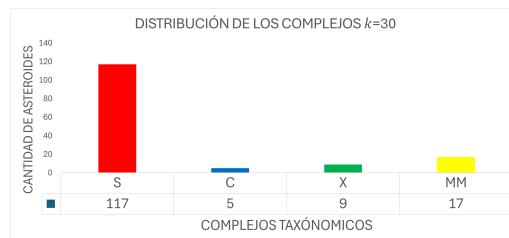
Figura 4.2: Distribución de las clases obtenidas en el estudio con $k = 10$: individual de las clases taxonómicas (**Figura 4.2a**) y agrupadas en los complejos S, C, X y MM (**Figura 4.2b**).

4.3.1. Asteroides con Función de Peso (FP) Consistente en Todas las Categorías

En primer lugar, identificamos 34 asteroides cuya clasificación taxonómica es consistente en las tres categorías evaluadas ($k=10$, $k=30$ y $k=50$), ya que la función de peso (FP) es igual a 1.0 para cada uno de estos valores de k . Esto significa que la clasificación taxonómica de estos

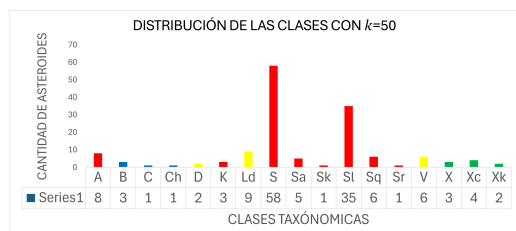


(a) Muestra individual de las clases taxonómicas.

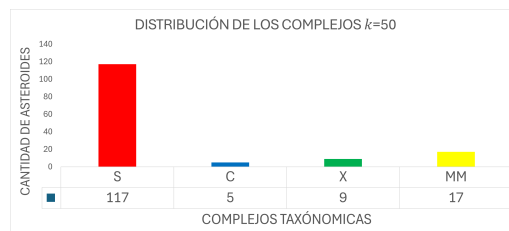


(b) Muestra agrupada en los complejos S, C, X y MM.

Figura 4.3: Distribución de las clases obtenidas en el estudio con $k = 30$: individual de las clases taxonómicas (Figura 4.3a) y agrupadas en los complejos S, C, X y MM (Figura 4.3b).



(a) Muestra individual de las clases taxonómicas.



(b) Muestra agrupada en los complejos S, C, X y MM.

Figura 4.4: Distribución de las clases obtenidas en el estudio con $k = 50$: individual de las clases taxonómicas (Figura 4.4a) y agrupadas en los complejos S, C, X y MM (Figura 4.4b).

asteroides no varía entre las diferentes evaluaciones, lo que indica una estabilidad significativa en sus características a través de distintas observaciones. La lista a continuación presenta estos asteroides, junto con su nombre y número de designación:

Arabella (841), Paula (1314), Turku (1496), Picksamaki (1523), Mirnaya (1610), Karel (1682), Dobrovolsky (1789), Ambartsumian (1905), Tucapel (2013), Jihlava (2080), AndreaDoria (2175), Kozyrev (2536), Pujio (2841), Parvati (2847), Caldira (2926), Newburn (2955), Kristensen (3455), Klopsteg (3520), Boyan (3681), Zichichi (3951), Odin (3989), Simpson (4788), Miho (4806), Karge (4822), Oozora (5214), Zubitskia (6232), Sicardy (6280), Udagawa (4632), Brehm (7054), Johnpond (7542), Beatles (8749), Buxus (8852), Bomben (12834) y Therberens (16118).

Cabe destacar que todos los asteroides mencionados tienen la taxonomía clasificada como “S”.

4.3.2. Asteroides con variación en su taxonomía

A continuación, se presenta el análisis de asteroides que muestran variaciones en su taxonomía entre las categorías evaluadas. Estos cambios pueden ser indicativos de características mixtas o variaciones significativas en la composición o superficie del asteroide. Aquí están los detalles de estos asteroides, incluyendo sus números, nombres, taxonomías y valores de FP en cada categoría:

4.3.3. Resultados del análisis estadístico simple

Este análisis estadístico nos presenta dos grupos principales: aquellos con una función de peso (FP) de 1.0 en todas las categorías y aquellos que muestran variaciones en su taxonomía entre las categorías evaluadas.

Tabla 4.1: Asteroides cuya taxonomía cambia al usar diferentes k-valores. En la primera columna se encuentra el nombre del asteroide y en el resto la taxonomía encontrada para cada valor de k utilizado (10, 30 y 50, respectivamente). Entre paréntesis el valor de la función de peso.

Asteroide	Taxonomía k=10	Taxonomía k=30	Taxonomía k=50
Steina (707)	L (FP: 0.76)	Sl (FP: 0.51)	Sl (FP: 0.47)
Kama (1387)	Xk (FP: 0.63)	X (FP: 0.37)	X (FP: 0.43)
Mitchella (1455)	A (FP: 0.67)	Ld (FP: 0.52)	A (FP: 0.44)
Zoya (1793)	Ld (FP: 0.37)	Sa (FP: 0.38)	Sa (FP: 0.33)
Paganini (2859)	S (FP: 0.74)	S (FP: 0.49)	Sl (FP: 0.49)
Delasalle (3002)	L (FP: 0.82)	L (FP: 0.59)	Sl (FP: 0.50)
Bronnina (3385)	Ld (FP: 0.67)	A (FP: 0.52)	Ld (FP: 0.47)
Koptelov (3968)	Sr (FP: 0.59)	S (FP: 0.70)	S (FP: 0.79)
Voitkevich (4475)	Sa (FP: 0.76)	Sa (FP: 0.55)	Sl (FP: 0.56)
Tottori (4720)	L (FP: 0.91)	L (FP: 0.47)	Sl (FP: 0.48)
Nunes (5313)	A (FP: 0.52)	Ld (FP: 0.54)	Ld (FP: 0.43)
1989dc (13508)	R (FP: 0.83)	Sr (FP: 0.55)	Sr (FP: 0.59)

Asteroides con FP 1.0 Consistente

Los asteroides con una FP consistente de 1.0 en todas las categorías sugieren una homogeneidad notable en sus características físicas. En su totalidad de estos asteroides pertenecen a la taxonomía S, lo que puede indicar similitudes en su composición y origen, algo que es concordante con lo esperado de los resultados dada la propuesta inicial donde se supone que todos estos asteroides de la familia flora deberían tener una taxonomía S.

Asteroides con cambio de taxonomía

En la tabla 4.1 podemos observar aquellos asteroides que muestran variaciones en su taxonomía entre las diferentes categorías, lo que puede indicar dos posibles causas. La primera posibilidad es una baja calidad o una calidad no óptima de los datos espectrales. La segunda posibilidad, en caso de que los datos sean de buena calidad, requiere una exploración adicional para justificar esta anomalía. En nuestro estudio, inicialmente seleccionamos 158 espectros distintos, de los cuales descartamos 10 debido a su clara baja calidad. Por lo tanto, es posible que existan más casos que debamos rectificar en nuestro análisis de resultados.

Es importante señalar que esta variabilidad, que podría ser indicativa de una baja calidad en el espectro obtenido, solo se considera relevante cuando el cambio ocurre entre diferentes complejos taxonómicos. Existen casos en los que, aunque hay un cambio en la taxonomía, no representa una variabilidad significativa dentro del complejo taxonómico. Por ejemplo, el asteroide Steina (707) cambia de la taxonomía L a Sl, lo que sugiere una variación en su clasificación dependiendo de la escala de evaluación, pero no un cambio en su complejo taxonómico.

Más adelante comentaremos los resultados de la revisión de aquellos asteroides que cambiaron de complejo taxonómico. Discutiremos si se debe a que el espectro es de baja calidad o a algún otro efecto.

Capítulo 5

Análisis y discusión de los resultados

Para proceder con el análisis de los espectros de asteroides de la familia Flora, se cuenta inicialmente con un total de 158 espectros adquiridos durante las observaciones realizadas en el Observatorio Astrofísico Guillermo Haro (OAGH). Sin embargo, es importante destacar que durante el proceso de evaluación y selección de los datos, se identificaron ciertas inconsistencias y problemas técnicos que llevaron a la exclusión de 10 de estos espectros. Las razones son las siguientes:

- El primer espectro descartado presentaba detalles inusuales que sugerían la presencia de señales anómalas que no correspondían a un patrón esperado de ruido o señal astronómica. A pesar de los intentos por corregir o interpretar estos detalles, se determinó que el espectro era inutilizable para el propósito del estudio.
- Los espectros de los nueve asteroides restantes fueron descartados debido a la presencia de ruido significativo, lo cual afectaba la calidad y fiabilidad de los datos. El ruido en los espectros puede distorsionar las características espectrales de los asteroides y dificultar su clasificación taxonómica precisa.

Por lo tanto, tras la exclusión de los espectros correspondientes a 10 asteroides por las razones mencionadas, se procedió con el análisis detallado de los 148 asteroides restantes para identificar y clasificar taxonómicamente a aquellos pertenecientes a la familia Flora. Este análisis se llevó a cabo siguiendo los protocolos y metodologías establecidas en el estudio.

Es importante destacar que, aunque se observaron 163 asteroides, solo se obtuvieron 158 espectros distintos, ya que cinco asteroides fueron observados en dos ocasiones debido a condiciones climáticas adversas durante las noches de observación. En todos los casos, se utilizó únicamente el espectro de mejor calidad para el análisis.

5.1. Tipos taxonómicos

En el análisis de los asteroides de la familia Flora, es fundamental considerar los tipos taxonómicos que se utilizan para clasificar y caracterizar estos cuerpos celestes en función de sus propiedades espectrales.

Dentro de los tipos taxonómicos más relevantes en el estudio de asteroides se encuentra el tipo S, que representa una categoría importante debido a su prevalencia y características distintivas. Los asteroides de tipo S suelen estar compuestos principalmente por silicatos y metales, lo que les confiere propiedades espectrales específicas que los diferencian de otros tipos taxonómicos. La clasificación precisa de los asteroides de tipo S es crucial para identificar patrones y relaciones en

la familia Flora y para comprender su origen y evolución.

Además del tipo S, existen otros tipos taxonómicos, como los tipos C, X y MM, que también desempeñan un papel significativo en la composición de la población de asteroides. Estos tipos representan diferentes composiciones mineralógicas y propiedades espectrales, aportando diversidad y complejidad al estudio de la familia Flora. Si bien el tipo S se destaca como el principal en este análisis, la inclusión y consideración de otros miembros taxonómicos es crucial para una comprensión integral de la familia. Estos miembros pueden dividirse en dos categorías: aquellos con una taxonomía bien definida y estable, que pueden ser considerados como “miembros intrusos”, y aquellos que presentan variabilidad en su clasificación taxonómica. Para estos últimos, se propone realizar una revisión y análisis exhaustivos, ya que la presencia de una variabilidad taxonómica sugiere la existencia de causas subyacentes que deben ser investigadas.

En este capítulo, se explorarán los tipos taxonómicos más relevantes en el contexto de la familia Flora, centrándose en el tipo S como eje principal de análisis y considerando a los otros miembros taxonómico como un complemento importante para la clasificación y caracterización de los asteroides estudiados. El objetivo es identificar patrones, relaciones y peculiaridades en la composición mineralógica de la familia Flora.

5.1.1. Tipo S

El tipo taxonómico S, figura 5.2, es fundamental en nuestro estudio y clasificación de asteroides, en este caso para los pertenecientes a la familia Flora. Este tipo taxonómico es uno de los más relevantes y representativos en el análisis de asteroides en el sistema solar debido a su prevalencia y características distintivas.

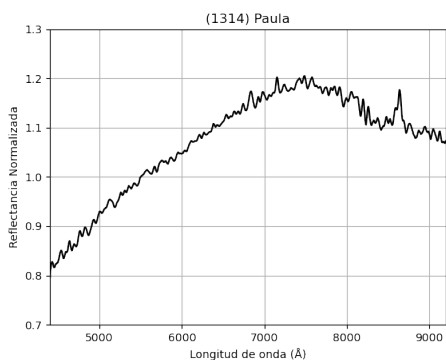


Figura 5.1: Espectro (1314) Paula, perteneciente a los espectros con clasificación taxonómica “S” con función de peso de 1.00.

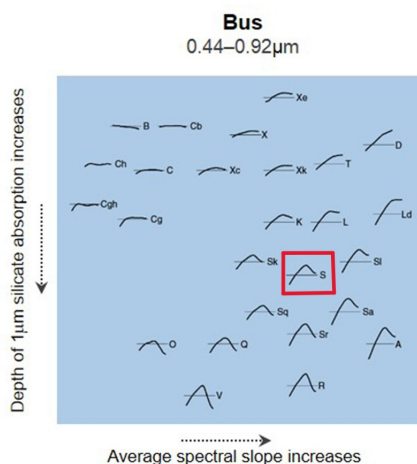


Figura 5.2: Sistemas de clasificación para espectros de reflectancia de asteroides en el esquema Bus-Binzel, podemos observar la similitud entre (1314) Paula, figura 5.1, y el espectro base “S” (encerrado en un marco color rojo).

En el análisis realizado, se identificó que un número significativo de asteroides de la familia Flora fueron clasificados como tipo S. Mediante un enfoque de clasificación utilizando las k menores distancias espectrales ($k=10, 30$ y 50), se encontraron 117 asteroides clasificados como tipo S. Estos resultados indican que el tipo S es el más abundante dentro de la familia Flora en el conjunto de datos analizado.

Es importante destacar que los asteroides del complejo S de la familia Flora mostraron un buen desempeño en el análisis mediante el método de distancia euclidiana. En particular, al considerar las funciones de peso (FPs) calculadas por este método, se observaron 56 casos donde la FP fue máxima (1.00) con $k=10$, destacando que solo uno de ellos era de tipo A, el cual, aunque incluido en este conjunto por el SMASII-A, se diferencia del resto, que son propiamente de tipo S y sus subcategorías. Para $k=30$ y $k=50$, se observaron 36 y 34 espectros, respectivamente.

Como se mencionó anteriormente en la Sección 4.4.3, se identificaron 34 asteroides con una función de peso (FP) de 1.0 en todas las categorías evaluadas, resaltando su estabilidad y consistencia en las características taxonómicas tipo S.

Estos resultados sugieren que el presente estudio de la clasificación taxonómica de los 148 asteroides de la familia Flora se alinea consistentemente con lo que se conoce de la familia que debería representar en su mayor parte una taxonomía S.

5.1.2. Tipo C

En nuestro análisis se observó que el tipo taxonómico C es menos frecuente en comparación con los otros dos tipos principales. Utilizando un enfoque de clasificación con valores de $k=10, k=30$ y $k=50$, sólo 5 asteroides fueron clasificados como tipo C. Dos de ellos, (3953) Perth 5.3 y (6969) Santaro, pertenecientes a la clase B, obtuvieron consistentemente valores superiores al 90% en los tres valores de k , lo que subraya una asignación robusta de su tipo taxonómico. Estos resultados resaltan que el tipo C es el menos representado entre los asteroides de la familia Flora analizados en este estudio, con sólo un pequeño grupo mostrando una fuerte coherencia espectral en su clasificación.

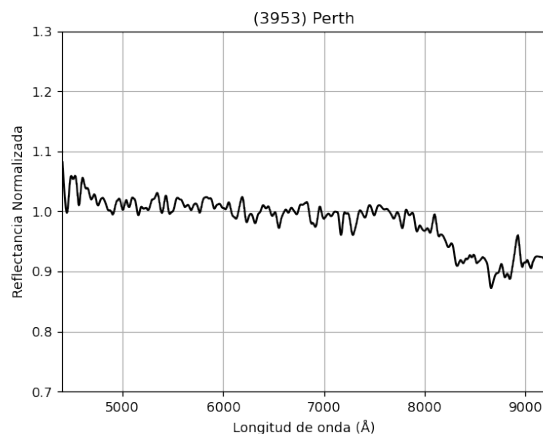


Figura 5.3: Espectro del asteroide (3953) Perth, clasificado dentro del complejo C, específicamente en la clase B. Este asteroide mostró una clasificación robusta con más del 90% de consistencia en los tres casos analizados ($k=10, k=30, k=50$), destacando la coherencia de su clasificación.

5.1.3. Tipo X

En el análisis realizado, se identificó que el complejo X es, entre los cuatro grupos principales, el tercero en representación, después de los "Miembros Menores". Utilizando $k=10$, $k=30$ y $k=50$, se obtuvieron 9 asteroides de tipo X en cada caso. Dentro de este grupo, el asteroide (1387) Kama 5.4 presentó un cambio en su clasificación, pasando de X_k a X, aunque permaneciendo dentro del mismo complejo X. Este cambio es menor, por lo que se puede confirmar su pertenencia al complejo X.

Estos resultados pueden resaltar la relevancia y la presencia significativa del tipo X en la clasificación de asteroides de la familia Flora.

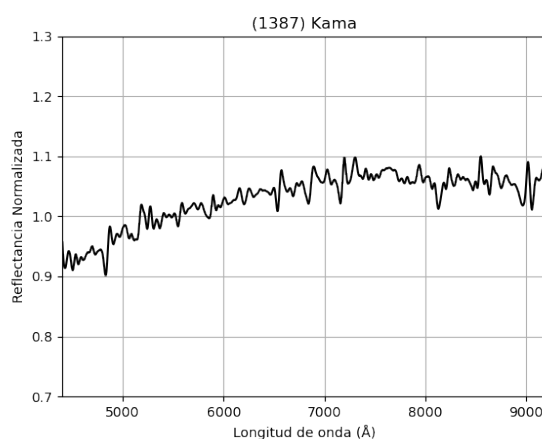


Figura 5.4: Espectro del asteroide (1387) Kama, clasificado dentro del tipo X. Este asteroide presentó un cambio en su clasificación de X_k a X, manteniéndose dentro del complejo X. Aunque este cambio fue menor, refuerza la variabilidad espectral y la necesidad de un análisis detallado dentro de este complejo.

5.1.4. Miembros Menores (MM)

En el análisis de los asteroides de la familia Flora, surge una incógnita sobre la existencia de ciertos tipos taxonómicos, aparte de los principales S, C y X. Estos cuerpos fueron llamados miembros menores, y plantean interrogantes sobre su origen, composición y papel en la dinámica de la familia Flora en el Cinturón Principal del sistema solar.

Para $k=10$, $k=30$ y $k=50$, se identificaron 17 asteroides, entre ellos se encuentran $D=2$, $Ld=9$ y $V=6$ en los tres casos.

Entre el conjunto de miembros menores, algunos presentan una Función de Peso (FP) igual a 1.00, aunque son pocos. Este fenómeno no se observa en los grupos C y X, donde no existen asteroides con $FP=1.00$.

Los asteroides del conjunto MM con $FP=1.00$ se clasifican como Vesta tanto en el caso de $k=10$ como en el de $k=30$. En total, son cuatro los asteroides con $FP=1.00$: Torrence (2614), Ermolova (3657) 5.5, 1997cf29 (15882) y Anusha o 1998xk39 (15989). Sin embargo, en el caso de $k=50$, ninguno de estos asteroides alcanza una $FP=1.00$ aunque es destacable que estos mismos cuatro asteroides mantienen una FP mayor a 0.92 en esta categoría.

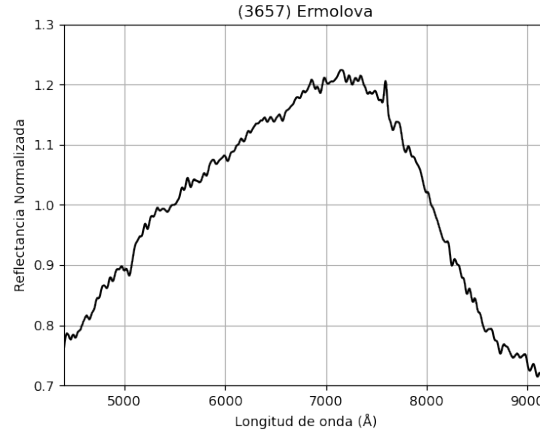


Figura 5.5: Espectro del asteroide (3657) Ermolova, clasificado como miembro del conjunto MM con un factor de probabilidad (FP) de 1.00 para $k=10$ y $k=30$, dentro de la taxonomía de Vesta. Aunque para $k=50$ no alcanza un FP=1.00, pero mantiene un FP de 0.93, destacándose entre los asteroides con alta consistencia en su clasificación.

5.1.5. Asteroides que presentan un cambio en su complejo taxonómico

Tabla 5.1: Asteroides que experimentan cambios en su complejo taxonómico al menos una vez. La primera columna muestra el nombre y número de designación del asteroide. La segunda columna describe el cambio de complejo, mientras que la última columna detalla el cambio de taxonomía asociado. Los cambios se indican con flechas que representan las transiciones.

Asteroide	Cambio de Complejo	De - A
Mitchella (1455)	S → Miembros Menores → S	A (S) → Ld (MM) → A (S)
Zoya (1793)	Miembros Menores → S	Ld (MM) → Sa (S)
Bronnina (3385)	Miembros Menores → S → Miembros Menores	Ld (MM) → A (S) → Ld (MM)
Nunes (5313)	S → Miembros Menores	A (S) → Ld (MM)

En las tablas 5.1 y 5.2, se observan seis asteroides que presentan cambios en su complejo taxonómico. Estos asteroides cambian al menos una vez de complejo y se mantienen en el nuevo complejo, aunque en algunos casos regresan a su complejo original. Por ejemplo, el asteroide Mitchella (1455) presenta una taxonomía A, perteneciente al complejo S, cuando se utiliza $k = 10$. Sin embargo, con $k = 30$, su taxonomía cambia a Ld, la cual pertenece al complejo MM, pero con $k = 50$ regresa a su taxonomía original, siendo nuevamente A.

Revisión y Análisis de la variación en la Clasificación Taxonómica

Tras una segunda revisión de las taxonomías obtenidas y un análisis visual de cada espectro presente en ambas tablas, se observó que 12 objetos cambiaron de clase taxonómica y lo más notable es que 4 de ellos cambiaron de complejo taxonómico. Estos cuatro objetos muestran una pendiente más roja, lo que sugiere que los cambios en su clasificación podrían estar relacionados con características espectrales en ese intervalo espectral. Aunque no se detectaron alteraciones o anomalías visuales evidentes en los espectros revisados, esta pendiente más roja merece un estudio más profundo que podría aportar información adicional para explicar la variación observada y para mejorar nuestra comprensión de su clasificación taxonómica.

Tabla 5.2: Función de Peso (FP) de asteroides que cambian de complejo taxonómico. La primera columna muestra el nombre y número de designación de los asteroides. La segunda columna indica el cambio en su función de peso con distinto valor de k (10, 30 y 50, respectivamente), los cambios se indican con flechas que representan las transiciones.

Asteroide	FP
Mitchella (1455)	0.67 → 0.52 → 0.44
Zoya (1793)	0.37 → 0.38 → 0.33
Bronnina (3385)	0.67 → 0.52 → 0.47
Nunes (5313)	0.52 → 0.54 → 0.43

5.1.6. Principales hallazgos

El presente estudio ha permitido una clasificación taxonómica detallada de los asteroides pertenecientes a la familia Flora, utilizando espectros de reflectancia obtenidos entre los años 2020 y 2021 en el Observatorio Astrofísico Guillermo Haro (OAGH). A través del método de distancia espectral y la comparación con conjuntos de control, hemos logrado asignar tipos taxonómicos específicos a 148 asteroides, ofreciendo una visión más completa de la composición y características de esta familia.

- **Homogeneidad en la taxonomía S:** La mayoría de los asteroides de la familia Flora fueron clasificados como tipo S, lo cual es consistente con lo que se conoce esta familia, que este tipo taxonómico es predominantemente. Un total de 34 asteroides mostraron una función de peso (FP) de 1.0 en todas las categorías evaluadas ($k = 10, k = 30, k = 50$). Esto implica que los asteroides presentan una máxima coincidencia en sus características espectrales con el patrón de tipo S, lo que se traduce en una mínima Distancia Euclidiana (DE) entre el espectro estudiado y los espectros de referencia (los primeros 10, 30 y 50, respectivamente). En este contexto, $FP = 1.0$ refleja la consistencia de la clasificación taxonómica en función de los espectros de comparación.
- **Diversidad de tipos taxonómicos:** Aunque el tipo S es predominante, también se identificaron asteroides de tipo C y tipo X. Específicamente, se encontraron 5 asteroides tipo C con $k=10, k=30$ y $k=50$. Para el tipo X, se identificaron 9 asteroides con $k=10, k=30$ y $k=50$. Estos resultados destacan la diversidad dentro de la familia Flora y puede ser un motivo de contemplar la existencia de “miembros intruso”, asteroides capturados por efectos gravitacionales, resultado de colisiones que alteraron su superficie o incluso remanentes de composiciones diferentes del cuerpo progenitor original. Para confirmar la existencia de estos “miembros intrusos”, es necesario revisar los parámetros orbitales de los asteroides, para confirmar como fueron asociados parte de la familia.
- **Miembros menores:** En este mismo sentido de la diversidad de tipos taxonómicos, destaca el complejo taxonómico nombrado Miembros Menores, ya que es el único complejo aparte del complejo S que presenta asteroides con una función de peso igual a 1. Esto se observa en 4 asteroides, designados como tipo V utilizando $k=10$ y $k=30$. Aunque en $k=50$ no se mantiene este valor exacto, la función de peso se conserva en un rango de 0.92-0.93, lo cual es destacable. Esta consistencia sugiere que, a pesar de la variación en k , estos asteroides tienen características taxonómicas muy definidas.
- **Cambios en la clasificación:** Algunos asteroides mostraron variaciones en su clasificación taxonómica dependiendo del valor de k utilizado en el análisis. Esto sugiere la necesidad de análisis adicionales para comprender mejor estas variaciones. Se identificaron varios asteroides que presentan cambios en su complejo taxonómico, lo que puede deberse a la calidad de los

datos espectrales o a variaciones intrínsecas en las características del asteroide. Es necesario realizar observaciones adicionales para aclarar estas anomalías y confirmar la clasificación taxonómica.

5.1.7. Implicaciones del estudio

Este trabajo contribuye significativamente al entendimiento de la familia Flora al proporcionar características taxonómicas de un gran número de asteroides, usando espectros de reflectancia y evaluando la función de peso (FP) para múltiples categorías ($k=10$, $k=30$, $k=50$). Esto nos permite confirmar la predominancia del tipo S, pero también la identificación de una diversidad taxonómica que sugiere posibles miembros intrusos. Encontramos que hay 31 asteroides que no presentan una clase perteneciente al complejo S.

Este estudio presenta la muestra más grande de asteroides de la familia Flora estudiada hasta la fecha. Junto con la investigación previa de Buendía, contamos con la muestra más extensa que se han estudiado espectroscópicamente hasta la fecha. El procedimiento espectroscópico utilizado en esta tesis es consistente con el trabajo de Buendía, utilizando el mismo set up (telescopio, espectrógrafo, etc.), lo que garantiza que los datos obtenidos sean homogéneos. Esto asegura que los resultados de ambos estudios puedan ser integrados para ofrecer una visión más amplia de la familia Flora.

Además, la metodología empleada y los análisis realizados sientan un precedente para estudios similares en otras familias de asteroides, destacando la importancia de la calidad de los datos y la selección adecuada de parámetros en los análisis espectrales.

Con este estudio, se espera no solo ampliar el conocimiento sobre la familia Flora, sino también contribuir al desarrollo de técnicas y metodologías más robustas para la clasificación taxonómica de asteroides, fortaleciendo así la investigación astronómica y nuestra comprensión del sistema solar.

Capítulo 6

Conclusiones

En este trabajo se ha llevado a cabo una clasificación taxonómica de 148 asteroides de la familia Flora utilizando espectros de reflectancia obtenidos en el Observatorio Astrofísico Guillermo Haro (OAGH). La metodología empleada, basada en la determinación de la distancia espectral, permitió asignar un tipo taxonómico específico a cada asteroide, proporcionando una visión más completa de la composición y características de esta familia de asteroides.

Los resultados obtenidos muestran que la mayoría de los asteroides de la familia Flora presentan una taxonomía del tipo S, lo cual es consistente con estudios previos. Sin embargo, se identificaron 31 miembros taxonómicos distintos y que presentan una taxonomía bien definida y estable, lo que sugiere la presencia de “miembros intrusos o atrapados” dentro de la familia.

También se encontraron espectros con ciertas variaciones que podrían estar relacionadas con su pendiente más roja, sugiriendo la presencia de características espectrales que aún requieren un análisis más detallado. Estas variaciones podrían reflejar propiedades intrínsecas del material superficial de los asteroides o diferencias sutiles en la calidad de los espectros obtenidos.

En este sentido, el análisis estadístico de la clasificación taxonómica reveló la existencia de dos grupos principales: asteroides con una función de peso (FP) de 1.0 en todas las categorías, lo que indica una mínima distancia euclidiana (DE) entre el espectro estudiado y los espectros de referencia, y asteroides con variaciones en su taxonomía entre las diferentes categorías evaluadas.

Los asteroides con $FP = 1.0$ nos dan una certeza de que el método utilizado es altamente consistente y que el tipo taxonómico asignado es altamente confiable.

Los asteroides con variaciones requieren una exploración adicional para explicar las anomalías observadas, considerando tanto la calidad de los datos espectrales como posibles variaciones debidas a algún otro efecto.

En conclusión, este estudio amplía significativamente la base de datos existente sobre la familia Flora y contribuye a una mejor comprensión de su origen, evolución y estructura. Los hallazgos obtenidos no solo robustecen los resultados previos, sino que también abren nuevas líneas de investigación para explorar en detalle las características y la composición de los asteroides de esta familia.

- Se confirma que la mayoría de los asteroides de la familia Flora pertenecen a la taxonomía del tipo S.
- Se identificaron asteroides con variaciones en su taxonomía, sugiriendo la presencia de miembros intrusos o atrapados.

- Es necesario realizar estudios adicionales en ciertos objetos para investigar las anomalías en la clasificación taxonómica y mejorar la calidad de los datos espectrales.

Este trabajo aporta una base de datos considerable que será de gran utilidad para futuras investigaciones que permitan profundizar en el estudio de los asteroides de la familia Flora y su clasificación taxonómica.

Apéndice A

Tablas de información

A.1. Condiciones de observación

Tabla A.1: Condiciones de observación. La información que cada columna nos proporciona del asteroide en orden es: su nombre, análogo solar utilizado, fecha de observación (Tiempo Universal), ascensión recta (AR) y declinación (DEC), magnitud visible (V), así como su distancia heliocéntrica (Δ), distancia observador-asteroide (r), ángulo de fase (α°), diámetro (D), magnitud absoluta (H) y albedo (ρ_v).

No.	Nombre	Análogo	Fecha	AR	DEC	V	Δ	r	α°	D	H	ρ_v
315	Constantina	HD117126	2021-04-08	12:27:02	-0:46:29.0	15.9	1.53	2.518	4.7	8.89	12.62	0.2
367	Amicitia	HD028068	2020-10-11	04:33:31	19:21:43	14.2	1.434	2.2	20.8	16.94	10.69	0.3259
641	Agnes	HD064324	2020-12-18	07:47:21	23:57:37	14.9	1.069	1.993	13.4	8.81	12.64	0.2
707	Steina	HD097356	2021-03-10	11:03:51	-1:15:34.0	15.1	1.402	2.391	2.9	10.99	12.16	0.2
711	Marmulla	HD082460	2020-12-19	08:58:10	25:11:03	16.2	1.866	2.674	14.4	10.84	11.75	0.3
722	Frieda	HD030708	2020-10-13	04:26:25	22:11:19	16	1.42	2.214	19.6	8.79	12.31	0.2721
800	Kress	HD028099	2020-10-13	03:11:03	25:21:00	14.1	1.155	2.066	15.1	11.94	11.54	0.3
825	Tanina	HD003964	2020-09-21	0:37:37.9	-2:16:00.0	14.6	1.376	2.369	4.6	14.67	11.84	0.1508
836	Jole	HD029461	2021-01-09	04:17:23	13:39:28	16.2	1.153	1.979	20.4	6.18	13.41	0.2
841	Arabella	HD008291	2021-10-30	00:03:06	02:50:31	16.1	1.383	2.269	14.5	6.5	12.86	0.3
937	Bethgea	HD011926	2020-09-21	22:54:18.0	1:21:38.0	13.4	0.822	1.81	8.3	13.03	11.79	0.2
960	Birgit	HD101339	2021-04-09	11:28:09	-1:17:56.0	16.3	1.634	2.569	10	9.23	12.54	0.2
1089	Tama	HD117126	2021-03-06	13:15:00	-1:53:56.0	15	1.422	2.319	13.4	12.87	11.7	0.2228
1219	Britta	HD110869	2021-03-06	12:13:38	04:46:50	14.6	1.296	2.265	7.1	11.22	11.78	0.2725
1249	Rutherfordia	HD209779	2021-10-01	22:13:35	-2:30:50.0	14.9	1.44	2.337	14	12.5	11.4	0.3112
1314	Paula	HD001832	2020-09-23	0:12:13.4	12:38:52.0	14.8	0.991	1.982	6.4	8.14	12.98	0.1711
1382	Gerti	HD089055	2021-01-11	09:39:40	15:52:42	15.4	1.388	2.288	12.8	9.35	12.51	0.2
1387	Kama	HD013382	2020-10-13	02:13:58	12:28:54	15.2	0.97	1.95	7.8	5.16	13.36	0.3
1419	Danzing	HD097356	2021-02-06	10:28:45	-0:33:44.0	14.1	1.158	2.1	10.8	14.14	11.45	0.2324
1455	Mitchella	HD146233	2021-03-07	14:53:06	-4:31:19.0	16	1.269	1.999	24.4	7.92	12.87	0.2
1492	Oppolzer	HD093393	2021-01-11	09:15:17	13:34:06	15.8	1.232	2.159	11.6	12.23	13	0.0745
1496	Turku	HD012612	2020-10-11	01:50:32	16:17:49	15.1	1.167	2.149	6.5	8.97	12.6	0.2
1513	Matra	HD098618	2021-01-11	10:26:17	09:37:09	16	1.166	1.997	19.9	6.68	13.24	0.2
1523	Picksamaki	HD224448	2021-10-01	23:24:38	01:00:10	15.7	1.455	2.432	6.6	8.11	12.38	0.3
1526	Mikkeli	HD001327	2020-10-11	00:57:27	15:26:08	14.9	0.933	1.926	4.5	6.27	13.38	0.2
1527	Malmquista	HD117126	2021-02-08	12:03:53	03:50:30	16.2	1.776	2.61	14	9.22	12.1	0.3
1549	Mikko	HD081040	2020-02-25	8:49:34.3	26:12:56.0	15.1	1.179	2.099	13.3	9.55	12.4	0.2125
1590	Tsiolkovskaja	HD008291	2020-10-10	00:41:27	08:58:46	14.2	1.214	2.21	2.6	13.19	11.84	0.1864

Continúa en la siguiente página

Tabla A.1 – continuación

No.	Nombre	Análogo	Fecha	AR	DEC	V	Δ	r	α°	D	H	ρ_v
1598	Paloque	HD054351	2021-01-09	06:08:21	27:32:36	16.1	1.515	2.471	6.9	13.24	12.8	0.0764
1610	Mirnaya	HD060298	2021-02-07	07:29:45	25:00:20	16.5	1.333	2.251	12	6.21	13.4	0.2
1622	Chacornac	HD015632	2020-12-21	01:56:03	18:54:37	16.7	1.856	2.54	18.7	8.53	12.27	0.3
1631	Kopff	HD054351A	2021-01-09	06:26:11	35:31:33	15.7	1.512	2.465	7.1	9.63	12.26	0.2375
1682	Karel	HD054351	2021-01-10	06:28:13	27:55:51	15.9	1.467	2.431	5.8	6.93	12.72	0.3
1703	Barry	HD081040	2021-03-06	08:59:59	20:47:24	16.1	1.714	2.595	12.4	9.5	12.17	0.2651
1789	Dobrovolsky	HD090333	2021-04-06	10:35:43	11:50:37	16.3	1.683	2.531	14.8	9.89	12.39	0.2
1793	Zoya	HD110537	2021-02-06	11:32:51	00:13:47	15.1	1.153	2.034	16.6	10.26	12.31	0.2
1810	Epimetheus	HD026736	2020-10-11	04:13:56	24:25:38	15.8	1.284	2.089	20.7	7.06	12.68	0.3
1855	Korolev	HD042807	2021-01-08	05:40:45	18:02:36	15.7	1.276	2.214	10	6.59	12.83	0.3
1856	Ruzena	HD078534	2021-02-08	08:43:37	11:23:24	15.9	1.301	2.277	4.8	7.57	12.97	0.2
1879	Broederstroom	HD101339A	2021-04-09	12:03:00	-3:05:37.0	16	1.425	2.399	7.2	8.07	12.83	0.2
1900	Katyusha	HD015632	2020-10-10	02:27:40	27:15:26	14.6	1.018	1.954	14.2	10.26	12.31	0.2
1905	Ambartsumian	HD071148	2021-02-07	07:57:18	16:30:21	16.2	1.508	2.456	8.2	7.92	12.87	0.2
2013	Tucapel	HD076332	2020-12-21	08:09:24	22:36:29	16	1.68	2.579	11	11.83	12	0.2
2036	Sheragul	HD008262	2020-09-24	00:11:19	03:38:53	14.7	1.038	2.04	1.7	7.71	12.93	0.2
2080	Jihlava	HD099505	2021-03-06	10:57:26	11:40:19	15.5	1.174	2.163	3	6.97	13.15	0.2
2112	Ulyanov	HD030708	2020-12-19	04:47:39	20:32:02	14.7	1.034	2.002	7.1	7.36	12.59	0.3
2121	Sevastopol	HD028099	2020-10-12	04:29:14	14:56:37	15.9	1.408	2.196	20.1	9.34	12.48	0.2064
2175	AndreaDoria	HD028068	2020-12-21	03:21:31	15:13:16	16.5	1.073	1.947	18	4.73	13.99	0.2
2233	Kuznetsov	HD030708	2021-01-08	04:43:33	20:13:46	15.5	1.256	2.133	15.6	9.02	12.59	0.2
2243	Lonnrot	HD114174	2021-04-07	12:17:54	00:53:50	16	1.541	2.524	5.4	7.43	12.57	0.3
2254	Requiem	HD219542B	2020-10-11	23:28:44	01:27:30	14.9	1.044	1.993	12.2	9.35	12.51	0.2
2259	Sofievka	HD008262	2020-09-23	1:39:34.9	19:02:20.0	15.7	1.251	2.176	13.5	21.9	12.48	0.0375
2322	Kittpeak	HD021845	2020-10-10	03:33:12	17:28:45	16.5	1.326	2.2	16.2	6.38	13.34	0.2
2409	Chapman	HD022670	2020-09-24	02:35:37	09:08:56	15.3	0.985	1.878	19.3	7.82	12.9	0.2
2419	Moldavia	HD078534	2021-02-09	08:45:15	11:30:59	16.3	1.217	2.192	5.2	4.28	13.6	0.35
2437	Amnestia	HD034386	2021-01-10	04:30:42	18:06:46	16.1	1.227	2.071	18.3	6.97	13.15	0.2
2467	Kollontai	HD097356A	2021-03-11	11:14:06	-1:54:46.0	16	1.54	2.53	2.5	8.53	12.71	0.2
2536	Kozyrev	HD060298	2020-12-19	05:39:22	24:44:49	14.7	1.127	2.11	1.2	8.85	12.63	0.2
2554	Skiff	HD110855	2020-01-24	10:46:53	3:35:03	16.7	1.556	2.406	14.7	7.7	12.88	0.21

Continúa en la siguiente página

Tabla A.1 – continuación

No.	Nombre	Análogo	Fecha	AR	DEC	V	Δ	r	α°	D	H	ρ_b
2614	Torrence	HD022670	2020-09-23	2:57:07.7	4:38:44.0	16.4	1.208	2.052	19.9	6.78	13.21	0.2
2644	Victorjara	HD003964	2021-10-01	23:34:21	-1:25:45.0	15.5	0.982	1.967	7.3	5.82	13.54	0.2
2709	Sagan	BHD110537	2021-02-06	12:14:06	-6:14:27.0	16.3	1.262	2.055	21	5.33	13.29	0.3
2746	Hissao	HD054351	2021-01-11	07:01:01	15:37:51	15.7	1.104	2.081	4.4	5.16	13.36	0.3
2831	Stevin	HD032963	2020-12-18	05:21:50	23:23:40	15.1	1.148	2.13	2.5	8.38	12.75	0.2
2841	Pujio	HD117126	2021-03-07	13:47:23	-2:04:08.0	16.1	1.2	2.064	17.9	5.56	13.2	0.3
2847	Parvati	HD114826	2020-02-24	12:38:36.2	-8:28:00.0	15.8	1.239	2.113	16.5	8.07	12.83	0.2
2859	Paganini	HD081040a	2020-02-25	8:56:49.8	14:40:17.0	15.7	1.027	1.974	11.5	6.07	13.45	0.2
2873	Binzel	HD013612b	2020-09-20	0:57:26.3	-5:15:36.0	15.9	1.251	2.231	7.6	6.18	12.97	0.3
2914	Glarinisch	HD060298	2021-02-06	06:58:30	19:01:41	16.7	1.327	2.216	14.3	5.79	13.55	0.2
2926	Caldira	HD114826	2021-04-09	13:06:11	-9:42:24.0	15.4	1.107	2.108	1.2	5.16	13.36	0.3
2955	Newburn	HD146233	2021-03-10	14:04:08	-10:32:16.0	16.5	1.242	2.083	18.9	5.96	13.49	0.2
3002	Delasalle	HD001835	2020-09-24	00:08:24	-9:42:39.0	15.6	1.318	2.312	4.5	6.68	12.8	0.3
3029	Sanders	HD081040	2021-02-06	09:09:53	16:02:50	15.3	1.212	2.198	1.1	5.98	13.04	0.3
3033	Holbaek	HD133600	2021-04-07	13:56:53	-6:06:22.0	15.1	1.061	2.049	6.4	6.29	12.93	0.3
3034	Climenhaga	HD019518	2021-01-10	02:35:28	20:53:10	16.9	1.75	2.32	22.9	8.18	12.8	0.2
3385	Bronnina	HD148577	2021-03-10	14:43:02	-15:03:39.0	16.1	1.433	2.179	21.4	9.1	12.57	0.2
3414	Champollion	HD224383	2020-10-13	22:57:50	-10:57:36.0	17	1.291	2.161	16.8	4.1	13.86	0.3
3437	Kapitsa	HD049178	2021-01-09	05:50:12	29:47:21	15.7	1.161	2.106	10	5.69	13.15	0.3
3448	Narbut	HD082460	2020-12-17	09:29:31	20:02:12	16.5	1.381	2.126	21.6	6.24	13.39	0.2
3455	Kristensen	HD117126	2021-04-06	12:35:21	-0:53:40.0	15.5	1.114	2.109	4	6.59	13.27	0.2
3520	Klopsteg	HD024053	2020-09-24	03:04:04	09:00:33	16.3	1.114	1.956	21.3	4.86	13.49	0.3
3573	Holmberg	HD097356	2021-03-11	10:54:49	01:28:08	15.4	1.145	2.134	3.7	5.85	13.09	0.3
3590	Holst	HD081040	2020-12-20	08:42:43	14:40:15	16.3	1.223	2.072	18	5.21	13.34	0.3
3605	Davy	HD054351	2020-12-19	06:20:17	24:47:57	15.1	1.113	2.092	3.3	6.09	13	0.3
3657	Ermolova	HD209779	2020-09-24	21:40:02	-3:14:47.0	15.5	1.11	2.008	17.2	5.87	12.9	0.35
3681	Boyan	HD034386	2021-10-29	04:16:31	14:29:18	16.9	1.361	2.277	12.5	5.74	13.57	0.2
3706	Sinnot	HD028068	2021-01-10	04:13:09	16:23:01	16.9	1.158	1.975	20.9	4.52	14.09	0.2
3855	Pasasympbonia	HD034386	2020-10-11	05:02:05	13:56:39	16.7	1.285	2.002	25	6.23	13.3	0.2178
3951	Zichichi	HD209779	2020-10-13	21:58:51	-3:20:24.0	16.4	1.364	2.148	20.8	7.19	13.08	0.2
3953	Perth	HD022670	2020-09-22	2:53:06.4	7:19:49.0	16.3	0.988	1.845	22.3	3.74	14.06	0.3

Continúa en la siguiente página

Tabla A.1 – continuación

No.	Nombre	Análogo	Fecha	AR	DEC	V	Δ	r	α°	D	H	ρ_v
3968	Koptelov	HD012612	2020-09-20	22:40:37.1	-1:25:11.0	16.2	1.302	2.28	7.6	5.24	13.16	0.35
3989	Odin	HD008262	2020-10-10	00:23:06	08:23:29	15.3	0.847	1.839	5.4	4.78	13.97	0.2
4053	Cherkasov	HD222582	2020-10-12	22:54:08	-3:24:55.0	16.6	1.273	2.163	15.6	5.77	13.56	0.2
4362	Carlisle	HD122474	2021-04-08	13:42:13	-8:33:11.0	15.2	1.017	2.012	4.3	5.41	13.26	0.3
4475	Voitkevich	HD097356	2021-04-09	10:50:24	05:53:41	16.8	1.267	2.149	16.5	4.6	14.05	0.2
4570	Runcorn	HD110537	2020-02-24	12:04:51.2	-0:24:17.0	15.8	1.05	1.986	12.8	5.09	13.39	0.3
4632	Udagawa	HD064324	2021-01-11	07:36:52	27:11:34	15.6	1.041	2.022	2.7	4.35	13.73	0.3
4720	Toftori	HD082460	2021-01-11	09:41:56	15:11:43	16.1	1.224	2.125	14	5.33	13.29	0.3
4788	Simpson	HD008262	2020-10-13	10:30:07	05:49:33	18.7	2.784	2.166	18.4	4.84	13.94	0.2
4794	Bogard	HD098618	2021-04-06	11:50:02	03:27:21	16.2	1.05	2.019	9.8	4.01	13.91	0.3
4806	Miho	HD078534	2020-12-20	08:29:21	10:49:02	16.4	1.152	2.014	17.9	4.82	13.51	0.3
4822	Karge	HD028068	2021-01-08	04:14:19	15:06:47	16.6	1.066	1.903	20.9	4.93	13.9	0.2
4964	Kourovka	HD209779	2020-09-23	22:57:32.4	-7:24:31.0	15.8	1.018	1.997	8.8	5.48	13.67	0.2
5214	Oozora	HD098618	2021-04-07	11:12:42	06:32:43	16.8	1.245	2.166	13.7	5.05	13.85	0.2
5278	Polly	HD097356	2021-03-07	10:36:13	01:12:49	15.9	1.045	2.03	4.6	4.16	13.83	0.3
5313	Nunes	HD114174	2021-04-06	13:31:37	-0:02:02.0	15.7	1.036	2.029	4.9	5.38	13.78	0.1878
5490	Burbidge	HD054351	2021-01-08	06:16:13	18:07:24	16.3	1.098	2.064	7.1	4.62	14.04	0.2
5530	Eisinga	HD114174	2021-03-10	12:07:46	05:16:19	16.1	1.032	2.016	5.6	4.56	14.07	0.2
5667	Nakhimovskaja	HD011505	2021-10-28	00:51:10	-0:50:55.0	16.4	1.023	1.973	11.8	3.83	14.01	0.3
5707	Shevchenko	HD097356A	2021-03-10	11:05:42	02:20:29	15.5	1.059	2.051	2.1	4.73	13.55	0.3
5802	Casteldepiano	HD023386	2020-12-17	03:11:56	20:58:23	16.5	1.251	2.138	15	5.61	13.62	0.2
6232	Zubitskia	HD101339	2021-04-08	11:45:58	-5:26:13.0	16.3	1.134	2.102	9.5	4.35	13.73	0.3
6266	Letzel	HD208704	2020-09-24	21:02:21	-14:29:42.0	16.5	1.107	1.931	22.5	5.13	13.76	0.21
6280	Sicardy	HD012612	2020-09-24	01:40:23	15:17:52	15.8	0.988	1.933	14	4.5	13.66	0.3
6290	1985CA2	HD028099	2021-01-11	04:18:54	15:52:13	16.6	1.212	2.027	20.2	4.75	13.54	0.3
6368	RichardMendez	HD023386	2020-12-19	03:11:28	29:50:47	16.1	1.027	1.915	17.4	5.28	13.75	0.2
6526	Matogawa	HD146233	2021-04-07	14:32:06	-5:32:31.0	16.5	1.197	2.159	9.9	4.31	13.75	0.3
6969	Santaro	HD011131	2020-09-21	23:31:05.1	-9:07:38.0	16.1	1.215	2.21	4.7	5.9	13.51	0.2
7054	Brehm	HD027836	2021-10-30	03:25:50	15:36:55	16.8	1.043	2.015	8	3.1	14.47	0.3
7475	Kaizuka	HD056202	2021-02-07	07:19:51	16:17:14	16.6	1.188	2.103	13.4	4.1	13.86	0.3
7479	1994EC1	HD071148	2021-02-09	07:36:52	17:09:14	16.5	1.132	2.058	12.8	4.82	13.95	0.2

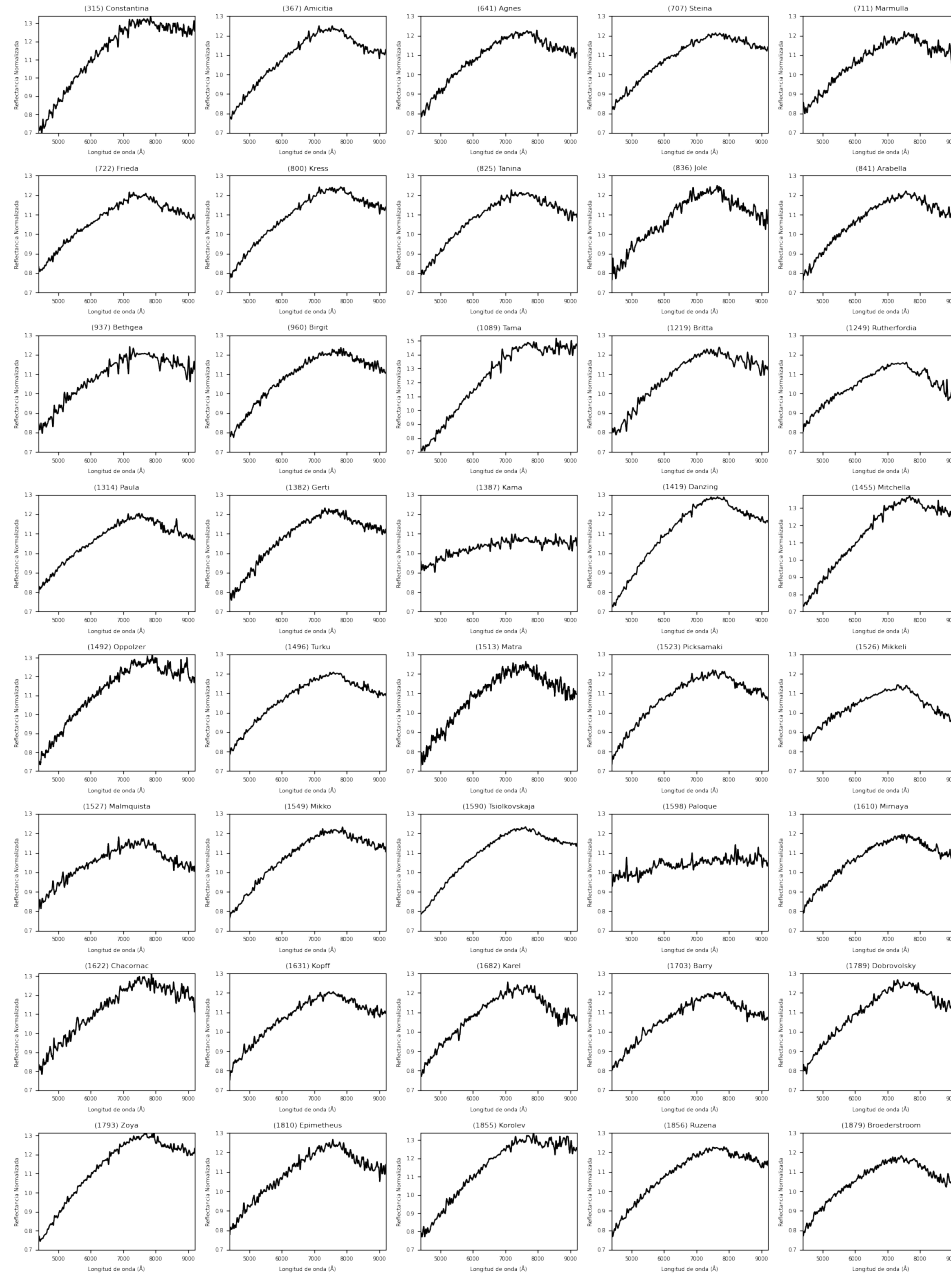
Continúa en la siguiente página

Tabla A.1 – continuación

No.	Nombre	Análogo	Fecha	AR	DEC	V	Δ	r	α°	D	H	ρ_b
7542	Johnpond	HD117126	2021-04-07	14:19:30	-5:36:23.0	16.6	1.138	2.111	8.8	2.62	15.27	0.2
7685	1997ep17	HD110537	2021-04-05	11:46:18	-0:52:52.0	15.9	1.045	2.019	8.9	4.5	13.66	0.3
7792	1995w23	HD114174	2021-02-05	12:35:54	08:44:53	16.1	1.234	2.021	21.7	3.95	13.94	0.3
8246	Kotov	HD209779	2020-09-22	22:54:29.0	-5:39:00.0	16	0.925	1.908	8.7	3.57	14.16	0.3
8425	Zirankeuejijjin	HD099505	2021-04-08	10:30:02	11:33:30	17.2	1.271	2.114	19	4.44	14.13	0.2
8749	Beatles	HD030708	2020-12-21	04:11:42	28:00:27	16.2	0.892	1.834	12.8	3.92	14.4	0.2
8815	Deanregas	HD054351	2021-02-05	06:51:50	18:47:48	16.7	1.12	2.014	16	5.43	13.69	0.2
8852	Buxus	HD026736	2020-10-12	04:17:25	23:30:56	16.7	1.081	1.903	22.7	4.48	14.11	0.2
9044	Kauru	HD146233	2021-04-06	14:21:01	-4:46:26.0	16.1	1.076	2.045	9.6	4.24	13.79	0.3
9368	Esashi	HD071148	2021-02-05	07:57:05	18:10:07	16	1.095	2.053	8.9	7.06	13.12	0.2
9560	Anguita	HD222582	2020-10-11	22:35:12	-7:06:50.0	17.6	1.416	2.271	16.5	4.03	14.34	0.2
10419	1998xb4	HD088072	2020-02-24	10:19:04.7	8:36:08.0	15.6	1.131	2.12	1.1	4.77	13.53	0.3
10717	DickWalker	HD011505A	2021-10-28	01:53:18	-2:02:25.0	16.5	0.923	1.898	8.1	2.84	14.66	0.3
11696	Capen	HD117126A	2021-04-08	13:56:55	-6:39:55.0	16.1	0.907	1.898	6.4	3.9	14.41	0.2
12768	1994eq1	HD078534	2021-03-10	08:40:56	15:16:56	17.4	1.2	2.056	18.5	4.3	14.2	0.2
12834	Bomben	HD008291	2021-10-29	01:33:17	01:26:00	16.8	1.049	2.024	7.6	3.57	14.6	0.2
13508	1989dc	HD081040	2021-03-11	08:41:08	28:53:57	17.1	1.391	2.198	19.1	4.09	13.7	0.35
15070	1999bk8	HD006718	2021-09-29	00:41:53	-5:44:05.0	15.5	0.858	1.854	5.1	3.71	14.08	0.3
15112	Arlenewolfe	HD117126	2021-04-09	14:10:58	-7:23:43.0	16.4	0.985	1.971	7.4	3.83	14.45	0.2
15882	1997cf29	HD078534	2021-03-07	08:32:25	17:04:25	17.4	1.19	2.05	18.3	3.71	14.52	0.2
15989	Anusha (1998xk39)	HD133430	2021-04-07	22:38:12	-0:08:35.0	20.7	3.273	2.548	13.7	4.46	14.12	0.2
16118	Therberens	HD117126B	2021-04-08	14:07:05	-3:11:26.0	16.7	0.966	1.95	7.8	3.27	14.79	0.2
19551	Peterborden	HD009986	2020-10-12	00:54:41	10:31:51	15.7	0.836	1.833	2.7	4.1	14.3	0.2
24104	Vinissac	HD076332	2021-02-09	08:09:20	14:09:01	16.3	1.091	2.047	9.4	4.02	14.29	0.21
26391	1999vn9	HD110537	2021-04-09	12:13:37	-7:11:29.0	16.3	1.09	2.075	6.9	3.74	14.06	0.3
30859	1992bm	HD023386	2021-10-29	03:11:13	27:35:40	16.6	0.94	1.906	10	3.35	14.74	0.2
46800	1998kh27	HD034386	2021-10-28	04:36:50	16:07:07	16.8	1.028	1.926	17.4	3.92	14.4	0.2

A.2. Espectros de reflectancia de los asteroides de nuestra muestra

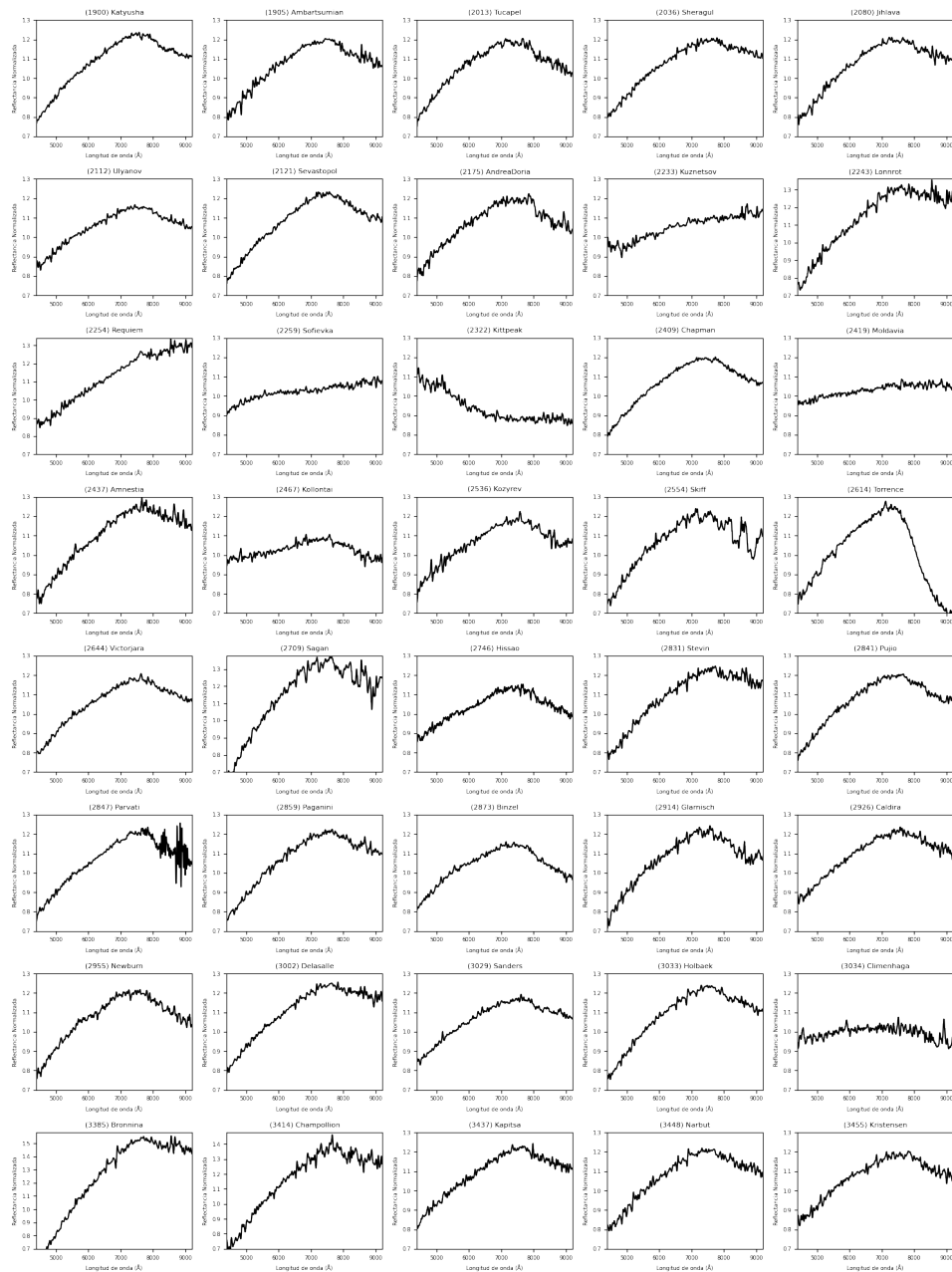
Tabla A.2: Espectros de reflectancia de los asteroides de nuestra muestra. Cada asteroide cuenta con su nombre y número de designación en la parte inferior del mismo. El eje x es la longitud de onda en Å y el eje y es la reflectancia normalizada.



Continúa en la siguiente página

Tablas de información
A.2 Espectros de reflectancia de los asteroides de nuestra muestra

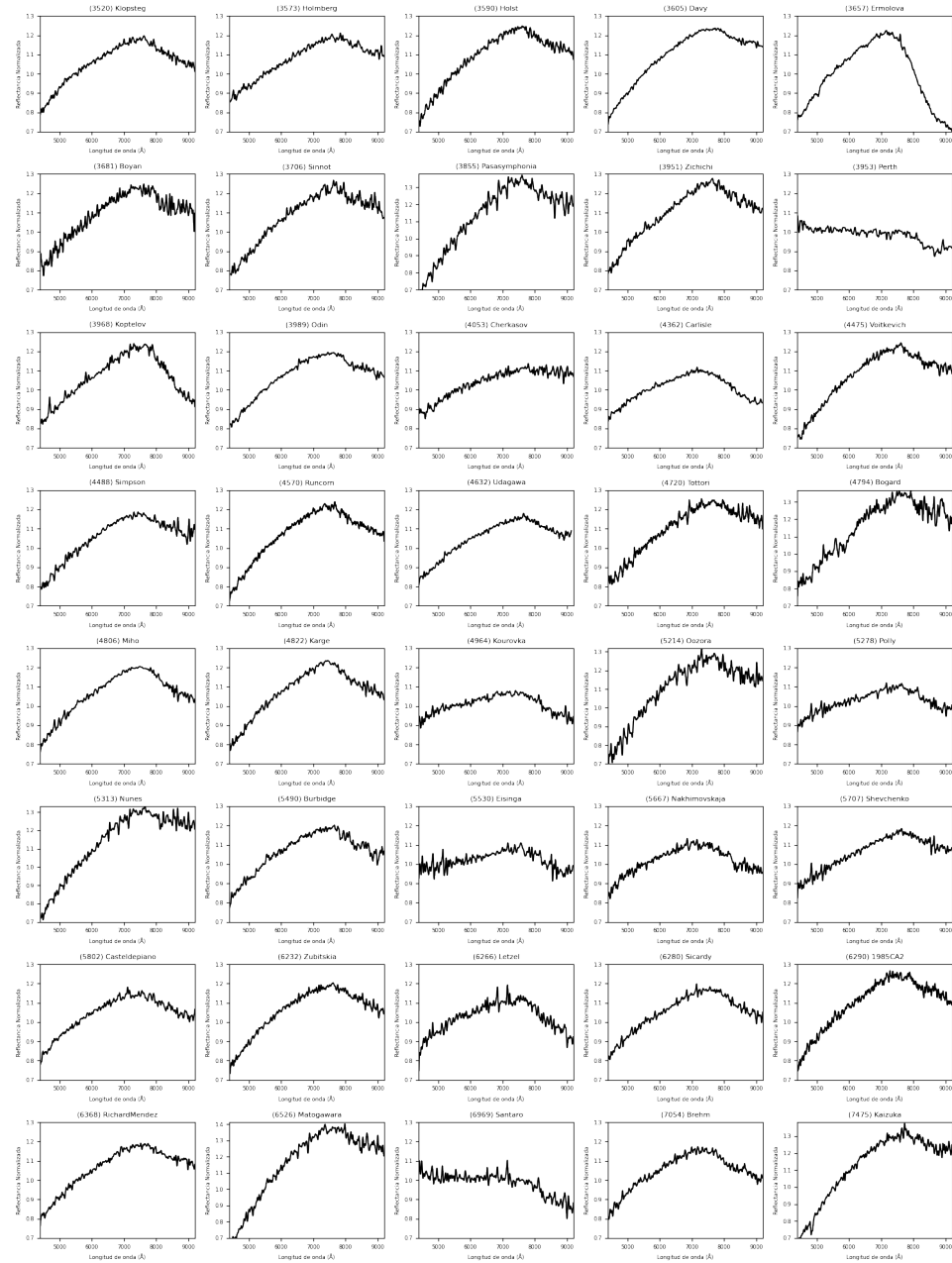
Tabla A.2 - continuación



Continúa en la siguiente página

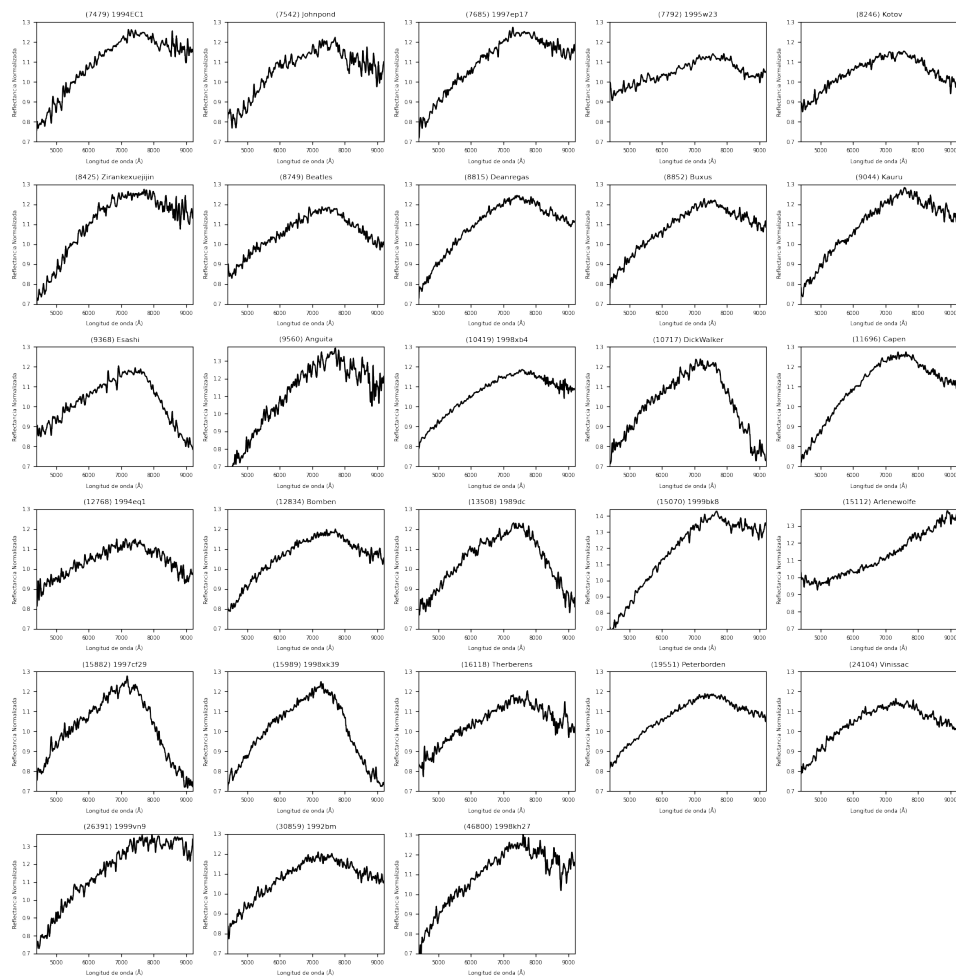
Tablas de información
A.2 Espectros de reflectancia de los asteroides de nuestra muestra

Tabla A.2 - continuación



Continúa en la siguiente página

Tabla A.2 - continuación



A.3. Taxonomías

Tablas de información
A.3 Taxonomías

Tabla A.3: Comparación de las distancias euclidianas determinadas con un diferentes número de objetos de la base de datos SMASS-II A. En las columnas 1 y 2 se encuentra el número de designación y el nombre de los asteroides, en la columna 3 se encuentra el tipo taxonómico propuesto en las literatura, aquellos que aun no han sido confirmados están marcados por un asterisco (*), en las columnas 4, 5 y 6 se encuentra la taxonomía propuesta en este trabajo para diferentes k-valores, 10, 30 y 50. Entre paréntesis el valor de la función de peso.

No.	Nombre	Literatura	Con 10 objetos	Con 30 objetos	Con 50 objetos
315	Constantina	S*	Ld (0.52)	Ld (0.54)	Ld (0.44)
367	Amicitia	S*	Sl (1.00)	Sl (0.99)	Sl (0.94)
641	Agnes	S*	Sl (0.98)	Sl (0.97)	Sl (0.94)
707	Steina	S*	L (0.76)	Sl (0.51)	Sl (0.47)
711	Marmulla	S	Sl (1.00)	Sl (0.99)	Sl (0.97)
722	Frieda	S*	S (1.00)	S (0.99)	S (0.98)
800	Kress	S	Sl (0.98)	Sl (0.96)	Sl (0.94)
825	Tanina	S	Sl (1.00)	Sl (0.99)	Sl (0.96)
836	Jole	S*	S (1.00)	S (0.99)	S (0.94)
841	Arabella	S	S (1.00)	S (1.00)	S (1.00)
937	Bethgea	S	Sl (0.99)	Sl (0.96)	Sl (0.87)
960	Birgit	S*	Sl (0.61)	Sl (0.55)	Sl (0.44)
1089	Tama	S*	Ld (0.75)	Ld (0.56)	Ld (0.52)
1219	Britta	S*	Sl (0.88)	Sl (0.93)	Sl (0.91)
1249	Rutherfordia	S	S (1.00)	S (0.91)	S (0.81)
1314	Paula	S	S (1.00)	S (1.00)	S (1.00)
1382	Gerti	S*	Sl (0.93)	Sl (0.86)	Sl (0.81)
1387	Kama	S	Xk (0.63)	X (0.37)	X (0.43)
1419	Danzing	S*	Sa (0.79)	Sa (0.72)	Sa (0.56)
1455	Mitchella	S*	A (0.67)	Ld (0.52)	A (0.44)
1492	Oppolzer	S*	Ld (0.71)	Ld (0.39)	Ld (0.37)
1496	Turku	S*	S (1.00)	S (1.00)	S (1.00)
1513	Matra	S*	Sl (0.93)	Sl (0.86)	Sl (0.80)
1523	Picksamaki	S	S (1.00)	S (1.00)	S (1.00)
1526	Mikkeli	S*	Sq (1.00)	Sq (0.95)	Sq (0.88)
1527	Malmquista	S	S (1.00)	S (0.99)	S (0.99)
1549	Mikko	S	Sl (0.73)	Sl (0.89)	Sl (0.88)
1590	Tsiolkovskaja	S	Sl (1.00)	Sl (0.98)	Sl (0.94)
1598	Paloque	S*	X (0.97)	X (0.80)	X (0.79)
1610	Mirnaya	S*	S (1.00)	S (1.00)	S (1.00)
1622	Chacornac	S	Sl (0.53)	Sl (0.34)	Sl (0.31)
1631	Kopff	S*	Sl (0.78)	Sl (0.74)	Sl (0.62)
1682	Karel	S	S (1.00)	S (1.00)	S (1.00)
1703	Barry	S*	S (0.81)	S (0.89)	S (0.90)
1789	Dobrovolsky	S*	S (1.00)	S (1.00)	S (1.00)
1793	Zoya	S*	Ld (0.37)	Sa (0.38)	Sa (0.33)
1810	Epimetheus	S	S (1.00)	S (0.99)	S (0.99)
1855	Korolev	S	Ld (0.97)	Ld (0.79)	Ld (0.61)
1856	Ruzena	S*	Sl (0.92)	Sl (0.93)	Sl (0.88)
1879	Broederstroom	S*	S (1.00)	S (0.99)	S (0.99)
1900	Katyusha	S*	Sl (0.72)	Sl (0.71)	Sl (0.75)

Continúa en la siguiente página

Tablas de información
A.3 Taxonomías

Tabla A.3 – continuación

No.	Nombre	Literatura	Con 10 objetos	Con 30 objetos	Con 50 objetos
1905	Ambartsumian	S*	S (1.00)	S (1.00)	S (1.00)
2013	Tucapel	S*	S (1.00)	S (1.00)	S (1.00)
2036	Sheragul	S*	Sl (0.83)	Sl (0.79)	Sl (0.78)
2080	Jihlava	S*	S (1.00)	S (1.00)	S (1.00)
2112	Ulyanov	S	S (0.81)	S (0.87)	S (0.91)
2121	Sevastopol	S	S (0.70)	S (0.56)	S (0.53)
2175	AndreaDoria	S*	S (1.00)	S (1.00)	S (1.00)
2233	Kuznetsov	S*	Xk (0.63)	Xk (0.65)	Xk (0.67)
2243	Lonrot	S	Ld (0.77)	Ld (0.64)	Ld (0.49)
2254	Requiem	S*	D (0.63)	D (0.47)	D (0.37)
2259	Sofievka	S*	Ch (0.54)	Ch (0.58)	Ch (0.38)
2322	Kittpeak	S*	B (0.83)	B (0.80)	B (0.73)
2409	Chapman	S*	S (1.00)	S (1.00)	S (0.98)
2419	Moldavia	V	X (0.52)	X (0.57)	X (0.54)
2437	Amnestia	S*	Sl (0.77)	Sl (0.82)	Sl (0.70)
2467	Kollontai	S*	Xc (0.96)	Xc (0.83)	Xc (0.76)
2536	Kozyrev	S*	S (1.00)	S (1.00)	S (1.00)
2554	Skiff	S	S (0.85)	S (0.90)	S (0.94)
2614	Torrence	S*	V (1.00)	V (1.00)	V (0.92)
2644	Victorjara	S*	S (0.86)	S (0.88)	S (0.91)
2709	Sagan	S	A (0.96)	A (0.74)	A (0.54)
2746	Hissao	S	Sk (0.99)	Sk (0.97)	Sk (0.90)
2831	Stevin	S*	Sl (0.80)	Sl (0.64)	Sl (0.59)
2841	Pujio	S	S (1.00)	S (1.00)	S (1.00)
2847	Parvati	S*	S (1.00)	S (1.00)	S (1.00)
2859	Paganini	S*	S (0.74)	S (0.49)	Sl (0.49)
2873	Binzel	S	Sq (0.92)	Sq (0.89)	Sq (0.83)
2914	Glarnisch	S*	S (1.00)	S (0.99)	S (0.99)
2926	Caldira	S	S (1.00)	S (1.00)	S (1.00)
2955	Newburn	S*	S (1.00)	S (1.00)	S (1.00)
3002	Delasalle	S	L (0.82)	L (0.59)	Sl (0.50)
3029	Sanders	S	S (0.62)	S (0.84)	S (0.89)
3033	Holbaek	S	Sl (0.99)	Sl (0.97)	Sl (0.90)
3034	Climenhaga	S*	C (0.85)	C (0.66)	C (0.51)
3385	Bronnina	S*	Ld (0.67)	A (0.52)	Ld (0.47)
3414	Champollion	S	A (0.63)	A (0.54)	A (0.45)
3437	Kapitsa	S	Sl (0.95)	Sl (0.90)	Sl (0.80)
3448	Narbut	S*	S (1.00)	S (0.99)	S (0.94)
3455	Kristensen	S*	S (1.00)	S (1.00)	S (1.00)
3520	Klopsteg	S	S (1.00)	S (1.00)	S (1.00)
3573	Holmberg	S	K (0.77)	K (0.76)	K (0.67)
3590	Holst	S	Sl (0.97)	Sl (0.90)	Sl (0.87)
3605	Davy	S	Sl (0.98)	Sl (0.92)	Sl (0.91)
3657	Ermolova	V	V (1.00)	V (1.00)	V (0.93)
3681	Boyan	S*	S (1.00)	S (1.00)	S (1.00)
3706	Sinnot	S*	Sl (0.87)	Sl (0.74)	Sl (0.77)
3855	Pasasympthonia	S	A (0.99)	A (0.81)	A (0.62)

Continúa en la siguiente página

Tablas de información
A.3 Taxonomías

Tabla A.3 – continuación

No.	Nombre	Literatura	Con 10 objetos	Con 30 objetos	Con 50 objetos
3951	Zichichi	S*	S (1.00)	S (1.00)	S (1.00)
3953	Perth	S	B (0.95)	B (0.93)	B (0.91)
3968	Koptelov	V	Sr (0.59)	S (0.70)	S (0.79)
3989	Odin	S*	S (1.00)	S (1.00)	S (1.00)
4053	Cherkasov	S*	Xk (0.77)	Xk (0.75)	Xk (0.67)
4362	Carlisle	S	Sq (0.97)	Sq (0.99)	Sq (0.96)
4475	Voitkevich	S*	Sa (0.76)	Sa (0.55)	Sl (0.56)
4570	Runcorn	S	Sl (0.93)	Sl (0.88)	Sl (0.87)
4632	Udagawa	S	S (1.00)	S (1.00)	S (1.00)
4720	Tottori	S	L (0.91)	L (0.47)	Sl (0.48)
4788	Simpson	S*	S (1.00)	S (1.00)	S (1.00)
4794	Bogard	S	Ld (0.65)	Ld (0.58)	Ld (0.51)
4806	Miho	S	S (1.00)	S (1.00)	S (1.00)
4822	Karge	S*	S (1.00)	S (1.00)	S (1.00)
4964	Kourovka	S*	Xc (0.62)	Xc (0.52)	Xc (0.49)
5214	Oozora	S	S (1.00)	S (1.00)	S (1.00)
5278	Polly	S	Xc (0.95)	Xc (0.88)	Xc (0.85)
5313	Nunes	S	A (0.52)	Ld (0.54)	Ld (0.43)
5490	Burbidge	S*	S (1.00)	S (0.99)	S (0.99)
5530	Eisinga	S*	Xc (0.52)	Xc (0.78)	Xc (0.82)
5667	Nakhimovskaja	S	Sq (0.96)	Sq (0.75)	Sq (0.68)
5707	Shevchenko	S	K (0.96)	K (0.89)	K (0.84)
5802	Casteldepiano	S*	S (1.00)	S (0.86)	S (0.69)
6232	Zubitskia	S	S (1.00)	S (1.00)	S (1.00)
6266	Letzel	S	Sq (0.87)	Sq (0.89)	Sq (0.87)
6280	Sicardy	S	S (1.00)	S (1.00)	S (1.00)
6290	1985CA2	S	Sl (0.95)	Sl (0.88)	Sl (0.81)
6368	RichardMendez	S*	S (1.00)	S (0.99)	S (0.99)
6526	Matogawa	S	A (1.00)	A (0.80)	A (0.56)
6969	Santaro	S*	B (0.99)	B (0.99)	B (0.96)
7054	Brehm	S	S (1.00)	S (1.00)	S (1.00)
7475	Kaizuka	S	A (0.88)	A (0.66)	A (0.48)
7479	1994EC1	S	Sl (0.58)	Sl (0.66)	Sl (0.55)
7542	Johnpond	S*	S (1.00)	S (1.00)	S (1.00)
7685	1997ep17	S	Sa (0.71)	Sa (0.51)	Sa (0.37)
7792	1995wZ3	S*	K (0.41)	K (0.45)	K (0.47)
8246	Kotov	S	S (0.53)	S (0.56)	S (0.65)
8425	Zirankexuejijin	S*	A (0.92)	A (0.70)	A (0.55)
8749	Beatles	S*	S (1.00)	S (1.00)	S (1.00)
8815	Deanregas	S	Sl (0.70)	Sl (0.90)	Sl (0.82)
8852	Buxus	S*	S (1.00)	S (1.00)	S (1.00)
9044	Kauru	S	Sl (0.98)	Sl (0.95)	Sl (0.94)
9368	Esashi	S*	V (0.90)	V (0.63)	V (0.51)
9560	Anguita	S*	Sa (0.73)	Sa (0.77)	Sa (0.66)
10419	1998xb4	S	S (0.98)	S (0.94)	S (0.90)
10717	DickWalker	S	V (0.98)	V (0.93)	V (0.88)
11696	Capen	S*	Sa (1.00)	Sa (0.90)	Sa (0.74)

Continúa en la siguiente página

Tabla A.3 – continuación

No.	Nombre	Literatura	Con 10 objetos	Con 30 objetos	Con 50 objetos
12768	1994eq1	S*	Sq (1.00)	Sq (0.91)	Sq (0.86)
12834	Bomben	S*	S (1.00)	S (1.00)	S (1.00)
13508	1989dc	V	R (0.83)	Sr (0.55)	Sr (0.59)
15070	1999bk8	S	A (0.67)	A (0.59)	A (0.48)
15112	Arlenewolfe	S*	D (0.94)	D (0.67)	D (0.44)
15882	1997cf29	S*	V (1.00)	V (1.00)	V (0.92)
15989	Anusha (1998xk39)	S*	V (1.00)	V (1.00)	V (0.93)
16118	Therberens	S*	S (1.00)	S (1.00)	S (1.00)
19551	Peterborden	S*	S (1.00)	S (0.99)	S (0.96)
24104	Vinissac	S*	S (0.84)	S (0.63)	S (0.54)
26391	1999vn9	S	Ld (0.99)	Ld (0.80)	Ld (0.66)
30859	1992bm	S*	S (1.00)	S (1.00)	S (0.99)
46800	1998kh27	S*	Sl (0.98)	Sl (0.95)	Sl (0.92)

Bibliografía

- [1] BUS, S. J., & BINZEL, R. P. (2002). Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey. *Icarus*, 158, 146–177. doi:10.1006/icar.2002.6856
- [2] DEMEO, F. E., BINZEL, R. P., SLIVAN, S. M., & BUS, S. J. (2009). An extension of the Bus asteroid taxonomy into the near-infrared. *Icarus*. doi:10.1016/j.icarus.2009.02.005
- [3] NASA/JPL-Caltech/ASU. (s. f.). [Psyche]. [Ilustración]. Recuperado de https://psyche.asu.edu/wp-content/uploads/2021/04/Psyche_Mission_Asteroid_a_210329-2048x2048.jpg
- [4] Mdf [Pseudónimo]. (2019, May 29). Inner Solar System [Imagen]. Wikimedia Commons. Recuperado de <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:InnerSolarSystem-es.png>
- [5] BUENDIA, E. (2021). Clasificación taxonómica de asteroides de la familia Flora. Tesis de Maestría, Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica.
- [6] DERMOTT, S. F., LI, D., CHRISTOU, A. A., KEHOE, T. J. J., MURRAY, C. D., & ROBINSON, J. M. (2021). Observational Constraints on the Long-Term Dynamical Evolution of the Asteroid Belt. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 505(2), 1917–1939.
- [7] Dreg743. (2007, January 22). A version of en:Image:Asteroid_proper_elements_i_vs_a.png modified by en:User:Dreg743. Changes include a color scheme, and some text labels [Imagen]. Wikimedia Commons. Recuperado de <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:AsteroidIncAu.png>
- [8] Wikiwand. (2023, 1 de diciembre). Familia de asteroides. Wikiwand. Recuperado de https://www.wikiwand.com/es/Familia_de_asteroides
- [9] SCHEERES, D., & STATLER, T. S. (2015). The Yarkovsky and YORP Effects: New Results and Ideas. *Journal of Planetary Sciences*.
- [10] VOKROUHLICKÝ, D., BOTTKÉ, W. F., CHESLEY, S. R., SCHEERES, D. J., & STATLER, T. S. (2015). Forming the Flora Family: Implications for the Near-Earth Asteroid Population and Large Terrestrial Planet Impactors. *The Astronomical Journal*, 153(4), 172.
- [11] NESVORNÝ, D. (2018). Dynamical Evolution of the Early Solar System. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*.
- [12] DURECH, J., SIDORIN, V., HANUŠ, J., DURECH, J., BROŽ, M., & WARNER, B. D. (2020, June 3). 3D convex shape model of 8 Flora, computed using light curve inversion techniques. DAMIT – Database of Asteroid Models from Inversion Techniques: for (8) Flora. *Astronomy and Astrophysics*, 530, A134. Recuperado de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:000008-asteroid_shape_model_%288%29_Flora.png

- [13] Vernazza, P., et al. (2021). VLT/SPHERE imaging survey of the largest main-belt asteroids: Final results and synthesis. *A&A*, 654, A56. Recuperado de [https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:8_Flora_VLT_\(2021\),_deconvolved.pdf](https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:8_Flora_VLT_(2021),_deconvolved.pdf)
- [14] Mungany commonswiki. (s. f.). Family Flora of asteroids.jpg. Wikimedia Commons. Dominio público. Recuperado de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Family_Flora_of_asteroids.jpg
- [15] Asteroid Reflectance Spectra. (s. f.). Para acceder al artículo en el que aparece esta imagen, visita <https://vissiniti.com/asteroid-classification/>
- [16] VISSINITI. *A History of Asteroid Classification*. Recuperado de <https://vissiniti.com/asteroid-classification/#the-A-to-Z-of-classes>
- [17] Tholen, D. J. (1984). Asteroid taxonomy from cluster analysis of photometry. Tesis doctoral, University of Arizona. Recuperado de <https://repository.arizona.edu/handle/10150/187738>
- [18] Gaffey, M. J., Bell, J. F., Brown, R. H., Burbine, T. H., Piatek, J. L., Reed, K. L., & Chaky, D. A. (1993). Mineralogical variations within the S-type asteroid class. *Icarus*, 106(2), 573-602. doi:10.1006/icar.1993.1194
- [19] NESVORNÝ, D., MORBIDELLI, A., VOKROUHLICKÝ, D., BOTTKÉ, W. F., & BROŽ, M. (2002). The Flora Family: A Case of the Dynamically Dispersed Collisional Swarm. *Icarus*, 157, 155–172. doi:10.1006/icar.2002.6830
- [20] ALCDEF. (Año). *Título de la base de datos*. Recuperado de <https://alcdef.org/>
- [21] Jet Propulsion Laboratory, NASA. (Año). JPL Small-Body Database Browser. Recuperado de <https://ssd.jpl.nasa.gov/>
- [22] Warner, B. D. (2021). MinorPlanet.info: Gateway [Sitio web]. Recuperado de <https://minplanobs.org/mpinfo/php/oneasteroidinfo.php>
- [23] PRAVEC, P., & HARRIS, A. W. (2007). Angular momentum in binary asteroids. *Icarus*, 190, 250–259. doi:10.1016/j.icarus.2007.02.018
- [24] HUSEMANN, B., KAMANN, S., SANDIN, C., SÁNCHEZ, S. F., GARCÍA-BENITO, R., & MAST, D. (2012). Pycosmic: a robust method to detect cosmics in califa and other fiber-fed integral-field spectroscopy datasets. *Astronomy & Astrophysics*, 545, A137. doi:10.1051/0004-6361/201219678