



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

---

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

---

Monitoreo fotométrico de asteroides con la Cámara Schmidt  
de Tonantzintla: Análisis de curvas de luz

Tesis presentada al

**Colegio de Física**

como requisito parcial para la obtención del grado de

**LICENCIADO EN FÍSICA**

por

Mytzi Yael Munguía Cuatlayotl

Asesorada por

Dr. Raúl Mújica García  
Dra. Rosibel Carrada Legaria

Puebla Pue.  
8 de julio de 2025





Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

---

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

---

Monitoreo fotométrico de asteroides con la Cámara Schmidt  
de Tonantzintla: Análisis de curvas de luz

Tesis presentada al

**Colegio de Física**

como requisito parcial para la obtención del grado de

**LICENCIADO EN FÍSICA**

por

Mytzi Yael Munguía Cuatlayotl

Asesorada por

Dr. Raúl Mújica García  
Dra. Rosibel Carrada Legaria

Puebla Pue.  
8 de julio de 2025



**Título:** Monitoreo fotométrico de asteroides con la Cámara Schmidt de Tonantzintla: Análisis de curvas de luz

**Estudiante:** MYTZI YAEL MUNGUÍA CUATLAYOTL

COMITÉ

---

Dra. Ana Aurelia Avilez López  
Presidente

---

Dr. José Silvano Guichard Romero  
Secretario

---

Dra. Areli Montes Pérez  
Vocal

---

M. C. Guillermo Cerdán Hernández  
Vocal

---

Dr. Raúl Mújica García  
Dra. Rosibel Carrada Legaria  
Asesor



# Dedicatoria

*A mi papá Jorge, quien me enseñó a ser fuerte ante la vida, como él mismo lo fue. Aunque ya no esté conmigo, su apoyo incondicional, su fe en mí y su ejemplo de valentía y esfuerzo siguen guiando mi camino. Este logro es también suyo, porque gran parte de lo que soy y de lo que he alcanzado se lo debo a él.*

*A mi mamá Celia, cuyo amor y fortaleza han sido mi refugio en los momentos difíciles y el impulso que me ha llevado a alcanzar cada meta. Su perseverancia me ha enseñado que no hay obstáculo imposible de superar. Este logro también es suyo, porque sin su guía, su ejemplo y su amor, nada de esto habría sido posible.*

*A mi hermano Uriel, quien ha estado a mi lado en los días más difíciles, sin importar qué. Su pureza, alegría y admirable forma de ver el mundo me han enseñado más de lo que puedo expresar. Su determinación y capacidad para lograr tanto por sí mismo, a pesar de su corta edad, lo convierten en un verdadero ejemplo a seguir. Sin duda, es mi mayor fuerza y una de las personas que más quiero en esta vida.*

*Por último, dedico esta tesis al hombre que, de alguna forma, ha renacido tres veces. Aunque nunca lo expresé, tu presencia me permitió reencontrar la alegría que pensaba perdida.*

*Gracias por cada palabra de aliento, por cada sacrificio silencioso y por enseñarme a nunca rendirme.*



# Agradecimientos

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi asesor, el *Dr. Raúl Mújica García*, por su apoyo incondicional, por brindarme su valioso conocimiento y por su infinita paciencia. No solo me proporcionó todas las herramientas necesarias para la realización de esta tesis, sino que, más allá de esta investigación, me ayudó a reencontrarme con el amor por la divulgación científica e investigación.

De igual manera, quiero expresar mi profunda gratitud a mi coasesora, la *Dra. Rosibel Carrada Legaria*, por su confianza incondicional en mí, su constante apoyo y, especialmente, por haberme acercado al fascinante mundo de la investigación.

Ambos son un gran ejemplo a seguir, tanto personal como profesionalmente. Espero algún día alcanzar su nivel de compromiso y dedicación.

A *Enrique Mayoral Salgado*, le agradezco por brindarme su amistad, por estar en los momentos en los que me sentí perdida, y por hacer que tanto este trabajo, las noches de observación y la vida misma fueran mucho más agradables y divertidas. También le agradezco por permitirme aprender de él, tanto en lo personal como en lo profesional. Hay mucho que valoro y aprecio de todo lo que me ha enseñado.

Al *M. C. Guillermo Cerdán*, mi más profundo agradecimiento por su generosidad al compartir su conocimiento y por su apoyo durante cada noche de observación.

A mi familia y amigos, gracias por estar presentes en cada etapa de mi vida. En especial, a mi abuelita *Georgina*, quien siempre mostró un genuino interés en todo lo que hacía, alentándome a ser mejor cada día; y a mi tía *Lillian*, por su constante apoyo incondicional a lo largo de todos estos años. También a mis queridos amigos *Ale, Elías, Miri, Josué, Max, Hugo, Magda, Christian, Liz*; y a mis amigos de la prepa: *Nancy, Minto, Emi, Rivas, Ruth* y *Vladi*, por su compañía en los buenos y malos momentos, haciendo que este camino fuera mucho más llevadero y lleno de alegría. A *Duviel, Jafet, Paco* y *Beleni*, mis amigos tanto en lo personal como en lo académico, gracias por hacer que tanto las clases como mi vida fueran más plenas.

Asimismo, agradezco al jurado por el tiempo dedicado a la lectura, evaluación y retroalimentación de este trabajo. Sus observaciones contribuyeron al fortalecimiento de esta tesis y a mi formación académica.

Por último, agradezco al Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) por brindarme una beca que hizo posible la realización de esta investigación. Su apoyo fue fundamental para que pudiera llevar a cabo este proyecto académico.

A todos ustedes, gracias.



# Índice general

Resumen	XVII
1. Introducción	1
1.1. Asteroides	1
1.2. Clasificación	2
1.2.1. Taxonómica	2
1.2.2. Orbital	3
1.2.3. Asteroides potencialmente peligrosos (PHAs)	8
1.2.4. Red Internacional de Alerta de Asteroides (IAWN)	8
1.3. Fotometría	10
1.3.1. Curva de luz	10
1.3.2. Parámetros	11
1.3.3. Análisis de Fourier	13
1.3.4. Justificación y estructura de la tesis	13
2. Selección de la muestra y observaciones	15
2.1. Selección de la muestra	15
2.1.1. La base de datos del Centro de Planetas Menores (MPC)	15
2.1.2. Criterios basados en la Base de Datos de Curvas de Luz del ALCDEF	16
2.1.3. Visibilidad y planificación de las observaciones con STARALT	18
2.1.4. Objetos seleccionados	19
2.2. Observaciones	19
2.2.1. Cámara Schmidt de Tonantzintla	19
2.2.2. Las observaciones	21
3. Procesamiento de imágenes y análisis de los datos	23
3.1. Procesado de las imágenes	23
3.1.1. PyRAF	23
3.1.2. Reducción y calibración de imágenes	24
3.2. Análisis de los datos	25
3.2.1. Fotometría diferencial	25
3.2.2. MPO Canopus	25
3.2.3. Procedimiento para obtener curvas de luz con MPO Canopus	26
3.3. Inversión de curvas de luz	36
3.3.1. Método de inversión	36
4. Resultados	39
4.1. (2345) Fucik	40
4.2. (3181) Ahnert	44
4.3. (34704) 2001 <b>SO</b> <sub>80</sub>	45
5. Conclusiones	47
5.1. Trabajo futuro	48
Bibliografía	49



# Índice de figuras

1.1. Distribución de asteroides en el sistema solar: Los asteroides se representan como puntos amarillos. Las figuras a) y b) muestran vistas desde el plano de la eclíptica, mientras que la figura c) ofrece una vista oblicua de este plano, en esta figura también se pueden distinguir objetos transneptunianos con diámetros mayores a 700 km, representados como diamantes blancos. Créditos P. Chodas disponible en <a href="https://ssd.jpl.nasa.gov/diagrams/">https://ssd.jpl.nasa.gov/diagrams/</a> . . . . .	4
1.2. Elementos orbitales. La parte a) ilustra la forma de una órbita elíptica en un plano bidimensional, mientras que b) ofrece una visualización tridimensional en la que se emplea la eclíptica como plano de referencia. Adaptada de [Lissauer & de Pater 2013].	5
1.3. Vacíos de Kirkwood. Adaptada de Alan Chamberlin disponible en <a href="https://ssd.jpl.nasa.gov/diagrams/mb_hist.html">https://ssd.jpl.nasa.gov/diagrams/mb_hist.html</a> . . . . .	5
1.4. Representación orbital de los distintos grupos de los NEAs. Recuperada de <a href="https://cneos.jpl.nasa.gov/about/neo_groups.html">https://cneos.jpl.nasa.gov/about/neo_groups.html</a> . . . . .	7
1.5. Representación o fotografías de tres eventos significativos de impacto de asteroides en la historia de la Tierra. . . . .	9
1.6. Diagrama que ilustra la forma y rotación de un asteroide a partir del análisis de sus curvas de luz. En el eje vertical se representa la variación del brillo del asteroide, mientras que el eje horizontal corresponde al tiempo. Recuperada de <a href="https://asteroidday.org/updates/event-updates/learn-how-can-we-characterize-asteroids/">https://asteroidday.org/updates/event-updates/learn-how-can-we-characterize-asteroids/</a> . . . . .	11
1.7. Representación esquemática del ángulo de fase ( $\alpha$ ) en un sistema Sol-asteroide-Tierra (observador). . . . .	11
2.1. Captura de pantalla del generador de efemérides del Minor Planet Center, mostrando el formulario de configuración donde se especifican las características deseadas para los asteroides. Capturada de <a href="https://minplanobs.org/MPInfo/php/callopplcdbquery.php">https://minplanobs.org/MPInfo/php/callopplcdbquery.php</a> . . . . .	16
2.2. Captura de pantalla de la página web de ALCDEF, mostrando el formulario de búsqueda y configuración para la consulta de datos fotométricos de asteroides. Capturada de <a href="https://alcdef.org/">https://alcdef.org/</a> . . . . .	17
2.3. Gráfico que muestra la variación de altitud de diversos asteroides durante una noche, utilizado para evaluar la visibilidad y planificar las observaciones. Capturado de <a href="https://astro.ing.iac.es/staralt/">https://astro.ing.iac.es/staralt/</a> . . . . .	18
2.4. Cámara Schmidt de Tonantzintla, ubicada en Puebla, México, a una latitud de 19°01'53.4" Norte, una longitud de 98°18'54.3" Oeste y una altitud de 2180 msnm. Junio 2023. . . . .	20
3.1. Imagen capturada durante el 27 de febrero de 2024, correspondiente al asteroide (34704) 2001 SO <sub>80</sub> y su campo de observación. . . . .	24
3.2. Ajustes críticos en la configuración de MPO Canopus. . . . .	27

3.3. Conjunto de muestras de aperturas. . . . .	28
3.4. Ajuste de las aperturas empleadas para el análisis fotométrico. En a) se muestra la configuración de las aperturas fotométricas utilizadas, especificando los radios de la apertura principal, el anillo interior y el anillo exterior para la corrección del fondo cielo. En b) se visualizan las aperturas fotométricas superpuestas sobre la imagen del asteroide; las aperturas amarillas corresponden al asteroide, mientras que las rojas indican las estrellas. Esta imagen pertenece a la serie observacional del 27 de febrero de 2024 que corresponde al asteroide (3181) Ahnert. . . . .	29
3.5. Configuración de una sesión fotométrica para el asteroide (2345) Fucik. Se crearon 11 sesiones en total para los tres asteroides analizados, manteniendo una nomenclatura consistente. En el caso del asteroide (2345) Fucik, las sesiones fueron nombradas como 2345 Fucik. Esta uniformidad es fundamental para la generación de la curva de luz, ya que el software requiere que las sesiones relacionadas tengan el mismo nombre. . . . .	30
3.6. Captura de pantalla del proceso de Canopus, se muestra la selección de la primera imagen y la activación de las opciones StarBGone y Show Path. . . . .	31
3.7. Selección de las estrellas de comparación y determinación de la trayectoria del asteroide. En la primera imagen a), se muestra la selección de estrellas análogas solares marcadas en verde, junto con la estrella ancla resaltada en amarillo y utilizada como referencia en imágenes posteriores. En la segunda imagen b), se presentan las coordenadas del asteroide identificadas por Canopus, lo que permite calcular su trayectoria con precisión. . . . .	32
3.8. Reubicación de las estrellas de comparación y del asteroide. Las estrellas de comparación están etiquetadas con su respectivo número, mientras que el asteroide se identifica con una T. . . . .	33
3.9. Se muestra la selección de las estrellas de referencia y las estrellas a sustraer. En la apertura roja se destaca la primera estrella de referencia, mientras que en la parte inferior derecha de la trayectoria del asteroide se observa una estrella que fue sustraída debido a su proximidad a dicha trayectoria. . . . .	33
3.10. Proceso de medición. En la apertura verde se destaca la estrella ancla, en las rojas las estrellas de comparación y en la amarilla el asteroide. . . . .	33
3.11. Comportamiento a lo largo de la sesión fotométrica de las estrellas de comparación. El eje horizontal representa el tiempo transcurrido desde el inicio de la sesión en días julianos fraccionarios (referido al JD 2460354.6000), mientras que el eje vertical muestra la diferencia de magnitudes entre el objeto objetivo y una estrella de comparación ( $\Delta m = \text{mag}(\text{Target}) - \text{mag}(\text{Comparison})$ ). La estabilidad de los puntos en torno a un valor constante indica que las estrellas de comparación son fotométricamente estables y adecuadas para el análisis. . . . .	34
3.12. Coberturas ideales de las sesiones fotométricas; los puntos en color verde representan cada sesión observacional. En a) se muestra la distribución de la cobertura del Pseudo-Ángulo de la Línea de Base (PABL, por sus siglas en inglés), relacionada con la orientación del eje de rotación durante las observaciones y en b) la cobertura del ángulo de fase, fundamental para la reconstrucción precisa del modelo de forma tridimensional mediante inversión de curvas de luz. . . . .	37
4.1. Curva de luz del asteroide (2345) Fucik, observado del 13 al 16 de febrero y 12 de marzo de 2024. Se obtuvo el periodo de $17.123 \pm 0.002$ h y la amplitud de 0.42 con una función de Fourier de cuarto orden. . . . .	40
4.2. Period Spectrum. Se obtuvo el periodo de $17.123 \pm 0.002$ h, asociado a un valor mínimo de RMS de 3.5036. La incertidumbre fue estimada con un nivel de confianza de $3\sigma = 0.002h$ . . . . .	41

4.3. Curva de luz generada con los datos disponibles en el ALCDEF de [Pál et al. 2020]. Las observaciones corresponden a febrero de 2019. . . . .	41
4.4. Period Spectrum correspondiente a las sesiones fotométricas de [Pál et al. 2020]. Al contar con un conjunto de datos más amplio, el mínimo se define con mayor claridad.	41
4.5. Curva de luz generada a partir de los datos fotométricos de [Pál et al. 2020] y los obtenidos en esta tesis. . . . .	42
4.6. Coberturas de curvas de luz disponibles del asteroide (2345) Fucik. . . . .	43
4.7. Búsqueda y reconstrucción de la forma del asteroide (2345) Fucik. . . . .	43
4.8. Curva de luz de (3181) Ahnert, observado los días 21, 22 y 27 de febrero de 2024. .	44
4.9. Period Spectrum. . . . .	44
4.10. Curva de luz del asteroide (34704) 2001 $SO_{80}$ , observado los días 28, 29 de febrero y el 3 de marzo de 2024. Se obtuvo el periodo de $3.004 \pm 0.002$ h y la amplitud de 0.21 con una función de Fourier de sexto orden. . . . .	46
4.11. Period Spectrum. Se obtuvo el periodo de $3.004 \pm 0.002$ h, asociado a un valor mínimo de RMS de 4.60474. La incertidumbre fue estimada con un nivel de confianza de $3\sigma = 0.002h$ . . . . .	46



# Índice de tablas

1.1. Elementos orbitales. Información recuperada de [IAU 2006], [Michimani 2019]. . . . .	3
2.1. Principales características de los componentes ópticos de la CST [Valdés et al. 2016]	20
2.2. Parámetros ópticos de la CST. Información recuperada de [Valdés et al. 2023] y [Cerdán 2019]. . . . .	21
2.3. Principales características del CCD de la CST [SBIG 2015]. . . . .	21
2.4. Datos de observación de los asteroides seleccionados. Se incluyen la fecha, coordenadas de ascensión recta ( $RA$ ) y declinación ( $DEC$ ), magnitud aparente ( $m_v$ ), distancias a la Tierra ( $\Delta$ ) y al Sol ( $r$ ), ángulo de fase ( $\alpha$ ), tiempo de exposición ( $T_e$ ) y número de imágenes capturadas. . . . .	22
3.1. Orden armónico recomendado según la amplitud de la curva de luz, basado en [Harris et al. 2014]. . . . .	35
4.1. Resultados obtenidos en este estudio, junto con los elementos orbitales, los parámetros físicos disponibles, la clasificación taxonómica y orbital, así como las distancias de perihelio y afelio. Estos últimos recuperados de [JPL s.f.-d], [JPL s.f.-e] y [JPL s.f.-f]	39
4.2. Valores reportados del período de rotación del asteroide (2345) Fucik. La incertidumbre asignada por el ALCDEF a las curvas de luz de Brinsfield, Carbo y Pál es de $U = 2$ . . . . .	40



# Resumen

En esta tesis se llevó a cabo un monitoreo fotométrico de tres asteroides del cinturón principal: (2345) Fucik, (83181) Ahnert y (34704) 2001  $SO_{80}$ , utilizando la Cámara Schmidt de Tonantzintla (INAOE). A través del análisis de sus curvas de luz, se determinaron parámetros fundamentales como el período de rotación y la amplitud de variación. Para el primer asteroide, que contaba con estudios previos, los resultados obtenidos permitieron generar un modelo tridimensional. En contraste, para los otros dos asteroides no se disponía de información previa. En el caso de (83181) Ahnert, no fue posible determinar sus parámetros, por lo que se analizan las razones de este resultado. Por otro lado, para (34704) 2001  $SO_{80}$ , se obtuvo por primera vez una estimación de sus parámetros, lo que representa una contribución significativa a la base de datos astronómicos.

Este estudio forma parte de un esfuerzo continuo por mejorar la vigilancia y caracterización de los asteroides, en cumplimiento de los compromisos del INAOE como miembro fundador de la Red Internacional de Alerta de Asteroides (IAWN, por sus siglas en inglés).

**Palabras clave:** *Fotometría, curvas de luz, asteroides del cinturón principal, período de rotación, amplitud, modelo tridimensional.*



# Capítulo 1

## Introducción

Nuestro sistema solar se formó hace aproximadamente 4,600 millones de años a partir de una vasta nube de gas y polvo llamada la nebulosa solar [NASA s.f.]. Esta nebulosa comenzó a contraerse bajo la influencia de la gravedad, formando un disco protoplanetario alrededor de una estrella joven que se convertiría en el Sol.

En este disco protoplanetario, partículas de polvo y roca se acumularon y fusionaron para formar planetesimales [Haldar & Tisljar 2014]. A medida que estos planetesimales continuaron creciendo y atrayendo más material, surgieron los planetas, lunas, asteroides y cometas que componen nuestro sistema solar [NASA s.f.]. Los procesos de colisión y acreción dieron forma a la composición de estos cuerpos celestes a lo largo del tiempo.

Los asteroides, siendo remanentes de la población planetesimal, son entonces esenciales para entender el origen del sistema solar. Aunque algunos asteroides han sido alterados por procesos térmicos, dinámicos y colisiones, la mayoría no experimentó una evolución geológica significativa, preservando evidencias físicas de los primeros 200 millones de años de la historia del sistema solar [Karttunen et al. 2017]. Al estudiarlos, podemos obtener una comprensión más profunda de nuestro lugar en el cosmos y de cómo surgió la diversidad de cuerpos celestes que observamos hoy en día.

### 1.1. Asteroides

En 2006, la Unión Astronómica Internacional (IAU, por sus siglas en inglés) estableció una definición formal de planeta que incluye tres criterios principales [IAU 2006].

Un planeta es un cuerpo celeste que:

1. Orbita directamente alrededor del Sol, pues, debe estar gravitacionalmente ligado al Sol.
2. Tiene suficiente masa para que su gravedad lo mantenga esférico, esto es lo que lo distingue de objetos más pequeños, como asteroides o cometas, que pueden tener formas irregulares.
3. Ha limpiado su órbita, es decir, domina su vecindad orbital o ha eliminado de ella otros cuerpos, de tamaño comparable, a través de colisiones o interacciones gravitacionales.

Bajo esta definición, actualmente hay ocho planetas en nuestro sistema solar: Mercurio, Venus, Tierra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno.

Plutón, que antes era considerado el noveno planeta, fue reclasificado como un “planeta

enano”. Un planeta enano cumple los dos primeros criterios de la IAU para planetas, pero no cumple el tercero, pues estos no han limpiado su vecindario orbital de otros objetos de tamaño similar. Además de Plutón, existen otros 4 planetas enanos, los cuales son Eris, Haumea, Makemake y Ceres [Popescu 2012].

Plutón es uno de los planetas enanos más conocidos en nuestro sistema solar. Aunque Plutón tiene suficiente masa para ser redondeado por la gravedad y orbita alrededor del Sol, se encuentra en una región del sistema solar, denominada región transneptuniana, donde existen otros cuerpos celestes que pueden perturbar su órbita, lo que lo excluye de la categoría de planetas tradicionales según la definición de la IUA.

Siguiendo la clasificación de la IUA, todos los otros objetos que giran alrededor del Sol serán referidos en conjunto como Cuerpos Menores del sistema solar. Esta categoría abarca la mayoría de los asteroides, objetos transneptunianos, cometas y otras entidades de pequeño tamaño. En caso de que un objeto orbite alrededor de otro cuerpo que no sea el Sol, el objeto se clasifica como una luna o un satélite, sin importar sus características específicas. El sistema solar alberga una amplia variedad de estos cuerpos menores que tradicionalmente se han dividido en tres grupos: asteroides, cometas y meteoroides [Karttunen et al. 2017].

Los asteroides son cuerpos celestes conformados en su mayoría por roca o metal, típicamente tienen formas irregulares, y a diferencia de los cometas no presentan cola de gas o polvo características de estos. La teoría más aceptada sobre el origen de los asteroides es la que propone que se formaron simultáneamente con los planetas. Los primeros asteroides primitivos eran grandes trozos, con el tiempo estos colisionaron y se fragmentaron entre si dando origen a los asteroides que actualmente conocemos. Algunos de los asteroides más grandes pueden ser remanentes de esos asteroides primitivos [Karttunen et al. 2017].

## 1.2. Clasificación

Actualmente, existen diversas formas de clasificar los asteroides, cada una diseñada para abordar diferentes aspectos de sus características y dinámica. En esta tesis nos centraremos en dos clasificaciones fundamentales: la taxonómica y la orbital.

### 1.2.1. Taxonómica

Según [Murphy 2023], cuando la luz solar incide en la superficie de un asteroide, los minerales la absorben y reemiten radiación en longitudes de onda específicas. Las características del espectro como la inclinación de la pendiente, la curvatura y las posiciones, anchos y profundidades de las bandas de absorción, permiten identificar la combinación de los minerales presentes en la superficie de los asteroides. Es decir, esta clasificación consiste en analizar la radiación electromagnética reflejada o emitida por los minerales en la superficie del asteroide para identificar las características espectrales que permiten determinar su composición.

Las clasificaciones modernas de los asteroides se basan en características clave de los espectros de reflectancia en el intervalo que va desde el ultravioleta hasta el visible e infrarrojo cercano (VNIR, por sus siglas en inglés), junto con el albedo (la fracción de luz solar reflejada por la superficie del asteroide) y los índices de color fotométricos. En las últimas cuatro décadas los intervalos de longitud de onda utilizados han sido principalmente de 0.3 a 2.45  $\mu\text{m}$ . Las taxonomías más comunes actualmente en uso son los esquemas de Bus-DeMeo, Tholen y Gaffey.

En estos esquemas de clasificación, los asteroides se agrupan en tres grandes complejos: C,

S y X, y un grupo más en el que se incluye al resto de objetos que no cae en estos tres complejos. Los asteroides del grupo C tienen una composición carbonácea, los del grupo S son silicatos, y los del grupo X son metálicos [Bus & Binzel 2002]. El resto, es decir, aquellos que no están catalogados en estos tres grupos, se conocen comúnmente como miembros finales y valores atípicos. Estos complejos se subdividen en diferentes subclases [Murphy 2023].

- Complejo C incluye subclases como B, Cb, C, Cg, Cgh, Ch.
- Complejo S abarca subclases como S, Sa, Sq, Sr, Sv.
- Complejo X comprende subclases como X, Xc, Xe, Xk, Xn.
- Miembros finales y valores atípicos comprende las clases y subclases A, B, D, K, L, Ld, O, Q, R, T, V.

### 1.2.2. Orbital

Esta clasificación se basa en la distribución espacial de los asteroides dentro del sistema solar, la cual depende principalmente de las características de sus órbitas alrededor del Sol. En la figura 1.1 se presenta una vista general de la distribución de los asteroides en el sistema solar, dividida en tres regiones: el sistema solar interior, el exterior y el distante. Dado que los asteroides se mueven en órbitas elípticas, con el Sol ubicado en uno de los focos de la órbita, es importante mencionar los elementos orbitales, ya que se hará uso de estos más adelante.

Existen seis elementos orbitales los cuales se describen en la tabla 1.1 y se pueden observar gráficamente en la figura 1.2. Es necesario mencionar que se utiliza un plano de referencia, y que regularmente se emplea el plano de la eclíptica, que es el plano en el que la Tierra orbita alrededor del Sol, y una dirección de referencia en este plano, que usualmente es el primer punto de Aries. Este punto corresponde al equinoccio de primavera en el hemisferio norte.

Nombre	Símbolo	Descripción
Inclinación	$i$	Ángulo entre el plano de la eclíptica y el plano de la órbita del asteroide.
Longitud del nodo ascendente	$\Omega$	Ángulo medido en sentido antihorario desde la dirección de referencia hasta la línea del nodo ascendente.
Argumento del Perihelio	$\omega$	Ángulo medido en dirección al movimiento desde el nodo ascendente hasta su perihelio. <sup>1</sup>
Semieje mayor	$a$	Es la mitad de la distancia total del eje mayor de la órbita.
Excentricidad	$e$	Define la forma de la elipse. Matemáticamente se expresa como $e = c/a$ . Cuando $e = 0$ , la figura es un círculo perfecto. A medida que $e$ se acerca a 1, la elipse se vuelve más alargada y más elongada.
Anomalía media	$M$	Se obtiene multiplicando la velocidad promedio del cuerpo en órbita por el tiempo que ha pasado desde que pasó por el perihelio. Esto da como resultado el ángulo que ha recorrido desde el perihelio hasta su posición actual.

Tabla 1.1: Elementos orbitales. Información recuperada de [IAU 2006], [Michimani 2019].

<sup>1</sup>El perihelio es el punto más cercano de la órbita de un cuerpo celeste al Sol. Por otro lado, cuando el cuerpo celeste se encuentra en el punto más lejano de su órbita, se denomina afelio [IAU Minor Planet Center s.f.].



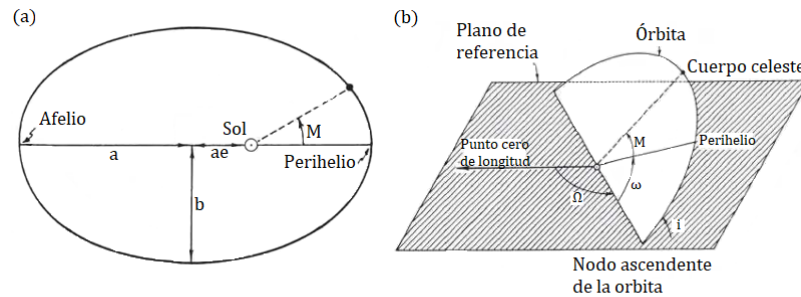


Figura 1.2: Elementos orbitales. La parte a) ilustra la forma de una órbita elíptica en un plano bidimensional, mientras que b) ofrece una visualización tridimensional en la que se emplea la eclíptica como plano de referencia. Adaptada de [Lissauer & de Pater 2013].

### Asteroides del cinturón de principal

El Cinturón Principal de Asteroides se ubica entre las órbitas de Marte y Júpiter; por lo cual, los valores de sus semiejes mayores ( $a$ ) están en el intervalo  $2.1 < a < 3.3$  UA del Sol [Elkins-Tanton 2010]. Este cinturón contiene una alta concentración de asteroides, su población es de 1,191,357 asteroides, cuya masa total equivale aproximadamente al 4% de la masa de la Luna [Williams 2022]. Se divide en tres zonas: I. Interior ( $2.1 < a \leq 2.5$  UA), II. Central ( $2.5 < a \leq 2.8$  UA) y III. Exterior ( $2.8 < a \leq 3.3$  UA) [Elkins-Tanton 2010].

La distribución de los asteroides en el cinturón principal no es uniforme, ya que se concentran en determinados valores del semieje mayor, lo que da lugar a huecos o vacíos en diversas regiones, conocidos como vacíos de Kirkwood. Estos huecos son causados por resonancias de movimiento medio con Júpiter. Dichas resonancias ocurren cuando el asteroide y Júpiter se alinean regularmente en puntos específicos de sus órbitas, generando interacciones gravitacionales. Estas interacciones pueden desestabilizar la órbita del asteroide, empujándolo fuera de esa región y creando así un vacío en el cinturón de asteroides [López-García 1993]. En la figura 1.3 se pueden observar estos vacíos.

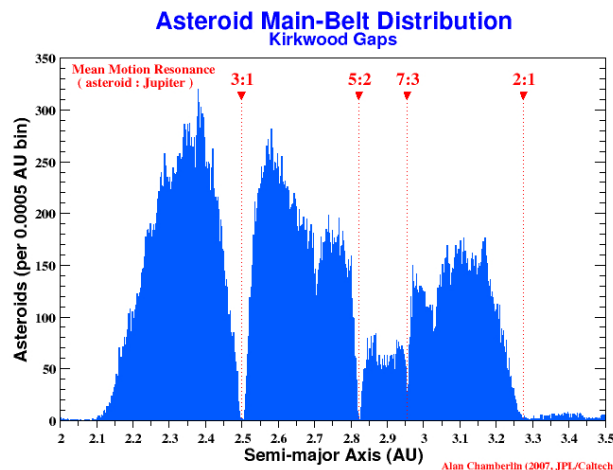


Figura 1.3: Vacíos de Kirkwood. Adaptada de Alan Chamberlin disponible en [https://ssd.jpl.nasa.gov/diagrams/mb\\_hist.html](https://ssd.jpl.nasa.gov/diagrams/mb_hist.html)

[Dymock 2010] sostiene que los asteroides del cinturón principal pueden convertirse en Asteroides Cercanos a la Tierra (NEAs, por sus siglas en inglés) debido a dos procesos dinámicos, ambos influenciados de manera determinante por las vacíos de Kirkwood.

El primer mecanismo ocurre cuando dos asteroides colisionan, lo que puede resultar en la expulsión de uno de los asteroides, de ambos o de varios fragmentos de ellos, hacia uno de estos vacíos. El segundo proceso involucra el efecto Yarkovsky, que afecta a asteroides con diámetros menores a 20 km. Este fenómeno térmico se debe a la absorción de radiación solar por parte del asteroide, que posteriormente es reemitida de forma desigual mientras gira sobre su eje. La emisión de calor genera una fuerza minúscula pero continua que modifica gradualmente la órbita del objeto. Si la rotación es prógrada (en la misma dirección del movimiento orbital), el asteroide se acelera y se aleja del Sol. En cambio, si la rotación es retrógrada (sentido opuesto al movimiento orbital), la fuerza resultante reduce su velocidad, acercándolo al Sol. En ambos casos, cuando un asteroide alcanza una brecha de Kirkwood, la influencia gravitatoria de Júpiter altera su órbita, aumentando su excentricidad. Como consecuencia, el asteroide puede evolucionar hasta convertirse en un cruzador de Marte (Mars crosser) y, posteriormente, ser perturbado hacia una órbita cercana a la Tierra. Finalmente, las interacciones gravitatorias con los planetas pueden estabilizar su excentricidad, manteniéndolo en las proximidades de la órbita terrestre como un NEA.

Por otro lado, el estudio de las familias de asteroides también ha sido fundamental para comprender la dinámica y evolución del cinturón principal. Desde el trabajo de [Hirayama 1918] hasta el estudio de [Nesvorný, Brož, & Carruba 2015], se han identificado un total de 122 familias de asteroides, entre las cuales se encuentran las familias Eos, Flora y Eunomia.

### Asteroides Troyanos

Los asteroides troyanos orbitan alrededor de los puntos Lagrangianos L4, situado a  $60^\circ$  por delante del planeta, o L5, a  $60^\circ$  por detrás del planeta, en un sistema compuesto por el Sol y un planeta [Santana-Ros et al. 2022]. Las órbitas de estos asteroides tienen semiejes mayores que varían entre 4.6 y 5.5 UA.

La mayor población de troyanos está asociada con Júpiter, es decir, comparten órbita con este planeta. Sin embargo, también existen asteroides troyanos en órbita alrededor de otros planetas como Venus, Marte, Urano, Neptuno y la Tierra. Hasta 2011, sólo se había registrado un asteroide troyano de la Tierra, denominado 2010 TK7. No fue sino hasta 2022 que se reportó un segundo asteroide troyano terrestre, el 2020 XL<sub>5</sub> [Santana-Ros et al. 2022].

### Asteroides Cercanos a la Tierra (NEAs)

Los Asteroides Cercanos a la Tierra son aquellos asteroides cuyo perihelio ( $q$ ) es menor a 1.3 UA. Estos objetos se clasifican en cuatro grupos (figura 1.4) según sus elementos orbitales, como el perihelio, la distancia de afelio ( $Q$ ) y el semieje mayor ( $a$ ): Amor, Apolo, Aten y Atira (o Apohele) [JPL s.f.-c].

Los Amor son aquellos cuyas órbitas se aproximan a la de la Tierra, pero no la cruzan. Los Apolo y los Aten son asteroides cuyas órbitas cruzan la órbita terrestre; sin embargo, la diferencia entre ellos radica en el semieje mayor: los Apolo tienen un  $a$  mayor que el de la Tierra, mientras que los Aten tienen un  $a$  menor. Los Atira son asteroides cuyas órbitas están completamente dentro de la órbita de la Tierra. [JPL s.f.-c].

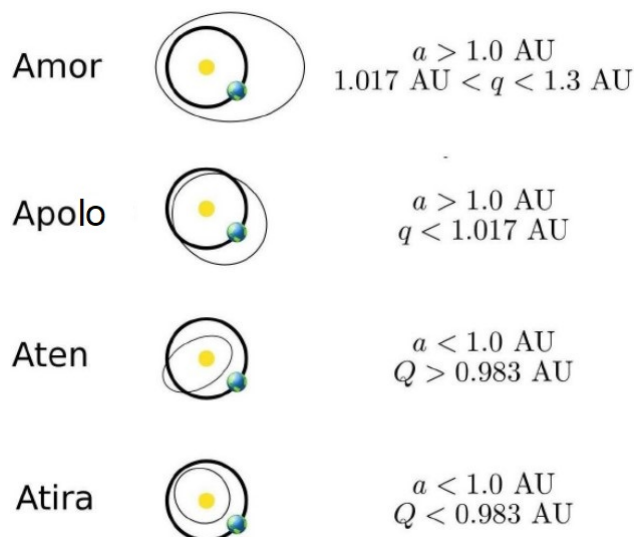


Figura 1.4: Representación orbital de los distintos grupos de los NEAs. Recuperada de [https://cneos.jpl.nasa.gov/about/neo\\_groups.html](https://cneos.jpl.nasa.gov/about/neo_groups.html).

## Centauros

Los Centauros son aquellos asteroides que orbitan el Sol entre Júpiter y Neptuno, en una región dinámica inestable, con semiejes mayores entre  $5.5 < a < 30.1 \text{ UA}$  [Levison & Duncan 1997]. Su vida dinámica es corta, del orden de decenas de millones de años, debido a las interacciones gravitacionales con los planetas gigantes [Holman & Wisdom 1993], [Horner, Evans, & Bailey 2004]. Se cree que los Centauros son cuerpos transneptunianos antiguos que han migrado hacia el interior del sistema solar, sirviendo como una etapa de transición entre las poblaciones más externas, como los objetos transneptunianos (TNOs) y los objetos del disco disperso (SDOs), y los cometas de la familia de Júpiter (JFCs) [Gladman, Marsden, & Vanlaerhoven 2008], [Elliot et al. 2005]. Es por esto que juegan un papel clave en el transporte de materiales volátiles hacia las regiones internas del sistema solar.

## Objetos transneptunianos (TNOs)

Los Objetos Transneptunianos (TNOs, por sus siglas en inglés) se encuentran en los límites más lejanos del sistema planetario, caracterizándose por tener un semieje mayor ( $a$ ) superior al de Neptuno ( $a > 30.047 \text{ UA}$ ). Estos cuerpos helados, considerados vestigios fósiles del disco protoplanetario, ofrecen información crucial sobre los procesos que moldearon tanto la nebulosa solar primitiva como otros sistemas planetarios en formación.

La población de TNOs se clasifica en distintos grupos según sus características orbitales y su distancia al Sol: los objetos clásicos, que forman parte del Cinturón de Kuiper, poseen órbitas mayormente circulares con distancias promedio entre 30 y 55 unidades astronómicas (UA); los objetos resonantes están atrapados en resonancias de movimiento medio con Neptuno; los objetos del disco disperso presentan órbitas muy excéntricas, con perihelio cercano a Neptuno, lo que sugiere que estas órbitas fueron alteradas por interacciones gravitacionales; y finalmente, los objetos desprendidos tienen órbitas extremadamente excéntricas con perihelio significativamente alejado de la influencia gravitacional de Neptuno [Barucci et al. 2010].

### 1.2.3. Asteroides potencialmente peligrosos (PHAs)

Los Asteroides Potencialmente Peligrosos (PHAs, por sus siglas en inglés) son una subcategoría de los objetos cercanos a la Tierra (NEOs, por sus siglas en inglés) definidos por su capacidad de realizar aproximaciones amenazantes al planeta. Para ser clasificados como PHA, los asteroides deben cumplir dos criterios principales: una Distancia Mínima de Intersección Orbital (MOID, por sus siglas en inglés) de 0.05 UA o menos, equivalente a aproximadamente 7.48 millones de kilómetros, y una magnitud absoluta ( $H$ ) de 22.0 o menos. Este último parámetro implica que los objetos considerados PHAs tienen un diámetro mayor a 140 metros, suponiendo un albedo promedio del 14% [JPL s.f.-c]. Por tanto, los asteroides que no pueden acercarse lo suficiente a la Tierra o que son demasiado pequeños para representar una amenaza significativa no se incluyen en esta categoría.

Debido a su proximidad y tamaño, los asteroides potencialmente peligrosos representan una amenaza significativa para nuestro planeta, ya que poseen el potencial de colisionar con la Tierra. A lo largo de la historia, algunos de los impactos más notorios incluyen:

1. Evento de Chicxulub (figura 1.5a): hace 66 millones de años, un asteroide de tipo carbonáceo impactó Chicxulub, México, con un diámetro aproximado de 10 km. Este evento marcó el límite entre el Cretácico y el Paleógeno y está asociado con la extinción masiva de los dinosaurios y muchas otras formas de vida [Fischer-Gödde et al. 2024].
2. Evento de Tunguska (figura 1.5b): el 30 de junio de 1908, un objeto (probablemente un asteroide o cometa) explotó en la atmósfera sobre Siberia, Rusia. Se estima que tenía de 50-60 metros de diámetro y liberó una energía equivalente entre 10-15 megatonnes de TNT<sup>2</sup>, causando la destrucción de aproximadamente 2,000 km<sup>2</sup> de bosque. Aunque no se formó un cráter, la explosión derribó millones de árboles y generó ondas de choque detectadas a miles de kilómetros [NASA 2023].
3. Evento de Cheliábinsk (figura 1.5c): El 15 de febrero de 2013, un asteroide entre 17-20 metros ingresó a la atmósfera sobre Cheliábinsk, Rusia, liberando una energía equivalente a 440 kilotonnes de TNT. La desintegración del objeto causó una bola de fuego brillante y una onda de choque que dañó más de 7,200 edificios y dejó más de 1,600 heridos. Fue el impacto más energético desde el evento de Tunguska en 1908 [NASA 2018], [JPL s.f.-a].

Según el Centro de Estudios de Objetos Cercanos a la Tierra (CNEOS, por sus siglas en inglés) [JPL s.f.-g] hasta el 22 de abril de 2025, se han descubierto 38,221 NEAs, de los cuales 2,494 son considerados PHAs. La identificación y monitoreo de estos asteroides es crucial para predecir la probabilidad de futuros impactos y minimizar los riesgos asociados.

Su monitoreo constante y la actualización de sus órbitas son esenciales para predecir mejor la probabilidad de impacto y mitigar posibles desastres.

### 1.2.4. Red Internacional de Alerta de Asteroides (IAWN)

La Red Internacional de Alerta de Asteroides (IAWN, por sus siglas en inglés) fue establecida en 2013 como parte de las recomendaciones aprobadas por la Organización de las Naciones Unidas para crear una respuesta internacional ante la amenaza de impacto de NEOs. Su objetivo es formar un grupo internacional de organizaciones

---

<sup>2</sup>Unidad de referencia para cuantificar la energía liberada en explosiones. Por ejemplo, se dice que un impacto libera el equivalente a “100 kilotonnes de TNT” para expresar una energía similar a la de una explosión nuclear. Una tonelada de TNT equivale aproximadamente a  $4.184 \times 10^9 J$ .



(a) Reconstrucción artística del cráter Chicxulub. (b) Tunguska, fotografiada durante una expedición. Imagen disponible en Science Source. Detlev Van Ravenswaay. Detlev Van Ravenswaay en la década de 1920. Leonid Kulik.



(c) El rastro del bólido de Cheliábinsk. Alex Alishevskikh.

Figura 1.5: Representación o fotografías de tres eventos significativos de impacto de asteroides en la historia de la Tierra.

dedicadas a la detección, monitoreo y caracterización de NEOs, con la responsabilidad de desarrollar estrategias y protocolos de comunicación claros para ayudar a los gobiernos en la evaluación de las consecuencias de un impacto y en la planificación de respuestas de mitigación [IAWN 2013].

Entre las funciones clave de la IAWN se incluyen el descubrimiento y monitoreo de NEOs peligrosos mediante diversas instalaciones ópticas y de radar, así como la coordinación de campañas internacionales de observación. Además, la red también proporciona un centro de intercambio de información para procesar observaciones de NEOs y ayudar a los gobiernos en la evaluación de los riesgos e impactos potenciales, desarrollando bases de datos sobre las consecuencias de impactos y recomendando políticas para afrontar las amenazas emergentes [IAWN s.f.].

Desde 2016, el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) colabora estrechamente con la IAWN en estas actividades de monitoreo y análisis, contribuyendo a las estrategias globales para la defensa planetaria contra la amenaza de impactos de asteroides. A través de esta colaboración, el INAOE apoya el trabajo internacional en la detección y mitigación de los riesgos asociados con los NEOs.

La colaboración internacional es esencial para gestionar eficazmente el riesgo de impactos de asteroides, ya que la combinación de recursos y datos de múltiples países permite contar con una red de detección y respuesta más robusta. El IAWN desempeña un papel crucial al asegurar que la humanidad esté mejor preparada para enfrentar esta amenaza cósmica.

El estudio de los asteroides, especialmente los objetos potencialmente peligrosos (PHAs), es vital para la seguridad de nuestro planeta. La detección y monitoreo continuo, junto con la evaluación de propiedades como el período orbital y la magnitud, nos permiten estar mejor preparados ante cualquier eventualidad. La colaboración internacional a través de redes como el IAWN garantiza una respuesta coordinada y eficaz ante posibles amenazas, protegiendo así a la humanidad de impactos cósmicos devastadores.

## 1.3. Fotometría

Según Gallaway [Gallaway 2016], la fotometría es uno de los pilares clave en la observación astronómica. En términos generales, la fotometría se refiere a la medición de la cantidad de energía en una banda específica de longitudes de onda, lo que también se relaciona con el flujo o brillo [Romanishin 2006]. La fotometría es una de las técnicas fundamentales en la astronomía observacional, cuyo propósito es la medición precisa del brillo aparente de los cuerpos celestes en intervalos específicos de longitudes de onda electromagnética, especialmente dentro de la banda óptica [Stetson 2013]. Esta técnica permite obtener parámetros clave como la magnitud, que indica el brillo del objeto observado, o la variabilidad de su brillo a lo largo del tiempo. De esta variabilidad se pueden derivar las curvas de luz, que son gráficos que muestran cómo cambia el brillo de un objeto celeste con el tiempo. Los cambios en el brillo pueden ser causados por diversos fenómenos, como la pulsación de una estrella, la ocurrencia de eclipses en sistemas estelares binarios, cuando una estrella pasa frente a otra, o la rotación de un objeto de geometría irregular, como un asteroide [Warner 2006].

### 1.3.1. Curva de luz

Las curvas de luz de asteroides son gráficos que representan la variación del brillo de un asteroide en función del tiempo. Estas variaciones se deben principalmente a la rotación del asteroide y a la geometría de su superficie, que refleja la luz solar de manera desigual. Una curva de luz es un gráfico que muestra el brillo, la magnitud o el color de un objeto a lo largo del tiempo, y se utiliza para estudiar una amplia variedad de objetos astronómicos. Además de los asteroides, las curvas de luz se emplean en el estudio de estrellas variables, sistemas binarios, exoplanetas, sistemas binarios de rayos X y supernovas. Las variaciones observadas en la curva de luz de un objeto proporcionan información clave sobre su naturaleza, como la escala de tiempo o el período de variabilidad, lo que ayuda a clasificar el objeto y a identificar los procesos físicos que ocurren en el asteroide [OEA s.f.].

El estudio de las curvas de luz proporciona información fundamental sobre las propiedades físicas de los asteroides, como su período de rotación, amplitud, forma tridimensional y la orientación de su eje de rotación [Asteroid Day 2022]. Al analizar los máximos y mínimos en la curva de luz, es posible inferir la elongación de la forma del asteroide y la presencia de irregularidades superficiales figura 1.6.

En algunos casos, la inversión de curvas de luz permite la reconstrucción de modelos tridimensionales del asteroide, especialmente cuando se cuenta con múltiples observaciones desde diferentes geometrías de observación. Estos modelos son valiosos para entender la dinámica de los asteroides y sus interacciones con otros cuerpos del sistema solar.

El estudio de estas curvas es esencial para la caracterización de asteroides cercanos a la Tierra (NEAs) y del cinturón principal, ya que proporciona información crucial para comprender su estructura, comportamiento y el riesgo potencial que representan.

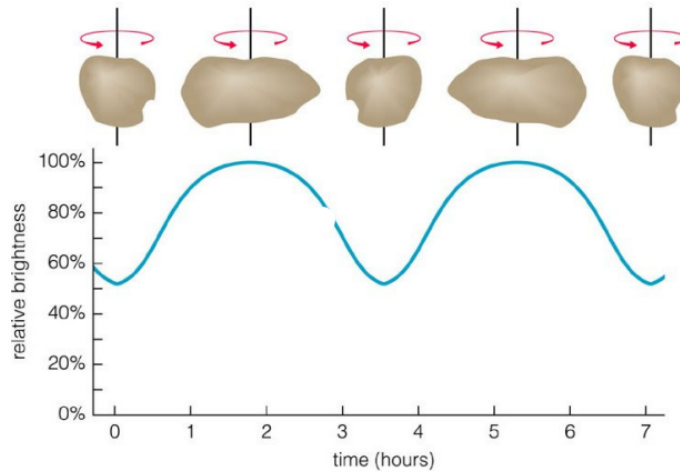


Figura 1.6: Diagrama que ilustra la forma y rotación de un asteroide a partir del análisis de sus curvas de luz. En el eje vertical se representa la variación del brillo del asteroide, mientras que el eje horizontal corresponde al tiempo. Recuperada de <https://asteroidday.org/updates/event-updates/learn-how-can-we-characterize-asteroids/>.

### 1.3.2. Parámetros

#### Albedo

El albedo es una medida que describe la capacidad de un cuerpo celeste para reflejar la luz. Se define como la relación entre la cantidad de luz que recibe un objeto y la cantidad de luz que refleja. El albedo se expresa como un valor numérico entre 0 y 1, donde 0 representa un objeto completamente oscuro que no refleja luz, y 1 representa un objeto que refleja toda la luz que recibe [JPL s.f.-b].

Existe el albedo geométrico ( $p_v$ ), el cual se refiere a la relación entre el brillo de un cuerpo en un ángulo de fase cero ( $\alpha = 0$ ), es decir, cuando el observador, el cuerpo y la fuente de luz están alineados y el brillo de un disco perfectamente difusor de igual tamaño y posición aparente que el cuerpo.

El ángulo de fase  $\alpha$  es el ángulo entre la dirección del Sol y la dirección del observador, medido desde el objeto 1.7. Un valor de  $\alpha = 0$  significa que el objeto está completamente iluminado desde la perspectiva del observador. A medida que aumenta, la fracción de la superficie iluminada que es visible disminuye, afectando la magnitud aparente del objeto.

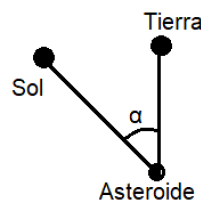


Figura 1.7: Representación esquemática del ángulo de fase ( $\alpha$ ) en un sistema Sol-asteroide-Tierra (observador).

Además del albedo geométrico, existe el albedo monocromático, que se define como la proporción de radiación reflejada por un objeto en comparación con la radiación incidente en una longitud de onda específica. En otras palabras, es una medida de cuánta luz, de un color particular (longitud de onda), es reflejada por un objeto en relación con la cantidad que incide sobre él. Los objetos más oscuros tienen un albedo más bajo, lo que significa que absorben más luz en una longitud de onda determinada, incrementando su temperatura y, como consecuencia, emitiendo más energía térmica [Demeo 2010].

### Magnitud

La magnitud absoluta ( $H$ ) es la magnitud visual que un observador mediría si el asteroide estuviera situado a 1 UA del Sol y de la Tierra, en una posición de fase cero ( $\alpha = 0$ ). Esta medida permite comparar el brillo de diferentes asteroides sin que la distancia entre ellos o su fase influya en la observación. Cuanto más baja es la magnitud absoluta, mayor es el brillo del asteroide [JPL s.f.-b]. Según [Lazzarin, Magrin, & Marchi 2008] esta magnitud se puede calcular a partir de observaciones fotométricas usando la siguiente fórmula:

$$H = m_v + 2.5 \log_{10} \left( \frac{\Phi}{r \cdot \Delta} \right) \quad (1.1)$$

donde:

- $H$  es la magnitud absoluta,
- $m_v$  es la magnitud aparente,
- $\Phi$  es la integral de fase (fracción de luz reflejada, con valores entre 0 y 1),
- $r$  es la distancia heliocéntrica en UA,
- $\Delta$  es la distancia Tierra-objeto en UA.

La magnitud aparente ( $m_v$ ) es la medida del brillo observado del asteroide desde la Tierra. A diferencia de la magnitud absoluta, que se refiere al brillo intrínseco del asteroide a una distancia estándar, la magnitud aparente varía dependiendo de factores como la posición del asteroide en su órbita, su tamaño y su albedo, entre otros, esta magnitud está definida como:

$$m_v = -2.5 \log_{10} \left( \frac{F}{F_0} \right) \quad (1.2)$$

donde  $F$  es el flujo recibido del objeto y  $F_0$  es un flujo de referencia.

### Diámetro

El diámetro de un asteroide se puede calcular utilizando su magnitud absoluta ( $H$ ) y el albedo geométrico ( $p_v$ ). Para un asteroide, el diámetro ( $D$ ) se puede expresar de varias maneras dependiendo de los parámetros disponibles:

- Relación entre diámetro y magnitud absoluta (en función del albedo) [Harris et al. 2014]:

$$D = \sqrt{\frac{10^{6.259 - \log_{10} p_v - 0.4 \cdot H}}{p_v}} \quad (1.3)$$

- Relación entre diámetro y magnitud absoluta (sin considerar el albedo) [Lazzarin, Magrin, & Marchi 2008]:

$$D = (1 \text{ km}) \times 10^{\frac{17.75 - H}{5}} \quad (1.4)$$

### Periodo de rotación

El periodo de rotación de un asteroide es el tiempo que tarda en completar una vuelta sobre su propio eje. Este dato es esencial para comprender la dinámica del asteroide y su comportamiento a largo plazo.

#### 1.3.3. Análisis de Fourier

El análisis de Fourier se utiliza ampliamente en la fotometría de asteroides para determinar periodos de rotación y evaluar la forma de los objetos. [Harris et al. 2014] muestra que la amplitud y el orden armónico están directamente relacionados con la geometría del asteroide y el ángulo de fase de observación. En casos de rotación compleja o no principal, puede ser necesario analizar múltiples frecuencias simultáneamente, ya que la variación fotométrica puede ser resultado de modos de rotación combinados. Aquí detallaremos las bases matemáticas del análisis de Fourier.

#### Serie de Fourier

Es una representación de una función periódica como una suma infinita de senos y cosenos. Para una función periódica  $f(x)$  con período  $T$ , se expresa como:

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left( a_n \cos\left(\frac{2\pi n}{T}x\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n}{T}x\right) \right) \quad (1.5)$$

donde los coeficientes  $a_n$  y  $b_n$  se calculan como:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(x) \cos\left(\frac{2\pi n}{T}x\right) dx \quad (1.6)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(x) \sin\left(\frac{2\pi n}{T}x\right) dx \quad (1.7)$$

Cuando pasamos a funciones no periódicas, la serie de Fourier se convierte en la transformada de Fourier, que es una integral en lugar de una suma discreta. En lugar de tratar con frecuencias discretas, la transformada de Fourier se aplica a frecuencias continuas.

La transformada de Fourier de una función  $f(t)$  está definida por la siguiente integral:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (1.8)$$

Este paso implica que, en lugar de trabajar con una suma de senos y cosenos de frecuencias discretas, la función  $f(t)$  se descompone en una integral sobre todas las posibles frecuencias  $\omega$ , representando la amplitud de cada frecuencia en la señal.

#### 1.3.4. Justificación y estructura de la tesis

A pesar de la importancia de estos cuerpos en el contexto de la investigación astronómica y la defensa planetaria, muchos asteroides aún no tienen estos parámetros definidos con certeza, lo que limita el conocimiento sobre su comportamiento y las implicaciones que podrían tener en el futuro, especialmente para aquellos cercanos a la Tierra.

En esta tesis, se presentan los resultados obtenidos a partir del estudio y monitoreo de tres asteroides pertenecientes al cinturón principal de asteroides: (2345) Fucik, (34704) 2001 SO<sub>80</sub> y (3181) Anerth. Estos asteroides, que forman parte de una población dinámica y diversa en el sistema solar, fueron seleccionados debido a la falta de información precisa sobre ciertos parámetros

clave, como el período de rotación y la amplitud de sus curvas de luz. Estos parámetros son fundamentales para caracterizar los asteroides y entender su dinámica, forma y composición. El monitoreo fotométrico fué la herramienta principal utilizada para determinar estos parámetros. Esta técnica permite una evaluación detallada de la variabilidad en la luz reflejada por los asteroides a lo largo del tiempo, lo cual es esencial para obtener información precisa sobre su período de rotación y la amplitud de sus curvas de luz. Al determinar estos parámetros, se contribuirá significativamente al conocimiento de los asteroides, facilitando tanto la investigación astronómica como las estrategias de mitigación ante posibles impactos.

El Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), como miembro de la Red Internacional de Alerta de Asteroides (IAWN), realiza un trabajo crucial en la observación y monitoreo de asteroides. La investigación presentada en esta tesis forma parte de un esfuerzo más amplio para mejorar la vigilancia y el estudio de estos cuerpos celestes, cuyo seguimiento es esencial para la protección de nuestro planeta y la comprensión de la evolución del sistema solar.

### **Estructura de la Tesis**

En el Capítulo 2, abordamos el proceso de selección de la muestra, discutiendo las bases de datos consultadas y las características ideales de los asteroides seleccionados. Detallamos las propiedades de los asteroides observados. Por último, presentamos las especificaciones de la Cámara Schmidt, telescopio empleado para las observaciones de los asteroides estudiados, mientras que en el capítulo 3, explicamos el proceso de reducción de datos, que incluye las correcciones por bias, dark y flat fields, así como el uso de la herramienta PyRAF. Además, destacamos la importancia de la reducción de datos en el contexto de nuestra investigación. Describimos la paquetería MPO Canopus y su aplicación en la generación de curvas de luz de los asteroides. Asimismo, explicamos los criterios utilizados para la selección del orden de la curva de luz y abordamos de manera breve el proceso de inversión de curvas de luz para generar su modelo tridimensional.

En el Capítulo 4, presentamos los resultados obtenidos. Comparamos la información de uno de nuestros objetos con los datos reportados en el ALCDEF y discutimos el caso de otro objeto para el cual no se obtuvieron resultados significativos, analizando las posibles causas. Asimismo, presentamos los nuevos datos obtenidos para nuestro tercer objeto, destacando los hallazgos relevantes y su importancia en el estudio de asteroides. Finalmente, las conclusiones se incluyen en el Capítulo 5, sintetizando los principales hallazgos de la investigación y discutiendo las implicaciones de los resultados. Para cerrar se propondrán posibles direcciones para futuras investigaciones.

## Capítulo 2

# Selección de la muestra y observaciones

En este capítulo se describe el proceso de selección de la muestra, basado en criterios que garantizan tanto la viabilidad observacional como la relevancia científica, así como las observaciones realizadas en el óptico con la Cámara Schmidt de Tonantzintla.

### 2.1. Selección de la muestra

#### 2.1.1. La base de datos del Centro de Planetas Menores (MPC)

El Centro de Planetas Menores (MPC, por sus siglas en inglés) es una organización dedicada al seguimiento y catalogación de planetas menores, asteroides y cometas. Su función es crucial para la comunidad científica, ya que proporciona datos precisos y actualizados sobre estos cuerpos celestes, facilitando su estudio y monitoreo.

Para la selección de la muestra, se utilizó el generador de efemérides del MPC (figura 2.1). Esta herramienta permite realizar una búsqueda de objetos observables en diferentes épocas del año, ofreciendo información detallada sobre sus posiciones y trayectorias.

La búsqueda de los asteroides se limitó con los siguientes criterios:

1. Periodo de Observación: Se seleccionaron objetos observables entre los meses de enero y abril de 2024.
2. Ubicación y Magnitud mínima observable: Se tomó en cuenta la ubicación geográfica del observatorio y la magnitud mínima observable con el instrumento óptico a utilizar, en este caso, la magnitud aparente mínima es de 17.

Estas limitaciones permitieron acotar la búsqueda a asteroides que pudieran ser observados de manera efectiva durante las sesiones programadas.

El uso del generador de efemérides del MPC resultó en una lista extensa de posibles candidatos. Esta lista incluyó asteroides con diversas características orbitales y físicas. Sin embargo, para afinar la selección, fue necesario aplicar un segundo criterio, el cual se detalla en la siguiente sección.

## Selección de la muestra y observaciones

### 2.1 Selección de la muestra

Figura 2.1: Captura de pantalla del generador de efemérides del Minor Planet Center, mostrando el formulario de configuración donde se especifican las características deseadas para los asteroides. Capturada de <https://minplanobs.org/MPInfo/php/calloplcdbquery.php>.

### 2.1.2. Criterios basados en la Base de Datos de Curvas de Luz del ALCDEF

El segundo criterio consistió en la selección de asteroides con parámetros indeterminados o inciertos. Para este propósito, se utilizó la Base de Datos de Curvas de Luz (LCDB, por sus siglas en inglés) del Formato de Intercambio de Datos de Curvas de Luz de Asteroides (ALCDEF, por sus siglas en inglés). Se evaluaron los asteroides cuyas curvas de luz presentan una calificación menor o igual a 2 y se priorizaron aquellos que no tienen curvas de luz reportadas. De este modo, se garantizó la inclusión de asteroides que ofrecieran oportunidades significativas para mejorar el conocimiento sobre sus parámetros físicos.

#### ALCDEF

El ALCDEF es un formato de intercambio de datos de curvas de luz de asteroides. Funciona como un repositorio central de datos de cuerpos menores, permitiendo a los investigadores de cualquier región del mundo agregar sus datos para que otros puedan utilizarlos. Se centra en la recolección de datos obtenidos en series de noches consecutivas (figura 2.2).

Para esta investigación, el LCDB fue de suma importancia, ya que de esta base de datos se recolectaron curvas de luz para complementar la información obtenida en las observaciones. Además, el LCDB proporciona una evaluación de la confiabilidad de los períodos de rotación reportados mediante una escala de calidad denominada  $U$  (Uncertainty). Esta escala asigna una calificación basada en la solidez de los datos y la coherencia de los resultados obtenidos. La escala  $U$  abarca nueve niveles de valoración, que varían desde 3 (alta confiabilidad) hasta 0 (resultado incorrecto). A continuación, se describen los distintos valores utilizados en esta clasificación:

- $U = 3$  La curva de luz presenta un patrón de rotación bien definido y sin ambigüedades, con una cobertura casi completa que permite estimar cualquier hueco pequeño con gran precisión.
- $U = 3-$  El período determinado es único, aunque pueden presentarse algunos huecos en la cobertura, lo que afecta la certeza de la estimación, sin ser suficiente como para admitir otra solución.

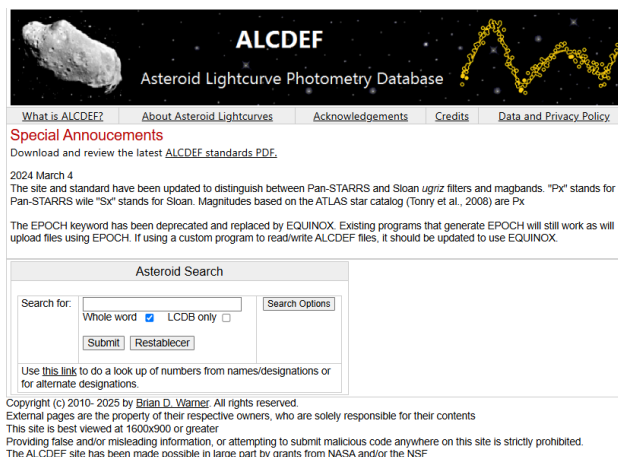


Figura 2.2: Captura de pantalla de la página web de ALCDEF, mostrando el formulario de búsqueda y configuración para la consulta de datos fotométricos de asteroides. Capturada de <https://alcdef.org/>.

- $U = 2+$  La probabilidad de que el período determinado sea incorrecto es baja; sin embargo, la presencia de un segundo período podría haber sido omitida, posiblemente debido a la interferencia de un satélite, lo que podría alterar los datos de forma inesperada durante una o dos noches en comparación con el resto.
- $U = 2$  El resultado se basa en una cobertura incompleta, lo que implica un riesgo significativo de que el período de rotación calculado sea incorrecto en aproximadamente un 30 %. También señala casos donde existe ambigüedad respecto al número de extremos por ciclo<sup>3</sup> o la cantidad de ciclos transcurridos entre las curvas de luz, lo que podría ocasionar una desviación en el resultado de hasta un número entero.
- $U = 2-$  El período y la amplitud no están determinados con certeza. Por ejemplo, cuando la cobertura de una sola noche abarca aproximadamente la mitad de un ciclo, incluyendo un mínimo y un máximo, esta información resulta insuficiente para derivar un período exacto. Este es el código de confiabilidad mínimo aceptado para el análisis estadístico.
- $U = 1+$  Similar a  $U = 2-$  pero con una amplitud tan baja que no es posible asegurar con certeza que las variaciones en la curva de luz se deban a la rotación del objeto y no al ruido u otros factores, lo que genera una mayor incertidumbre sobre la confiabilidad de los datos.
- $U = 1$  Existe una posibilidad significativa de que las variaciones observadas en la curva de luz se deban al ruido, errores de calibración u otros factores distintos a variaciones rotacionales, lo que compromete la validez de la determinación del período.
- $U = 1-$  La curva de luz es probablemente incorrecta, ya que sus datos podrían estar completamente equivocados. Además, el período registrado es altamente improbable, especialmente si se trata de un asteroide grande con un período muy corto, inferior a 2 horas, lo cual sería físicamente inusual y poco probable.
- $U = 0$  El resultado presentado inicialmente se ha demostrado incorrecto tras una revisión más detallada.

<sup>3</sup>Un ciclo corresponde a una rotación completa de un objeto, como un asteroide, durante la cual su brillo varía de manera repetitiva debido a su forma y orientación. Un ciclo completo implica que el objeto gira 360 grados y regresa a la misma posición respecto al observador.

### 2.1.3. Visibilidad y planificación de las observaciones con STARALT

Una vez identificados los candidatos mediante los criterios anteriores, es necesario verificar que los asteroides sean visibles durante la noche de observación. Para ello, descargamos sus efemérides desde el Centro de Planetas Menores (MPC, por sus siglas en inglés) y, con el programa STARALT, se verifica la visibilidad de los objetos en las noches de observación.

#### STARALT

El programa STARALT fue desarrollado por el Grupo de Telescopios Isaac Newton (ING, por sus siglas en inglés), que opera en el Observatorio del Roque de los Muchachos en colaboración con el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC). Es ampliamente utilizado por astrónomos para planificar observaciones. El programa está disponible en línea, lo que permite su acceso desde cualquier parte del mundo, favoreciendo la colaboración internacional en proyectos de astronomía observacional.

Al introducir las coordenadas del asteroide, o de cualquier objeto celeste, como la ubicación del telescopio a utilizar, se genera un gráfico que muestra la variación de la altitud del objeto en función del tiempo durante una noche específica. El eje horizontal representa las horas de la noche, mientras que el eje vertical indica la altitud del objeto sobre el horizonte, expresada en grados. La curva trazada refleja la variación de la altitud del objeto, permitiendo identificar los momentos de mayor altitud como los más adecuados para la observación astronómica. Además, muestra la variación de altitud de la Luna a lo largo de la noche (línea punteada) (figura 2.3).

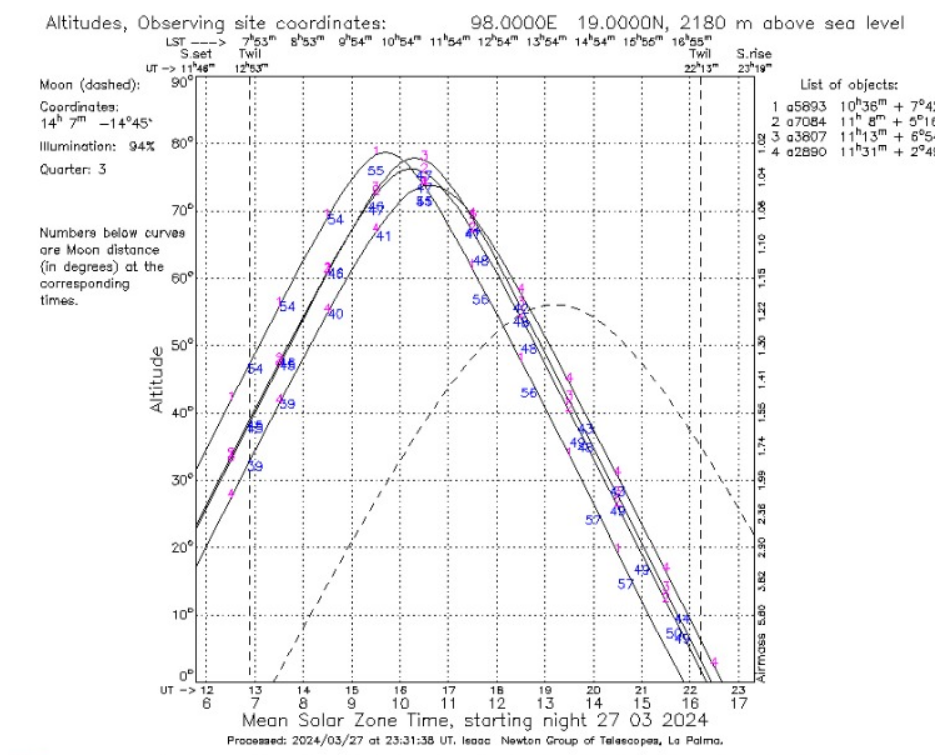


Figura 2.3: Gráfico que muestra la variación de altitud de diversos asteroides durante una noche, utilizado para evaluar la visibilidad y planificar las observaciones. Capturado de <https://astro.ing.iac.es/staralt/>.

Con esta información, se seleccionaron asteroides que cumplieran con las siguientes condiciones:

- Duración de la visibilidad: el asteroide debe ser visible durante al menos cinco horas continuas en el cielo, ya que permite obtener una cantidad suficiente de datos en una sola noche de observación.
- Altitud mínima: la altitud del asteroide debe superar los 30 grados sobre el horizonte, puesto que el telescopio a utilizar posee una buena capacidad de observación a partir de esa altura ya que no habrá objetos interfiriendo y la masa de aire no será muy grande.
- Separación con respecto a la Luna: el asteroide debe estar lo suficientemente alejado de la Luna, dado que su proximidad genera que el cielo sea más brillante e introduce ruido en los datos, afectando la calidad de las mediciones.

Esta evaluación preliminar permitió descartar aquellos asteroides cuya visibilidad no era óptima, además de garantizar la obtención de datos fotométricos de la mejor calidad.

#### 2.1.4. Objetos seleccionados

A continuación se presentan los asteroides seleccionados para el estudio, elegidos según los criterios previamente establecidos, con el objetivo de asegurar que cumplieron con los requisitos necesarios para esta investigación:

**(2345) Fucik:** este asteroide cuenta con datos previamente reportados y fue seleccionado debido a la valoración  $U=2$  de su curva de luz. Su inclusión tiene como objetivo mejorar la calidad de esta curva, así como aumentar la precisión en la determinación de su período y amplitud.

**(3181) Anhart:** en el caso de este asteroide, no se encontraron datos previamente reportados hasta la fecha de la selección. Por ello, fue observado con el propósito de reportar por primera vez sus parámetros fotométricos.

**(34704) 2001 SO<sub>80</sub>:** similar al caso anterior, este asteroide no presenta datos reportados previamente, por lo que se busca lograr el mismo objetivo, obtener y reportar sus parámetros fotométricos.

## 2.2. Observaciones

### 2.2.1. Cámara Schmidt de Tonantzintla

La Cámara Schmidt es un telescopio desarrollado por Bernhard Schmidt en 1932. El sistema óptico de este telescopio es similar al de una cámara fotográfica, ya que posee una relación focal corta que proporciona un campo de visión amplio. Debido a esta corta relación focal, es necesario corregir las aberraciones para generar imágenes nítidas y precisas. La Cámara Schmidt está formada por un espejo cóncavo de forma esférica, que es el elemento principal. Frente a este espejo se encuentra una lente asférica, y en su centro de curvatura, una placa correctora esférica muy delgada. Además, en el centro de curvatura del espejo se encuentra un diafragma circular. Este sistema permite generar imágenes libres de aberraciones, ya que la imagen formada por los haces de luz paralelos emitidos por un objeto puntual al infinito será idéntica en cualquier dirección debido a la simetría de curvatura [Valdés et al. 2015a] y [Valdés et al. 2015b].

La Cámara Schmidt de Tonantzintla (CST) (figura 2.4) comenzó a operar en 1944. Desde ese año hasta 1994, sus principales investigaciones científicas se centraron en la captura de imágenes directas y espectroscópicas. Estas últimas se tomaron con un prisma objetivo de  $3.96^\circ$

y 69.85 cm de diámetro. A mediados de los años noventa, se le hicieron algunas modificaciones, principalmente un nuevo sistema de adquisición de imágenes, sustituyendo las placas fotográficas por un detector de imágenes CCD refrigerado. Para evitar o contrarrestar las aberraciones en las imágenes, se acopló una lente de aplanamiento de campo. En 2015, se realizó una renovación del sistema electrónico de adquisición de datos, y en 2018, se realizaron cambios adicionales, sustituyendo el CCD por uno a color con un sensor de fotograma completo. En las tablas 2.1, 2.3 y 2.2 se detallan las principales características tanto de las componentes ópticas como del CCD empleado en las observaciones con la CST en esta investigación.



Figura 2.4: Cámara Schmidt de Tonantzintla, ubicada en Puebla, México, a una latitud de  $19^{\circ}01'53.4''$  Norte, una longitud de  $98^{\circ}18'54.3''$  Oeste y una altitud de 2180 msnm. Junio 2023.

Componente óptico	Característica	Valor
Espejo primario	Diámetro ( $D$ )	774 mm
	Diámetro efectivo ( $D_e$ )	762 mm
	Radio de curvatura ( $R_c$ )	4314.825 mm
	Distancia focal ( $F = \frac{R_c}{2}$ )	2157.412 mm
Lente de aplanamiento de campo	Diámetro de curvatura ( $D$ )	190 mm
	Radio de curvatura 1 ( $C1$ )	-1455.3095 mm
	Radio de curvatura 2 ( $C2$ )	1455.3095 mm
Lente correctora	Diámetro ( $D_c$ )	660.4 mm

Tabla 2.1: Principales características de los componentes ópticos de la CST [Valdés et al. 2016]

Parámetro	Valor
Escala de placa	96.6 arcsec/mm
Distancia focal, incluyendo la lente aplanadora, ( $F_a$ )	2135.24 mm
Razón focal ( $\frac{F_a}{D_c}$ )	3.23
Campo de visión (FOV)	28.8 × 22.0 arcmin
Escala de imagen	0.52 x 0.52 arcsec

Tabla 2.2: Parámetros ópticos de la CST. Información recuperada de [Valdés et al. 2023] y [Cerdán 2019].

Característica	Valor
Modelo	SBIG STF-8300
Matriz de píxeles	3326 x 2504
Tamaño del CCD	17.96 x 13.52 mm
Tamaño de píxel	5.4 $\mu m$
Exposición	De 0.09 a 3600 s
Convertidor analógico digital	16 bitz
Ganancia	0.37e-/ADU
Matriz	Monocromática

Tabla 2.3: Principales características del CCD de la CST [SBIG 2015].

### 2.2.2. Las observaciones

Las observaciones se llevaron a cabo durante los meses de febrero y marzo de 2024. En total, se obtuvieron datos útiles en 11 noches de observación, mientras que otras sesiones fueron descartadas debido a la presencia significativa de ruido que afectó considerablemente la calidad de los datos. En la tabla 2.4 se presentan las fechas de observación para cada asteroide, junto con sus coordenadas celestes, magnitud aparente, distancia al Sol y a la Tierra al momento de la observación, así como el número total de puntos obtenidos en cada sesión. Además, se especifica el tiempo de exposición, garantizando un registro completo y estandarizado para el análisis posterior. Cabe destacar que, en todas las series de datos, se utilizó exclusivamente el filtro R, el cual selecciona la luz en la región del rojo del espectro visible (aproximadamente entre 560 y 700 nm). Este filtro es parte de sistemas fotométricos estandarizados y permite obtener mediciones comparables del brillo aparente de los objetos, facilitando el análisis fotométrico y la generación de curvas de luz consistentes.

De acuerdo con Cerdán [Cerdán 2019], durante las observaciones realizadas en la CST se deben aplicar ciertos ajustes técnicos, los cuales fueron implementados en esta investigación. Entre ellos, se destaca la refrigeración del CCD a la temperatura más baja posible mediante un enfriador electrónico incorporado, lo que permite reducir el ruido térmico durante las sesiones de observación. Asimismo, se utilizó el proceso conocido como binning, que consiste en la combinación de píxeles en una matriz de 2x2, con el propósito de optimizar el procesamiento de las imágenes en el software MPO Canopus, el cual se describirá con mayor detalle en el siguiente capítulo. Aunque este procedimiento altera la escala del campo de visión (FOV), el software corrige automáticamente este efecto durante el análisis de los datos.

**Selección de la muestra y observaciones**  
2.2 Observaciones

Asteroide	Fecha	<i>RA</i>	<i>DEC</i>	$m_v$	$\Delta$ (AU)	$r$ (AU)	$\alpha$ ( $^\circ$ )	$T_e$ (s)	Puntos
(2345) Fucik	12.02.2024	08h 31m 03.40s	+16 $^\circ$ 58' 49.8"	14.96	1.916	2.875	5.76	90	58
	13.02.2024	08h 30m 13.61s	+16 $^\circ$ 59' 03.4"	14.99	1.921	2.875	6.15	90	195
	14.02.2024	08h 29m 24.73s	+16 $^\circ$ 59' 14.9"	15.02	1.931	2.876	6.56	90	116
	15.02.2024	08h 28m 36.82s	+16 $^\circ$ 59' 24.2"	15.04	1.931	2.876	6.93	90	65
	11.03.2024	08h 15m 32.46s	+16 $^\circ$ 48' 30.4"	15.61	2.148	2.892	15.19	240	26
(3181) Anhert	20.02.2024	10h 16m 13.10s	+03 $^\circ$ 16' 24.0"	14.67	1.105	2.088	3.76	90	134
	21.02.2024	10h 15m 14.90s	+03 $^\circ$ 22' 38.5"	14.65	1.104	2.088	3.51	90	153
	26.02.2024	10h 10m 23.80s	+03 $^\circ$ 55' 24.4"	14.66	1.102	2.08	3.71	90	279
(34704) 2001 SO <sub>80</sub>	27.02.2024	09h 13m 50.00s	+00 $^\circ$ 19' 21.8"	15.87	1.345	2.291	9.56	120	160
	28.02.2024	09h 12m 58.80s	+00 $^\circ$ 20' 18.9"	15.90	1.349	2.292	9.94	120	93
	01.03.2024	09h 11m 20.50s	+00 $^\circ$ 22' 29.6"	15.97	1.364	2.294	11.10	120	125

Tabla 2.4: Datos de observación de los asteroides seleccionados. Se incluyen la fecha, coordenadas de ascensión recta (*RA*) y declinación (*DEC*), magnitud aparente ( $m_v$ ), distancias a la Tierra ( $\Delta$ ) y al Sol ( $r$ ), ángulo de fase ( $\alpha$ ), tiempo de exposición ( $T_e$ ) y número de imágenes capturadas.

## Capítulo 3

# Procesamiento de imágenes y análisis de los datos

En este capítulo se describen las herramientas utilizadas para procesar las imágenes obtenidas con la Cámara Schmidt, así como el proceso para analizar los datos fotométricos de los asteroides observados. La calidad y precisión de los datos es esencial para poder realizar una interpretación confiable de sus parámetros, como el periodo y la amplitud.

### 3.1. Procesado de las imágenes

A las imágenes capturadas en las diferentes temporadas de observación, que aún no han sido procesadas, se les llama imágenes en bruto (raw images). Estas imágenes raw contienen ruidos generados por el propio CCD (ruido térmico, electrónico y variaciones en la sensibilidad de los píxeles). Por esta razón, es necesario someterlas a un proceso (reducción de imágenes) que tiene como objetivo corregir o minimizar estos efectos y preparar los datos para el análisis posterior.

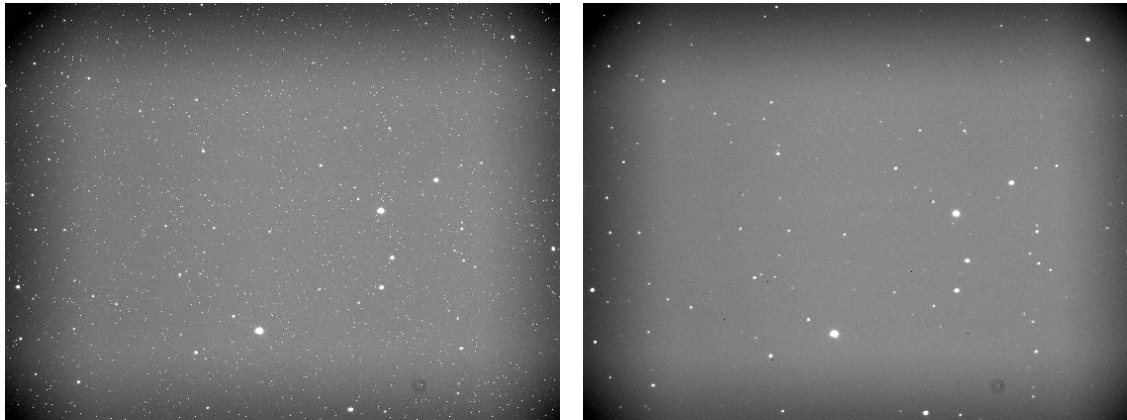
En la figura 3.1, se muestra como ejemplo una comparación entre una imagen en bruto (figura 3.1a) y su versión procesada (figura 3.1b). Este contraste ilustra la manera en que la reducción de imágenes elimina la mayor parte del ruido, mejorando la calidad y utilidad de los datos para el análisis científico.

La reducción de las imágenes incluye la aplicación de técnicas de calibración para corregir sesgos, ruidos y variaciones en la sensibilidad. En esta sección se describen las herramientas utilizadas y las etapas seguidas para realizar esta tarea.

#### 3.1.1. PyRAF

Para la reducción de las imágenes se utilizó la paquetería PyRAF, la cual funciona en un entorno de programación basado en Python y diseñado para interactuar con el software IRAF (Image Reduction and Analysis Facility). Este entorno proporciona una interfaz moderna que facilita la automatización de tareas y la ejecución de secuencias de comandos para manejar grandes volúmenes de datos. Entre sus principales funciones encontramos:

- Calibración de imágenes astronómicas: incluye la corrección de sesgos (bias), imágenes de oscuridad (darks) y campos planos (flat fields) para eliminar defectos del sistema y reducir el ruido en las imágenes.



(a) Imagen fotométrica sin procesar.

(b) Imagen fotométrica reducida.

Figura 3.1: Imagen capturada durante el 27 de febrero de 2024, correspondiente al asteroide (34704) 2001 SO<sub>80</sub> y su campo de observación.

- Automatización de tareas: permite procesar grandes conjuntos de datos de manera eficiente y sin intervención manual, optimizando el flujo de trabajo.

### 3.1.2. Reducción y calibración de imágenes

La reducción y calibración de imágenes son pasos esenciales para garantizar que las observaciones astronómicas sean precisas y confiables. Estos procesos permiten eliminar errores sistemáticos, minimizar el ruido y normalizar los datos.

Para la reducción de nuestras imágenes, se llevó a cabo una calibración por bias, flat fields y darks. Para cada una de estas calibraciones, se capturaron 10 imágenes. Es importante destacar que cada calibración se realiza para cada noche de observación, teniendo en cuenta el tiempo de exposición y el filtro utilizado. Esto significa que, si en una noche de observación se usaron dos filtros y diferentes tiempos de exposición, se realiza la calibración de manera independiente para cada filtro y con los respectivos tiempos de exposición. A continuación, se describen los pasos seguidos para la reducción de las imágenes:

**Calibración por bias.** Para esta calibración se obtienen imágenes con tiempo de exposición cero, sin embargo, la mínima es de 0.09 segundos, ya que es el tiempo más corto que permite el CCD utilizado (ver valor en la tabla 2.3). Estas imágenes se toman con el obturador cerrado, luces apagadas, etc., para evitar la entrada de luz. A partir de estas imágenes, se genera un “master bias”, una combinación de todas las imágenes “bias” mediante el cálculo de la mediana de cada píxel, para esto se utiliza la tarea **zerocombine**. Este master bias se resta a todas las imágenes, de los objetos y de los flat fields, utilizando la tarea **ccdproc**. Este proceso elimina la corriente oscura acumulada, la cual depende de la temperatura del CCD.

**Calibración por darks.** Las imágenes dark se capturan utilizando el mismo tiempo de exposición que las observaciones de los asteroides seleccionados, y al igual que en el caso de los bias, con el obturador cerrado. Luego se combinan las imágenes dark utilizando la tarea **darkcombine** generando así un “master dark” por cada tiempo de exposición. Esta imagen se resta a las imágenes correspondientes (aquellas con el mismo tiempo de exposición) mediante la tarea **ccdproc**. Esta calibración permite corregir el ruido generado por el movimiento térmico de los electrones en los elementos del CCD, el cual depende del aumento de la temperatura del

sensor con del tiempo de integración de la imagen. Esto corrige efectos como los “píxeles muertos” o “píxeles calientes”.

**Calibración por flat fields.** Las imágenes flat fields se obtienen iluminando uniformemente el CCD con una onda plana de luz. En este caso, el obturador sí se abre. El tiempo de integración se ajusta para que el nivel de cuentas de la imagen alcance aproximadamente el 70 % del valor de saturación del CCD, es decir, cerca de 45,000 ADU. Los flat fields se combinan utilizando la tarea **flatcombine**, obteniendo un “master flat”. Luego, se realiza un *binning* del master flat con la tarea **median**, asignando a cada píxel el valor de la mediana del arreglo. Después, utilizando la tarea **imarith**, el master flat se divide por el master flat con binning, obteniendo así un flat field normalizado para cada filtro. Finalmente, las imágenes de los asteroides se corrigen utilizando este flat field normalizado mediante la tarea **ccdproc**. Este proceso corrige las variaciones en la sensibilidad de los píxeles, ya que la respuesta de cada píxel a la luz varía.

## 3.2. Análisis de los datos

### 3.2.1. Fotometría diferencial

La fotometría diferencial es una técnica que consiste en medir el brillo de un objeto, como un asteroide, en relación con una o más estrellas dentro del mismo campo de visión y cuyo brillo debe ser constante. Estas estrellas, conocidas como estrellas de comparación, son fundamentales en este método, ya que permiten cuantificar cómo cambia el brillo del asteroide a lo largo del tiempo, eliminando las variaciones causadas por las variaciones en las condiciones atmosféricas o instrumentales.

La fotometría diferencial se utiliza ampliamente no sólo en el estudio de asteroides, sino también en la investigación de estrellas binarias, tránsitos planetarios y estrellas variables. Este enfoque es preferido sobre la fotometría absoluta porque proporciona una precisión relativa más alta al contrarrestar las variaciones externas. Por ejemplo, si una nube delgada pasa a través del campo de visión, afecta por igual el brillo de todas las objetos en esa región, incluyendo las estrellas de comparación y el asteroide. Este hecho permite corregir dichas variaciones y centrarse únicamente en los cambios intrínsecos del brillo del asteroide. Asimismo, este método compensa otras perturbaciones, como la presencia de la Luna, gradientes de brillo en el cielo o fluctuaciones instrumentales. Al aplicar estas correcciones, se obtiene una medida diferencial relativa precisa punto a punto.

Para llevar a cabo nuestras sesiones fotométricas y analizar los datos necesarios para construir las curvas de luz, utilizamos el software MPO Canopus. Este software permite realizar la fotometría diferencial de manera eficiente, asegurando la calidad y precisión de los resultados obtenidos.

### 3.2.2. MPO Canopus

Para la determinación del periodo el software aplica el análisis de Fourier (sección 1.3.3), este análisis permite representar la variación del brillo como una suma de funciones seno y coseno con múltiplos armónicos de una frecuencia fundamental.

El procedimiento consiste en asumir distintos valores de periodo, plegar la curva de luz con cada uno y ajustar una serie de Fourier a los datos resultantes. Tras cada ajuste, el software calcula error del ajuste mediante el valor de la raíz cuadrática media (RMS) entre la curva modelada y los datos observados. Este proceso se repite para un amplio conjunto de periodos.

El periodo óptimo es aquel que produce el valor mínimo de RMS, lo cual indica que la serie de Fourier se ha ajustado de la forma más precisa a la variación observada en el brillo. Aunque el análisis no identifica directamente la frecuencia dominante, ofrece una familia de funciones periódicas con las cuales evaluar múltiples periodos, siendo es el valor mínimo del RMS el que guía la selección del periodo más probable.

MPO Canopus es un software diseñado para realizar astrometría y fotometría de asteroides y estrellas variables. Fue desarrollado por Brian D. Warner y lanzado en 1999. Permite medir con precisión las posiciones de asteroides u otros objetos celestes y realizar análisis fotométricos detallados. Además, al integrarse con el programa complementario PhotoRed, es posible transformar magnitudes instrumentales en magnitudes estándar, facilitando la comparación de datos entre diferentes noches y observadores.

A lo largo de los años, MPO Canopus ha sido fundamental en la obtención de más de 150,000 mediciones fotométricas de asteroides, produciendo más de 2,500 curvas de luz publicadas en más de 200 artículos científicos. También ha contribuido al descubrimiento de más de dos docenas de asteroides binarios y ha facilitado más de 50,000 observaciones de estrellas variables.

### 3.2.3. Procedimiento para obtener curvas de luz con MPO Canopus

#### Configuración inicial

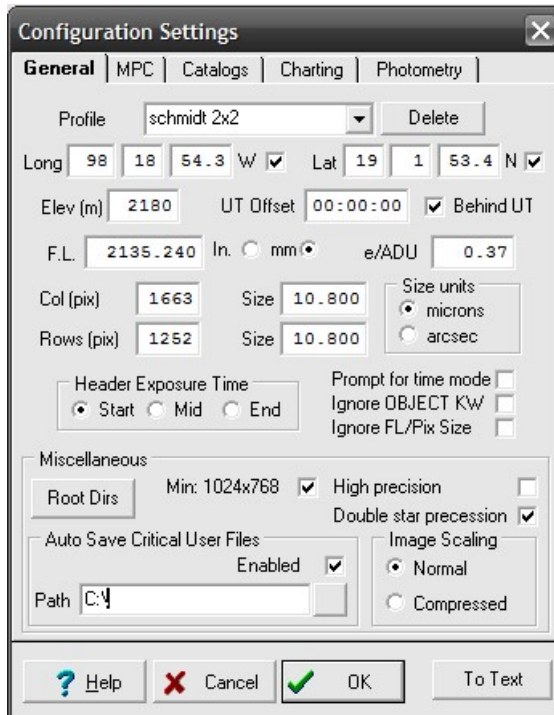
Antes de realizar cualquier análisis con MPO Canopus, es esencial llevar a cabo una configuración inicial adecuada para garantizar resultados precisos. Este paso establece las bases para realizar fotometría diferencial realizada por Canopus y, eventualmente, generar curvas de luz confiables. En la figura 3.2 se presentan las configuraciones realizadas para llevar a cabo nuestro análisis:

En la figura 3.2a se describen los ajustes generales. En esta sección se crea un perfil donde se almacena la información correspondiente al telescopio que se utilizó. Esto incluye la ubicación geográfica, el desplazamiento de la hora universal (UT), la distancia focal, así como características específicas de las imágenes y los píxeles del sensor.

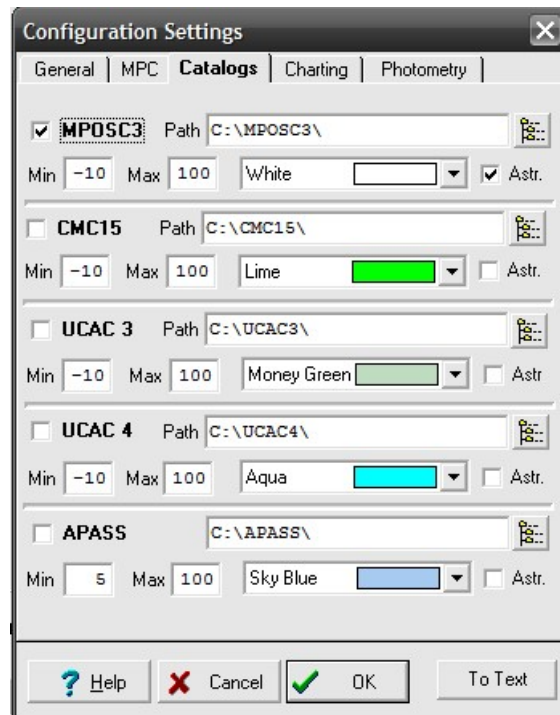
La figura 3.2b muestra las opciones para seleccionar diferentes catálogos estelares utilizados en la astrometría de las imágenes. Aunque no es estrictamente necesario para el correcto funcionamiento del programa, esta sección adquiere relevancia cuando se generan informes de astrometría para el Centro de Planetas Menores (MPC), ya que estos deben incluir información específica del catálogo utilizado en lugar de la preestablecida.

Por otro lado, la figura 3.2c presenta los ajustes necesarios para alinear las imágenes con los gráficos de estrellas de referencia. En esta sección es fundamental activar la opción que invierte las coordenadas de este y oeste, ya que la orientación de la Cámara Schmidt lo requiere.

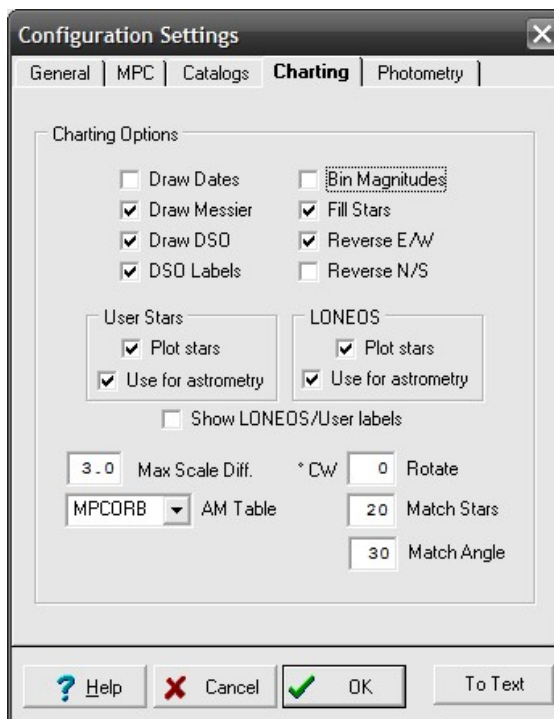
Finalmente, la figura 3.2d incluye opciones clave para realizar el análisis. Entre éstas destacan la selección del método “Derived” para el cálculo de magnitudes y el ajuste del nivel de saturación del CCD, establecido en 65,000 en nuestro caso.



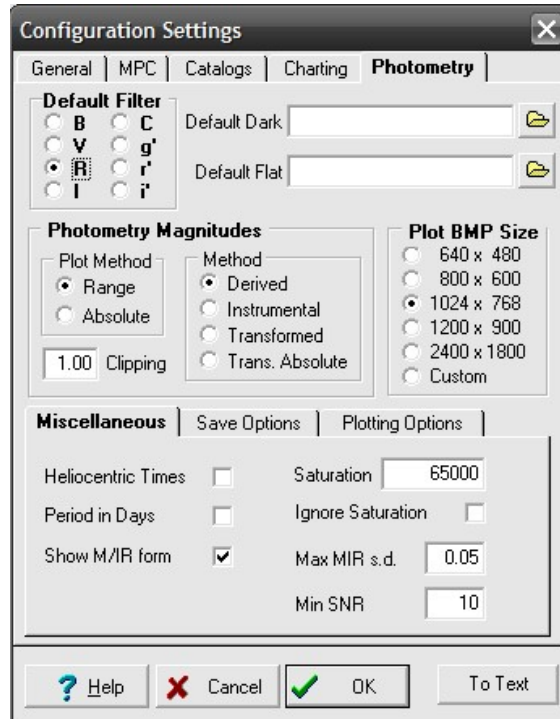
(a) Valores críticos: pestaña General.



(b) Valores críticos: catálogos.



(c) Valores críticos: gráficos.



(d) Valores críticos: fotometría.

Figura 3.2: Ajustes críticos en la configuración de MPO Canopus.

## Ajuste de las aperturas

En el contexto de la fotometría diferencial, una apertura se refiere a una región definida dentro de la imagen CCD que permite delimitar con precisión el área de la cual se extraerá el flujo (brillo) del objeto observado, así como el brillo del fondo del cielo. Estas aperturas son esenciales para obtener mediciones precisas y consistentes del brillo aparente de asteroides y estrellas de comparación, constan de tres regiones concéntricas, como se muestra en la figura 3.3.

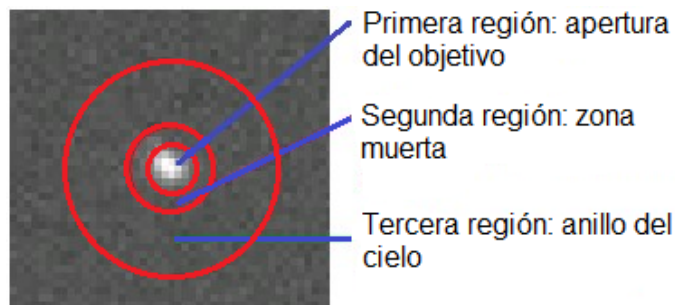


Figura 3.3: Conjunto de muestras de aperturas.

La primera región, conocida como la apertura del objeto, delimita el área donde los valores de los píxeles se utilizan para calcular el brillo del objeto a estudiar. La segunda región, denominada zona muerta, se omite en el cálculo, ya que tiene como objetivo asegurarse de que solo se mide el fondo del cielo y que no haya contaminación por el brillo del objeto. La tercera región corresponde al anillo del cielo, donde los píxeles se utilizan para calcular el brillo promedio del fondo (cielo). Este valor promedio se resta a cada uno de los píxeles en la apertura del objeto, logrando que la medición final corresponda únicamente al brillo del objeto, eliminando así la contribución del fondo del cielo.

Las dimensiones de estas aperturas deben configurarse de manera que toda la señal del asteroide quede dentro de la primera apertura, garantizando simetría y evitando la inclusión de fondo. Por ejemplo, si se utiliza una apertura de 11x11 píxeles con una zona muerta de 2 píxeles y un anillo del cielo de 11 píxeles, se garantiza que el radio total cubra adecuadamente la señal del objeto y del fondo.

Además, MPO Canopus ofrece gran flexibilidad en la configuración de las aperturas. Estas pueden ser circulares, elípticas o de formas asimétricas según sea necesario, y es posible rotarlas para ajustarse a objetos en movimiento rápido. También se permite configurar de manera independiente las aperturas de comparación y astrometría, lo que resulta útil en situaciones específicas. En la figura 3.4 se muestra la configuración de aperturas que se utilizó para esta investigación.

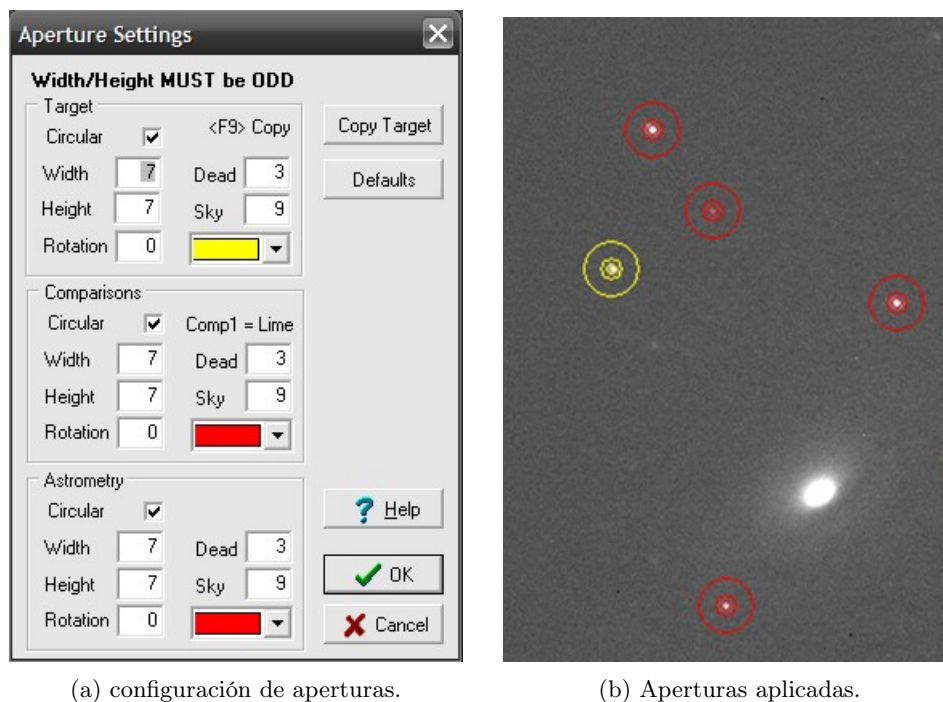


Figura 3.4: Ajuste de las aperturas empleadas para el análisis fotométrico. En a) se muestra la configuración de las aperturas fotométricas utilizadas, especificando los radios de la apertura principal, el anillo interior y el anillo exterior para la corrección del fondo cielo. En b) se visualizan las aperturas fotométricas superpuestas sobre la imagen del asteroide; las aperturas amarillas corresponden al asteroide, mientras que las rojas indican las estrellas. Esta imagen pertenece a la serie observacional del 27 de febrero de 2024 que corresponde al asteroide (3181) Ahnert.

### Proceso de análisis

El análisis inicia con la selección de una imagen de alta calidad, asegurando que no haya sido obtenida con la presencia de nubes, o que presente errores de guiado o ruido excesivo. Para ello, se recomienda elegir la primera imagen de la noche y verificar la presencia del asteroide. Canopus permite automatizar este proceso mediante el uso de catálogos estelares. Posteriormente, se crea una sesión en el programa para agrupar las imágenes de cada noche de observación, verificando una nomenclatura consistente para todas las sesiones asociadas a un mismo objeto.

En la **creación de una sesión fotométrica**, si se emplearon diferentes filtros durante la misma noche, es necesario generar sesiones separadas para cada filtro. En este estudio, se utilizó un único filtro R, por lo que sólo se generó una sesión por noche. Además, se requiere verificar y ajustar la información del telescopio, la cámara, la longitud focal, la temperatura y el tiempo de exposición. También es necesario seleccionar el filtro R y ajustar la banda fotométrica (Mag Band), tal como se muestra en la figura 3.5.

Una vez creada la sesión, se inicia el proceso que Canopus denomina “asistente de curva de luz”, el cual abre una serie de pestañas con distintos pasos, detallados a continuación:

En primer lugar, se carga la misma imagen con la que se generó la sesión, ya que la ubicación del asteroide dentro del campo de estrellas es conocida. A continuación, se procede con la **identificación del asteroide y su trayectoria**. Para ello, se activa la opción Star Subtraction

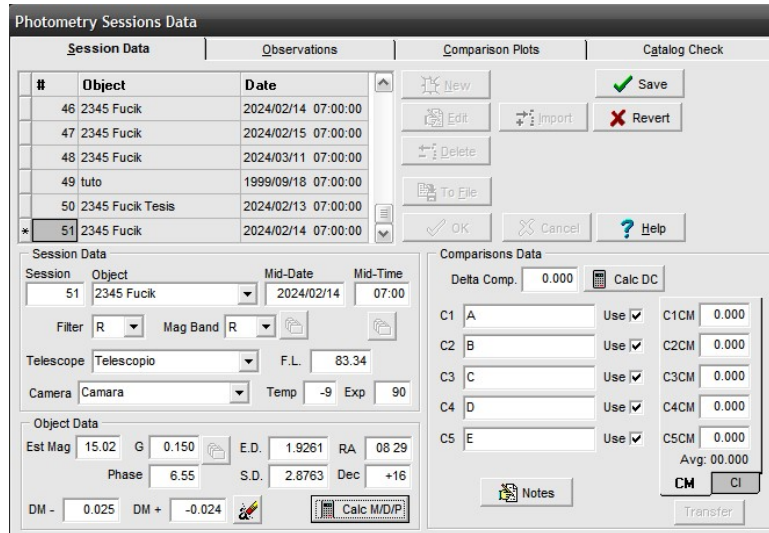


Figura 3.5: Configuración de una sesión fotométrica para el asteroide (2345) Fucik. Se crearon 11 sesiones en total para los tres asteroides analizados, manteniendo una nomenclatura consistente. En el caso del asteroide (2345) Fucik, las sesiones fueron nombradas como 2345 Fucik. Esta uniformidad es fundamental para la generación de la curva de luz, ya que el software requiere que las sesiones relacionadas tengan el mismo nombre.

(StarBGone), que permite eliminar la interferencia de estrellas cercanas, y la opción Show Path, que facilita la visualización de la trayectoria del asteroide y ayuda a evitar obstrucciones causadas por otras estrellas, como se muestra en la figura 3.6.

Posteriormente, se lleva a cabo la **selección de las estrellas de comparación**, estrellas cercanas al asteroide en el campo de observación, cuya magnitud es conocida y estable. Idealmente se seleccionan análogos solares ya que facilitan la comparación directa con el asteroide y optimizan las correcciones atmosféricas e instrumentales.

### Análogos solares

Los asteroides reflejan la luz solar, por lo que la radiación que nos llega de ellos es, principalmente, radiación del Sol. Por esta razón, el uso de estrellas de comparación que sean análogos solares, de tipo espectral G2V, permite minimizar las posibles diferencias de color entre el objeto y las estrellas de referencia. Esta consideración resulta especialmente relevante en el caso de los asteroides de tipo C, cuya reflectancia es baja y presentan una respuesta espectral moderadamente plana en longitudes de onda en el intervalo del visible

El uso de estrellas de comparación con características espectrales similares al Sol reduce el error en la transformación fotométrica y mejora la coherencia de las mediciones, especialmente al trabajar con filtros fotométricos estándar como B (azul), V (visible), R (rojo) o I (infrarrojo), correspondientes a diferentes bandas del espectro visible y cercano al infrarrojo.. Esto optimiza las correcciones atmosféricas e instrumentales al mantener una consistencia espectral entre el objeto y las estrellas de comparación.

Una vez aclarado este aspecto, se procede con la selección de estrellas de comparación. Para ello, se emplea el catálogo MPOSC3 y el filtro R. Canopus identifica en la imagen, mediante un círculo verde, las estrellas cercanas al asteroide que son análogos solares. A partir de esta selección,

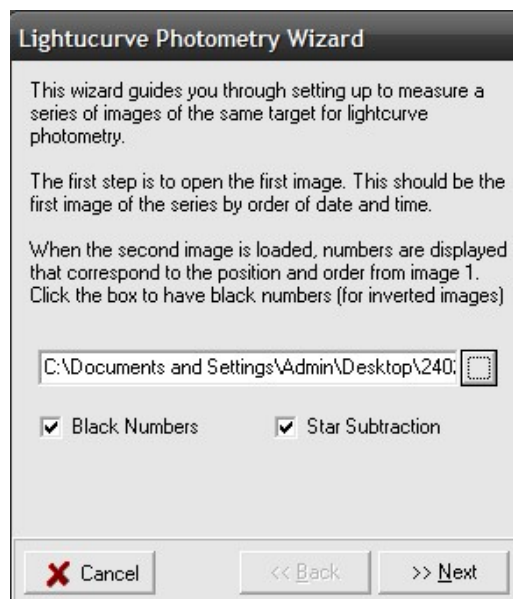


Figura 3.6: Captura de pantalla del proceso de Canopus, se muestra la selección de la primera imagen y la activación de las opciones StarBGone y Show Path.

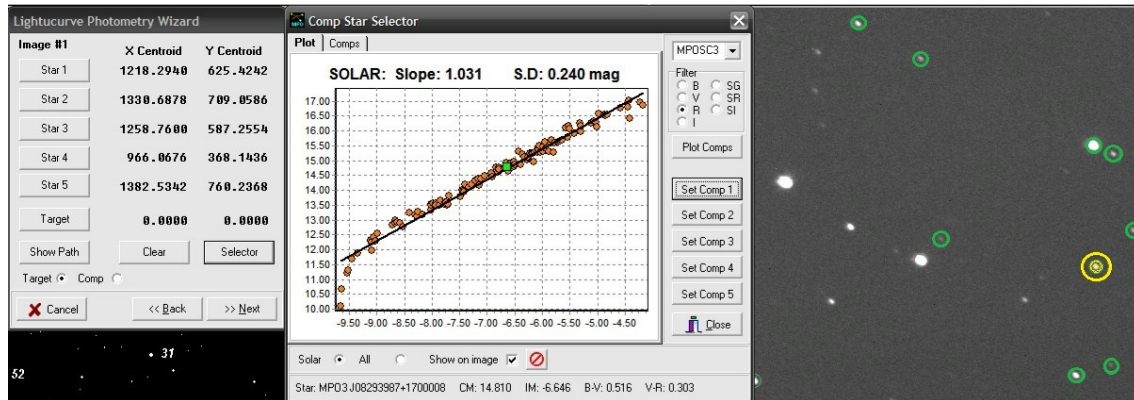
se elige la primera estrella, llamada estrella ancla, la cual se representa con una apertura roja en la figura 3.7a. Esta estrella permite facilitar la ubicación de las demás, en imágenes posteriores. Es posible seleccionar hasta un máximo de cinco estrellas, priorizando las más cercanas al asteroide. Canopus determina automáticamente sus coordenadas y las marca en la imagen. Es fundamental transferir los datos al archivo de sesión y generar una copia de respaldo en formato de texto para garantizar la integridad de la información. Este procedimiento se realiza al concluir la selección de estrellas.

A continuación, se determinan las coordenadas del asteroide para que Canopus calcule su trayectoria, tal como se muestra en la figura 3.7b.

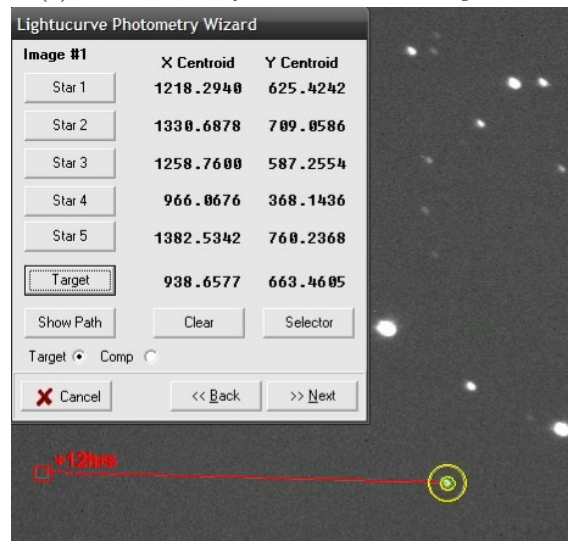
Una vez determinadas las estrellas de comparación, se procede con la selección de una imagen adicional. Esta imagen debe corresponder, preferentemente, a una que haya sido tomada hacia el final de la sesión, lo que permite calcular con mayor precisión el movimiento del asteroide. En el caso de que las imágenes presenten rotaciones extremas, se selecciona una imagen intermedia para garantizar una correcta alineación de las estrellas de comparación.

Al desplegar la imagen, tanto las estrellas de comparación como el asteroide aparecen etiquetados. Si debido a una rotación extrema, las etiquetas no coinciden, se emplea la estrella ancla para reajustar automáticamente las coordenadas de las demás estrellas. En la figura 3.8 se ilustra este proceso, así como la reunificación de las coordenadas del asteroide cuando es necesario.

A continuación, se procede con las **mediciones fotométricas**. Para ello, se sustraen las estrellas cercanas a la trayectoria del asteroide con el fin de evitar su influencia en las mediciones. Se seleccionan dos estrellas de referencia, aisladas y no saturadas: una con un brillo similar al de las estrellas a sustraer y otra más alejada, que ayuda a calcular de manera más precisa la rotación aparente de la imagen durante la observación. Esta rotación se refiere al cambio en la orientación de las imágenes a medida que el asteroide se desplaza por el cielo, y su corrección es fundamental para realizar una medición precisa de las estrellas de referencia. En la figura 3.9, la primera



(a) Estrella ancla y las estrellas de comparación.



(b) Trayectoria y ubicación del asteroide.

Figura 3.7: Selección de las estrellas de comparación y determinación de la trayectoria del asteroide. En la primera imagen a), se muestra la selección de estrellas análogas solares marcadas en verde, junto con la estrella ancla resaltada en amarillo y utilizada como referencia en imágenes posteriores. En la segunda imagen b), se presentan las coordenadas del asteroide identificadas por Canopus, lo que permite calcular su trayectoria con precisión.

estrella de referencia (apertura roja), así como la trayectoria del asteroide marcada con una línea roja a lo largo de la noche para visualizar las estrellas cercanas.

Posteriormente, se guarda todo el proceso y se generan las mediciones para todas las imágenes de la sesión. Este procedimiento puede llevarse a cabo automáticamente con AutoMatch, pero es fundamental supervisarlos para corregir posibles errores en las imágenes. Es recomendable analizar imagen por imagen, como se muestra en la figura 3.10.

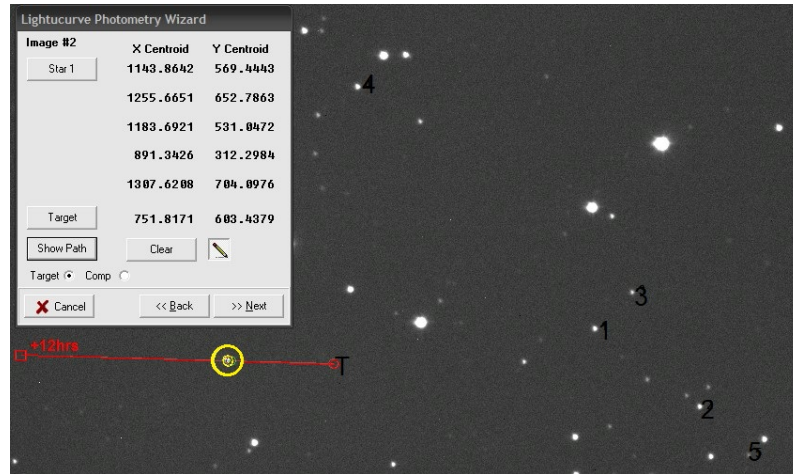


Figura 3.8: Reubicación de las estrellas de comparación y del asteroide. Las estrellas de comparación están etiquetadas con su respectivo número, mientras que el asteroide se identifica con una T.

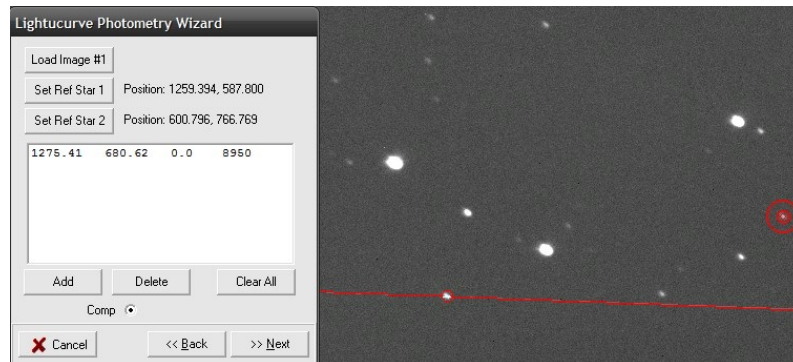


Figura 3.9: Se muestra la selección de las estrellas de referencia y las estrellas a sustraer. En la apertura roja se destaca la primera estrella de referencia, mientras que en la parte inferior derecha de la trayectoria del asteroide se observa una estrella que fue sustraída debido a su proximidad a dicha trayectoria.

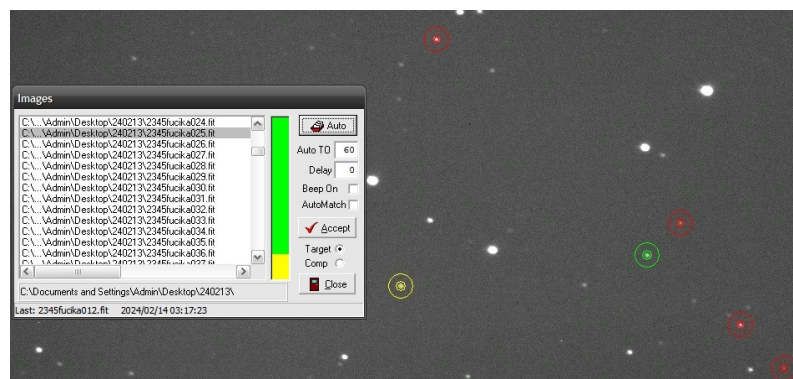


Figura 3.10: Proceso de medición. En la apertura verde se destaca la estrella ancla, en las rojas las estrellas de comparación y en la amarilla el asteroide.

Finalmente, se lleva a cabo la **generación de curvas de luz**. Tras completar las mediciones, se analizan los datos en la página de las curvas de luz. El primer paso consiste en un ajuste preliminar sin corrección del período, lo que permite identificar patrones iniciales.

Posteriormente, se lleva a cabo la **búsqueda del período**, para lo cual es necesario verificar lo siguiente:

- Las estrellas de comparación: MPO Canopus genera gráficos que muestran el comportamiento de las estrellas de comparación (etiquetadas como C1 a C5) durante la sesión. Estas gráficas ayudan a identificar estrellas variables, que deben ser descartadas para obtener resultados precisos. Al eliminar estrellas inconsistentes, el software recalcula los valores promedio del conjunto de comparación, corrigiendo discrepancias entre sesiones. En la figura 3.11 se muestra el comportamiento de las estrellas de comparación a lo largo de la noche.
- Corrección de las mediciones: una vez verificadas las estrellas de comparación, se genera una curva de luz refinada. Este paso es crucial para determinar parámetros como el período de rotación y la amplitud.

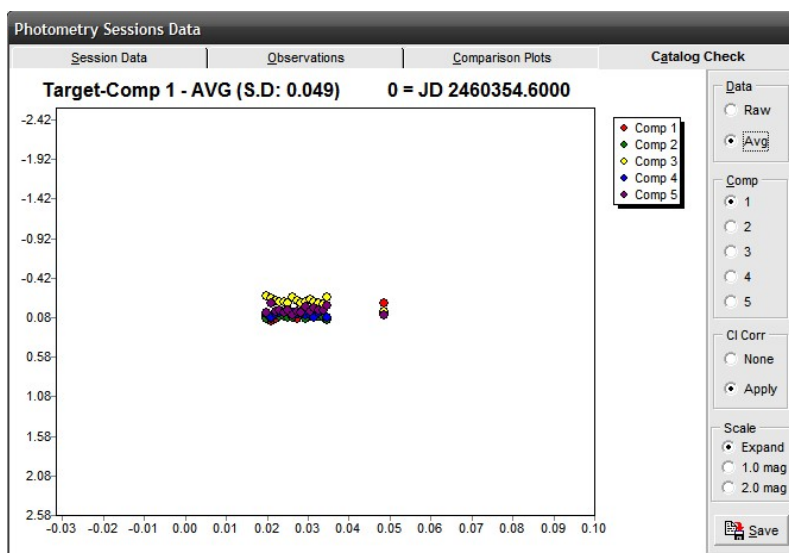


Figura 3.11: Comportamiento a lo largo de la sesión fotométrica de las estrellas de comparación. El eje horizontal representa el tiempo transcurrido desde el inicio de la sesión en días julianos fraccionarios (referido al JD 2460354.6000), mientras que el eje vertical muestra la diferencia de magnitudes entre el objeto objetivo y una estrella de comparación ( $\Delta m = \text{mag}(\text{Target}) - \text{mag}(\text{Comparison})$ ). La estabilidad de los puntos en torno a un valor constante indica que las estrellas de comparación son fotométricamente estables y adecuadas para el análisis.

Una vez verificada la estabilidad fotométrica de las estrellas de comparación, el siguiente paso es determinar el periodo de rotación del asteroide. Para ello, Canopus permite combinar sesiones de distintas noches, lo que proporciona una mayor cantidad de puntos y mejora la confiabilidad del periodo obtenido. Sin embargo, para que esta combinación sea posible, es fundamental que las sesiones sean nombradas de manera uniforme, ya que cualquier variación en los nombres impide su fusión.

Al combinar sesiones fotométricas, es crucial considerar la proximidad temporal entre ellas. Si las observaciones fueron realizadas con una diferencia significativa en el ángulo de fase, la

superposición de puntos puede introducir errores considerables debido a las variaciones en la magnitud del asteroide. En caso de que existan discrepancias menores entre las magnitudes de distintas sesiones, Canopus permite ajustar las curvas mediante un delta de magnitud, corrigiendo estas diferencias y asegurando una mayor coherencia en los datos.

El algoritmo utilizado por Canopus para encontrar el período es el FALC (Fourier Analysis for Lightcurve), el cual se basa en el análisis de Fourier para descomponer la curva de luz en una serie de términos sinusoidales. Este algoritmo ajusta la curva de luz observada a una función periódica, permitiendo determinar con precisión el periodo de rotación del asteroide. Durante el proceso, Canopus permite la configuración de varios parámetros, como el orden en la serie de Fourier, el tamaño del paso y la cantidad de puntos a combinar, entre otros.

Es fundamental elegir correctamente el orden de la serie de Fourier, ya que un uso excesivo de armónicos puede resultar en un ajuste incorrecto del período. Esto es particularmente importante cuando la forma del asteroide es irregular, como en el caso de aquellos con cráteres o picos. En estos asteroides, la curva de luz puede mostrar variaciones complejas que no siguen un patrón claramente definido. Si se usan demasiados armónicos, el modelo puede adaptarse excesivamente a estas pequeñas fluctuaciones, lo que puede generar un cálculo erróneo del período de rotación.

### Elección del orden armónico en la curva de luz

Las curvas de luz presentan una amplitud variable, la cual depende de la geometría de la sección transversal del asteroide y su orientación respecto al observador. La amplitud de una curva de luz se define como:

$$A = -2.5 \log \frac{CS_{min}}{CS_{max}} \quad (3.1)$$

donde  $CS_{min}$  y  $CS_{max}$  representan las secciones transversales mínima y máxima, respectivamente.

De acuerdo con [Harris et al. 2014], la amplitud de la curva de luz está directamente relacionada con la elección del orden armónico en su reconstrucción. El orden armónico determina la cantidad de términos sinusoidales en el modelo matemático, influyendo en la precisión con la que se representa la variabilidad de la luz reflejada. Según este estudio, la amplitud de la curva de luz también refleja la simetría geométrica del asteroide, y en función de su valor se recomienda lo siguiente (ver tabla 3.1):

Orden	Min/Max sección transversal	Amplitud máxima
2	$\infty$	$\infty$
4	$\cos(45^\circ) = 0.707$	0.376
6	$\cos(30^\circ) = 0.866$	0.156
8	$\cos(22.5^\circ) = 0.924$	0.086
10	$\cos(18^\circ) = 0.951$	0.054

Tabla 3.1: Orden armónico recomendado según la amplitud de la curva de luz, basado en [Harris et al. 2014].

Los armónicos impares pueden indicar la presencia de asimetrías en la forma del asteroide o efectos no puramente geométricos, como variaciones en el albedo superficial.

En el proceso de búsqueda del período con Canopus, se genera un espectro de potencia del periodo, donde se identifica el mejor ajuste junto con su incertidumbre asociada. Un menor valor de error RMS indica un ajuste más preciso. Además, se presenta una tabla con los errores asociados al periodo determinado, incluyendo el error probable (PE) y el error a tres desviaciones estándar, lo que permite evaluar la confiabilidad del resultado.

Finalmente, en caso de diferencias de magnitud entre las sesiones observacionales, Canopus permite aplicar una corrección mediante un ajuste de la magnitud relativa, asegurando una solución más coherente y precisa.

### 3.3. Inversión de curvas de luz

La inversión de curvas de luz es el procedimiento utilizado para reconstruir la forma tridimensional de un asteroide y determinar su eje de rotación a partir de sus curvas de luz observadas. Este método es fundamental en el estudio de cuerpos menores del sistema solar, ya que permite inferir su geometría a partir de datos fotométricos.

Para llevar a cabo este proceso, se emplea el software LCInvert, diseñado específicamente para reconstruir la forma tridimensional y determinar el eje de rotación del asteroide estudiado. Este software se basa en el método de inversión convexa desarrollado por [Kaasalainen & Torppa 2001].

#### 3.3.1. Método de inversión

LCInvert emplea modelos convexos para la reconstrucción de la forma del asteroide, lo que significa que asume que su superficie no presenta concavidades significativas. Este enfoque es útil, ya que permite obtener soluciones estables y matemáticamente bien definidas a partir de un conjunto de curvas de luz.

El software utiliza una parametrización convexa para determinar la forma y el eje de rotación del asteroide, ajustando múltiples curvas de luz obtenidas en diferentes condiciones geométricas de observación. Además, aplica técnicas de minimización para encontrar la mejor combinación de parámetros que reproduzca dichas observaciones, optimizando simultáneamente la orientación del eje de rotación y la forma del asteroide.

Para realizar la inversión de curvas de luz con este software, se deben cumplir las siguientes condiciones:

- Contar con un mínimo de 10 sesiones fotométricas.
- El ángulo de fase debe ser de al menos  $20^\circ$ , es decir, las observaciones deben cubrir un rango mínimo de  $20^\circ$  (figura 3.12a).
- El PABL (Pole-Angle Bisector Latitude) ideal debe ser de  $90^\circ$  (figura 3.12b).

Si bien la generación de un modelo tridimensional de los asteroides no era parte de los objetivos de esta tesis, abordamos este aspecto ya que la distribución de los datos fotométricos obtenidos nos permitieron reconstruir la forma y determinar el eje de rotación del asteroide (2345) Fucik. La información obtenida en este trabajo complementó estudios previos, lo que permitió la generación de su modelo 3D por parte del equipo que estudia asteroides en el INAOE, y al cual me he sumado para llevar a cabo esta investigación.

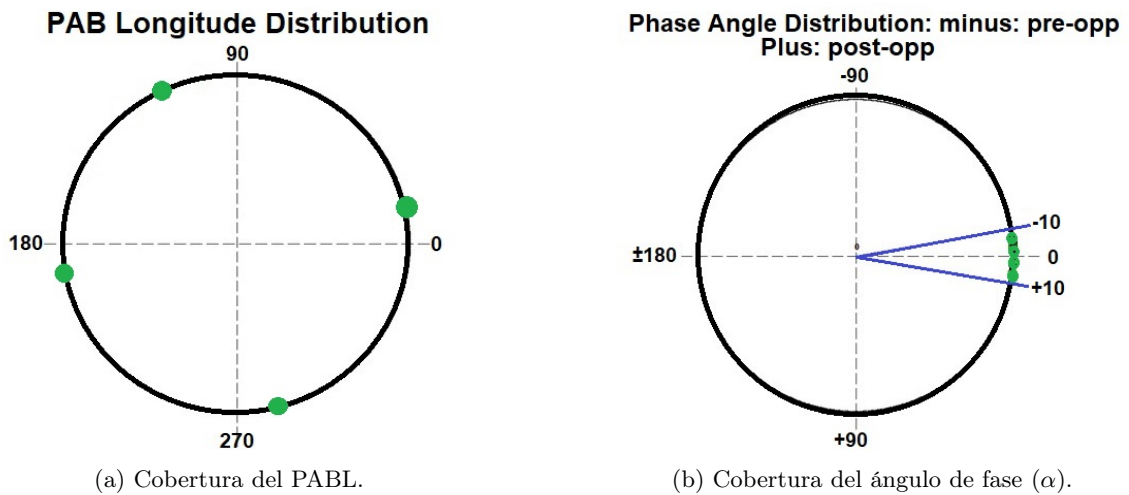


Figura 3.12: Coberturas ideales de las sesiones fotométricas; los puntos en color verde representan cada sesión observacional. En a) se muestra la distribución de la cobertura del Pseudo-Ángulo de la Línea de Base (PABL, por sus siglas en inglés), relacionada con la orientación del eje de rotación durante las observaciones y en b) la cobertura del ángulo de fase, fundamental para la reconstrucción precisa del modelo de forma tridimensional mediante inversión de curvas de luz.



## Capítulo 4

# Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del análisis fotométrico de los tres asteroides mencionados en la muestra. Se realizó una comparación entre las observaciones de uno de los asteroides de nuestra muestra, con los datos disponibles en el ALCDEF, evaluando su consistencia y posibles discrepancias. Asimismo, se analiza el caso de otro objeto para el cual no se obtuvieron resultados concluyentes, explorando las posibles causas. Finalmente, se exponen los nuevos datos obtenidos para un tercer asteroide, resaltando su relevancia en el estudio de estos cuerpos celestes.

En la tabla 4.1 se presentan los resultados obtenidos de nuestro estudio, incluyendo además los elementos orbitales, algunos parámetros físicos, la clasificación taxonómica y orbital, así como las distancias de perihelio y afelio de los asteroides en la muestra. Esta información será analizada en detalle en las secciones siguientes.

		Asteroide		
		(2345) Fucik	(3181) Ahnert	(34704) 2001 $SO_{80}$
Resultados	Periodo	$17.123 \pm 0.002$ h	--	$3.004 \pm 0.002$ h
	Orden	4	--	6
	Amplitud	0.42	--	0.21
Parámetro	$H$	10.90	12.75	12.92
	Diámetro	$25.155 \pm 0.684$	$7.961 \pm 0.097$ km	--
	$p_v$	$0.134 \pm 0.016$	$0.216 \pm 0.019$	--
Clasificación	Taxonómica	$S$	$S$	--
	Orbital	Cinturón principal zona III Eos	Cinturón principal zona I Flora	Cinturón principal zona II Eunomia
Elementos orbitales	$i$	$9.12372^\circ$	$3.96281^\circ$	$13.51944^\circ$
	$\Omega$	$303.65227^\circ$	$221.05084^\circ$	$288.33730^\circ$
	$\omega$	$136.12067^\circ$	$305.63756^\circ$	$192.96233^\circ$
	$a$	3.018370 UA	2.22932 UA	2.60587 UA
	$e$	0.071600	0.06487	0.13229
	$M$	$129.77668^\circ$	$117.98575^\circ$	$122.53972^\circ$
Distancias orbitales	$Q$	3.23447	2.37382	2.95060
	$q$	2.80225	2.08483	2.26113

Tabla 4.1: Resultados obtenidos en este estudio, junto con los elementos orbitales, los parámetros físicos disponibles, la clasificación taxonómica y orbital, así como las distancias de perihelio y afelio. Estos últimos recuperados de [JPL s.f.-d], [JPL s.f.-e] y [JPL s.f.-f]

## 4.1. (2345) Fucik

El asteroide (2345) Fucik fue descubierto el 25 de julio de 1974 por Tamara Mijáilovna Smirnova en el Observatorio Astrofísico de Crimea, ubicado en Rusia. Es el asteroide más distante y con una magnitud absoluta ( $H$ ) mayor (tabla 4.1) de los asteroides monitoreados. A pesar de su mayor magnitud absoluta, su magnitud aparente, indicada en la tabla 2.4 del capítulo 2, resulta similar a la de los otros dos asteroides. Este fenómeno puede explicarse debido a que se localiza a una mayor distancia, lo que disminuye la cantidad de luz reflejada que alcanza la Tierra, haciendo que su brillo aparente sea similar al de los otros dos asteroides. Se ha determinado que está compuesto principalmente de silicatos, lo que proporciona información sobre su composición mineralógica.

Este asteroide ha sido monitoreado en diversas ocasiones. Los valores reportados para su período de rotación se presentan en la tabla 4.2.

Periodo	Referencia
$17.12 \pm 0.01$ h	[Brinsfield 2008]
$17.35 \pm 0.09$ h	[Carbo et al. 2009]
$17.12300 \pm 0.00006$ h	[Ďurech, Hanuš, & Vančo 2019]
$17.1244 \pm 0.0005$ h	[Pál et al. 2020]

Tabla 4.2: Valores reportados del período de rotación del asteroide (2345) Fucik. La incertidumbre asignada por el ALCDEF a las curvas de luz de Brinsfield, Carbo y Pál es de  $U = 2$ .

En la Figura 4.1 se muestra la curva de luz obtenida para este asteroide, ajustada con una serie de Fourier de cuarto orden, según el criterio propuesto por [Harris et al. 2014] (ver Tabla 3.1, Capítulo 3). El ajuste está representado por la línea negra continua. La calidad del ajuste se evaluó mediante la raíz cuadrática media (RMS), considerando como período óptimo aquel que minimiza globalmente este error. El análisis del period spectrum (Figura 4.2) muestra múltiples mínimos locales del RMS, siendo el más bajo de 3.50361, correspondiente a un período de rotación de 17.123 h, en concordancia con estudios previos. La curva de luz presenta una amplitud de 0.42 y una incertidumbre de 0.002, determinada con un nivel de confianza de 3 sigmas. Aunque nuestra incertidumbre es mayor que la reportada por [Ďurech, Hanuš, & Vančo 2019], sigue siendo menor que en otros trabajos, lo que respalda la validez de los resultados.

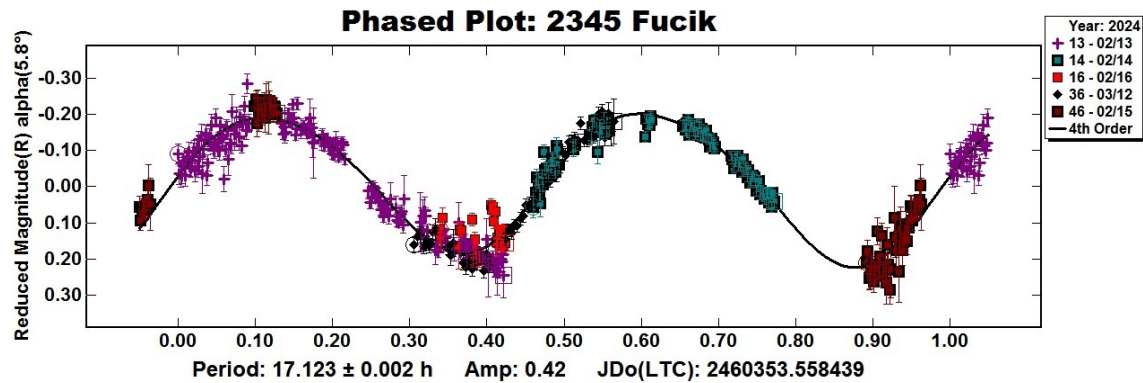


Figura 4.1: Curva de luz del asteroide (2345) Fucik, observado del 13 al 16 de febrero y 12 de marzo de 2024. Se obtuvo el periodo de  $17.123 \pm 0.002$  h y la amplitud de 0.42 con una función de Fourier de cuarto orden.

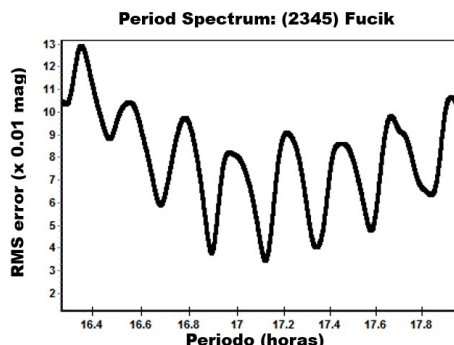


Figura 4.2: Period Spectrum. Se obtuvo el periodo de  $17.123 \pm 0.002$  h, asociado a un valor mínimo de RMS de 3.5036. La incertidumbre fue estimada con un nivel de confianza de  $3\sigma = 0.002h$ .

A continuación, se muestra la curva de luz (figura 4.3) obtenida por [Pál et al. 2020] y su respectivo period spectrum en la figura 4.4, al comparar esta curva de luz con la figura 4.1, se observa una notable similitud en la forma de ambas curvas. La diferencia en las amplitudes puede atribuirse al ángulo de fase en el que se realizaron las observaciones, ya que este parámetro determina la geometría de iluminación y visualización del asteroide. Una variación en dicho ángulo implica un cambio en el área observable lo que afecta directamente el valor de la amplitud registrada.

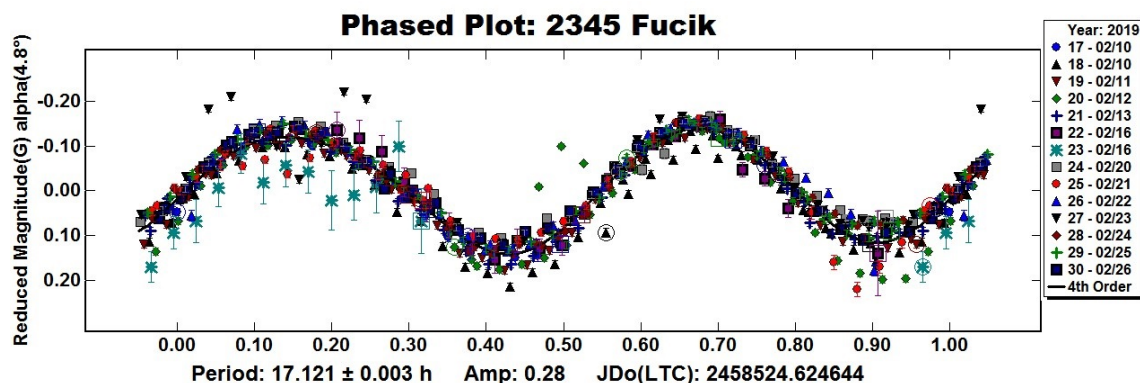


Figura 4.3: Curva de luz generada con los datos disponibles en el ALCDEF de [Pál et al. 2020]. Las observaciones corresponden a febrero de 2019.

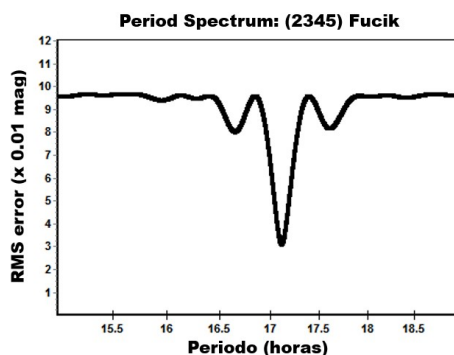


Figura 4.4: Period Spectrum correspondiente a las sesiones fotométricas de [Pál et al. 2020]. Al contar con un conjunto de datos más amplio, el mínimo se define con mayor claridad.

Para facilitar la comparación entre ambas curvas y resaltar la continuidad entre los datos obtenidos por [Pál et al. 2020] y los de esta tesis, se construyó una tercera curva de luz combinada, mostrada en la figura 4.5. Esta curva integra ambos conjuntos de datos, lo que permite visualizar con mayor claridad la coherencia entre ellos. A pesar de haber sido obtenidas desde diferentes ángulos de fase, las curvas muestran una notable concordancia: el periodo de rotación se mantiene constante, aunque las amplitudes varían debido a la geometría de observación.

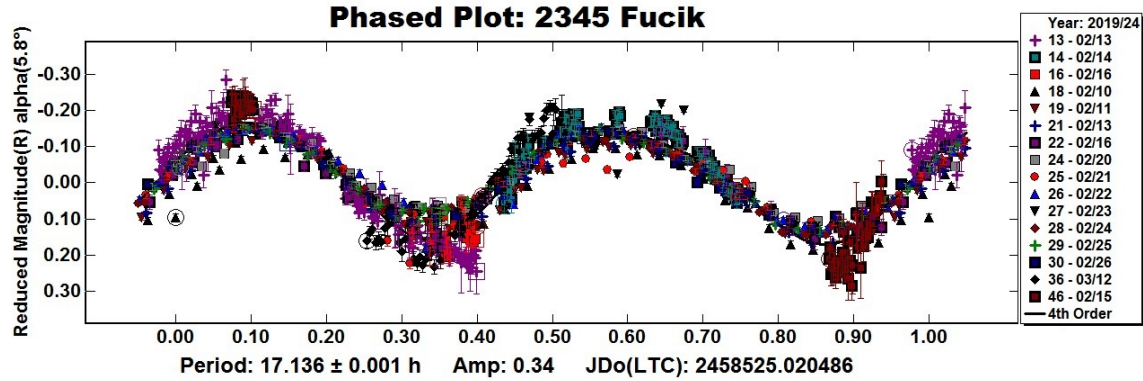


Figura 4.5: Curva de luz generada a partir de los datos fotométricos de [Pál et al. 2020] y los obtenidos en esta tesis.

Las observaciones realizadas a diferentes ángulos de fase son fundamentales para generar un modelo tridimensional más preciso y mejorar la determinación del eje de rotación del asteroide. Aunque la generación de un modelo 3D no es el objetivo principal de esta tesis, los datos fotométricos obtenidos complementan los registros disponibles en la base de datos del ALCDEF. Esto permite cubrir los requisitos mínimos para la inversión de curvas de luz, posibilitando la reconstrucción del modelo 3D del asteroide por parte del equipo de cuerpos menores del INAOE. A continuación, se presentan los resultados obtenidos, acompañados de una breve explicación de los mismos.

En la figura 4.6a se muestra el PABL, mientras que la figura 4.6b se presenta la cobertura del ángulo de fase ( $\alpha$ ). En color verde, se representan las coberturas de la base de datos ALCDEF correspondientes a los estudios de [Brinsfield 2008] y [Pál et al. 2020], mientras que en color naranja se indican las coberturas obtenidas en esta tesis. Esta distribución angular juega un papel crucial en la mejora del modelo tridimensional, ya que una mayor cobertura de ángulos de fase permite una reconstrucción más precisa del asteroide.

Por otro lado, en la figura 4.7a, se ilustra la búsqueda de los polos de inversión, donde las regiones de color azul oscuro corresponden a los valores más bajos de chi-cuadrada, indicando la mejor solución. La orientación óptima del polo se encuentra en  $\lambda = 210^\circ$  y  $\beta = 15^\circ$ , con un valor de chi-cuadrada de 2.05017 y un periodo de rotación de 17.12591. Es importante señalar que LC Invert realiza una búsqueda del periodo a partir de la media de los valores reportados en la base de datos y del obtenido en esta tesis. Con estos parámetros, se logró obtener el modelo tridimensional del asteroide, el cual se presenta en la figura 4.7b.

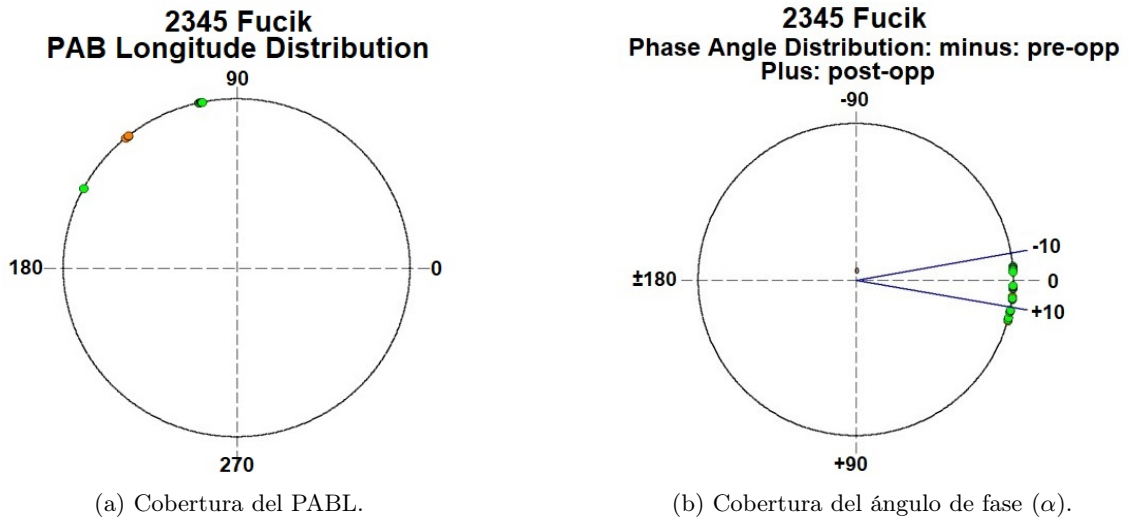


Figura 4.6: Coberturas de curvas de luz disponibles del asteroide (2345) Fucik.

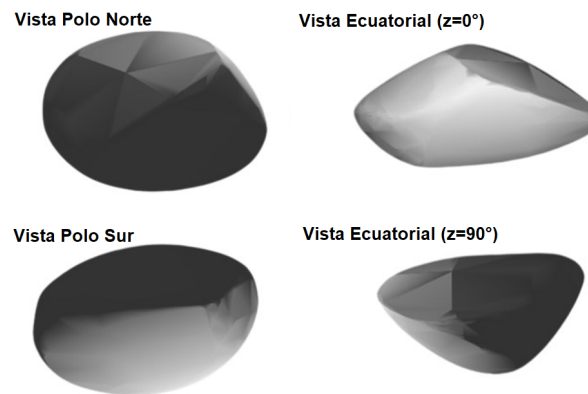
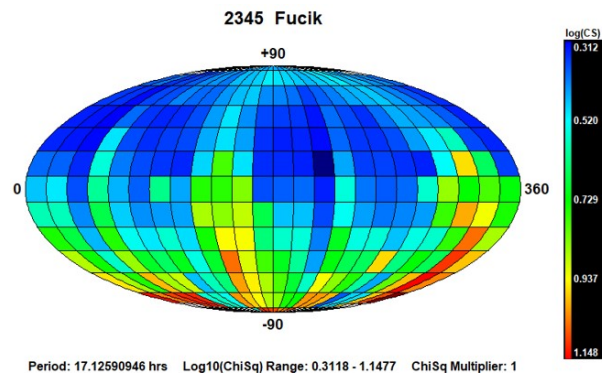


Figura 4.7: Búsqueda y reconstrucción de la forma del asteroide (2345) Fucik.

## 4.2. (3181) Ahnert

El asteroide (3181) Ahnert fue descubierto el 8 de marzo de 1964 por Freimut Börngen en el Observatorio Karl Schwarzschild, ubicado en Alemania. Es el asteroide más cercano en nuestra muestra, aunque presenta la menor magnitud absoluta dentro del conjunto observado. Al igual que (2345) Fucik, su composición está dominada por silicatos, lo que indica que su estructura está formada principalmente por materiales rocosos, proporcionando información sobre la formación de los miembros del cinturón principal de asteroides.

No se dispone de los valores de su periodo de rotación ni de su amplitud. Sin embargo, ha sido monitoreado para determinar su albedo, clase taxonómica y magnitud absoluta.

En la figura 4.8 se presenta la curva de luz obtenida para este asteroide. El análisis del *period spectrum*, mostrado en la figura 4.9, no revela un período significativo, ya que la distribución del error RMS es prácticamente plana y no exhibe mínimos evidentes. Incluso los datos fotométricos no muestran una variabilidad clara que permita determinar un periodo de rotación confiable.

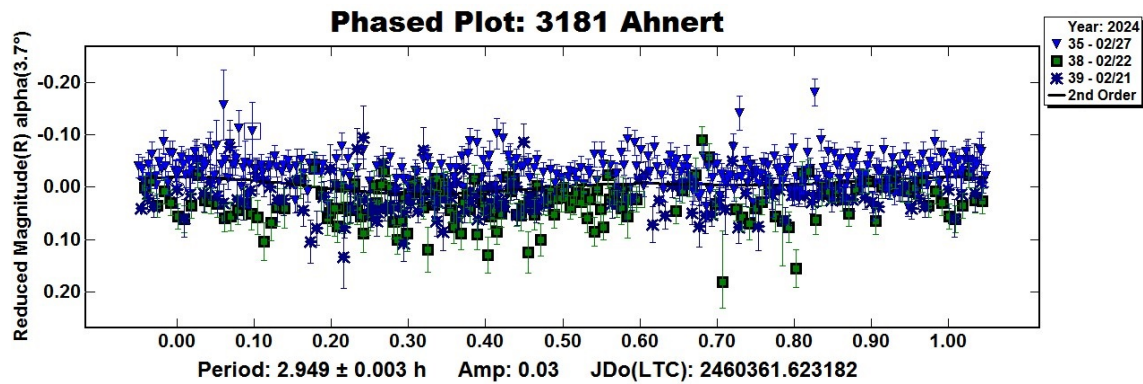


Figura 4.8: Curva de luz de (3181) Ahnert, observado los días 21, 22 y 27 de febrero de 2024.

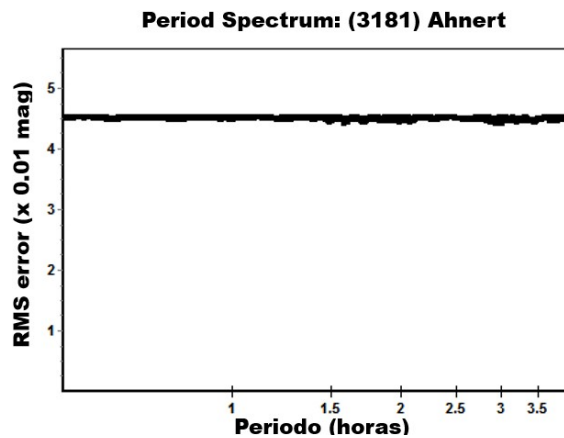


Figura 4.9: Period Spectrum.

Dado que en la curva de luz el nivel de ruido no es significativo, la imposibilidad de determinar un periodo de rotación confiable no puede atribuirse a la dispersión en los datos, ya que esta

dispersión es mayor a las barras de error de los datos individuales. Es claro entonces que la variabilidad observada es extremadamente baja o prácticamente nula, lo que sugiere varias posibles explicaciones.

Una posibilidad es que la superficie del asteroide presente pocas irregularidades, lo que reduciría las variaciones en el brillo reflejado y dificultaría la detección de cambios periódicos en la curva de luz. Otra hipótesis es que el asteroide sea un rotador lento, lo que implicaría que las observaciones realizadas sólo cubren una pequeña fracción de su periodo de rotación, impidiendo la identificación de la variación del brillo en las escalas de tiempo que hemos cubierto con las observaciones.

Adicionalmente, la orientación del eje de rotación respecto a la línea de visión del observador podría desempeñar un papel clave. Si el asteroide se encuentra en una configuración en la que su variación de fase es mínima, es posible que las modulaciones en el brillo sean imperceptibles desde la perspectiva terrestre. En este caso, sería recomendable realizar nuevas observaciones en una época diferente, cuando el asteroide haya experimentado un desplazamiento angular significativo respecto al Sol y la Tierra. Esto permitiría evaluar posibles cambios en la curva de luz asociados con una diferente iluminación y geometría de observación, facilitando la detección de un período de rotación, si hay variabilidad.

### 4.3. (34704) 2001 SO<sub>80</sub>

El asteroide (34704) 2001 SO<sub>80</sub> fue descubierto el 29 de julio de 2001 en el proyecto LINEAR en Socorro, EE.UU. Se encuentra en la región central del Cinturón Principal de Asteroides, ubicándose entre los dos objetos previamente analizados. A diferencia de los otros asteroides monitoreados en esta tesis, la información disponible sobre este objeto es muy limitada. Hasta el momento, sólo se ha determinado su magnitud absoluta (tabla 4.1), mientras que parámetros fundamentales como el período y la amplitud carecen de registros en bases de datos.

En la Figura 4.10 se muestra la curva de luz obtenida para este asteroide, ajustada con una serie de Fourier de sexto orden. El análisis del *period spectrum* (figura 4.11) revela un mínimo del error RMS en torno a 3.0 horas, con dos mínimos locales en 3.004 h y 3.20 h. Considerando los valores de RMS, el mínimo absoluto se encuentra en 3.004 h, con un error de 3 sigma de 0.002 h, por lo que se adopta este valor como el período de rotación del asteroide.

La amplitud de la curva de luz es de 0.21, lo que indica una variabilidad moderada en el brillo del asteroide. Aunque este valor es relativamente bajo, sugiere que la geometría observada del objeto presenta pocas irregularidades o cierta simetría en la distribución de su superficie reflectante. Sin embargo, no sería apropiado asumir que el asteroide tiene una forma esférica basándose únicamente en esta información. Para establecer una conclusión más sólida sobre su morfología, sería indispensable contar con observaciones a diferentes fases de su rotación.

Un claro ejemplo de la variación en la magnitud se puede observar en la sección 4.1. En la curva de luz presentada en la figura 4.1, se aprecia una amplitud de 0.42, mientras que en la figura 4.3, obtenida desde un ángulo diferente de rotación, se observa una amplitud de 0.28. Esta diferencia resalta la relevancia de observar el asteroide en sus diversos modos de rotación, dado que al cambiar el ángulo de observación, la forma del asteroide varía. No obstante, el periodo de rotación permanece constante, lo que refuerza la importancia de realizar observaciones en diferentes fases para un análisis más preciso de la morfología del objeto..

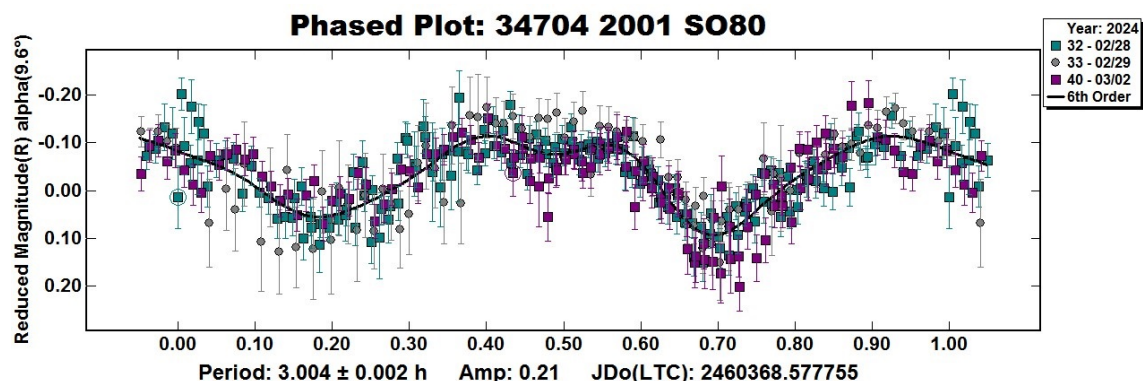


Figura 4.10: Curva de luz del asteroide (34704) 2001  $SO_{80}$ , observado los días 28, 29 de febrero y el 3 de marzo de 2024. Se obtuvo el periodo de  $3.004 \pm 0.002$  h y la amplitud de 0.21 con una función de Fourier de sexto orden.

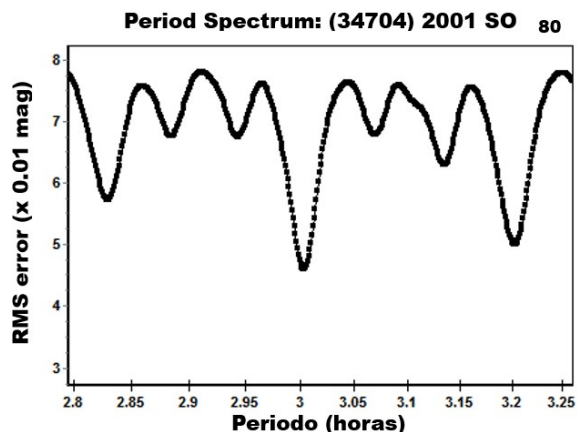


Figura 4.11: Period Spectrum. Se obtuvo el periodo de  $3.004 \pm 0.002$  h, asociado a un valor mínimo de RMS de 4.60474. La incertidumbre fue estimada con un nivel de confianza de  $3\sigma = 0.002h$ .

La determinación del período y la amplitud de la curva de luz representa un avance significativo en el estudio de este asteroide, dado que hasta el momento no se contaba con información al respecto. Estos resultados proporcionan un punto de partida para futuras investigaciones dirigidas a caracterizar su forma, orientación rotacional y posibles variaciones en su reflectividad superficial.

## Capítulo 5

# Conclusiones

En este trabajo se analizaron las curvas de luz de los asteroides (2345) Fucik, (3181) Ahnert y (34704) 2001 SO80, con el objetivo de determinar sus períodos de rotación y amplitudes. Los resultados obtenidos contribuyen al conocimiento de estos objetos y complementan la información disponible en bases de datos como el ALCDEF.

Para el asteroide (2345) Fucik, se buscó mejorar su clasificación en la escala de confiabilidad del ALCDEF, en la que presenta una valoración de  $U = 2$ . Se determinó un período de rotación de  $17.123 \pm 0.002$  con una amplitud de 0.42. Sin embargo, debido a su largo período de rotación, no fue posible alcanzar una clasificación superior, ya que los criterios del ALCDEF exigen la cobertura de un ciclo completo en una sola noche de observación, lo cual no es factible en este caso. A pesar de esta limitación, las nuevas observaciones permitieron la generación de un modelo tridimensional por parte del equipo de cuerpos menores del INAOE, al cumplir con los requisitos mínimos para su reconstrucción. Si bien se requieren datos adicionales para mejorar la precisión del modelo, este resultado representa un avance significativo en el estudio de este objeto.

En el caso del asteroide (3181) Ahnert, no fue posible determinar un período de rotación confiable debido a la baja variabilidad en su curva de luz. Este comportamiento podría estar asociado a una superficie homogénea, una rotación lenta o una orientación desfavorable del eje de rotación, lo que dificulta la detección de variaciones en el brillo. Es necesario realizar observaciones en diferentes épocas del año para evaluar posibles variaciones en la curva de luz y determinar si la baja amplitud observada es de origen geométrico o intrínseco. A pesar de la imposibilidad de establecer un período, estos resultados representan un aporte valioso para futuras investigaciones sobre este objeto, al proporcionar una referencia inicial para estudios posteriores.

Finalmente, para el asteroide (34704) 2001 SO<sub>80</sub> se determinaron por primera vez sus parámetros, obteniéndose un período de  $3.004 \pm 0.002$  h y su amplitud que es de 0.21. Este resultado representa una contribución significativa al conocimiento de este objeto y a las bases de datos utilizadas en el estudio de asteroides. Aunque se requieren observaciones en otros ángulos de fase para caracterizar mejor su morfología, la determinación de sus parámetros rotacionales representa un primer paso en el estudio de su dinámica y estructura.

En síntesis, los resultados obtenidos en este estudio contribuyen al conocimiento sobre la rotación y variabilidad fotométrica de los asteroides analizados. La determinación de sus períodos de rotación y amplitudes en algunos casos complementa la información disponible en bases de datos como el ALCDEF, pero en otro se determinan por primera ocasión. Estos hallazgos refuerzan la importancia de la observación fotométrica en el estudio de asteroides ya que no sólo validan mediciones previas, sino que al reportar por primera ocasión algunos parámetros, evidencian la

necesidad de continuar con estos programas de monitoreo para mejorar la comprensión de la dinámica y morfología de estos objetos.

## 5.1. Trabajo futuro

A futuro, se planea continuar con la recopilación de datos para generar y mejorar la precisión de los modelos tridimensionales, así como la caracterizar los parámetros de asteroides con baja variabilidad fotométrica. La obtención de datos en diferentes fases de rotación proporcionará información clave sobre la morfología y dinámica de estos cuerpos. Además, los modelos generados en estos trabajos podrán servir como referencia para estudios de otros asteroides, contribuyendo a una mejor comprensión de la población en el Cinturón Principal de Asteroides y en otras regiones del sistema solar.

# Bibliografía

- [Asteroid Day 2022] Asteroid Day, 2022, Learn how can we characterize asteroids, <https://asteroidday.org/updates/event-updates/learn-how-can-we-characterize-asteroids/>
- [Barucci et al. 2010] Barucci M. A., Alvarez-Candal A., Belskaya I., de Bergh C., DeMeo F., Dotto E., Fornasier S., et al., 2010, *Msngr*, 141, 15
- [Brinsfield 2008] Brinsfield J. W., 2008, *MPBu*, 35, 119
- [Bus & Binzel 2002] Bus S. J., Binzel R. P., 2002, *Icar*, 158, 106. doi:10.1006/icar.2002.6857
- [Carbo et al. 2009] Carbo L., Green D., Kragh K., Krotz J., Meiers A., Patino B., Pligge Z., et al., 2009, *MPBu*, 36, 152
- [Cerdán 2019] Cerdán G., 2019, Morphological properties determination on main belt asteroids, Tesis de maestría, INAOE
- [Choi et al. 2023] Choi C. Q., Dutfield S., Dobrijevic M., 2023, Pluto: Everything you need to know about the dwarf planet, <https://www.space.com/43-pluto-the-ninth-planet-that-was-a-dwarf.html>
- [Demeo 2010] Demeo F., 2010, The compositional variation of small bodies across the Solar System, Tesis doctoral, LESIA
- [Durech, Hanuš, & Vančo 2019] Durech J., Hanuš J., Vančo R., 2019, *A&A*, 631, A2. doi:10.1051/0004-6361/201936341
- [Dymock 2010] Dymock R., 2010, *adph.book*. doi:10.1007/978-1-4419-6439-7
- [Elkins-Tanton 2010] Elkins-Tanton L., 2010, Asteroids and Meteorites. Asteroids, Meteorites and Comets: The Solar System, pp. 92-97. Facts on File.
- [Elliot et al. 2005] Elliot J. L., Kern S. D., Clancy K. B., Gulbis A. A. S., Millis R. L., Buie M. W., Wasserman L. H., et al., 2005, *AJ*, 129, 1117. doi:10.1086/427395
- [Fischer-Gödde et al. 2024] Fischer-Gödde M., Tusch J., Goderis S., Bragagni A., Mohr-Westheide T., Messling N., Elfers B.-M., et al., 2024, *Sci*, 385, 752. doi:10.1126/science.adk4868
- [Gallaway 2016] Gallaway M., 2016, *ioa.book*. doi:10.1007/978-3-319-23377-2
- [Gladman, Marsden, & Vanlaerhoven 2008] Gladman B., Marsden B. G., Vanlaerhoven C., 2008, *ssbn.book*, 43
- [Haldar & Tisljar 2014] Haldar S., Tisljar J., 2014, Introduction to Mineralogy and Petrology, Elsevier, p. 81-91

- [Harris et al. 2014] Harris A. W., Pravec P., Galád A., Skiff B. A., Warner B. D., Világi J., Gajdoš Š., et al., 2014, *Icar*, 235, 55. doi:10.1016/j.icarus.2014.03.004
- [Hirayama 1918] Hirayama K., 1918, *AJ*, 31, 185. doi:10.1086/104299
- [Holman & Wisdom 1993] Holman M. J., Wisdom J., 1993, *AJ*, 105, 1987. doi:10.1086/116574
- [Horner, Evans, & Bailey 2004] Horner J., Evans N. W., Bailey M. E., 2004, *MNRAS*, 354, 798. doi:10.1111/j.1365-2966.2004.08240.x
- [IAU Minor Planet Center s.f.] IAU Minor Planet Center, s. f., Servicio Web MPC, IAU Minor Planet Center, [https://minorplanetcenter.net/web\\_service/](https://minorplanetcenter.net/web_service/)
- [IAWN s.f.] IAWN. s.f., IAWN Functions, <https://iawn.net/about.shtml>
- [IAWN 2013] IAWN. 2013, IAWN History, <https://iawn.net>
- [IAU 2006] IAU (International Astronomical Union), 2006, The Final IAU Resolution on the definition of “planet” ready for voting, <https://www.iau.org/news/pressreleases/detail/iau0602/>
- [IAU s.f. ] IAU (International Astronomical Union), s.f., Pluto and the Developing Landscape of Our Solar System, <https://www.iau.org/public/themes/pluto/>
- [JPL s.f.-a] JPL (Jet Propulsion Laboratory), s.f., Additional details on the large Feb. 15 fireball over Russia, NASA, <https://www.jpl.nasa.gov/news/additional-details-on-the-large-feb-15-fireball-over-russia/>
- [JPL s.f.-b] JPL (Jet Propulsion Laboratory), s.f., Glossary, NASA, <https://ssd.jpl.nasa.gov/glossary/>.
- [JPL s.f.-c] JPL (Jet Propulsion Laboratory), s. f., NEO Basics: NEO Groups, NASA, [https://cneos.jpl.nasa.gov/about/neo\\_groups.html](https://cneos.jpl.nasa.gov/about/neo_groups.html)
- [JPL s.f.-d] JPL (Jet Propulsion Laboratory), s. f., Small-Body Database Lookup: (2345) Fucik, NASA, [https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb\\_lookup.html#/?sstr=2345](https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=2345) [Consultado 20 Feb. 2025]
- [JPL s.f.-e] JPL (Jet Propulsion Laboratory), s. f., Small-Body Database Lookup: (3181) Ahnert. NASA. [https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb\\_lookup.html#/?sstr=3181](https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=3181) [Consultado 20 Feb. 2025]
- [JPL s.f.-f] JPL (Jet Propulsion Laboratory), s. f., Small-Body Database Lookup: (34704) 2001 SO80, NASA, [https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb\\_lookup.html#/?sstr=34704&view=OPD](https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=34704&view=OPD). [Consultado 20 Feb. 2025]
- [JPL s.f.-g] JPL (Jet Propulsion Laboratory), s. f., Small-Body Database Query (SBDB Query), NASA Center for Near Earth Object Studies, [https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb\\_query.html](https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_query.html).
- [Karttunen et al. 2017] Karttunen H., Kröger P., Oja H., Poutanen M., Donner K. J., 2017, *Fundamental Astronomy*, 6th edn. Springer, Heidelberg
- [Kaasalainen & Torppa 2001] Kaasalainen M., Torppa J., 2001, *Icar*, 153, 24. doi:10.1006/icar.2001.6673
- [Lazzarin, Magrin, & Marchi 2008] Lazzarin M., Magrin S., Marchi S., 2008, *MSAIS*, 12, 20

- [Levison & Duncan 1997] Levison H. F., Duncan M. J., 1997, *Icar*, 127, 13. doi:10.1006/icar.1996.5637
- [Lissauer & de Pater 2013] Lissauer J., de Pater I., 2013, *Fundamental Planetary Science: Physics, Chemistry and Habitability*. Cambridge Univ. Press, New York
- [López-García 1993] López-García F. D., 1993, *BAAA*, 38, 43
- [Michimani 2019] Michimani, J., 2019, 3D Modelling of Near-Earth Asteroids using Lightcurve Database, Tesis de maestría, INAOE
- [Murphy 2023] Murphy M., 2023, A History of Asteroid Classification, Vissiniti, <https://vissiniti.com/asteroid-classification/> [Consultado 10 Dic. 2024]
- [NASA 2018] NASA., 2018, Five years after the Chelyabinsk meteor, NASA leads efforts in planetary defense, [https://www.nasa.gov/solar-system/five-years-after-the-chelyabinsk-meteor-nasa-leads-efforts-in-planetary-defense/?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.nasa.gov/solar-system/five-years-after-the-chelyabinsk-meteor-nasa-leads-efforts-in-planetary-defense/?utm_source=chatgpt.com)
- [NASA s.f.] NASA., s.f., Solar System: Facts, NASA. <https://science.nasa.gov/solar-system/facts/>
- [NASA 2023] NASA., 2023, 115 years ago: The Tunguska asteroid impact event, <https://www.nasa.gov/history/115-years-ago-the-tunguska-asteroid-impact-event>
- [Nesvorný, Brož, & Carruba 2015] Nesvorný D., Brož M., Carruba V., 2015, *aste.book*, 297. doi:10.2458/azu\_uapress\_9780816532131-ch016
- [OEA s.f.] OEA., s.f., Término del glosario: Curva de luz, <https://astro4edu.org/resources/glossary/term/176/>.
- [Pál et al. 2020] Pál A., Szakáts R., Kiss C., Bódi A., Bognár Z., Kalup C., Kiss L. L., et al., 2020, *ApJS*, 247, 26. doi:10.3847/1538-4365/ab64f0
- [Popescu 2012] Popescu M., 2012, *Techniques for asteroid spectroscopy*. Tesis de doctorado, Observatorio de París
- [Romanishin 2006] Romanishin W., 2006, *Introduction to Astronomical Photometry Using CCDs*, [http://www.physics.csbsju.edu/370/photometry/manuals/OU.edu\\_CCD\\_photometry\\_wrccd06.pdf](http://www.physics.csbsju.edu/370/photometry/manuals/OU.edu_CCD_photometry_wrccd06.pdf)
- [Santana-Ros et al. 2022] Santana-Ros T., Micheli M., Faggioli L., Cennamo R., Devogèle M., Alvarez-Candal A., Oszkiewicz D., et al., 2022, *NatCo*, 13, 447. doi:10.1038/s41467-022-27988-4
- [SBIG 2015] SBIG Astronomical Instruments, 2015, Model STF-8300M/C CCD Camera Operating Manual, [https://nimax-img.de/Produktdownloads/47234\\_2\\_Bedienungsanleitung-EN.pdf](https://nimax-img.de/Produktdownloads/47234_2_Bedienungsanleitung-EN.pdf)
- [Stetson 2013] Stetson P. B., 2013, doi:10.1007/978-94-007-5618-2\_1
- [Valdés et al. 2016] Valdés J. R., Guichard J., Cornejo A., et al. 2016, Pruebas para determinar las propiedades opticas actuales de la Camara Schmidt de Tonantzintla, Reporte Técnico No. CA2016-015, INAOE
- [Valdés et al. 2015a] Valdés, J.R., Márquez, A., Guichard, J., et al. 2015a, Procedimiento para retirar la celda y el espejo de la Cámara Schmidt de Tonantzintla. Reporte Técnico. Coordinación de Astrofísica. INAOE

- [Valdés et al. 2015b] Valdés, J.R, Márquez, A., Guichard, J., et al.2015b, Procedimiento para la limpieza de la Lente Correctora de la Cámara Schmidt de Tonantzintla. Reporte Técnico. Coordinación de Astrofísica. INAOE
- [Valdés et al. 2023] Valdés J. R., Mújica R., Guichard J., Camacho S., Cerdán G., Michimani J., Vega R., 2023, RMxAA, 59, 67. doi:10.22201/ia.01851101p.2023.59.01.04
- [Warner 2006] Warner B. D., 2006, A Practical Guide to Lightcurve Photometry and Analysis, Springer, New York
- [Williams 2022] Williams M., 2022, What is the Asteroid Belt? - Universe Today, Universe Today, <https://www.universetoday.com/32856/asteroid-belt/>