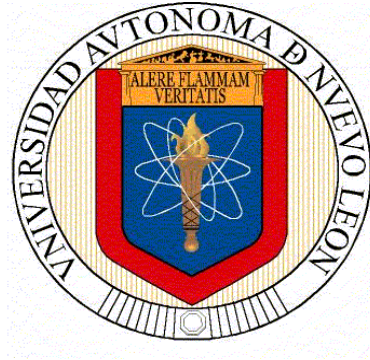


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS**



**ESTUDIOS PREPARATORIOS PARA EL SEGUIMIENTO
Y CARACTERIZACIÓN DE ASTEROIDES DESDE EL OAU**

**TESIS PRESENTADA POR:
VICTORIA PATRICIA ALFERES MARTÍNEZ**

**COMO UNO DE LOS REQUISITOS PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRA EN ASTROFÍSICA PLANETARIA Y TECNOLOGÍAS AFINES**

MARZO 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS

PROGRAMAS DE POSGRADOS



**ESTUDIOS PREPARATORIOS PARA EL SEGUIMIENTO
Y CARACTERIZACIÓN DE ASTEROIDES DESDE EL OAU**

Tesis presentada por:

Lic. Victoria Patricia Alferes Martínez

Como uno de los requisitos para obtener el grado de:

Maestra en Astrofísica Planetaria y Tecnologías afines
en la Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas

Asesores:

Dr. Joel Humberto Castro Chacón

Dr. José Enrique Pérez León

Universidad Autónoma de Nuevo León
San Nicolás de los Garza, Nuevo León Marzo, 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS

PROGRAMAS DE POSGRADOS

Los miembros del comité certifican que han leído la disertación que presenta
Lic. Victoria Patricia Alferes Martínez como requisito parcial
para obtener el grado de:

**MAESTRA EN ASTROFÍSICA PLANETARIA
Y TECNOLOGÍAS AFINES**

Dr. Joel Humberto Castro Chacón

Asesor externo
Universidad Autónoma de México,
Instituto de Astronomía, Ensenada, B.C.

Dr. José Enrique Pérez León

Asesor interno
Universidad Autónoma de Nuevo León,
Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas, Nuevo León

Dr. Andrés Alberto Avilés Alvarado

Secretario
Universidad Autónoma de Nuevo León,
Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas, Nuevo León

Marzo, 2022

Declaración de Derechos de Autor

Declaro por este medio haber escrito yo misma esta disertación y que presento exclusivamente mis investigaciones.



Lic. Victoria Patricia Alferes Martínez

**San Nicolás de los Garza, Nuevo León México
Marzo, 2022**

© 2022 Lic. Victoria Patricia Alferes Martínez

Derechos Reservados

Resumen

En este trabajo se presenta un estudio de las capacidades del sitio “El Picacho” del Observatorio Astronómico Universitario (OAU), mediante la validación de observaciones de asteroides en el telescopio TPO de 16” y el telescopio PlaneWave de 20”; que tienen acopladas cámaras QHY174M-GPS tipo CMOS. El primer proyecto observacional al cual estará dedicado el OAU es la caracterización de cuerpos menores del sistema solar, en particular asteroides de diferentes clasificaciones dinámicas como son los asteroides cercanos a la tierra (NEAs) y los asteroides del cinturón principal (MBAs). Para llevar a cabo la caracterización de este tipo de objetos, en el marco del proyecto del OAU, se requiere de estudios fotométricos, espectrofotométricos y polarimétricos; los resultados de estas observaciones permitirán hacer clasificaciones taxonómicas, determinación de propiedades superficiales y medición de propiedades físicas. Para alcanzar el objetivo de medir las propiedades físicas, es indispensable construir curvas de fase y rotacionales de los asteroides bajo estudio. En este trabajo de tesis de maestría se desarrollaron las herramientas computacionales codificadas en Python para: planear noches de observación, realizar la fotometría de manera confiable y homogénea, obtener periodos rotacionales a partir de magnitudes relativas utilizando algoritmos para calcular periodogramas como el de Lomb & Scargle además de minimización de dispersión de fase (PDM) y obtener la curva teórica modelada mediante ajuste de mínimos cuadrados. Se obtuvieron las curvas de rotación de dos asteroides observados en el OAU y se comprobaron los códigos desarrollados con datos de observaciones de una colaboración con el Florida Space Institute (FSI) para la caracterización de troyanos. Este trabajo se enmarca dentro del proyecto de grupo entre la UANL y la UNAM de Fronteras CONACYT 2019: ***Descifrando las relaciones entre propiedades superficiales, rotación, fragmentación y taxonomía para Objetos Próximos a la Tierra, utilizando telescopios en el OAN-SPM y el nuevo telescopio en el OA-UANL.***

Agradecimientos

Deseo agradecer a la Universidad Autónoma de Nuevo León por formarme profesionalmente hasta el día de hoy. Al Centro de Investigaciones de la Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas por darme la oportunidad y el espacio para estudiar la maestría de Astrofísica Planetaria y Tecnologías Afines.

Agradezco al Dr. Enrique Pérez por el apoyo para lograr el desarrollo de este trabajo de tesis. Especialmente a mi asesor Dr. Joel Castro, a quien estoy eternamente agradecida por todas sus enseñanzas y conocimientos compartidos, por su paciencia, apoyo y dedicación para guiarme en el proceso de la presente tesis, para mí ha sido una gran experiencia el haber podido trabajar a su lado.

A mamá y a papá, que siempre me han alentado a cumplir con mis objetivos y me han brindado su amor y apoyo incondicional. Gracias, los amo muchísimo.

Por último, agradezco a CONACyT por la beca otorgada que me ha hecho posible el poder realizar mis estudios de maestría, al proyecto CONACyT CB2016 283800 y al proyecto de Fronteras de la Ciencia 2019: *Descifrando las relaciones entre propiedades superficiales, rotación, fragmentación y taxonomía para Objetos Próximos a la Tierra, utilizando telescopios en el OAN-SPM y el nuevo telescopio en el OA-UANL.*

Lista de figuras

- Figura 1: Ubicación del Observatorio Astronómico de UANL Monterrey-México. Arriba a la derecha: Vista actual del sitio, mostrando el pico más alto de los alrededores. Abajo a la derecha: El sitio del observatorio ubicado a 2,200 msnm (24.76° N 99.89° W), y el sitio Bosque Escuela a 1,600 msnm (24.71° N, 99.86° W) (Colin et al., 2014). 16
- Figura 2: Observatorio Astronómico Universitario, en el Cerro El Picacho, en Iturbide, N.L. 17
- Figura 3: Telescopio Tlapiani del OA-UANL 18
- Figura 4: Telescopio de 16" del OAU. 19
- Figura 5: Telescopio de 20" del OAU. 20
- Figura 6: Cámara QHY174-GPS para uno de los telescopios del OAU..... 21
- Figura 7: Esquema del efecto de la turbulencia atmosférica en la generación de imágenes astronómicas. (a) El efecto de la turbulencia atmosférica. (b) El efecto de movimiento de la imagen de una estrella vista con un telescopio pequeño (Roy & Clarke, 2003)..... 25
- Figura 8: (a) Observatorios de Mauna Kea, isla de Hawái a 4,205 msnm (Wainscoat, 1998); (b) Observatorio Paranal, desierto de Atacama, Chile a 2,635 msnm (ESO, 2009) 26
- Figura 9: Perfiles de transmisión relativa de filtros utilizados en el sistema de magnitud UBVRI. Los máximos de las bandas se normalizan a la unidad. Las bandas R e I se basan en el sistema de Johnson, Cousins y Glass, que incluye también las bandas infrarrojas J, H, K, L y M. Las bandas R e I utilizadas anteriormente difieren considerablemente de estas (Karttunen et al., 2007). 27
- Figura 10: Esquema de detección de luz de un CCD. La luz incide sobre píxeles en el sensor CCD para luego formar una imagen digital (Barrios, 2019). 28
- Figura 11: El principio de lectura de una cámara CCD. (a) Durante una exposición, los electrones quedan atrapados en pozos potenciales correspondientes a los píxeles de la cámara. El número de cada píxel muestra el número de electrones. (b) Después de la exposición, cada línea horizontal se mueve un píxel hacia la derecha; la fila más a la derecha se mueve al búfer de lectura. (c) El contenido del búfer se mueve hacia abajo un píxel. La carga más baja se mueve al convertidor A/D, que envía la cantidad de electrones a la computadora. (d) Después de mover el búfer hacia abajo varias veces, se ha leído una fila vertical. (e) La imagen se desplaza de nuevo un píxel a la derecha. Este procedimiento se repite hasta que se lee toda la imagen (Karttunen et al., 2007). 28
- Figura 12: Instrumentos de imagen directa del OAN-SPM. Izquierda: Rueda de filtros *Italiana*. Derecha: Rueda de filtros Mexman (OAN-SPM, 2021). 29
- Figura 13: Curvas de luz representativas para objetos celestes. Arriba a la izquierda: curva de luz simulada de un asteroide en rotación con un cuerpo de modelo elipsoide de forma triaxial (Vargha & Kolláth, 1999); Arriba a la derecha: curva de luz

	para un sistema estelar binario eclipsante, utilizada para medir los radios y el período orbital de las estrellas (Johnson, 2015); Abajo: curva de luz de tránsito del exoplaneta (Johnson, 2015).	30
Figura 14:	Una estrella emite luz en todo el espectro: un continuo. Cuando la luz blanca atraviesa un prisma, forma un arco iris, su espectro. De la misma manera, a medida que la luz de una estrella atraviesa el gas de una nebulosa (o incluso solo la atmósfera de la estrella) los colores específicos (o longitudes de onda) son absorbidos por los elementos contenidos en el gas, produciendo líneas oscuras sobre el continuo. Este es un espectro de absorción. La energía absorbida por el gas se vuelve a emitir en todas direcciones, también en los colores característicos específicos de los elementos presentes en el gas, produciendo líneas brillantes en ciertas longitudes de onda; esto se conoce como espectro de emisión (European Southern Observatory ESO, 2015).	31
Figura 15:	Diagrama de un espectrógrafo de hendidura. La rendija del espectrógrafo limita la luz que ingresa al espectrógrafo para que actúe como una fuente puntual de luz de una imagen más grande. Esto permite a un astrónomo tomar varios espectros de diferentes regiones de una fuente extendida, como una galaxia o una estrella específica en el campo de visión del telescopio. Luego, la luz se colima (se pone en paralelo) antes de golpear una rejilla de difracción. Esto dispersa la luz en longitudes de onda de componentes que luego pueden enfocarse mediante un espejo de cámara en un detector como un dispositivo de carga acoplada (CCD). Al girar la rejilla, diferentes partes del espectro disperso se pueden enfocar en la cámara. La lámpara de comparación es vital porque proporciona líneas espectrales de longitud de onda conocida (por ejemplo, sodio o neón) en reposo con respecto al espectrógrafo, lo que permite calibrar el espectro de la fuente distante y medir cualquier desplazamiento de las líneas espectrales (Hollow, 2006).	32
Figura 16:	Instrumentos del OAN-SPM. Derecha: Espectrógrafo Boller & Chivens. Izquierda: Espectrógrafo Echelle (OAN-SPM, 2021).	33
Figura 17:	Tipos de polarización de la onda electromagnética: lineal, circular y elíptica (Siblini, 2017).	33
Figura 18:	Diagrama esquemático de un polarímetro de imagen. El primer elemento del arreglo óptico es el analizador. Luego se tiene un filtro que selecciona la componente linealmente polarizada en un cierto ancho de banda (Hiriart et al., 2005).....	34
Figura 19:	Instrumentos del OAN-SPM. Derecha: POLIMA (Polarizador óptico de imagen). Izquierda: POLIMA-2 (Polarizador óptico de doble haz) (OAN-SPM, 2021).	35
Figura 20:	Principales observatorios astronómicos en el mundo (Google Maps, 2021).	36
Figura 21:	Derecha: Imagen de la NASA de los asteroides Mathilde, Gaspra e Ida a escala. Izquierda: Imagen del NEA 25143 Itokawa, cartografiado por la sonda Hayabusa (ISAS/JAXA) (Trigo & Madiedo, 2013).	37
Figura 22:	Distribución del cinturón principal de asteroides. Los huecos de Kirkwood son causados por resonancias de movimiento medio entre un asteroide y Júpiter. Por ejemplo,	

el hueco de Kirkwood de 3:1 se encuentra donde la relación entre el período orbital de un asteroide y el de Júpiter es 3/1, es decir, el asteroide completa tres órbitas por cada una órbita de Júpiter. El efecto de estas resonancias de movimiento medio es un cambio en los elementos orbitales del asteroide (particularmente el semieje mayor) (Chamberlin, 2007).37

Figura 23: Ubicaciones de los troyanos, en los puntos lagrangianos L4 y L5 del sistema Júpiter-Sol (Kutner, 2003).38

Figura 24: Representación orbital de los diferentes grupos de NEAs. (https://cneos.jpl.nasa.gov/about/neo_groups.html).40

Figura 25: Árboles caídos en el bosque en Tunguska después del impacto de 1908. Vastas áreas fueron arrasadas debido a la explosión. Crédito de las imágenes: Leonid Kulik (Redfern, 2013).41

Figura 26: a) El meteorito de Chelyabinsk, Rusia atravesando el cielo. Capturado por M. Ahmetvaleev el 15 de febrero de 2013; b) Fotografía de la bola de fuego brillante generada por el meteorito. Algunos científicos creen que la luz del meteorito pudo haber sido más brillante que el Sol (Byrd, 2019).41

Figura 27: Asteroides Cercanos a la Tierra descubiertos. Consultado el 8 de enero de 2022 (<https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/totals.html>).42

Figura 28: Representación del ángulo de fase. r y Δ corresponden a la distancia al Sol y la Tierra desde el asteroide respectivamente (Adaptado de Jackson, 2021).45

Figura 29: Esquema que muestra el ángulo de fase y la configuración de la oposición. El momento de oposición se da cuando la diferencia entre la longitud geocéntrica de dos objetos es 180° (Adaptado de Ojeda, 2019).46

Figura 30: Magnitud del asteroide en función del ángulo de fase para 24 Themis (a), 44 Nysa (b) y 1862 Apollo (c). El efecto de oposición es visible como un aumento anómalo de intensidad cerca de $\Phi = 0$ (Adaptado de de Pater & Lissauer, 2001). 47

Figura 31: Curva de luz Curva de luz obtenida en el Observatorio Table Mountain de la NASA cerca de Wrightwood, CA por Michael Hicks y Bonnie Buratti el 30 de agosto de 2017 (Benner et al., 2017).47

Figura 32: Izquierda: El ángulo de fase es el observado en el asteroide entre las líneas de visión de la Tierra y el Sol. Derecha: El ángulo de aspecto es el ángulo entre la línea de visión de la Tierra y el eje de rotación del asteroide (Adaptado de ASCL, 2007).48

Figura 33: Modelo de la forma del asteroide (3908) Nyx (arriba) y su curva de luz (abajo).49

Figura 34: Modelo de la forma del asteroide (5587) 1990 SB (arriba) y su curva de luz (abajo).49

Figura 35: Modelo de la forma del asteroide (1580) Betulia (arriba) y su curva de luz (abajo).49

Figura 36: Imágenes de calibración. a): Imagen *Bias*. El nivel de bias en esta imagen es de 320 cuentas. Cada píxel se dispersa alrededor de este valor debido al ruido de lectura;

b): Imagen Dark, con un tiempo de exposición de 300 s. El nivel medio en esta imagen es de 370 cuentas. 320 de estos cuentas son de nivel *bias* lo que da una corriente oscura de 50 cuentas; c): Una imagen Flat de cielo crepuscular. El patrón de iluminación general es el resultado del viñeteado. También se pueden ver variaciones de píxel a píxel y grandes donas de manchas de polvo desenfocadas (Adaptadas de Littlefair, 2014)..... 51

Figura 37: Esquema del proceso de calibración (Adaptado de Hergesheimer, 2019). 52

Figura 38: Fotometría de apertura de una imagen CCD. El objetivo está etiquetado como apertura 1 (en blanco). La estrella de comparación no variable está etiquetada como apertura 2 (en verde). El círculo interior define la señal total del objetivo. El anillo definido por los dos círculos exteriores se utiliza para calcular la señal del cielo. Crédito de la imagen: Vik Dhillon (Adaptada de Littlefair, 2014). 53

Figura 39: Captura de la pestaña principal de seguimiento de la montura del telescopio con *GSServer* ingresando las coordenadas de RA y Dec del asteroide 1188 Gothlandia..... 57

Figura 40: Captura de la pantalla principal de *SharpCap* mostrando la imagen tomada por el telescopio para las coordenadas del asteroide 1188 Gothlandia..... 57

Figura 41: Ejemplo de una imagen obtenida con *AstFinder* para la posición del asteroide 1188 Gothlandia. El punto verde en el centro marca la posición del asteroide a una fecha y hora dadas (<https://asteroid.lowell.edu/astfinder/>)..... 58

Figura 42: Secuencia de imágenes en un *blink*. El asteroide 1188 Gothlandia se ha encerrado en un círculo en color rojo mientras que las estrellas de referencia se muestran encerradas en círculos de color verde. Se puede apreciar en cada imagen como el asteroide va cambiando de posición en el campo..... 60

Figura 43: Curva de la magnitud vs el día juliano obtenida para 2195 Tengstrom para el día 26 de enero de 2022..... 61

Figura 44: Curvas de la magnitud vs el día juliano obtenida para 1188 Gothlandia para el 4 de diciembre de 2021 (arriba) y 25 de enero de 2022 (abajo)..... 62

Figura 45: Curva de la magnitud de 2195 Tengstrom relativa a una de las estrellas de referencia para el día 26 de enero de 2022 63

Figura 46: Curva de la magnitud de 1188 Gothlandia relativa a una de las estrellas de referencia para los días 4 de diciembre de 2021 (arriba) y 25 de enero de 2022 (abajo). 64

Figura 47: Representación de la rotación de un asteroide. Debido a su morfología irregular, las curvas de luz de los asteroides presentan variabilidad a medida que rotan en su propio eje. Gracias a esto es posible aprovechar la variabilidad de su brillo para calcular el periodo de rotación..... 65

Figura 48: Periodogramas resultantes de los algoritmos de: a) Lomb & Scargle y b) PDM, los periodos de rotación son el inverso de los ciclos por día. Datos para el troiano 1994 CS8..... 66

Figura 49: Curva de fase rotacional del troyano 1994 CS8 para un periodo de rotación de 7.727 horas. Este es un ensamble de observaciones realizadas en seis diferentes fechas. La curva central es un ajuste del modelo de rotación utilizando series de Fourier.....	67
Figura 50: Curva de luz de magnitud relativa vs fase rotacional del asteroide 1188 Gothlandia obtenida de datos en El Picacho el 4 diciembre de 2021 y el 25 de enero de 2022 con los telescopios de 16" y 20". El modelo fue ajustado con la ecuación (6).....	68
Figura 51: Curvas de luz de 1188 Gothlandia. a) Curva de luz obtenida para los meses de diciembre 2008 a enero 2009 (Hamanowa & Hamanowa, 2009); b) Curva de luz compuesta de las fechas de agosto a diciembre 2011 (Baker et al., 2012); c) Curva de luz para el mes de enero de 2019 (Groezinger & Montgomery, 2020).	69
Figura 52: Periodograma obtenido con el algoritmo PDM para las observaciones de 1188 Gothlandia en el sitio de El Picacho en el OAU el 4/12/2021 y el 25/01/2022. Los mínimos de dispersión se ubican en 3.48 h y 3.8 h	70
Figura 53: Curva de luz de magnitud relativa vs fase rotacional del asteroide 2195 Tengstrom para el 26 de enero de 2022. El modelo fue ajustado con la ecuación (6) utilizando un periodo rotacional de 2.8 h.	71
Figura 54: Curvas de luz de 2195 Tengstrom. a) Curva de luz para el mes de diciembre (Pray & Kusnirak, 2011); b) Curva de luz obtenida para el mes de abril (Higgins et al., 2006).	72
Figura 55: Periodograma obtenido con el algoritmo PDM para las observaciones de 2195 Tengstrom en el sitio de El Picacho del OAU el 26/01/2022. El mínimo de dispersión se encontró en 2.76 h.	73
Figura 56: Curva de luz de magnitud relativa vs fase rotacional del asteroide troyano 1994 para 6 fechas de observación	74
Figura 57: Curvas de luz de 1994 CS8. a) Curva de luz para los días 19 y 20 de octubre del 2014 (Stephens et al., 2015); b) Curva de luz obtenida para los días del 23 de febrero al 27 de marzo del 2017 (Stephens & Coley, 2017)	75
Figura 58: Periodograma obtenido con el algoritmo de Lomb & Scargle para las observaciones de 1994 CS8 adquiridas en el OSN en Granada, España y en el OAN-SPM en Ensenada, Baja California en 2019. Se muestran dos máximos a 3.87 y 4.23 h respectivamente.....	76
Figura 59: Periodograma obtenido con el algoritmo de PDM para las observaciones de 1994 CS8 adquiridas en el OSN en Granada, España y en el OAN-SPM en Ensenada, Baja California en 2019. en el OSN en España en 2019. El mínimo corresponde a 3.87 h.	76

Lista de tablas

Tabla I:	Características del telescopio de 16'' instalado en el OAU (El Picacho).....	19
Tabla II:	Características del telescopio de 20'' instalado en el OAU (El Picacho).....	20
Tabla III:	Parámetros de la cámara QHY174-GPS.....	21
Tabla IV:	Grupos de NEAs. (https://cneos.jpl.nasa.gov/about/neo_groups.html).	39
Tabla V:	Descripción de los parámetros de la base de datos de IMCCE y JPLSBDB.	55
Tabla VI:	Parámetros físicos de asteroides observados (Fuente: JPL Small-Body Database Browser).....	56

Índice

I. Introducción	14
I.1. Antecedentes	14
I.2. Observatorio	16
I.2.1. Instrumentación	18
I.3. Objetivos.....	22
I.3.1. Objetivo General	22
I.3.2. Objetivos específicos	22
I.4. Hipótesis	22
I.5. Justificación.....	23
II. Marco Teórico	24
II.1. Astronomía Observacional.....	24
II.1.1. Importancia de los sitios	24
II.1.2. Técnicas de observación	26
II.1.3. Observación de objetos del sistema solar	35
II.2. Estudios sobre asteroides	37
II.2.1. Clasificaciones	37
II.2.1.1. Tipos dinámicos	37
II.2.1.2. Tipos taxonómicos	42
II.2.2. Magnitudes	45
II.2.3. Curvas de fase	46
II.2.4. Fotometría rotacional	47
II.3. Fotometría de cuerpos menores.....	50
II.3.1. Procesamiento inicial.....	50
II.3.2. Cociente de Señal a Ruido.....	52
II.3.3. Fotometría de apertura	53
II.3.4. Fotometría diferencial	53
III. Metodología.....	55
III.1. Planeación de observaciones de cuerpos menores	55
III.2. Adquisición de datos	57
III.3. Reducción de datos	59
III.3.1. Calibración de imágenes	59

III.3.2. Obtención de curvas de luz	59
III.3.2.1. Ubicación del asteroide en el campo observado.....	59
III.3.2.2. Fotometría de apertura.....	60
III.3.2.3. Fotometría diferencial.....	63
III.3.3. Obtención de curvas de fase rotacional.....	65
III.3.4. Ajuste por mínimos cuadrados.....	67
IV. Resultados	68
IV.1. Observaciones de El Picacho.....	68
IV.1.1. Asteroide 1188 Gothlandia	68
IV.1.1.1. Comparación con la literatura.....	69
IV.1.2. Asteroide 2195 Tengstrom	71
IV.1.2.1. Comparación con la literatura.....	71
IV.2. Troyanos, colaboración FSI	74
IV.2.1. Troyano 1994 CS8.....	74
IV.2.1.2. Comparación con la literatura.....	75
V. Conclusiones.....	77
VI. Trabajos a futuro	78
Bibliografía	79
Apéndice A	84
A.1 Planeación de observaciones.....	84
A.2 Reducción de datos	85
A.2.1 Calibración de imágenes.....	85
A.2.2 Obtención de curvas de luz.....	89
A.2.3 Obtención de curvas de fase rotacional y ajuste por mínimos cuadrados	96

I. Introducción

I.1. Antecedentes

En México se ha desarrollado e impulsado el conocimiento astronómico mediante la creación de grandes observatorios. A mediados de 1967, el astrónomo Guillermo Haro, para entonces director del Instituto de Astronomía de la Universidad Autónoma de México (IA-UNAM), decidió construir un observatorio en la Sierra de San Pedro Mártir, en Baja California (Cornejo, 2014). En 1970 y 1972 se instalaron los telescopios tipo Ritchey-Chrétien de 1.5 y 0.84 m respectivamente. El espejo primario, del telescopio de 1.5 m, originalmente de aluminio, fue sustituido por un espejo de Cervit. El 17 de septiembre de 1979, se hace la inauguración oficial del Observatorio Astronómico Nacional San Pedro Mártir (OAN-SPM), con los telescopios mencionados y el telescopio Ritchey-Chrétien de 2.10 metros de diámetro en su espejo primario, el más grande del OAN-SPM (Álvarez & López, 2003). Los telescopios cuentan con instrumentos como La Cámara Infrarroja Doble (CID), Espectrógrafo Boller & Chivens, Camila, Espectrógrafo Echelle, Polima, entre otros (Observatorio Astronómico Nacional San Pedro Mártir [OAN-SPM], 2021). Actualmente el OAN-SPM se encuentra al nivel de los mejores observatorios de su clase en el mundo.

Años más tarde de la inauguración del OAN-SPM el observatorio instalado en la sierra de la Mariquita, a pocos kilómetros de Cananea, Sonora fue inaugurado oficialmente el 8 de septiembre de 1987, es nombrado Observatorio Astronómico Guillermo Haro (OA-GH) a la muerte de Guillermo Haro, en 1988. El observatorio cuenta con un telescopio Ritchey-Chrétien diseñado y construido por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) y cuyo espejo principal es de 2.12 m. Además, cuenta con dos espejos secundarios para trabajar en el visible y en el infrarrojo, y está equipado con instrumentos de cámara directa, espectrofotómetro LFOSC, espectrógrafo Boller & Chivens, y una Cámara del Infrarrojo Cercano (CANICA) (Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica [INAOE], 2009).

A lo largo de los años, en México, se ha generado un crecimiento importante en la comunidad astronómica, ejemplo de ello es su participación en diversos proyectos como lo es El Gran Telescopio Milimétrico Alfonso Serrano (GTM) (Large Millimeter Telescope, o LMT) que inició operaciones en 2011, el cual es un radiotelescopio de 50 metros de diámetro localizado en lo alto del volcán Sierra Negra (aproximadamente a 4,600 msnm), que se encuentra junto al Pico de Orizaba, el pico más alto de México, el más grande del mundo diseñado para hacer observaciones astronómicas en longitudes de onda milimétricas (0.85 – 4 mm) permitiendo estudiar los procesos de formación y evolución de estructuras como estrellas, sistemas planetarios y galaxias. El GTM es un proyecto binacional mexicano - estadounidense del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) y la Universidad de Massachusetts en Amherst. De igual manera el proyecto El Gran Telescopio Canarias (GTC), inaugurado en 2009, ha contado con la participación de México, a través del Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México (IA-UNAM) y el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) y Estados Unidos, a través de la Universidad de Florida (Moreno & Torres, 2012). El GTC es un telescopio óptico segmentado de 10.4 m de apertura y es actualmente el telescopio de apertura única más grande del mundo que estudia tránsitos planetarios, formación de estrellas y galaxias, la naturaleza de agujeros negros y eventos

muy energéticos como supernovas. Está situado a 2,396 msnm en el Observatorio del Roque de Los Muchachos, La Palma, Islas Canarias, España.

Algunos observatorios de clase mundial como lo son: el Karl G. Jansky Very Large Array (VLA), un observatorio radioastronómico situado al oeste de Socorro, Nuevo México, EEUU que consiste en un arreglo de 27 antenas móviles, cada una con un diámetro de disco de 25 metros y un peso de 209 toneladas alineadas a lo largo de tres brazos en forma de Y; El Very Long Baseline Array (VLBA) formado por un conjunto de 10 antenas de 25 metros de diámetro cada una situadas desde Hawái hasta las islas Vírgenes de Estados Unidos; el Observatorio ALMA (Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array) en Chile, el radiotelescopio más grande que existe, el cual consta de 66 antenas de siete y doce metros cuya distancia máxima entre las antenas puede ser de 150 m a 16 kilómetros; el Observatorio de Mauna Kea, un conjunto de Observatorios astronómicos situados cerca del volcán inactivo Mauna Kea, en la isla de Hawái, Estados Unidos ubicado a 4,205 msnm, incluye los telescopios óptico/infrarrojo más grandes del mundo de 10 m (los telescopios Keck), el mayor dedicado a infrarrojo de 3.8 m (el UKIRT) y el mayor telescopio submilimétrico del mundo de 15 m (el JCMT), por mencionar algunos, están muy por encima de los existentes en México. Sin embargo, aún así México ha sido capaz de incursionar en la ciencia astronómica utilizando los observatorios mexicanos y mediante colaboraciones. Además, se ha impulsado el interés por la astronomía con la creación de observatorios de divulgación, planetarios, actividades, campamentos entre otros.

Por su parte la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) fundada en 1933, ha incursionado en el desarrollo de la astrofísica y de las ciencias del espacio gracias a la colaboración con distintas instituciones nacionales e internacionales. El Centro de Investigaciones de Ciencias Físico Matemáticas (CICFM) de UANL forma parte del Proyecto Internacional de Monitoreo de Basura Espacial el cual está integrado por una Red de 25 observatorios distribuidos en más de 15 países, coordinados por el Instituto de Matemáticas Aplicadas del Instituto Keldysh de la Academia de Ciencias de Rusia y está dedicado en detectar y monitorear basura espacial, principalmente satélites de los que no están más en operación y no se sabe dónde se encuentran (Consortio Nacional de Recursos de Información Científica y Tecnológica [CONRICYT], 2017). Además, el CICFM y el OAU son sede del Laboratorio de Clima Espacial (LANCE) en colaboración con el Instituto de Geofísica de la UNAM, Unidad Michoacán (Laboratorio Nacional de Clima Espacial [LANCE], 2019).

I.2. Observatorio

La UANL también cuenta con diversos observatorios en el estado como el Observatorio Astronómico FCFM-Zuazua en Ex Hacienda San Pedro, Zuazua, el Observatorio Astronómico FCFM-Bustamante, en Museo de Historia, Bustamante y el Observatorio Astronómico FCFM-Galeana, en Ejido Corona del Rosal, Cerro el Infiernillo.

En el municipio de Iturbide N.L. localizados en medio de la Sierra Madre Oriental, se encuentran el campus ecológico Bosque Escuela a 1,600 m sobre el nivel del mar y al noroeste de la zona del campus, se encuentra el Observatorio Astronómico UANL (OA-UANL) en el Cerro El Picacho ubicado a 2,200 sobre el nivel del mar (Figura 1).

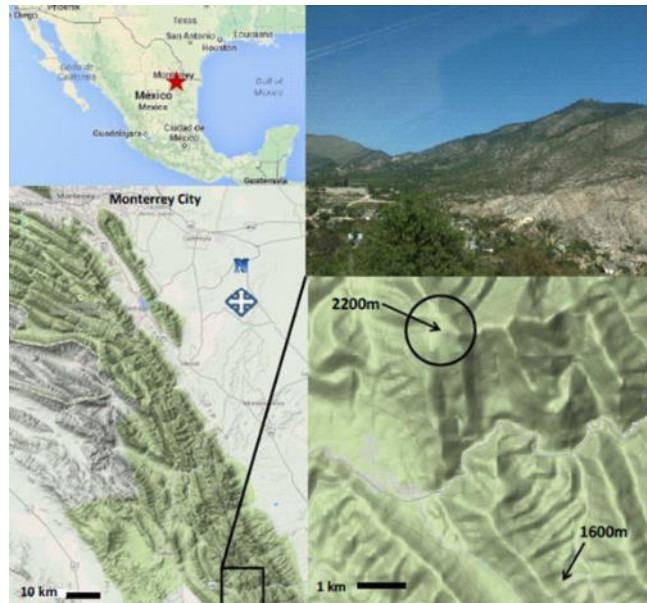


Figura 1: Ubicación del Observatorio Astronómico de UANL Monterrey-México. Arriba a la derecha: Vista actual del sitio, mostrando el pico más alto de los alrededores. Abajo a la derecha: El sitio del observatorio ubicado a 2,200 msnm (24.76° N 99.89° W), y el sitio Bosque Escuela a 1,600 msnm (24.71° N, 99.86° W) (Colin et al., 2014).



Figura 2: Observatorio Astronómico Universitario, en el Cerro El Picacho, en Iturbide, N.L.

La Figura 3 muestra el perfil de brillo de cielo nocturno representativo para todo el año 2021 en el OA-UANL. La gráfica es el resultado del promedio de perfiles que previamente han sido reducidos exentándolos de fuentes de resplandor de aire.

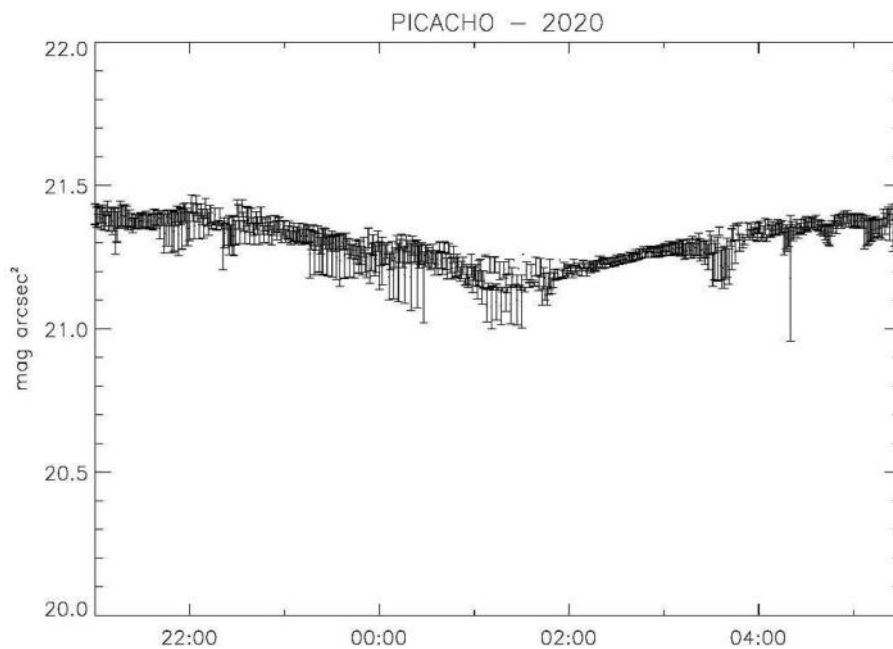


Figura 3: Perfil de brillo de cielo nocturno en el sitio “El Picacho”. Los instrumentos utilizados para realizar esta gráfica son un sensor de brillo SQM-Unihedron y una cámara Alpeha-All Sky.



Figura 4: Telescopio Tlapiani del OA-UANL.

Uno de los telescopios que alberga el OAU es el tetratelescopio Tlapiani (“guardián” en náhuatl). Tlapiani es parte de una colaboración con el Observatorio Astronómico Nacional, en Ensenada, Baja California y su construcción es también gracias a la Campaña Nacional de Monitoreo de Asteroides que surgió en 2013. El diseño y la construcción del telescopio es totalmente mexicano cuenta con tecnología 100% nacional. Es un telescopio óptico clase 1 m, que está constituido por 4 tubos de 50 cm de apertura que permitirán el estudio y monitoreo de los asteroides, así como también la observación de diversos objetos y eventos astronómicos como estrellas variables, observación de planetas, ocultaciones entre otros. Con este proyecto, México entrará en las campañas nacionales e internacionales de monitoreo de asteroides con el Observatorio Astronómico Universitario como la sede de los telescopios ópticos más grandes del noreste de México (Salazar, 2019).

I.2.1. Instrumentación

Para cumplir con los objetivos de este trabajo, se llevaron a cabo observaciones con el telescopio TPO de 16” con la montura ecuatorial Orión HDX110 EQ-G (Figura 5) y un telescopio PlaneWave de 20” con la montura 1600 GTO de Astrophysics (Figura 6). En las Tablas I y II se muestran las características de ambos telescopios.



Figura 5: Telescopio de 16'' del OAU.

Tabla I: Características del telescopio de 16'' instalado en el OAU (El Picacho).

Diseño óptico	Ritchey-Chrétien
Apertura	405 mm (16'')
Longitud focal	3250 mm
Relación focal	f/8
Poder de resolución	0.29 segundos de arco
Magnitud limitante	16.8
Diámetro del tubo	565 mm
Longitud del tubo	1114 mm

Peso del tubo	42 kg
---------------	-------

Cabe señalar que el tubo PlaneWave es idéntico a los cuatro que constituyen al tetratescopio Tlapiani, por lo cual es una medida muy similar de la capacidad óptica que tendrá Tlapiani.



Figura 6: Telescopio de 20'' del OAU.

Tabla II: Características del telescopio de 20'' instalado en el OAU (El Picacho).

Apertura	508 mm (20'')
Longitud focal	3454 mm
Relación focal	f/6.8
Longitud del montaje de tubo óptico	1194 mm
Diámetro de espejo secundario	191 mm

Diámetro de espejo primario	508 mm
Peso	63.5 kg

Para las observaciones se emplearon cámaras QHY174-GPS tipo CMOS (Figura 7). En la Tabla III, se muestran los parámetros de la cámara, así como de la óptica resultante del acoplamiento con los telescopios.



Figura 7: Cámara QHY174-GPS para uno de los telescopios del OAU.

Tabla III: Parámetros de la cámara QHY174-GPS.

Sensor CMOS	Sony IMX174
Dimensiones del sensor	11.24 x 7.03 mm (approx. 13.3 mm diagonal)
Formato pixeles	1920 x 1200
Tamaño del pixel (μm)	5.86 x 5.86
Escala de placa (arcs/pix)	0.37

I.3. Objetivos

I.3.1. Objetivo General

El objetivo general de este trabajo es la obtención de curvas de luz de asteroides desde el OA-UANL para caracterizar sus capacidades en el estudio de los cuerpos menores del sistema solar.

I.3.2. Objetivos específicos

1. Llevar a cabo observaciones de asteroides desde el sitio de observación del OAU, en Iturbide N.L.
2. Desarrollar un código para la preparación de las noches de observación, mediante la visibilidad de objetos en dichos sitios.
3. Desarrollar un código de reducción fotométrica general, que permita obtener curvas de luz con la mejor señal a ruido posible (SNR) mediante la técnica de curvas de crecimiento. Adicionalmente, este código debe permitir al usuario seleccionar los objetos a reducir, sobre todo en caso de que hayan sido obtenidos con *dithering*.
4. Evaluar las curvas de luz para calcular periodos rotacionales y generar curvas de fase rotacional de los asteroides observados y comparar con la literatura.
5. Analizar ventajas y desventajas del OA-UANL para la observación de objetos móviles. Hacer énfasis en las capacidades de seguimiento.
6. Concluir sobre la pertinencia del observatorio en relación con el proyecto de Fronteras de la Ciencia 2019: ***Descifrando las relaciones entre propiedades superficiales, rotación, fragmentación y taxonomía para Objetos Próximos a la Tierra, utilizando telescopios en el OAN-SPM y el nuevo telescopio en el OA-UANL***, para el cual el OA-UANL es un elemento indispensable.

I.4. Hipótesis

Para ser capaces de evaluar las capacidades observacionales de OAU es indispensable tomar en cuenta todos los elementos que conforman el observatorio como son: infraestructura, telescopios, instrumentos, cámaras, clima y disponibilidad. En este trabajo consideramos que la mejor manera de evaluar las capacidades observacionales del observatorio como conjunto es llevar a cabo observaciones astronómicas de cuerpos menores del sistema solar, ya que para observar este tipo de objetos fue construido el observatorio en primer lugar. Entre las propiedades físicas de asteroides que se pretenden medir fotométricamente está el periodo rotacional, por lo tanto, esperamos que las curvas de luz obtenidas sean de suficiente calidad para ajustar la fase rotacional con el periodo correspondiente.

I.5. Justificación

El estudio de los cuerpos menores del sistema solar es, dentro de la astronomía, la única ciencia que puede comprobarse *In-Situ*, debido a que es lo más lejos que puede llegar una misión espacial hasta ahora. Muchos de los resultados de técnicas observacionales y las inferencias teóricas en diferentes cuerpos del sistema solar han podido ser corroborados gracias a las visitas de sondas a los cuerpos bajo estudio. Debido a esto, se convierte en un área sumamente atractiva para entender con profundo detalle las propiedades físicas, químicas y biológicas de una gran cantidad de objetos en el sistema solar, así como los procesos que han llegado a generar dichas propiedades.

Por otro lado, la comprensión sobre la formación y evolución del sistema solar aún tiene muchas preguntas abiertas, y el estudio de los cuerpos menores es indispensable para desentrañar los misterios que encierra nuestro sistema planetario. Además, gracias a ese nuevo conocimiento se puede entender mejor las muy variadas y diferentes configuraciones de otros sistemas planetarios. Los cuerpos menores además de generar curiosidad también representan fuentes de recursos minerales para futuras misiones espaciales y peligro potencial de impacto con la Tierra. Por tales motivos vale la pena estudiarlos con el mayor detalle posible.

Este interés en los cuerpos menores del sistema solar ha sido la principal motivación de la creación del OAU en Nuevo León. La mayoría de la infraestructura está funcionando y se están llevando a cabo esfuerzos para caracterizar las condiciones del sitio. Este observatorio está constituido para funcionar además como un laboratorio, de manera que se espera el desarrollo de nuevos instrumentos y sistemas de observación en el futuro. Actualmente, se le está dando un gran impulso a la divulgación de la ciencia, mediante la aceptación de visitantes en diferentes paseos turísticos.

En cuanto al desarrollo científico del OAU, este se está impulsando mediante colaboraciones, principalmente con el Instituto de Astronomía de la UNAM, unidad Ensenada, con él ya se tienen proyectos de grupo financiados. Este trabajo de tesis está enmarcado en uno de ellos. Por tal motivo la evaluación de las capacidades observacionales del sitio se vuelve indispensable para proyectar el desarrollo de la astronomía observacional. Este trabajo constituye el primer estudio a partir de observaciones astronómicas desde el OAU y el desarrollo de las herramientas computacionales que se estarán utilizando para la reducción y análisis de los datos.

II. Marco Teórico

II.1. Astronomía Observacional

II.1.1. Importancia de los sitios

En las observaciones astronómicas que se realizan desde telescopios terrestres la calidad de las imágenes puede verse afectada, en gran medida, por distintos factores como la localización del sitio, las condiciones de cielo, clima, etc., es por esto por lo que la caracterización del sitio es esencial para poder determinar qué tanto se puede observar y cuál podría ser la calidad de las observaciones.

La magnitud límite designa al objeto más tenue que es visible a simple vista o con algún instrumento de observación como un telescopio. La magnitud límite de un telescopio depende principalmente del sistema óptico (telescopio + cámara) y de los factores que se imponen por la calidad del cielo como la contaminación lumínica y las condiciones atmosféricas.

La contaminación lumínica es inducida por agentes de luz artificial como lo son el alumbrado público, la industria, luces de casas, edificios, vehículos o por la luz de la luna. La luz de las ciudades cercanas se refleja en el cielo, haciendo que el cielo parezca brillar. Cuanto más brillante es este resplandor, aumenta la cantidad de luz de fondo detectada por los telescopios haciendo más difícil el ver objetos astronómicos débiles. Otra de las causas que pueden afectar la calidad de imagen es la pérdida de transparencia atmosférica debido a la presencia de nubes, neblina y/o polvo que provoca absorción o dispersión (extinción) de la luz. La cantidad de extinción depende del camino que recorra la luz a través de la atmósfera. Por tanto, el grado de extinción va a depender de la altitud o del ángulo del objeto sobre el horizonte; la mínima pérdida de luz para cualquier sitio de observación ocurre cuando el objeto se encuentra en el cenit, así como de las condiciones locales de la atmósfera en el momento de la observación. Por otra parte, existen regiones de aire en constante movimiento que varían en temperatura y densidad lo que produce variaciones en el índice de refracción afectando a la luz que se propaga a través de la atmósfera. Como resultado de las pequeñas diferencias de refracción que se introducen, los frentes de onda planos, provenientes de objetos lejanos, llegan distorsionados (Figura 8 (a)). Esto se conoce como turbulencia atmosférica o "*seeing*", usualmente se mide en segundos de arco (" $''$ "), y es uno de los principales problemas al momento de realizar observaciones ya que ocasiona desviaciones al llegar a los telescopios (Figura 8 (b)) y fluctuaciones de intensidad (titilación o centelleo), lo cual limita la resolución de estos y produce la degradación de las imágenes haciendo que aparezcan difusas y borrosas. Un buen sitio tendría un porcentaje alto de noches en el año en las cuales el *seeing* llegue a ser igual o menor a un segundo de arco (Roy & Clarke, 1998).

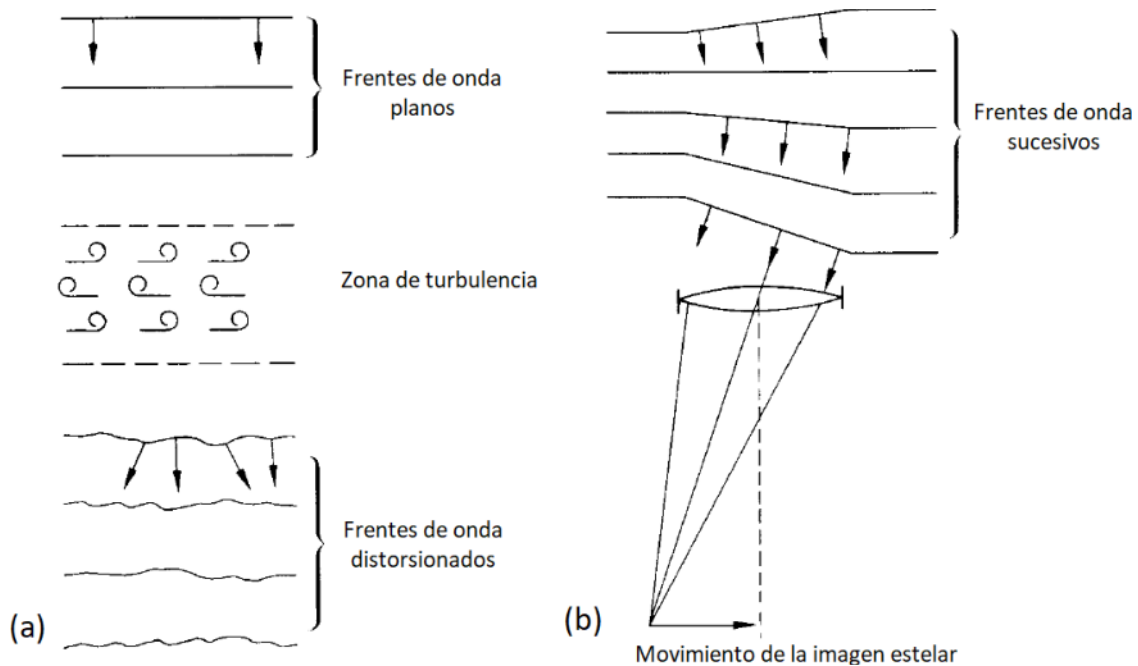


Figura 8: Esquema del efecto de la turbulencia atmosférica en la generación de imágenes astronómicas. (a) El efecto de la turbulencia atmosférica. (b) El efecto de movimiento de la imagen de una estrella vista con un telescopio pequeño (Roy & Clarke, 2003).

Para mejorar de manera significativa las observaciones, la selección de un sitio de observación depende de una serie de consideraciones. El clima es importante, sin embargo, el cielo despejado no es suficiente. Por esta razón, los observatorios astronómicos son ubicados convenientemente en lugares con altitudes de aproximadamente 2,000 m sobre el nivel del mar (msnm), lo que permite estar por encima de una cantidad significativa de vapor de agua atmosférico que puede atenuar las señales, tener poca contaminación lumínica y que el espesor del aire a través del cual se observa se reduzca, lo que permitiría que las capas que presentan más turbulencias se encuentren por debajo de la altitud del observatorio, mejorando así el *seeing*. Algunos de los mejores sitios astronómicos se encuentran en pequeñas islas en medio de los océanos debido a que la atmósfera sobre el mar tiende a ser menos turbulenta que la atmósfera sobre la tierra donde el aire sobre las nubes es muy seco o en desiertos, donde la escasez de vapor de agua y las pocas nubes proporcionan un gran número de noches despejadas. También la mayoría de los observatorios suelen estar por encima de la capa de inversión local en la atmósfera, lo que significa que la formación de nubes locales se produce debajo del telescopio. De esta manera se aumenta significativamente el número de noches útiles para las observaciones en comparación con un telescopio ubicado a bajas altitudes. Los dos mejores sitios para observación astronómica desde tierra están ubicados en Hawái y Chile (Figura 9).

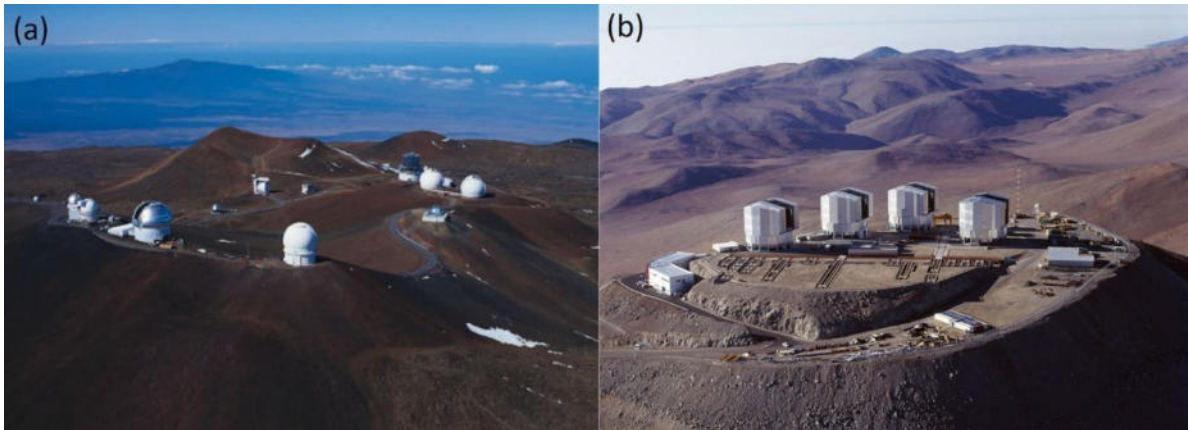


Figura 9: (a) Observatorios de Mauna Kea, isla de Hawái a 4,205 msnm (Wainscoat, 1998); (b) Observatorio Paranal, desierto de Atacama, Chile a 2,635 msnm (ESO, 2009).

La visibilidad a menudo varía según las condiciones locales, según el flujo de aire y el terreno. La calidad promedio de las observaciones depende fuertemente de las propiedades de un telescopio y su cámara, algo que no se ve afectado directamente por el sitio del observatorio. Sin embargo, la calidad de estas también está estrechamente relacionada con las condiciones ambientales del sitio. Debido a que estas condiciones pueden cambiar drásticamente según la ubicación geográfica, antes de que se construya un observatorio óptico se requiere la categorización y posterior clasificación de ubicaciones al planificar la construcción de un observatorio realizando pruebas visuales y observaciones de prueba a lo largo de varios años para tener en cuenta todos los factores que puedan afectar las condiciones del lugar lo cual es de suma importancia debido a que de esto dependerá la calidad de los datos que se deseen obtener.

II.1.2. Técnicas de observación

Es posible estudiar la naturaleza y propiedades físicas de objetos astronómicos a partir de la radiación electromagnética que emiten, utilizando la instrumentación necesaria en los telescopios, dependiendo el tipo de estudio que queremos realizar, se pueden aplicar una serie de técnicas con las que se miden diferentes propiedades de la luz como: cantidad de fotones, espectro y polarización. A partir de estas mediciones se infieren propiedades y/o procesos físicos de los objetos que emiten la radiación. Según la propiedad de radiación que se pretende medir, las técnicas observacionales se conocen como: fotometría, espectroscopía y polarimetría.

Fotometría: El objetivo es medir el brillo proveniente de algún objeto astronómico. Cuando se habla de brillo, en realidad se hace referencia al flujo de energía, f , que es la energía por unidad de área por unidad de tiempo recibida de dicho objeto. Sin embargo, el flujo de energía que se observa no es exactamente igual al que se ha emitido, antes ha tenido que atravesar ciertos medios para finalmente dejar una señal en el detector, por esto es necesario el uso de sistemas fotométricos para medir el flujo relativo del astro. Dichos sistemas son un conjunto de rangos de longitud de onda o bandas espectrales las cuales son implementadas a partir del uso de filtros, que se utilizan para permitir que sólo una determinada banda de longitud de onda ingrese al detector.

Uno de los sistemas de magnitudes multicolores utilizados ampliamente en fotometría fotoeléctrica es el sistema UBV desarrollado a principios de la década de 1950 por Harold L. Johnson y William W. Morgan. Las magnitudes se miden a través de tres filtros, U = ultravioleta, B = azul y V = visual. Las magnitudes observadas a través de estos filtros se denominan magnitudes U, B y V, respectivamente. El sistema UBV se amplió posteriormente añadiendo más bandas. Un sistema comúnmente utilizado es el sistema de Johnson-Cousins UBVRI de cinco colores, que incluye filtros R=rojo e I=infrarrojos. Este sistema usa fotomultiplicadores que permite definir las bandas espectrales mediante diferentes combinaciones de filtros. Cambiando filtros se pueden medir, por ejemplo, las magnitudes U, B y V de una estrella, una tras otra (Karttunen et al., 2007). La figura 10 muestra la transmitancia en función de la longitud de onda de cada filtro. En fotometría, se denomina “índice de color” o simplemente “color” al valor numérico que define las características espectrales de la luz que recibimos de un objeto. Se obtiene por la diferencia entre dos magnitudes medidas con diferentes filtros. Restando la magnitud B de U se obtiene el índice de color U-B, y así sucesivamente.

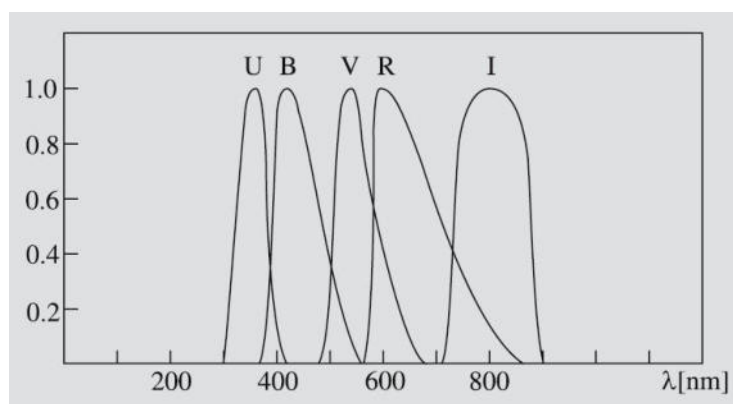


Figura 10: Perfiles de transmisión relativa de filtros utilizados en el sistema de magnitud UBVRI. Los máximos de las bandas se normalizan a la unidad. Las bandas R e I se basan en el sistema de Johnson, Cousins y Glass, que incluye también las bandas infrarrojas J, H, K, L y M. Las bandas R e I utilizadas anteriormente difieren considerablemente de estas (Karttunen et al., 2007).

Cuando se realizan observaciones fotométricas, generalmente se compara el brillo de la estrella en estudio con el brillo de las estrellas cuyas propiedades ya se han estudiado. Estos sistemas fotométricos tienen que estar definidos con ayuda de observaciones de estrellas en esas bandas de manera que se establece una lista de magnitudes estándar para un conjunto de estrellas que sirven de referencia. Los instrumentos se pueden calibrar observando algunas estrellas estándar, cuyo brillo se conoce con mucha precisión (Karttunen et al., 2007).

El uso de los fotómetros fotoeléctricos como instrumentos para este tipo de observaciones representó un gran avance en cuanto a la sensibilidad de los instrumentos permitiendo medir y observar objetos más débiles, contando con una célula fotoeléctrica o fotomultiplicador como detector. Este dispositivo electrónico transforma los fotones incidentes en corriente eléctrica que puede ser medida con precisión (Zamorano, 2020). Sin embargo, en la actualidad la fotometría con cámaras CCD (Couple-Charge Device o dispositivo de carga acoplada) ha desplazado a la fotometría fotoeléctrica. Estos detectores constan de una superficie formada por diodos de silicio sensibles a la luz, dispuestos en una matriz rectangular de elementos de imagen o píxeles que captan la luz y generan carga electrónica para formar una imagen digital (Figura 11). Normalmente hay más de 1 millón de píxeles (1000 x 1000) en los CCD astronómicos (Kutner, 2003).

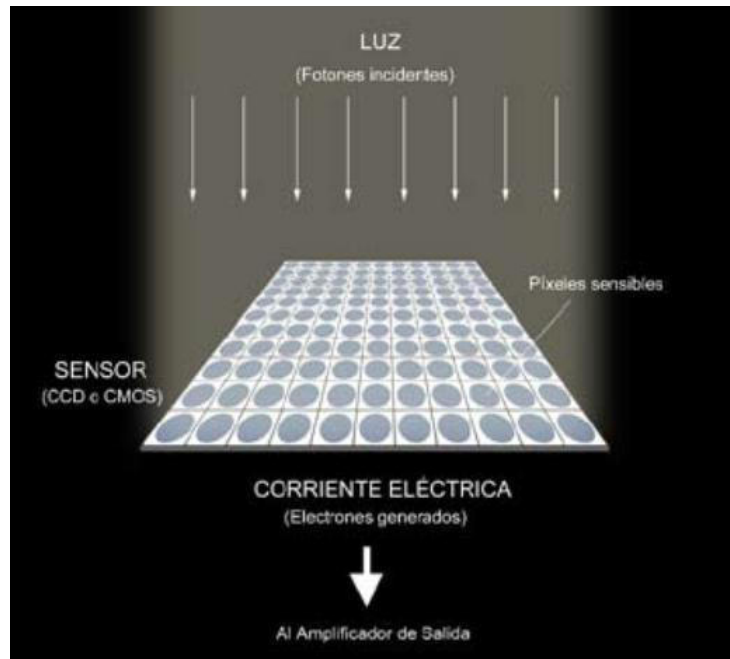


Figura 11: Esquema de detección de luz de un CCD. La luz incide sobre píxeles en el sensor CCD para luego formar una imagen digital (Barrios, 2019).

El funcionamiento principal del sensor CCD (Figura 12) está basado en el efecto fotoeléctrico libera electrones en el momento en que la radiación incide sobre el cristal del silicio. Cuando los fotones que inciden generan los electrones cada píxel colecta las cargas. Después de que una exposición es completada, el sensor es leído columna por columna y un pequeño voltaje análogo asociado con cada píxel es transformado a un valor digital por un convertidor analógico digital (A/D) que transmite el valor digital a una computadora (Fontalvo et al., 2006).

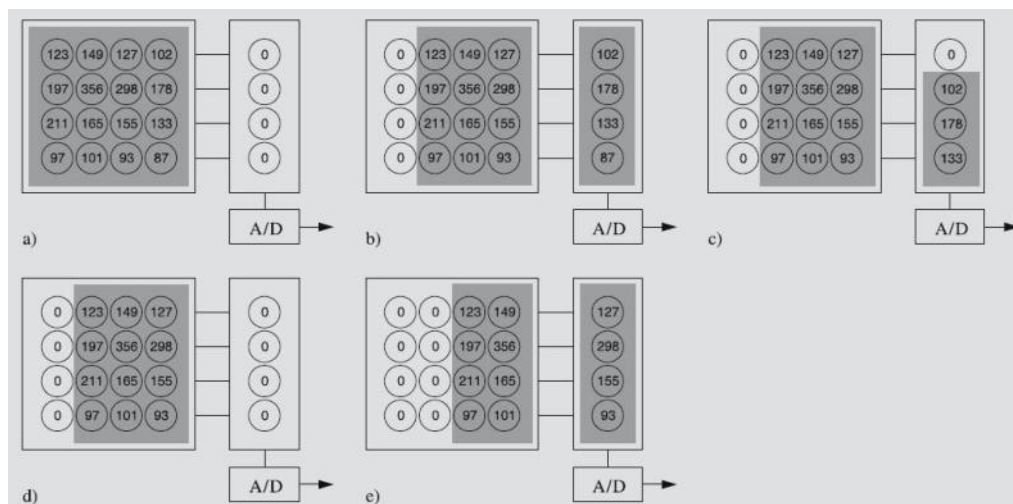


Figura 12: El principio de lectura de una cámara CCD. (a) Durante una exposición, los electrones quedan atrapados en pozos potenciales correspondientes a los píxeles de la cámara. El número de cada píxel muestra el número de electrones. (b) Después de la exposición, cada línea horizontal se mueve un píxel hacia la derecha; la fila más a la derecha se mueve al búfer de lectura. (c) El contenido del búfer se mueve hacia abajo un píxel. La carga más baja se mueve al convertidor A/D, que envía la cantidad

de electrones a la computadora. (d) Después de mover el búfer hacia abajo varias veces, se ha leído una fila vertical. (e) La imagen se desplaza de nuevo un píxel a la derecha. Este procedimiento se repite hasta que se lee toda la imagen (Karttunen et al., 2007).

La mayoría de las cámaras CCD ofrecen la posibilidad de incorporarles diferentes tipos de filtros entre el telescopio y el sensor. Esto permite medir el espectro de una fuente de puntos bien definidos, proporcionando una mayor información sobre el tipo de emisión recibida. En un sentido, se podría entender la fotometría con filtros como una forma de espectroscopía de muy baja resolución (Zamorano et al., 2020). Actualmente el Observatorio Astronómico Nacional San Pedro Mártir, tiene como uso exclusivo el sistema de ruedas de filtros italiana llamado “Rueda Italiana” que cuenta con dos ruedas de filtros, una con diez posiciones y otra con nueve. Dichos filtros se mantienen fijos. Además, cuenta con el sistema de ruedas de filtros “Mexman”, el cual puede ser utilizado en los telescopios de 2.1 m y 0.84 m (Figura 13). Este sistema cuenta con dos ruedas de filtros con 8 posiciones cada una, pudiéndose usar 14 filtros en total (con dos posiciones normalmente vacías) y puede ser controlado desde una computadora (OAN-SPM, 2021).

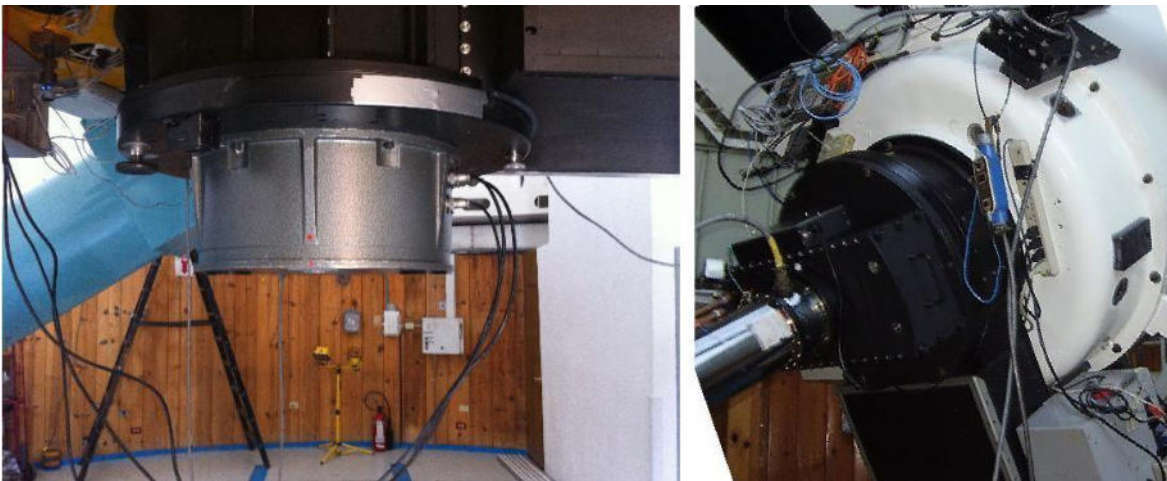


Figura 13: Instrumentos de imagen directa del OAN-SPM. Izquierda: Rueda de filtros *Italiana*. Derecha: Rueda de filtros Mexman (OAN-SPM, 2021).

La combinación de observaciones en diferentes bandas fotométricas ayuda a determinar las propiedades de los objetos celestes que se están observando. Con los datos de magnitudes y colores se puede, por ejemplo, clasificar las estrellas. Midiendo y graficando las variaciones de la magnitud a lo largo del tiempo se puede obtener una curva de luz, lo cual es común para una variedad de objetos celestes y fenómenos astronómicos, como asteroides, tránsitos planetarios, estrellas eclipsantes binarias y variables. Las curvas de luz producen formas distintivas que se utilizan para determinar propiedades de los objetos (Figura 14).

En el caso particular de asteroides la fotometría permite generar curvas de luz y de fase para estudiar propiedades físicas y superficiales como: periodos de rotación, formas y tamaños; además de mineralogía y orografía. Cuando se hacen observaciones simultáneas en diferentes filtros se pueden obtener diferentes puntos dentro de la banda espectral de resonancia, a esta técnica se le conoce como espectrofotometría y es ampliamente utilizada como complemento a la espectroscopía de baja resolución en clasificaciones taxonómicas (Zellner, et al., 1985).

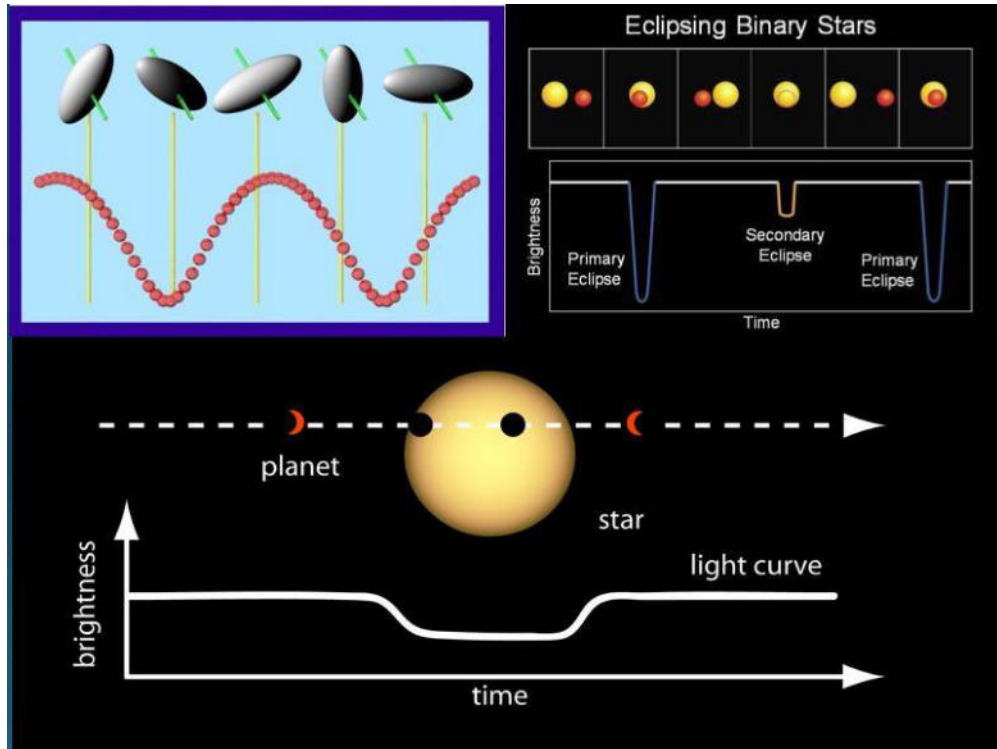


Figura 14: Curvas de luz representativas para objetos celestes. Arriba a la izquierda: curva de luz simulada de un asteroide en rotación con un cuerpo de modelo elipsoide de forma triaxial (Vargha & Kolláth, 1999); Arriba a la derecha: curva de luz para un sistema estelar binario eclipsante, utilizada para medir los radios y el período orbital de las estrellas (Johnson, 2015); Abajo: curva de luz de tránsito del exoplaneta (Johnson, 2015).

Espectroscopía: Es el estudio que determina las propiedades químicas y físicas de los objetos celestes a partir de la luz emitida, reflejada o absorbida por el objeto. A diferencia de la fotometría, la espectroscopía permite obtener mucha más información. El análisis espectral de una fuente de luz, por ejemplo, de las estrellas, permite conocer parámetros como su composición de elementos en la atmósfera, distancia a la que se encuentran, velocidad de desplazamiento con respecto al observador, temperatura, etc. Consiste en medir la intensidad de la radiación de una fuente en función de la longitud de onda. La radiación tiene que ser dispersada, esto es, separar los componentes que integran el haz de luz que se focaliza en el telescopio. Para realizar esto se hace uso de un espectrógrafo el cual es un instrumento de medición que divide o dispersa la luz de una fuente en las diferentes longitudes de onda que la componen para que pueda registrarse y luego analizarse. Su sistema dispersor es lo más importante siendo los prismas ópticos y rejillas de difracción los elementos dispersores utilizados con mayor frecuencia. Dicho instrumento es utilizado en espectroscopía para realizar análisis del tipo de espectro que emite una fuente o que es absorbida por una sustancia que se encuentra entre el camino de la luz que emite una fuente como se muestra en la Figura 15.

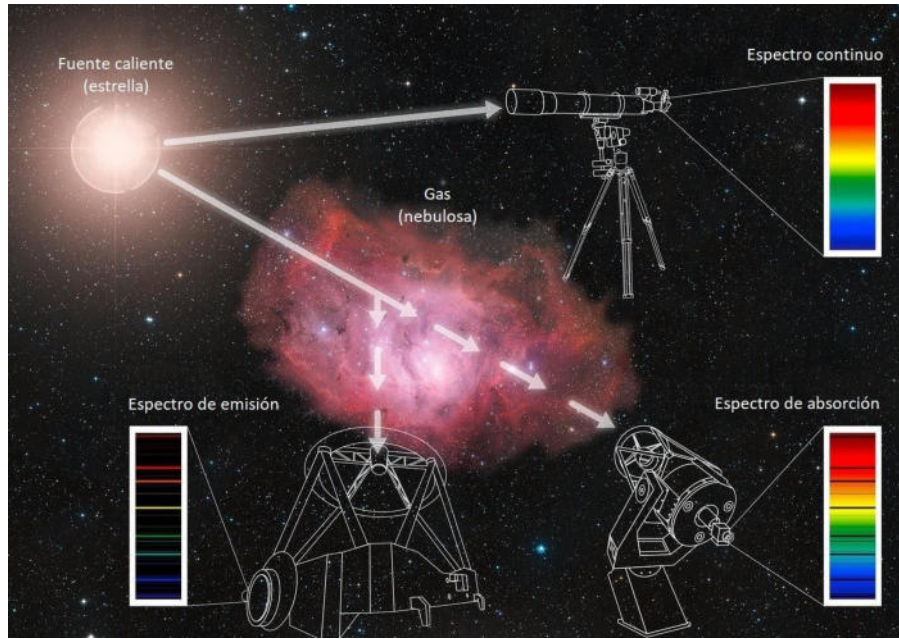


Figura 15: Una estrella emite luz en todo el espectro: un continuo. Cuando la luz blanca atraviesa un prisma, forma un arco iris, su espectro. De la misma manera, a medida que la luz de una estrella atraviesa el gas de una nebulosa (o incluso solo la atmósfera de la estrella) los colores específicos (o longitudes de onda) son absorbidos por los elementos contenidos en el gas, produciendo líneas oscuras sobre el continuo. Este es un espectro de absorción. La energía absorbida por el gas se vuelve a emitir en todas direcciones, también en los colores característicos específicos de los elementos presentes en el gas, produciendo líneas brillantes en ciertas longitudes de onda; esto se conoce como espectro de emisión (European Southern Observatory ESO, 2015).

El espectrógrafo está compuesto por una apertura de entrada el cual se ubica en el plano focal del telescopio y se utiliza para aislar la fuente astronómica, un colimador (lente o espejo) que transforma el haz de luz que sale de la ranura en un haz paralelo, un elemento dispersor (filtros, prismas o rejillas de difracción) que dispersa la luz en diferentes longitudes de onda, una lente de enfoque que genera una imagen enfocada del espectro y por último un detector (placas fotográficas o cámaras CCD) sobre el cual se forma la imagen del espectro del objeto (Hollow, 2006). La Figura 16 muestra un diagrama esquemático con los componentes clave de un espectrógrafo de hendidura.

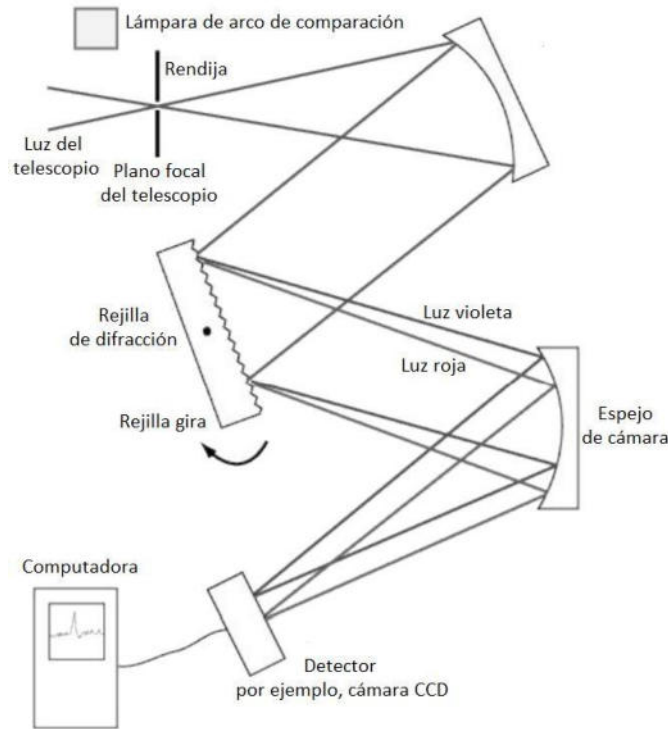


Figura 16: Diagrama de un espectrógrafo de hendidura. La rendija del espectrógrafo limita la luz que ingresa al espectrógrafo para que actúe como una fuente puntual de luz de una imagen más grande. Esto permite a un astrónomo tomar varios espectros de diferentes regiones de una fuente extendida, como una galaxia o una estrella específica en el campo de visión del telescopio. Luego, la luz se colima (se pone en paralelo) antes de golpear una rejilla de difracción. Esto dispersa la luz en longitudes de onda de componentes que luego pueden enfocarse mediante un espejo de cámara en un detector como un dispositivo de carga acoplada (CCD). Al girar la rejilla, diferentes partes del espectro disperso se pueden enfocar en la cámara. La lámpara de comparación es vital porque proporciona líneas espectrales de longitud de onda conocida (por ejemplo, sodio o neón) en reposo con respecto al espectrógrafo, lo que permite calibrar el espectro de la fuente distante y medir cualquier desplazamiento de las líneas espectrales (Hollow, 2006).

Observatorios como el OAGH en Cananea y el OAN-SPM cuentan con el Espectrógrafo Boller & Chivens y el espectrógrafo tipo Echelle. El espectrógrafo Boller & Chivens del telescopio de 2.1 m de diámetro del OAN-SPM es un instrumento para obtener espectros de rendija larga de resolución baja e intermedia a través de la utilización de diferentes rejillas de difracción como elementos dispersores mientras que el espectrógrafo Echelle es de una resolución mayor (OAN-SPM 2021), ver Figura 17.



Figura 17: Instrumentos del OAN-SPM. Derecha: Espectrógrafo Boller & Chivens. Izquierda: Espectrógrafo Echelle (OAN-SPM, 2021).

Polarimetría: Es una técnica para medir la polarización, una propiedad fundamental de la radiación electromagnética y que está fundamentalmente ligada a la geometría interna de una fuente de radiación. La polarimetría complementa los métodos de análisis basados en la fotometría, espectroscopía y de imágenes (Trippe, 2014). Provee información sobre las propiedades físicas (campos magnéticos, condiciones internas, densidades de partículas, etc.) de los objetos astronómicos.

El estado de polarización de la radiación está definido por el comportamiento del campo eléctrico. Cuando la radiación no está polarizada, la orientación del campo eléctrico no tiene una orientación preferencial, comportándose de forma aleatoria. Para la radiación polarizada, la punta del vector que representa el campo eléctrico instantáneo traza una elipse, un círculo o una línea recta, y se dice entonces que la radiación está polarizada de forma elíptica, circular o lineal, respectivamente (Figura 18), siendo la polarización elíptica el estado de polarización más general de una onda electromagnética (Hough, 2006).

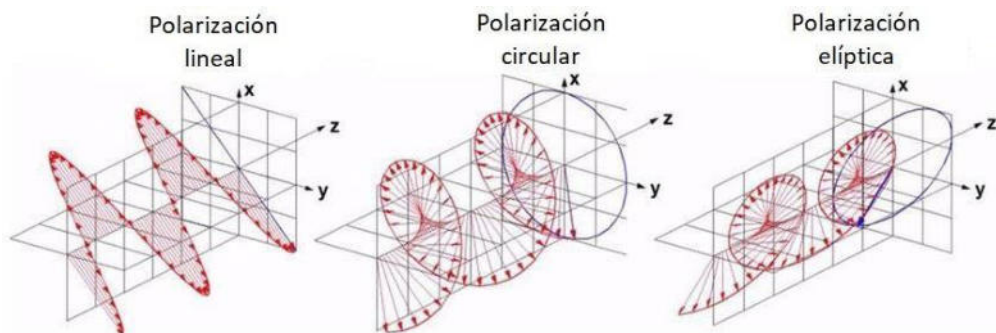


Figura 18: Tipos de polarización de la onda electromagnética: lineal, circular y elíptica (Siblini, 2017).

Para medir la polarización, un telescopio debe estar equipado con un polarizador, que es básicamente un filtro que solo permite que pase la luz con una dirección particular de polarización lineal. En un polarímetro para realizar imagen directa se añade un polarizador en la trayectoria de la luz (Hiriart et al., 2005), esto permite estudiar objetos extendidos como nebulosas, galaxias y cometas. Todos los polarímetros siguen el mismo principio básico, con un modulador de polarización seguido de un analizador, que convierte cualquier componente polarizado en una intensidad de luz que mide el detector. Para el caso de estudio de objetos puntuales, los analizadores suelen tener la forma de prismas polarizadores de doble haz, que permiten obtener una mayor precisión en la medición de la polarización al visualizar simultáneamente ambos estados de polarización ortogonal en el detector, y proporcionan el uso más eficiente de la luz incidente (Hough, 2006). La Figura 19 muestra un diagrama de un polarímetro de imagen.



Figura 19: Diagrama esquemático de un polarímetro de imagen. El primer elemento del arreglo óptico es el analizador. Luego se tiene un filtro que selecciona la componente linealmente polarizada en un cierto ancho de banda (Hiriart et al., 2005).

Como resultado se obtienen una serie de imágenes de intensidad para distintos ángulos del polarizador, sin embargo, dichas imágenes deben ser corregidas debido a que la polarización detectada puede no ser solamente de la fuente ya que los telescopios y sus instrumentos o las variaciones del cielo pueden generar cierta polarización cuando la luz pasa a través de ellos.

El OAN-SPM cuenta con un polarímetro óptico de imagen de un solo haz, llamado POLIMA y un polarímetro de doble haz, POLIMA-2 (Figura 20). POLIMA utiliza un prisma de Glan-Taylor,

ensamblado de manera que uno de los dos haces en el prisma es eliminado. El eje de polarización del prisma puede ser orientado respecto al plano de la imagen en intervalos de un grado. Además del analizador de polarización, cuenta con una rueda de filtros ópticos, y un mecanismo de movimiento. El instrumento POLIMA-2, una versión mejorada del polarímetro de imagen (POLIMA), se construyó como colaboración entre la Universidad Iberoamericana y la UNAM. En él se utiliza una placa de Savart como analizador de polarización de doble haz que permite la medición simultánea de dos estados ortogonales de polarización lineal, además cuenta con una rueda de filtros (bandas U, B, V, R, I y Halpha) (OAN-SPM, 2021).



Figura 20: Instrumentos del OAN-SPM. Derecha: POLIMA (Polarizador óptico de imagen). Izquierda: POLIMA-2 (Polarizador óptico de doble haz) (OAN-SPM, 2021).

II.1.3. Observación de objetos del sistema solar

El interés de poder observar todo el plano galáctico ha permitido la creación de observatorios en distintas partes del mundo. Existen facetas determinantes en las clasificaciones de ubicación que corresponden a los sitios seleccionados. Uno puede ser la estabilidad financiera de un país; de hecho, parece que las áreas con la mayor densidad de observatorios son regiones relativamente estables; otro factor relacionado puede ser el número de instituciones científicas o de investigación en la región; otro más puede ser la accesibilidad de la región para materiales de construcción y/o equipos de astronomía (Thorp, 2016).



Figura 21: Principales observatorios astronómicos en el mundo (Google Maps, 2021).

La Figura 21 muestra la distribución de los principales observatorios astronómicos de todo el mundo, utilizando un conjunto de datos de más de 500 observatorios terrestres. A pesar de que podría considerarse que los telescopios ubicados cerca del ecuador pueden acceder a gran parte de ambos hemisferios y podría considerarse el mejor sitio, a partir del mapa de la Figura 21 es evidente que no se cuenta con muchos observatorios en esta región. Colocar los telescopios más cerca de los polos tiene la desventaja de que el Sol nunca llega lo suficientemente por debajo del horizonte en los meses de verano como para que el cielo se vuelva realmente oscuro, aunque las noches de invierno más largas pueden ser ventajosas para ciertos proyectos astronómicos. Es importante tener telescopios en el hemisferio sur, ya que hay grandes partes del cielo que no se pueden ver desde el hemisferio norte, actualmente se encuentran observatorios distribuidos en ambos hemisferios. El cielo del hemisferio sur es posiblemente el más interesante, ya que contiene tanto el centro galáctico como las dos galaxias más cercanas a la nuestra: las Nubes Grande y Pequeña de Magallanes. El cielo del hemisferio norte se podría considerar el cielo mejor estudiado, por lo que tiende a haber más miembros de cada clase de objeto astronómico conocido en el norte.

Hoy en día los científicos han podido a observar objetos astronómicos más allá incluso del sistema solar gracias no solo a la instrumentación e implementación de distintas técnicas de observación sino también al constante desarrollo de infraestructuras alrededor del planeta, que facilitan el estudio de estos objetos y aumentan la utilidad de las observaciones.

Con lo dicho anteriormente se pudiera pensar que existe suficiente infraestructura para estudiar, con tantos observatorios, de manera muy exhaustiva todos los objetos del sistema solar. Sin embargo, esto no es así debido principalmente a que la mayoría de los observatorios con telescopios grandes está dedicado al estudio de cielo profundo, por lo que la ciencia sobre el sistema solar ha quedado relegada a telescopios pequeños, de clase 2 m hacia abajo. Otro factor es que, en algunos casos como, los observatorios no poseen espectrógrafos de baja resolución, polarímetros o seguimiento planetario en los telescopios, limitando así la ciencia que puede hacerse con cuerpos del sistema solar.

II.2. Estudios sobre asteroides

II.2.1. Clasificaciones

II.2.1.1. Tipos dinámicos

Los asteroides, también denominados planetas menores, son cuerpos rocosos, que orbitan alrededor del Sol. La mayoría tienen forma irregular, aunque algunos son casi esféricos. Los asteroides pueden variar en tamaño desde unos pocos metros hasta varios cientos de kilómetros. Pueden ser sólidos o pilas de escombros y, a menudo, tienen hoyos o cráteres (Figura 22). Actualmente hay 1,113,527 asteroides conocidos (NASA, 2022).

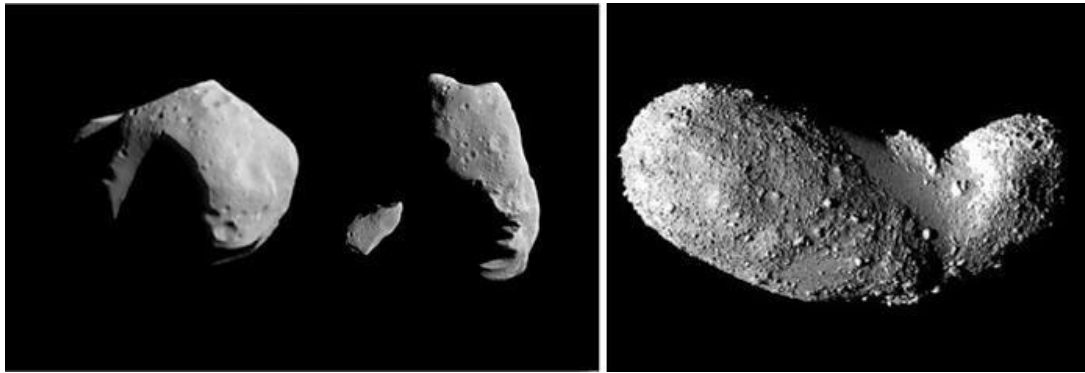


Figura 22: Derecha: Imagen de la NASA de los asteroides Mathilde, Gaspra e Ida a escala. Izquierda: Imagen del NEA 25143 Itokawa, cartografiado por la sonda Hayabusa (ISAS/JAXA) (Trigo & Madiedo, 2013).

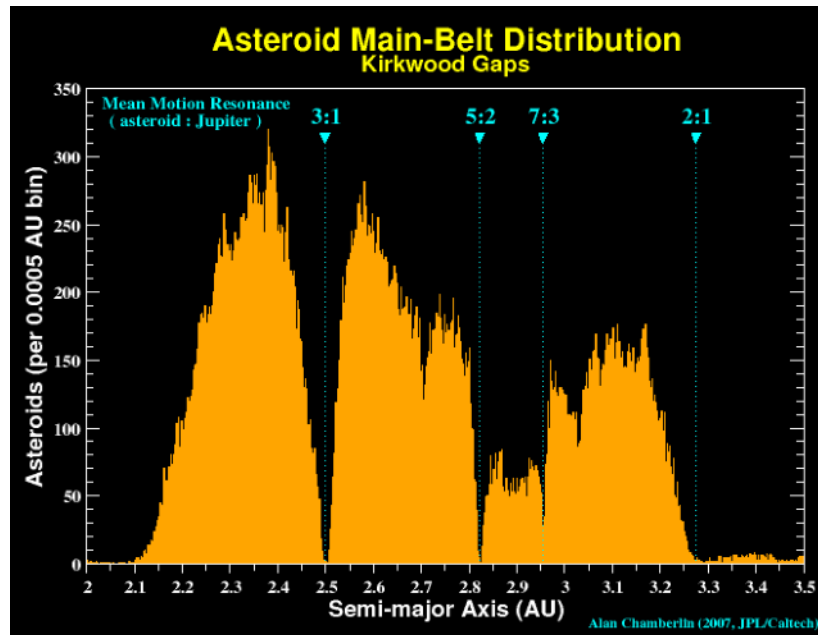


Figura 23: Distribución del cinturón principal de asteroides. Los huecos de Kirkwood son causados por resonancias de movimiento medio entre un asteroide y Júpiter. Por ejemplo, el hueco de Kirkwood de 3:1 se encuentra donde la relación entre el período orbital de un asteroide y el de Júpiter es 3/1,

es decir, el asteroide completa tres órbitas por cada una órbita de Júpiter. El efecto de estas resonancias de movimiento medio es un cambio en los elementos orbitales del asteroide (particularmente el semieje mayor) (Chamberlin, 2007).

La mayoría de los asteroides conocidos se encuentran entre las órbitas de Marte y Júpiter con distancias de 2.2 a 3.3 AU del Sol, dentro de la región conocida como cinturón principal de asteroides y la masa total del cinturón principal es menos de 1/1000 de la masa de la Tierra (Karttunen et al., 2007). La distribución de asteroides dentro del cinturón de asteroides es desigual (Figura 23); parecen haber “áreas vacías” conocidas como Huecos de Kirkwood (Kirkwood Gaps). Las áreas vacías más prominentes están a distancias donde el periodo orbital de un asteroide alrededor del Sol está en la proporción de 3:1, 5:2, 7:3 o 2:1 al período orbital de Júpiter (Gregersen, 2010).

Muchos grupos de asteroides orbitan alrededor del Sol fuera del cinturón principal. Estos incluyen los troyanos, asteroides ubicados en los puntos de Lagrange L4 y L5, 60° adelante y 60° detrás del planeta que orbitan. El grupo de troyanos mejor conocido son los Troyanos de Júpiter (Figura 24) en estos puntos un cuerpo sin masa puede permanecer estacionario con respecto a las primarias masivas (en este caso, el Sol y Júpiter).

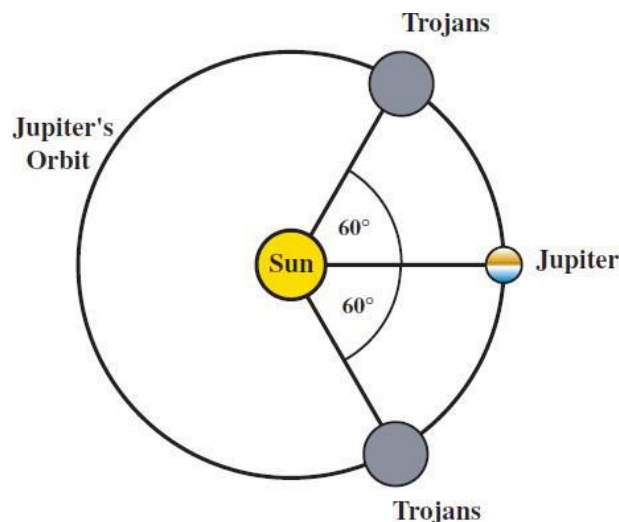


Figura 24: Ubicaciones de los troyanos, en los puntos lagrangianos L4 y L5 del sistema Júpiter-Sol (Kutner, 2003).

Los objetos cercanos a la Tierra o *Near-Earth Objects* (NEOs) son asteroides y cometas con distancias en perihelio (q) menores a 1.3 unidades astronómicas (UA) y distancias en el afelio (Q) mayores a 0.983 U.A., y cuyas órbitas se cruzan o aproximan a la órbita de la Tierra (Morbidelli et al., 2002). La gran mayoría de los NEOs son asteroides, conocidos como asteroides cercanos a la Tierra o *Near-Earth Asteroids* (NEAs)

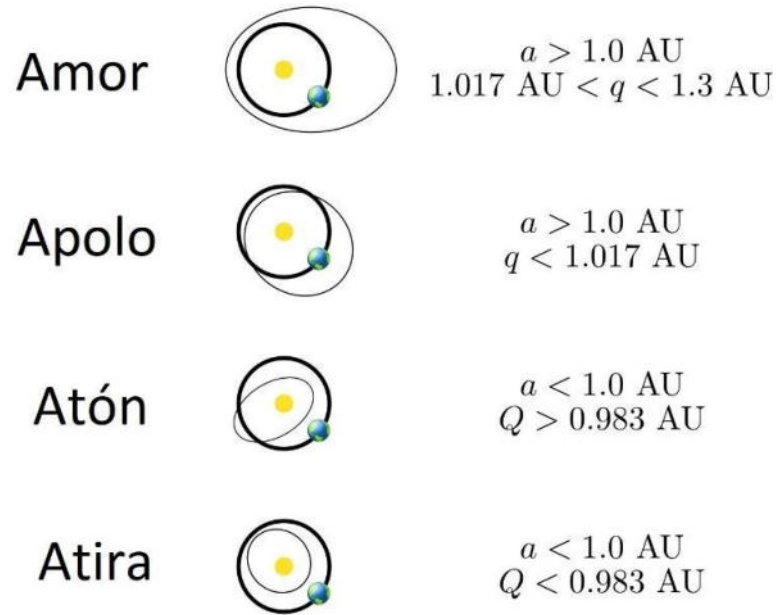
La importancia del estudio de NEAs radica en su cercanía y en que pueden convertirse en objetos peligrosos para la Tierra (PHOs), por lo cual es importante coleccionar la mayor cantidad de información sobre estos. Adicionalmente, algunos NEAs pueden ser restos relativamente inalterados del proceso de formación del sistema solar hace unos

4.600 millones de años, lo cual los hace también valiosos pues pueden contener pistas sobre la formación y evolución del sistema solar. El poder monitorearlos es, hoy en día, una necesidad para ayudar a predecir su órbita y prever algún posible impacto con la Tierra.

Los NEAs se dividen en cuatro grupos según su distancia de perihelio (q) y afelio (Q) y su semieje mayor (a): Atira, Atón, Apolo, Amor y en los asteroides potencialmente peligrosos (PHA, Potentially Hazardous Asteroids). La Tabla IV y la Figura 25 muestran las características de los NEAs.

Tabla IV: Grupos de NEAs.
(https://cneos.jpl.nasa.gov/about/neo_groups.html).

Grupo	Definición	Descripción
Amor	NEAs cuya órbita es externa a la de la Tierra e interna a la de Marte (nombrado así por el asteroide 1221 Amor). También conocidos como Objetos interiores a la Tierra (IEOs).	$a > 1.0 \text{ UA}$ $1.017 < q < 1.3 \text{ UA}$
Apolo	NEAs que cruzan la órbita de la Tierra con semieje mayor, más grande que el de la Tierra (nombrado así por el asteroide 1862 Apollo).	$a > 1.0 \text{ UA}$ $q < 1.017 \text{ UA}$
Atón	NEAs que cruzan la órbita de la Tierra con semieje mayor, menor al de la Tierra (nombrado de esta forma por el asteroide 2062 Aten)	$a < 1.0 \text{ UA}$ $Q > 0.983 \text{ UA}$
Atira	NEAs cuyas órbitas están contenidas enteramente dentro de la órbita de la Tierra. (nombrado así por el asteroide 163693 Atira).	$a < 1.0 \text{ UA}$ $Q < 0.983 \text{ UA}$
PHA	NEAs cuya distancia mínima de intersección de la órbita (MOID) con la Tierra es 0.05 UA o menos y cuya magnitud absoluta (H) es 22.0 o más brillante.	$MOID \leq 0.05 \text{ UA}$ $H \leq 22.0$



(q = distancia en perihelio, Q = distancia en afelio, a = semieje mayor)

Figura 25: Representación orbital de los diferentes grupos de NEAs.
(https://cneos.jpl.nasa.gov/about/neo_groups.html).

Los PHA para la Tierra son los de Atiras y Atón (Meunier, 2015). Estos pueden representar un gran peligro de colisionar con la superficie de la Tierra, y causar grandes daños a distintas escalas, como ha sucedido con diversos eventos de impacto. Por ejemplo, el evento Ch'ing-yang de 1490 en el que hubo una lluvia de meteoros o explosión en la atmósfera (*airburst*) ocurrida en China, en el distrito de Ch'ing-yang de la provincia de Shansi en marzo o abril de 1490 como consecuencia de la desintegración de un asteroide al explotar durante su entrada a la atmósfera terrestre. La energía liberada durante este evento es desconocida, pero de acuerdo con registros históricos chinos provocó más de 10,000 muertes. Así mismo, la gran explosión ocurrida en el bosque siberiano cerca del Río Podkamennaya Tunguska, Rusia el 30 de junio de 1908 es conocida como el evento de Tunguska el cual ha sido atribuido a un asteroide o cometa con un tamaño del orden de 50 a 190 metros de diámetro. La explosión del meteorito ocurrió a una altitud de aproximadamente 5-10 km aplanando un área de 2,150 km² de bosque (Figura 26) y se reportó que durante el suceso habrían muerto al menos dos personas. La energía de la explosión está estimada en un rango de 10-15 megatonnes de TNT esto es 1,000 veces mayor que la de la bomba atómica lanzada sobre Hiroshima, Japón en 1945, siendo así el *airburst* más potente registrado en la Tierra hasta la fecha.



Figura 26: Árboles caídos en el bosque en Tunguska después del impacto de 1908. Vastas áreas fueron arrasadas debido a la explosión. Crédito de las imágenes: Leonid Kulik (Redfern, 2013).

El meteorito de Chelyabinsk fue un meteorito brillante que entró a la atmósfera de la Tierra sobre Rusia el 15 de febrero de 2013. Fue causado por un asteroide de aproximadamente 20 m, con una masa inicial de entre 12,000-13,000 toneladas y que ingresó con una velocidad de 60,000–69,000 km/h. Debido a su gran velocidad, el meteorito explotó en un *airburst* sobre Chelyabinsk a una altura alrededor de 20-30 km con una energía cinética total antes del impacto atmosférico de 400–500 kilotonnes de TNT. La explosión generó una nube caliente de gas y polvo, pequeños fragmentos de meteoritos, así como una onda de choque que causó daños materiales muy significativos. Cerca de 1,500 personas resultaron heridas debido a estos efectos secundarios producidos por el meteorito. A pesar de que no se reportaron muertes, el meteorito de Chelyabinsk es el único meteorito confirmado que ha ingresado a la atmósfera terrestre que ha provocado una gran cantidad de daños.



Figura 27: a) El meteorito de Chelyabinsk, Rusia atravesando el cielo. Capturado por M. Ahmetvaleev el 15 de febrero de 2013; b) Fotografía de la bola de fuego brillante generada por el meteorito. Algunos científicos creen que la luz del meteorito pudo haber sido más brillante que el Sol (Byrd, 2019).

En la Figura 28 se muestra el número acumulado de NEAs conocidos por el *Center for Near Earth Object Studies* (CNEOS) en función del tiempo. A la fecha se han descubierto un total de 27,896 NEAs, de los cuales 9,954 son mayores a 140 m (color naranja), y 885 mayores a 1 km (color rojo).

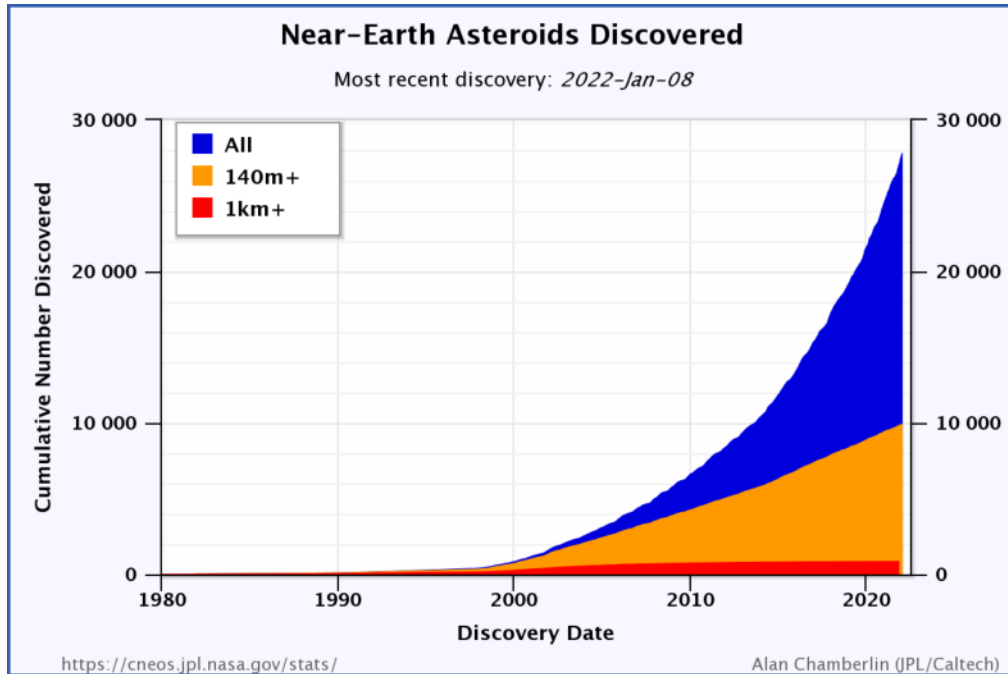


Figura 28: Asteroides Cercanos a la Tierra descubiertos. Consultado el 8 de enero de 2022 (<https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/totals.html>).

De acuerdo con CNEOS, 27 asteroides son del grupo Atira, 2,168 del grupo Atón, 15,557 del grupo Apolo y 10,122 del grupo Amor. Los PHAs son 2,247, donde 160 asteroides son mayores a 1 km.

II.2.1.2. Tipos taxonómicos

Diferentes programas de observación dedicados al estudio de asteroides han demostrado que pueden tener gran variedad en sus propiedades como tamaño, periodo rotacional, albedo, morfología, tipo espectral etc. La determinación de distintos parámetros físicos se puede obtener por medio de la técnica de fotometría mediante el análisis de curvas de luz.

Los espectros de asteroides se han clasificado y actualmente hay una gran variedad de clases de asteroides debido al uso de diferentes criterios en cada sistema de clasificación. En 1975, los astrónomos Clark R. Chapman, David Morrison, y Ben Zellner fueron los primeros en clasificar los asteroides mediante un sistema taxonómico basándose en su color, albedo y forma espectral, obteniendo así los tipo C (carbonáceos, oscuros de bajo albedo), tipo S (pétreos o “silíceos”, brillantes de alto albedo) y tipo U (no pertenecen al tipo C o S). A partir de entonces se han ido desarrollando más clasificaciones taxonómicas, de las cuales, las más usadas actualmente son:

1. La taxonomía propuesta por David J. Tholen (1984), basada en los datos del *Eight-Color Asteroid Survey* (ECAS, Zellner et al., 1985) sobre la reflectancia espectral de 589 asteroides a partir de un sistema fotométrico utilizando ocho filtros pasa-bandas en el rango de longitud de onda de 0.34-1.04 micras.

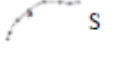
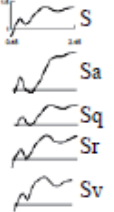
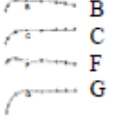
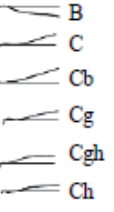

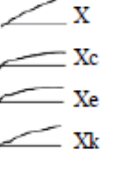
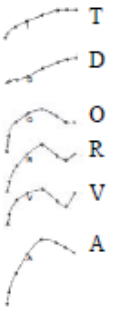
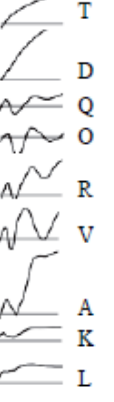
2. La clasificación desarrollada por los astrónomos Schelte Bus y Richard Binzel (2002), como resultado de los datos obtenidos de la fase II del *Small Main-belt Asteroid Spectroscopic Survey* (SMASSII) y para la cual, con el fin de extender la clasificación de Tholen para incluir características espectrales más específicas utilizaron una resolución espectral en el rango de 0.45-0.95 micras para 1,447 asteroides.
3. La clasificación taxonómica de asteroides Bus-DeMeo descrita en DeMeo et al. (2009) como una extensión de la taxonomía de Bus (1999) y la cual está basada en las características de los espectros de 371 asteroides en donde se extendió el rango espectral del visible al infrarrojo cercano de 0.45-2.45 micras.

Estas clasificaciones tienen como grupos principales los complejos S, C y X (metálicos) y cada uno de los complejos se divide en clases individuales (también llamados "tipos"). Una comparación de estas principales taxonomías se muestra en la Tabla III. La taxonomía de Tholen incluye 14 clases dentro de los grupos principales los complejos S (S), complejos C (B, C, F y G), complejos X (E, M y P) y otras clases (T, D, O, R, V y A).

El sistema de clasificación de Bus y Binzel consta de 26 clases taxonómicas. El complejo S conformado por los tipos espectrales (S, Sa, Sq, Sr, Sk y Sl), el complejo C con los tipos (B, C, Cb, Cg, Cgh y Ch), mientras que el complejo X está formado por los tipos (X, Xc, Xe y Xk) y 10 clases adicionales (T, D, Q, O, R, V, A, K, L y Ld).

Finalmente, las 24 clases de la taxonomía de Bus-DeMeo son muy similares a las de la taxonomía de Bus (Bus y Binzel, 2002). La mayoría de las clases se conservan, con una nueva clase definida (Sv) y eliminando las clases Sl, Sk y Ld.

Tabla V: Comparación y explicación de la progresión de las taxonomías espectrales. Se presenta una descripción simple de minerales y meteoritos relevantes para cada clase (DeMeo et al. 2015).

Taxonomic System	Tholen (1984)	Bus (2002)	Bus-DeMeo (2009) (B-D)	Taxonomy Notes	Relevant Minerals and Possible Meteorite Analogs
Wavelength Range	0.33–1 μm	0.45–0.90 μm	0.45–2.45 μm		
S-complex		S Sa Sq Sr Sk Sl		Tholen: Defined only S. Gaffey: 7 mineralogic classes based on Band I center and Band II/Band I area ratio. Primarily separates olivine to orthopyroxene ratio. Bus: Separates based on strength of 0.9- μm drop, indicative of 1- μm band. B-D: Definition largely preserved from Bus. Now includes full 1- and 2- μm feature in near-IR. Sl, Sk, and Ld are removed, Sv is added.	Minerals: olivine, pyroxene Meteorites: S(I): pallasites?, R chondrites, brachinites S(IV): many are ordinary-chondrite-like S(V): primitive achondrites? S(VII): basaltic achondrites
C-complex		B C Cb Cg Cgh Ch		Tholen: Primarily distinguished by the 0.3–0.5- μm UV dropoff region. Bus and B-D do not cover this region, thus do not make these distinctions. Bus: Defined by UV dropoff and/or by 0.7- μm Cgh, Ch feature. B-D: Definition largely preserved from Bus. Near-IR is largely degenerate.	Minerals: opaques, carbon, phyllosilicates, some have weak features indicating olivine, pyroxene Meteorites: carbonaceous chondrites (except CV), possibly impact melts from ordinary chondrites and HEDs?
X-complex		X Xc Xe Xk		Tholen: EMP are spectrally degenerate. Distinguished by high (E), med (M), and low (P) albedo. Bus: X class defined by shape of curve and/or 0.49- μm Xe feature. B-D: Definition largely preserved from Bus. Near-IR is largely degenerate.	Minerals: M,P: opaques, carbon, low-Fe pyroxene. E: enstatite, oldhamite Meteorites: M,P: carbonaceous chondrites (not CV). M w/high radar albedo: irons, CB chondrites, silicate-rich irons E: enstatites
Other: End members, outliers		T D O R V A K L Ld		Definitions for each of these classes are relatively consistent among taxonomies as they are each spectrally distinct.	D: opaques, organics Q: mostly LL OCs O: pyroxene, olivine R: olivine, pyroxene V: HEDs, pyroxene, plagioclase feldspar A: pallasite, brachinite, R chondrites, olivine K: CO, CV, olivine L: CAI-rich, spinel-rich

II.2.2. Magnitudes

Los astrónomos antiguos hacían estimaciones del brillo a simple vista. Hiparco y Ptolomeo, astrónomos griegos alrededor del año 150 a. C., dividieron las estrellas visibles en seis clases según su brillo. Estas clases se llamaron magnitudes, siendo las estrellas de primera magnitud ($m = 1$), las más brillantes y las estrellas de sexta magnitud ($m = 6$), las más débiles. Cuando se realizaron mediciones cuantitativas, se encontró que cada salto de una magnitud correspondía a una relación de flujo fija. Debido a esto, la escala de magnitud es esencialmente logarítmica (Kutner, 2003). Las magnitudes ahora se extienden en ambos sentidos desde los seis valores originales. Al aumentar el brillo, disminuye la magnitud.

Para los asteroides, la magnitud aparente m_v , depende de parámetros geométricos como lo son su distancia heliocéntrica r (distancia Sol-objeto), su distancia geocéntrica Δ (distancia Tierra-objeto) y el ángulo de fase α , así como de su diámetro D y albedo geométrico p_v que son propiedades físicas y ópticas del cuerpo (Ojeda, 2019). El ángulo de fase (Figura 29), se define como la separación angular entre la Tierra y el Sol, vista desde el asteroide, mientras que el albedo geométrico p_v se puede considerar como la cantidad de radiación reflejada por un cuerpo en relación con la de una superficie difusa completamente plana, conocida como superficie de Lambert, la cual es un reflector perfecto en todas las longitudes de onda (de Pater & Lassueur, 2010).

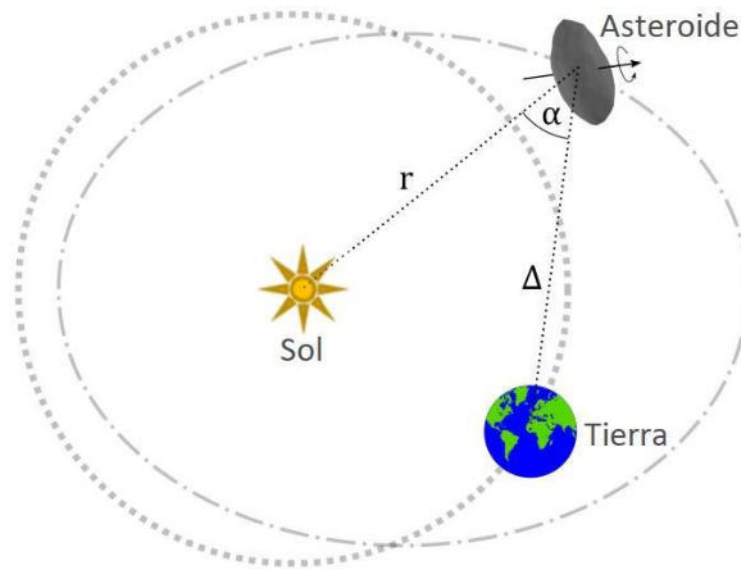


Figura 29: Representación del ángulo de fase. r y Δ corresponden a la distancia al Sol y la Tierra desde el asteroide respectivamente (Adaptado de Jackson, 2021).

La magnitud absoluta H , la cual tiene en cuenta solo las propiedades intrínsecas del cuerpo, se define como la magnitud aparente en la banda V de Johnson de un asteroide iluminado por el flujo de luz solar a una distancia de 1 unidad astronómica (UA) tanto de la Tierra como del Sol y con un ángulo de fase $\alpha = 0^\circ$. La magnitud reducida es función del ángulo de fase $V(\alpha)$ y es calculada a partir de la magnitud aparente observada como (Mahlke et al., 2021):

$$V(\alpha) = m_v + 5 \log (r\Delta) \quad (1)$$

Donde m_v es la magnitud aparente (integración de la luz reflejada; un número en el rango de 0 a 1), r es la distancia (en UA) entre el asteroide y el Sol en la época de observación y Δ la respectiva distancia entre el asteroide y la Tierra (en UA). $V(\alpha)$ se conoce como la curva de fase y, por definición $H = V(0)$. Las propiedades físicas del objeto se relacionan con H por (Mahlke et al., 2021):

$$\log_{10} D = 3.1236 - 0.2H - 0.5 \log_{10} D p_v \quad (2)$$

donde D es el diámetro del cuerpo y p_v es el albedo geométrico.

II.2.3. Curvas de fase

En una curva de fase se representa el brillo (en magnitud) de un cuerpo, como los asteroides, en función del ángulo de fase, α , al que se encuentra. Cuando el ángulo de fase es igual a cero, se dice que el asteroide se encuentra en oposición (Figura 30). En los gráficos de las curvas de fase (Figura 31) se muestra un incremento abrupto en intensidad a ángulos de fase $\Phi \leq 2^\circ$, es decir, a medida que el asteroide se acerca a la oposición, denominado *efecto de oposición* (de Pater & Lissaeur, 2010).

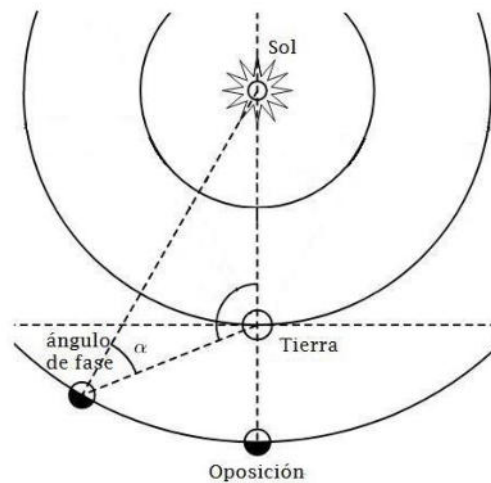


Figura 30: Esquema que muestra el ángulo de fase y la configuración de la oposición. El momento de oposición se da cuando la diferencia entre la longitud geocéntrica de dos objetos es 180° (Adaptado de Ojeda, 2019).

El efecto de oposición hace que los asteroides (u otro cuerpo, como la luna) sean más brillantes en ángulos de fase pequeños. En general, la causa del efecto se relaciona con la forma en que la luz se refleja y se dispersa cuando la fuente de iluminación es casi perpendicular a la superficie iluminada. Para obtener los mejores resultados, las curvas de luz se deben obtener cuando el asteroide se encuentra en ángulos de visión significativamente diferentes, no solo durante la oposición o la apariencia más brillante, sino para varias apariciones ya que con cada aparición el eje de giro del asteroide probablemente tenga un ángulo distinto desde la línea de visión hasta el observador (Warner, 2006). En la Figura 31a se aprecia una curva de fase que no posee un efecto de oposición evidente, lo cual sí ocurre en la 31b y 31c. Estas diferencias implican diferencias orográficas importantes entre los objetos, de lo que se infiere que los cuerpos con efecto de oposición fuerte

poseen orografías menos homogéneas que afectan la cantidad de luz que refleja en diferentes fases.

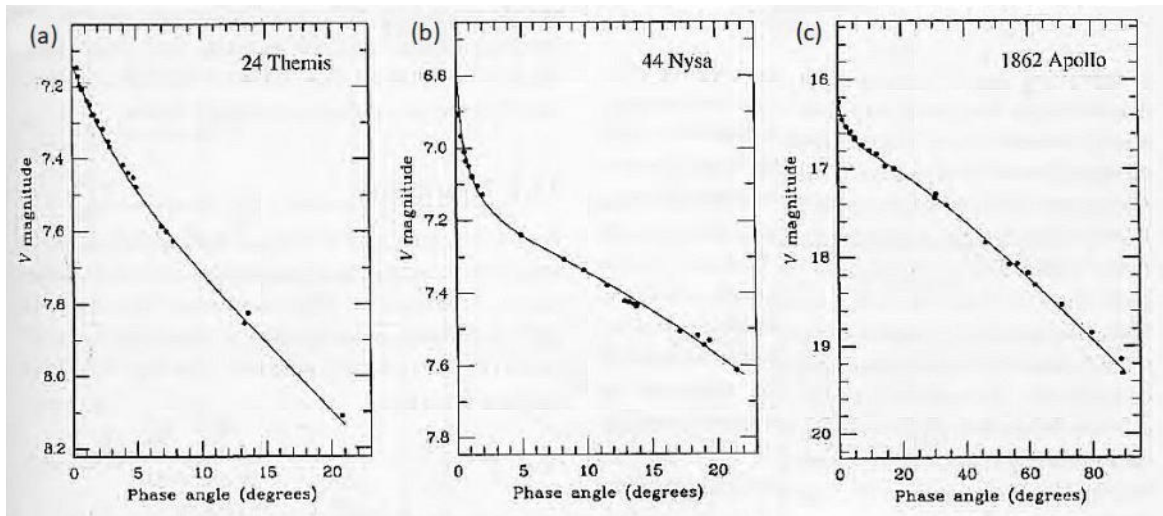


Figura 31: Magnitud del asteroide en función del ángulo de fase para 24 Themis (a), 44 Nysa (b) y 1862 Apollo (c). El efecto de oposición es visible como un aumento anómalo de intensidad cerca de $\Phi = 0$ (Adaptado de de Pater & Lissauer, 2001).

II.2.4. Fotometría rotacional

La fotometría es una técnica de conteo de fotones donde se mide el flujo o brillo de todo un objeto (de Pater & Lissauer 2010). Una curva de luz es un gráfico que presenta la información generalmente del brillo de un objeto (magnitud) o flujo contra el tiempo (Figura 32). Dado que los asteroides reflejan la luz del Sol, se puede utilizar la fotometría para su observación. Cuando se realiza fotometría con el propósito específico de obtener una curva de luz debido a la rotación de un objeto como los asteroides, para calcular la variación del brillo o cualquier otro parámetro, así como el análisis correspondiente de los datos, se denomina “fotometría de curva de luz” (Warner, 2006).

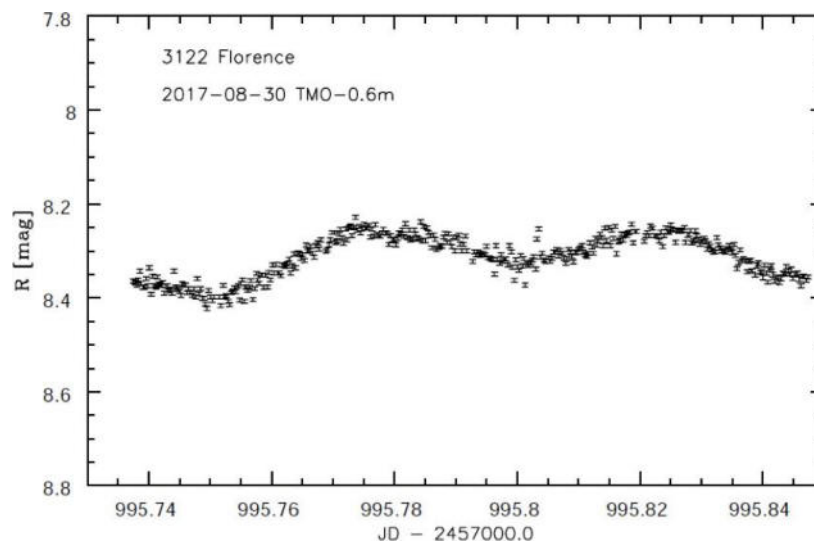


Figura 32: Curva de luz Curva de luz obtenida en el Observatorio Table Mountain de la NASA cerca de Wrightwood, CA por Michael Hicks y Bonnie Buratti el 30 de agosto de 2017 (Benner et al., 2017).

Las irregularidades en la forma del asteroide y las variaciones del albedo superficial (cantidad de luz que refleja un objeto) influenciarán el aspecto que tendrá la curva de luz (de Pater & Lissaeur, 2010) a partir de la cual se puede deducir una serie de características del asteroide. La curva de luz puede determinar el período de rotación en base a la periodicidad en sus curvas; su amplitud (diferencia pico a pico en magnitud) y sus cambios en función del ángulo de visión; la velocidad a la que gira y si gira sobre un solo eje o si está "tambaleándose". Si se obtienen numerosas curvas a lo largo de meses o años, pueden conducir a una determinación de la forma del asteroide y la orientación de su eje de giro (Warner, 2006).

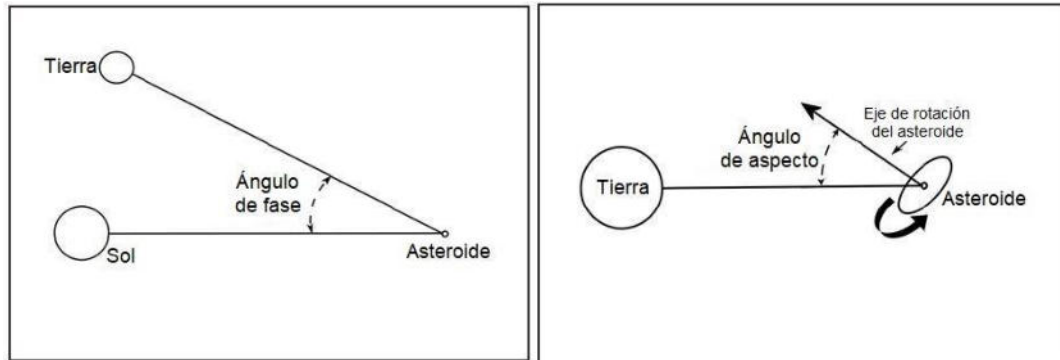


Figura 33: Izquierda: El ángulo de fase es el observado en el asteroide entre las líneas de visión de la Tierra y el Sol. Derecha: El ángulo de aspecto es el ángulo entre la línea de visión de la Tierra y el eje de rotación del asteroide (Adaptado de ASCL, 2007).

En las Figuras 34 – 36 se compara la forma y las curvas de luz para los asteroides (3908) Nyx, (5587) 1990 SB y (1580) Betulia producidas por Kaasalainen et al., (2004). Para cada figura, la fila superior es la fecha en formato de día, mes y año. En la línea inferior, el primer valor es el ángulo de fase en el que se obtuvo la curva de luz y los dos segundos valores son los ángulos de aspecto de la Tierra y el Sol (Figura 33).



(3908) Nyx

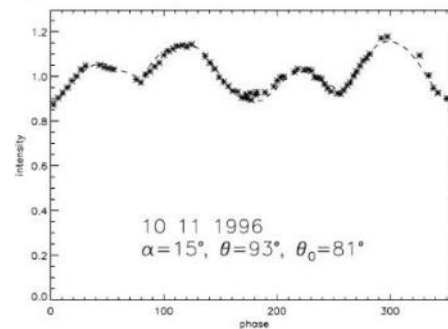
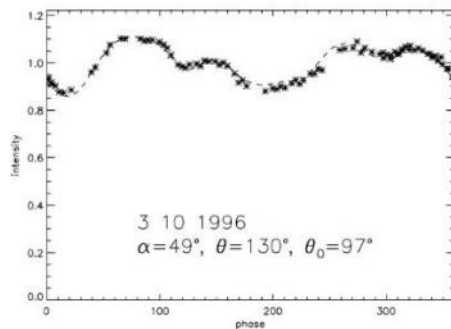


Figura 34: Modelo de la forma del asteroide (3908) Nyx (arriba) y su curva de luz (abajo).

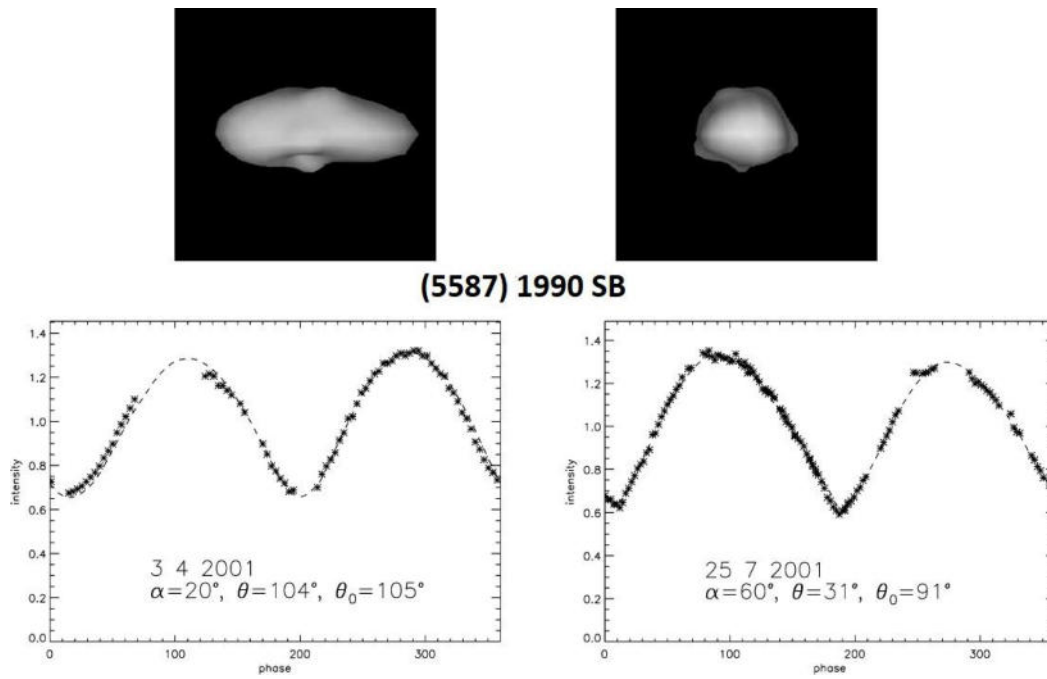


Figura 35: Modelo de la forma del asteroide (1580) Betulia (arriba) y su curva de luz (abajo).

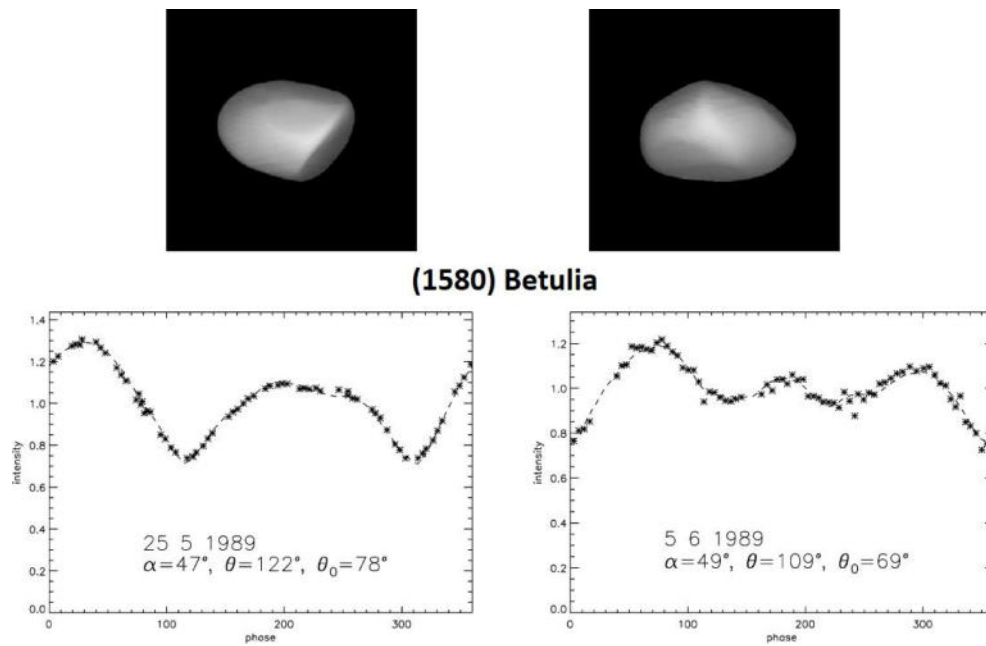


Figura 36: Modelo de la forma del asteroide (1580) Betulia (arriba) y su curva de luz (abajo).

La diferencia en la estructura y la amplitud de las curvas, de las Figuras anteriores, con diferentes ángulos de visión del eje de rotación puede coincidir con el modelo del asteroide generado. A medida que los asteroides giran, generan una curva de luz similar a la que se muestra.

II.3. Fotometría de cuerpos menores

II.3.1. Procesamiento inicial

A mayor sensibilidad de la cámara utilizada para obtener las imágenes astronómicas, se presentan mayores errores los cuales no son parte del o los objetos que realmente se estén observando.

Algunos de estos errores pueden ser:

- **Ruido térmico:** Se presenta por recalentamiento de los instrumentos ocasionando que esto genere electrones en los píxeles que no provienen de la fuente de estudio si no por efecto térmico. Por esto en las observaciones se hace un control de la temperatura de los sensores.
- **Ruido de lectura:** Puede presentarse cuando las imágenes se guardan de manera muy rápida afectando las observaciones.
- **Ruido electrónico:** Son errores generados por las características físicas propias del detector.
- **Ruido de fondo de cielo:** El cielo nocturno se encuentra iluminado por diferentes fuentes naturales o artificiales, por lo tanto, no se puede considerar completamente oscuro y esto ocasiona que señal no deseada debido a esta contribución del fondo iluminado se introduzca a las imágenes.

Para poder corregir el “ruido” generado es necesario tratar las imágenes para que puedan ser utilizadas. Para esto, es necesario generar “Masters” de calibración con imágenes “Bias”, “Flats” y “Darks” respectivamente, que permitirán convertir las imágenes astronómicas en aptas para su extracción de datos.

Las imágenes “Bias” ayudan a eliminar errores electrónicos, los “Flats” eliminan la suciedad o manchas de polvo y los “Darks” para cambios en temperatura en las imágenes.

- **Bias Frames:** A cada imagen que es tomada, se añade un ruido electrónico y de lectura que son generados por la electrónica de la misma cámara CCD. Las imágenes conocidas como “bias frames” se crean tomando una serie de imágenes con el obturador de cámara cerrado, sin exponerlo a la luz y con un tiempo de exposición cero. Con la mediana de varios “bias frames” se crea un “Master Bias” que puede sustraerse de todas las imágenes científicas para eliminar las señales o cuentas que la electrónica de la cámara, al momento de hacer la lectura del contenido, generan (Figura 37a).
- **Dark Frames:** La corriente oscura o “dark current” se produce debido al ruido térmico en el chip CCD generado por los movimientos térmicos de los electrones. Los píxeles que muestran niveles muy altos de corriente oscura (los llamados píxeles calientes) pueden controlarse enfriando los CCD. Para eliminar este ruido, se toman “dark frames”. Estas son imágenes tomadas con el obturador y domo cerrado y con tiempo de exposición similar al de las imágenes de trabajo. A cada “dark frame” se les debe restar el “Master Bias”, para luego promediarlos y crear un “Master Dark” que se puede restar de las imágenes científicas (Figura 37b).

- *Flat Frames*: Si tomamos una imagen de una fuente de luz perfectamente uniforme cada pixel tendrá un numero de cuentas diferentes debido a varios efectos que se combinan haciendo que el nivel de conteo pueda variar significativamente en la imagen como lo son, la falta o disminución de la iluminación hacia los bordes de la imagen o granos de polvo en las superficies ópticas que aparecen como donas oscuras y que bloquearán una pequeña fracción de la luz que cae sobre el sensor CCD, entre otros. Para esto, se toman “flat frames” o imágenes de campo plano que consisten en conseguir exposiciones de luz iluminando cada pixel del sensor CCD de manera uniforme mediante correcciones “dome flat” que se llevan a cabo iluminando la cúpula del telescopio o “sky flat” donde se hacen tomas del cielo ya sea durante el amanecer o el atardecer. De igual manera estas imágenes se combinan para obtener un Master Flat (Figura 37c).

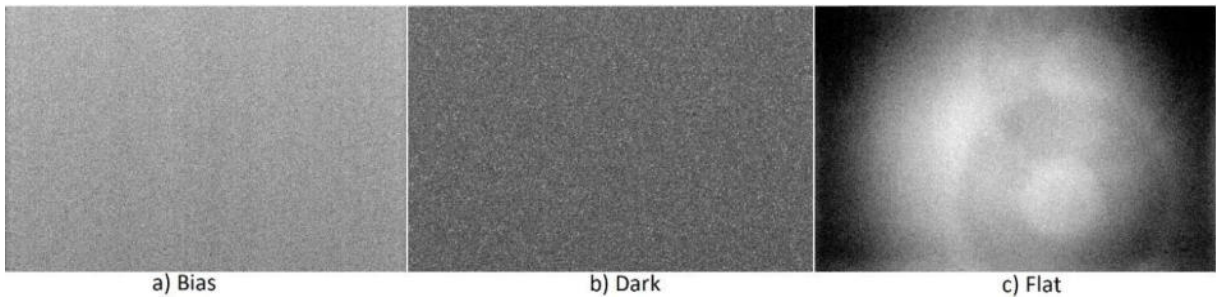


Figura 37: Imágenes de calibración. a): Imagen *Bias*. El nivel de bias en esta imagen es de 320 cuentas. Cada píxel se dispersa alrededor de este valor debido al ruido de lectura; b): Imagen Dark, con un tiempo de exposición de 300 s. El nivel medio en esta imagen es de 370 cuentas. 320 de estos cuentas son de nivel *bias* lo que da una corriente oscura de 50 cuentas; c): Una imagen Flat de cielo crepuscular. El patrón de iluminación general es el resultado del viñeteado. También se pueden ver variaciones de píxel a píxel y grandes donas de manchas de polvo desenfocadas (Adaptadas de Littlefair, 2014).

Al proceso de limpiar las imágenes de ruidos propios de la instrumentación se le conoce como calibración de imágenes, en la Figura 38 se presenta un esquema de este procedimiento.

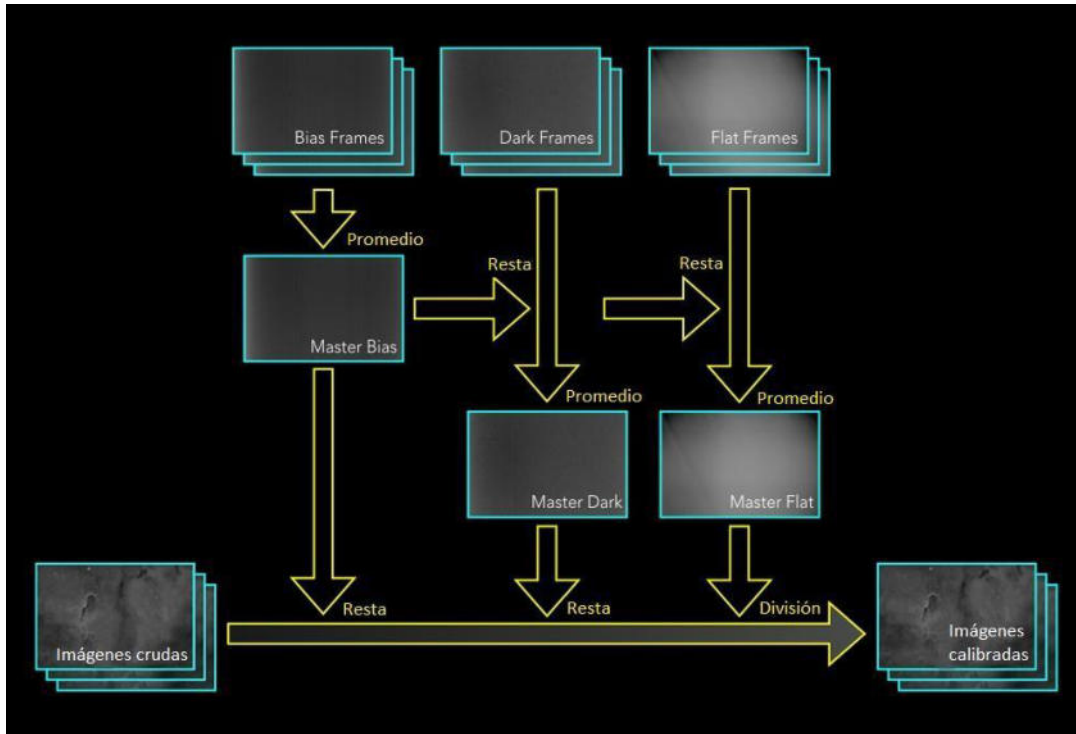


Figura 38: Esquema del proceso de calibración (Adaptado de Hergesheimer, 2019).

II.3.2. Cociente de Señal a Ruido

Para las observaciones astronómicas la señal a ruido es un término estadístico que define la relación entre la señal útil (fotones de la fuente astronómica), S , frente a la señal de ruido, N , (el fondo del cielo, el ruido inherente en el chip, etc.). La relación señal-ruido viene dada por (Littlefair, 2014):

$$SNR = S/N \quad (3)$$

Cuanto mayor sea esta relación, más fuertes serán los datos solo del objetivo y más precisas serán sus mediciones. Si medimos el flujo de una estrella con una $SNR=10$, entonces el ruido es una décima parte de la señal y la barra de error en el flujo es el 10% del flujo total. Por lo tanto, la SNR establece la precisión con la que se puede medir el flujo. Otra forma de expresar la SNR es usando N , el número de electrones recolectados (Littlefair, 2014),

$$SNR \text{ a } \sqrt{N} \quad (4)$$

El valor N no es el total de los valores de píxel aportados por el objetivo. Los valores de píxel están en ADU, unidades analógicas a digitales.

II.3.3. Fotometría de apertura

Para calcular el flujo proveniente de un objeto se puede hacer uso de la técnica conocida como fotometría de apertura. Consiste en generar una serie de ‘anillos’ alrededor del objeto: Al círculo interior se le llama *apertura* y en él se centra al objeto. La siguiente región es un *anillo* con un radio interior y exterior, definido para obtener el valor del fondo del cielo. (Figura 39).

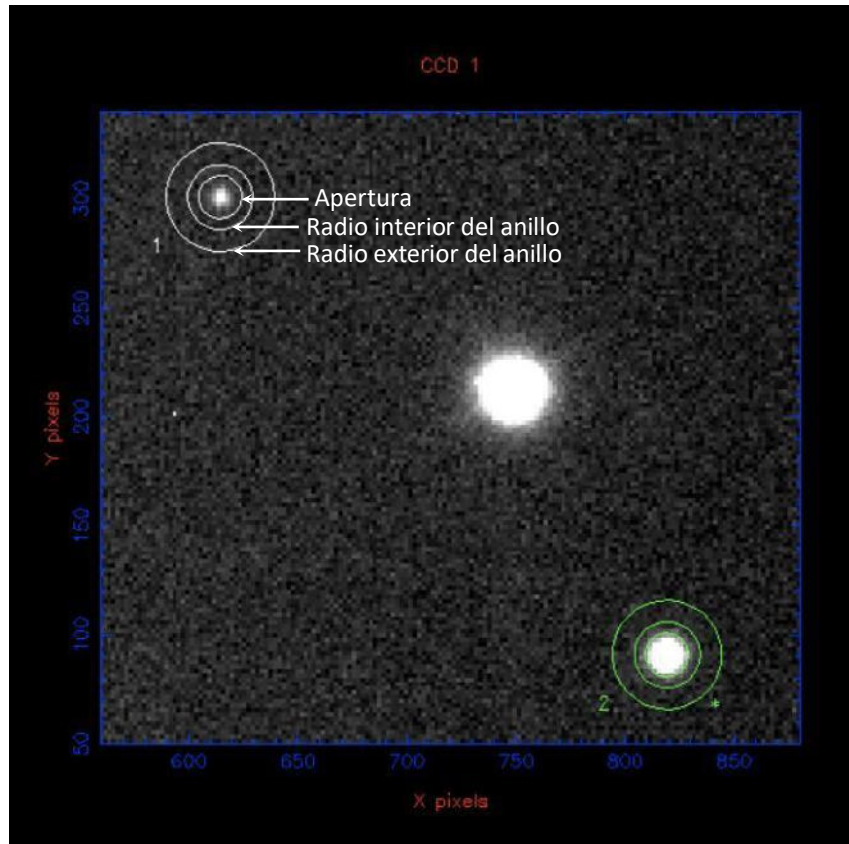


Figura 39: Fotometría de apertura de una imagen CCD. El objetivo está etiquetado como apertura 1 (en blanco). La estrella de comparación no variable está etiquetada como apertura 2 (en verde). El círculo interior define la señal total del objetivo. El anillo definido por los dos círculos exteriores se utiliza para calcular la señal del cielo. Crédito de la imagen: Vik Dhillon (Adaptada de Littlefair, 2014).

Los píxeles dentro de la apertura se utilizan para calcular la señal total del objetivo. Esto se encuentra sumando todos los valores de píxeles dentro de esta área (en realidad, la cantidad de electrones derivados de los valores de los píxeles) y luego restando el valor del fondo del cielo de cada píxel en la apertura (Warner, 2006).

II.3.4. Fotometría diferencial

Otro de los métodos utilizados en fotometría es la fotometría diferencial, que encuentra la diferencia en magnitud entre un objetivo y un conjunto de estrellas de referencia ubicadas en el mismo campo cercano, con lo que puede establecer una “magnitud normalizada” para el objetivo.

Es necesario que las estrellas de comparación y el objetivo tengan un brillo aproximadamente similar en la imagen y elegir al menos dos estrellas, esto en dado caso que alguna de ellas sea de tipo variable. La fotometría diferencial permite trabajar en condiciones de observación no tan ideales, haciendo que sea una técnica sencilla ya que, a diferencia de la fotometría absoluta, no requiere de noches “fotométricas”, es decir condiciones de observación perfecta durante toda la noche. Otra ventaja, es que puede usar solo las magnitudes instrumentales sin calibrar y hacer un análisis de los valores diferenciales (Warner, 2006).

III. Metodología

A continuación, se presenta la metodología seguida para la obtención y análisis de datos. Los códigos implementados que se mencionan se muestran en el Apéndice A.

III.1. Planeación de observaciones de cuerpos menores

La planeación de las observaciones comienza con la elección de las noches de observación. Es indispensable que estas se elijan en base a las predicciones de las condiciones climatológicas más óptimas. Una vez teniendo dichas fechas, es necesario buscar los objetos que se encuentren visibles en ese momento para realizar una lista con los posibles objetos a observar.

Para obtener esta información se emplea un código en Python, que hace uso de la librería astronómica *Astropy* así como de *Astroquery*, el cual es un paquete afiliado a *Astropy* que contiene una colección de herramientas para acceder a datos astronómicos en línea. Del módulo *Mod_QHorizons.py*, se hace uso de la función *cono_anytime()* la cual consulta el servicio de búsqueda de cono, de la clase SkyBoT del *Institute de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides (IMCCE)* y produce una tabla que contiene todos los cuerpos del Sistema Solar que podrían estar un cono definido en grados alrededor del cenit.

Los datos que recuperamos de la clase SkyBot son: Number, Name RA, DEC, V. La función *cono_anytime* es útil para hacer uso de la función *phys()* ingresando las coordenadas del lugar de observación (latitud y longitud) fecha y hora de búsqueda, así como definir los parámetros de tamaño de cono y una magnitud límite.

La función *phys()* utiliza el parámetro *phys_par* de la clase SBDB de Astropy la cual consulta el servicio JPL Small-Body Database Browser (JPLSBDB) y proporciona información detallada sobre las propiedades físicas un cuerpo pequeño conocido específico. Los parámetros recuperados son: rot_per, spec_T, spec_B y NEO.

En la Tabla VI, se describen cada uno de los parámetros obtenidos:

Tabla V: Descripción de los parámetros de la base de datos de IMCCE y JPLSBDB.

Parámetro	Descripción
'Number'	Número del objeto.
'Name'	Nombre del objeto.
'RA'	Ascensión Recta del objeto, el valor se encuentra expresado en grados.
'Dec'	Declinación del objeto, el valor se encuentra expresado en grados.
'V'	Magnitud aparente.
'rot_per'	Periodo rotacional del objeto en horas.

'spec_T'	Tipo espectral de acuerdo a la clasificación taxonómica espectral de Tholen.
'spec_B'	Tipo espectral de acuerdo con la Clasificación taxonómica espectral SMASSII (Small...
'NEO'	Especifica si el objeto está clasificado como NEO (Near Earth Asteroid).

Para la selección de objetos se define dentro de la función *phys()* una magnitud aparente límite que facilite su observación (por ejemplo $V < 15$). Una vez generada la tabla con los datos, se seleccionan los objetos con el menor periodo de rotación (por ejemplo < 6 horas) esto con el fin de poder observar un periodo completo, como prioridad.

Los asteroides seleccionados fueron 1188 Gothlandia y 2195 Tengstrom, ambos del cinturón principal de asteroides. 1188 Gothlandia fue descubierto en 1930 por Josep Comas Sola en Barcelona y el asteroide 2195 Tengstrom fue descubierto por Liisi Oterma en Turku, Finlandia en 1941. Algunos parámetros físicos de estos los asteroides se muestran en la Tabla VII.

Tabla VI: Parámetros físicos de asteroides observados (Fuente: JPL Small-Body Database Browser).

Asteroide	Magnitud absoluta (H)	Diámetro (km)	Periodo de rotación (h)
1188 Gothlandia (1930 SB)	11.61	12.670	3.4916
2195 Tengstrom (1941 SP1)	12.47	8.627	2.82112

III.2. Adquisición de datos

Habiendo elegido los asteroides a observar es necesario localizar el campo donde se encuentran a partir de sus coordenadas de ascensión recta y declinación, y de esta manera hacer la toma de las imágenes. Para esto hacemos uso de los softwares *GSServer* (Figura 40) el cual permite controlar la montura del telescopio posicionándolo en las coordenadas de RA y DEC ingresadas para cada objeto y *SharpCap* (Figura 41), para la captura de las imágenes astronómicas.



Figura 40: Captura de la pestaña principal de seguimiento de la montura del telescopio con *GSServer* ingresando las coordenadas de RA y Dec del asteroide 1188 Gothlandia.

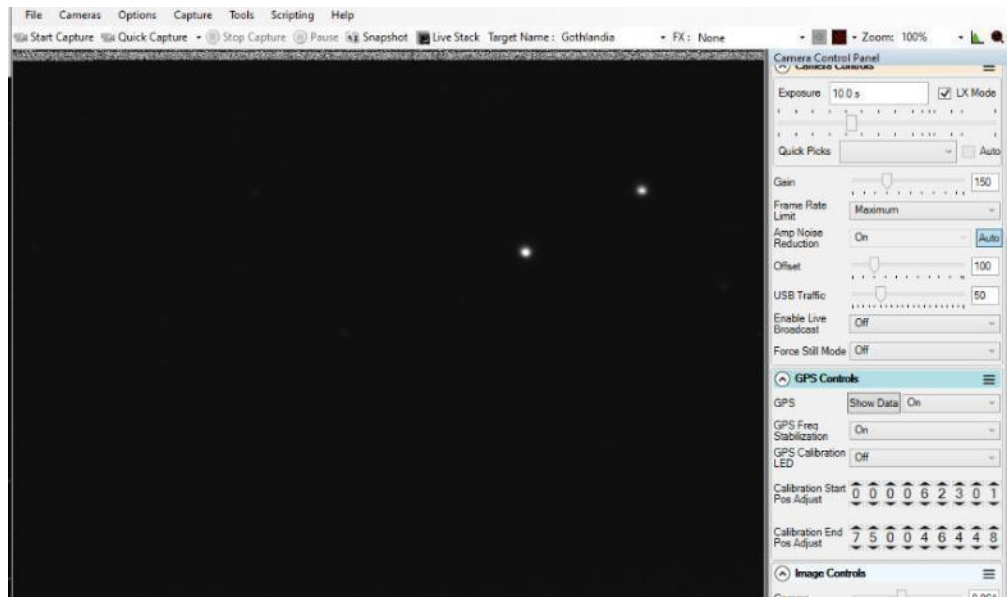


Figura 41: Captura de la pantalla principal de *SharpCap* mostrando la imagen tomada por el telescopio para las coordenadas del asteroide 1188 Gothlandia.

Una vez que el telescopio ha llegado a las coordenadas dadas, debemos saber si el campo que estamos observando en la pantalla de *SharpCap* es el correcto (Figura 41). Utilizamos entonces *AstFinder* (Figura 42), que genera la imagen del campo para un asteroide determinado en un momento específico, dando una posición de la zona en donde debería encontrarse el asteroide la noche de la observación.

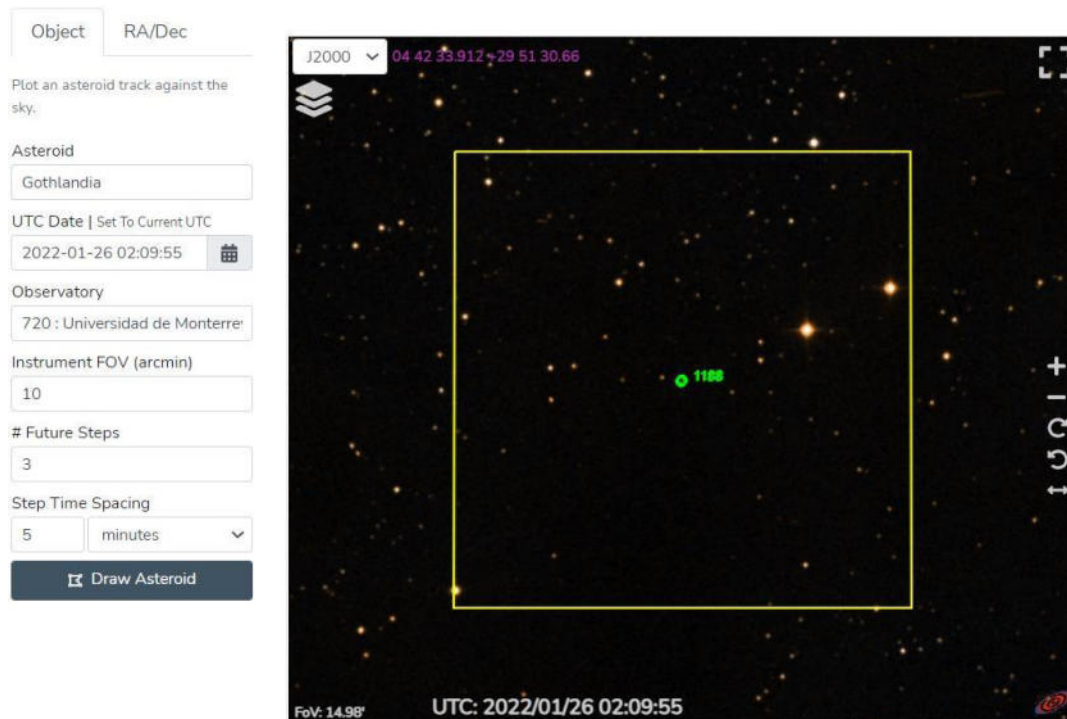


Figura 42: Ejemplo de una imagen obtenida con *AstFinder* para la posición del asteroide 1188 Gothlandia. El punto verde en el centro marca la posición del asteroide a una fecha y hora dadas (<https://asteroid.lowell.edu/astfinder/>).

Tomando como referencia las estrellas que se muestran en el campo obtenido en *AstFinder* es posible ubicar el campo correcto. Es importante mencionar que, debido a que los telescopios están instalados sobre una montura ecuatorial, la correcta alineación y la precisión en el seguimiento y apuntado juegan un papel preponderante para la ubicación del campo.

Si las estrellas que se visualizan en la imagen del campo en *SharpCap* coincide, con las que se muestran en *AstFinder*, el campo tomado es el correcto y podemos entonces identificar el asteroide para proceder con la captura de las imágenes.

Las imágenes tomadas con *SharpCap* se guardan en formato *FITS* (*Flexible Image Transport System*, por sus siglas en inglés), un formato de archivo de datos astronómicos y en el que es posible guardar información importante como metadatos en el mismo archivo respecto al nombre y coordenadas del objeto, tiempo de exposición para cada imagen, fecha y hora de la captura, nombre del observador, etc.

III.3. Reducción de datos

III.3.1. Calibración de imágenes

Como ya se ha mencionado en la sección II.3.1, las imágenes obtenidas durante la observación son imágenes en “bruto” las cuales presentan errores que necesitan ser corregidos. Esto se logra empleando el uso de dos códigos para la calibración de las imágenes minimizando así estos errores.

Para la cámara QHY174M tipo CMOS utilizada en el telescopio del OAU, antes de iniciar la calibración de imágenes por *bias*, *darks* y *flats*, se utiliza el módulo *scrub_qhy_fits.py* que permite calcular el ruido en cada uno de los renglones de la cámara por medio de las medianas y sustraerlo haciendo uso de las funciones *mad()* y *robomad()*. Una vez realizado lo anterior se procede igual que con las imágenes tomadas con cámara tipo CCD, es necesario tomar imágenes *bias* y *flats* para la creación de “masters” de calibración. Para esto, se utiliza una rutina que usa la función *reducir()* del módulo *redbasica_fot.py*. Para ambos casos es necesario ingresar como parámetros de entrada, la lista de archivos de las imágenes del objeto y para la función *reducir()* hay que agregar además la lista de imágenes *bias* y *flats*.

El resultado para ambos procesos son imágenes ya corregidas que son aptas para la extracción de la fotometría.

III.3.2. Obtención de curvas de luz

Para poder obtener curvas de luz aplicaremos las técnicas de fotometría de apertura y fotometría diferencial al asteroide y a varias estrellas de comparación.

III.3.2.1. Ubicación del asteroide en el campo observado

Para poder emplear la fotometría de apertura es necesario primero ubicar el asteroide y hacer una selección de varias estrellas de referencia.

La ubicación del asteroide se realiza visualizando las imágenes con el software *SAOImage DS9*, una aplicación de visualización de datos e imágenes astronómicas. En él es posible abrir una serie de imágenes y luego hacer un “*blink*” que permite ir mostrando todas las imágenes una a una para de esta forma detectar al asteroide, el cual, será distinguible debido a que todas las estrellas de campo quedarán quietas, mientras que el asteroide parecerá cambiar de posición moviéndose a través del campo. Como se mencionó anteriormente se puede hacer uso de la plataforma *AstFinder* de Lowell.

Con esto también fue posible hacer la selección de, al menos 3 estrellas de referencia, para las cuales se tomó a cuenta las siguientes características:

- Deben tener un brillo similar o superior al del asteroide.
- Hay que verificar en algún catalogo que no sean estrellas variables.
- Deben aparecer en todas las imágenes y estar contenidas dentro del campo observado.

En la Figura 43 se muestran como ejemplo tres de las imágenes tomadas para el asteroide 1188 Gothlandia, cada una con un tiempo de diferencia de aproximadamente 30 minutos que muestran el movimiento del asteroide y las estrellas de referencia seleccionadas.

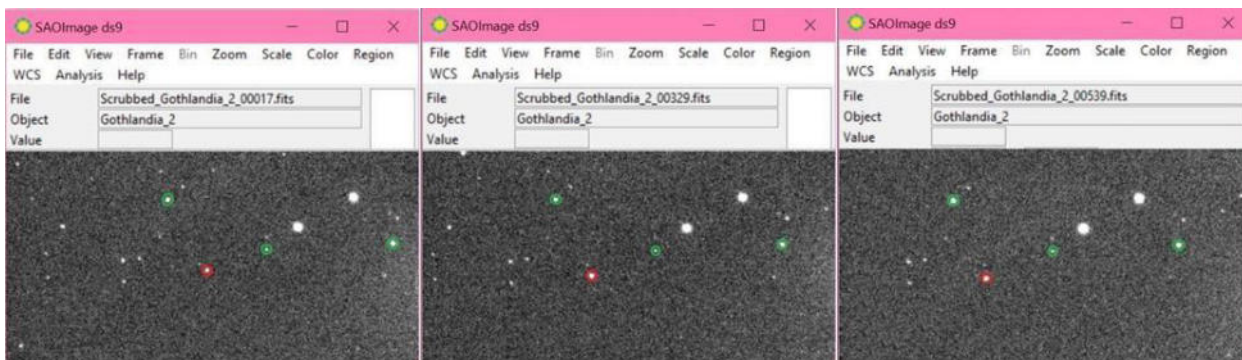


Figura 43: Secuencia de imágenes en un *blink*. El asteroide 1188 Gothlandia se ha encerrado en un círculo en color rojo mientras que las estrellas de referencia se muestran encerradas en círculos de color verde. Se puede apreciar en cada imagen como el asteroide va cambiando de posición en el campo.

II.3.2.2. Fotometría de apertura

Una vez que se han identificado tanto el objeto como las estrellas de referencia, se realiza la fotometría de apertura con el módulo de *fotometría_P.py*, el cual consiste en definir aperturas alrededor de los objetos para medir el flujo y magnitud a partir de la suma de los valores de los píxeles dentro de la apertura, así como un anillo alrededor de la apertura para estimar el valor del fondo de cielo que será luego sustraído del valor total en la apertura y de esta forma obtener solo el valor de la fuente.

En un inicio se pide introducir el nombre de la lista con las imágenes ya calibradas del objeto e ingresar el número total de objetos a seleccionar (asteroide y estrellas de referencia). Esta selección se logra con la clase *mou_clickN* que permite obtener sus coordenadas (x,y) aproximadas. Luego, la función *centro()* busca el baricentro fotométrico a partir de dichas coordenadas.

También, se pide elegir si se quiere realizar de forma manual o automatizada. Cuando se elige hacer la fotometría sin seguimiento automático, se irán mostrando una a una las imágenes y es necesario seleccionar los objetos en cada ocasión. Es posible descartar aquellas imágenes que llegaran a ser de baja calidad, donde los objetos o el campo se mueva, etc. En el caso de elegir hacerlo de manera automatizada, se muestra una imagen en la cual hay que hacer la selección de los objetos una sola vez. A diferencia de la forma manual, no es posible ir visualizando las imágenes conforme se hace la fotometría y poder descartarlas, sin embargo, se puede ingresar un límite de error en magnitud, lo cual permitirá descartar imágenes que sobrepasen este límite.

Habiendo hecho esto la función *fot()* obtiene los valores de flujo total y magnitud de los objetos en una serie de aperturas y el valor de cielo en los anillos interno y externo. Algo importante es definir cuál es la apertura correcta. Es posible definir en el código una serie de aperturas con radios cada vez mayores, y un anillo con un radio interno y externo para obtener información sobre el fondo de

cielo. La elección de la apertura más adecuada se define en función del menor error calculado para la magnitud con la mayor razón señal-ruido medida.

Al finalizar el proceso de fotometría de apertura se generan para cada objeto las curvas de luz del flujo o magnitud vs. el tiempo, en días julianos (JD, por sus siglas en inglés), sistema que, a diferencia del calendario gregoriano, representa los días y las horas como un conteo numérico continuo. Así mismo, la información obtenida se guarda en archivos para flujo y magnitud respectivamente que contienen, para cada imagen: el día juliano, el flujo o magnitud, su error y el tiempo de exposición dado a cada imagen. En las Figuras 44 y 45 se muestran las curvas de luz para los dos asteroides observados.

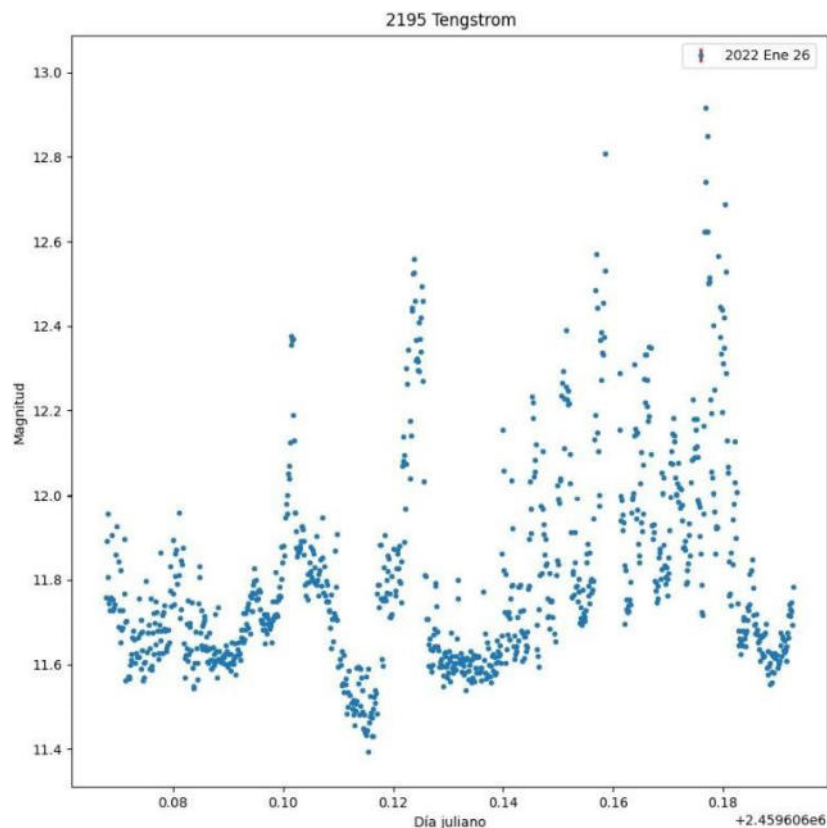


Figura 44: Curva de la magnitud vs el día juliano obtenida para 2195 Tengstrom para el día 26 de enero de 2022.

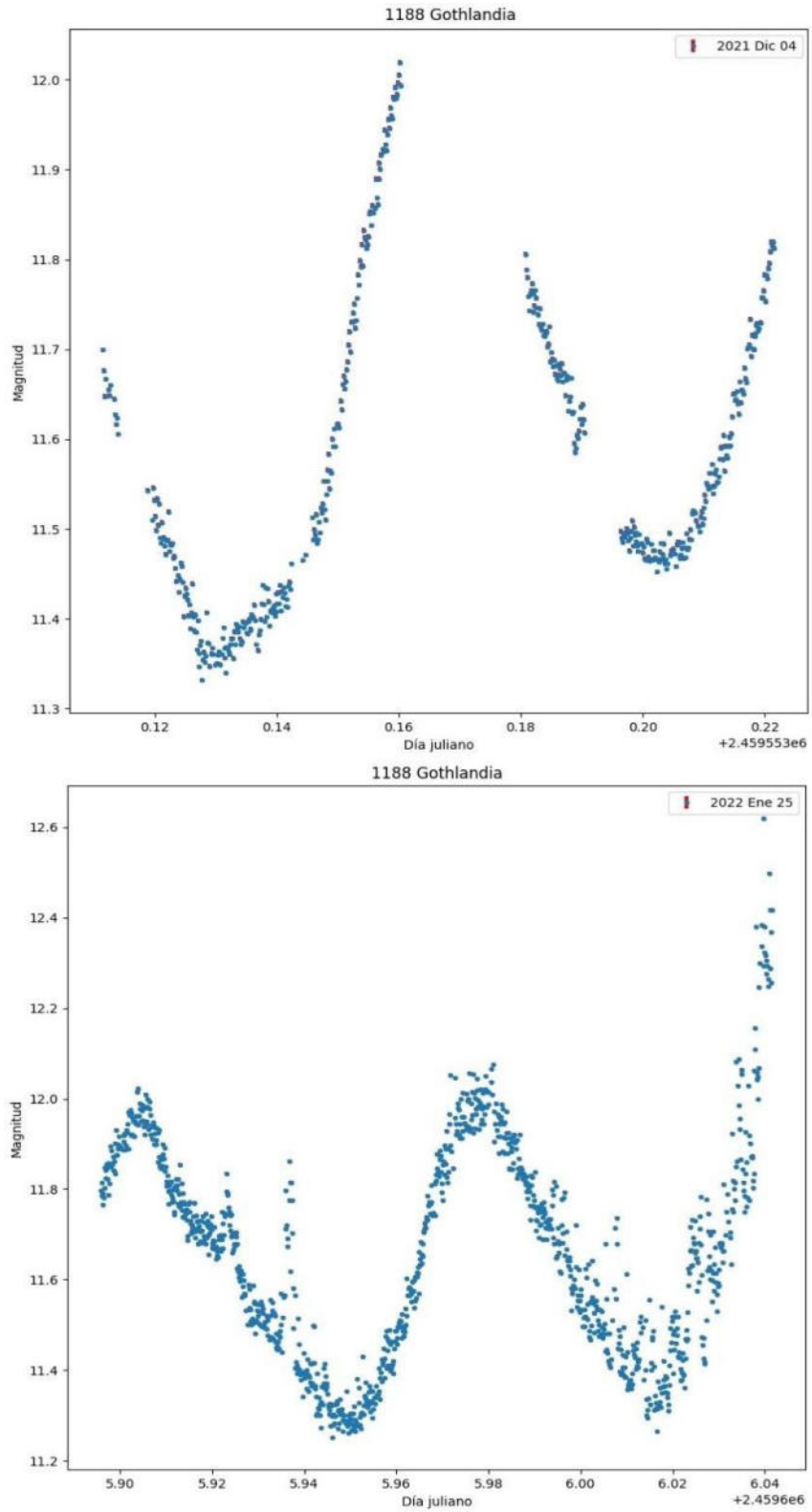


Figura 45: Curvas de la magnitud vs el día juliano obtenida para 1188 Gothlandia para el 4 de diciembre de 2021 (arriba) y 25 de enero de 2022 (abajo).

III.3.2.3. Fotometría diferencial

La fotometría diferencial consiste en la medición de la diferencia en magnitud entre el asteroide y una estrella de calibración (que no debe ser variable). Comparando sus magnitudes podremos ver la variación del brillo del objeto de interés.

Esto se realiza mediante el código *RelMag.py*, el cual pide ingresar el nombre del archivo de magnitud (antes generado con la fotometría de apertura) de una de las estrellas de referencia para obtener la magnitud del asteroide relativa a esa estrella de comparación a partir de la resta de sus magnitudes instrumentales, mediante la fórmula:

$$RelMag = (magA - magE) + \left[\frac{\max(magA) + \min(magA)}{2} \right] \quad (5)$$

Donde *magA* es la magnitud instrumental del asteroide y *magE* la magnitud instrumental de la estrella de referencia. La ecuación (5) se expresa para el caso donde $magE > magA$, el segundo término se utiliza para centrar la curva de magnitud relativa en cero. Posteriormente se promedian todas las curvas obtenidas para cada estrella de referencia, de lo que se obtiene la curva de magnitud relativa vs JD del asteroide bajo estudio. Estas curvas se muestran en las Figuras 46 y 47.

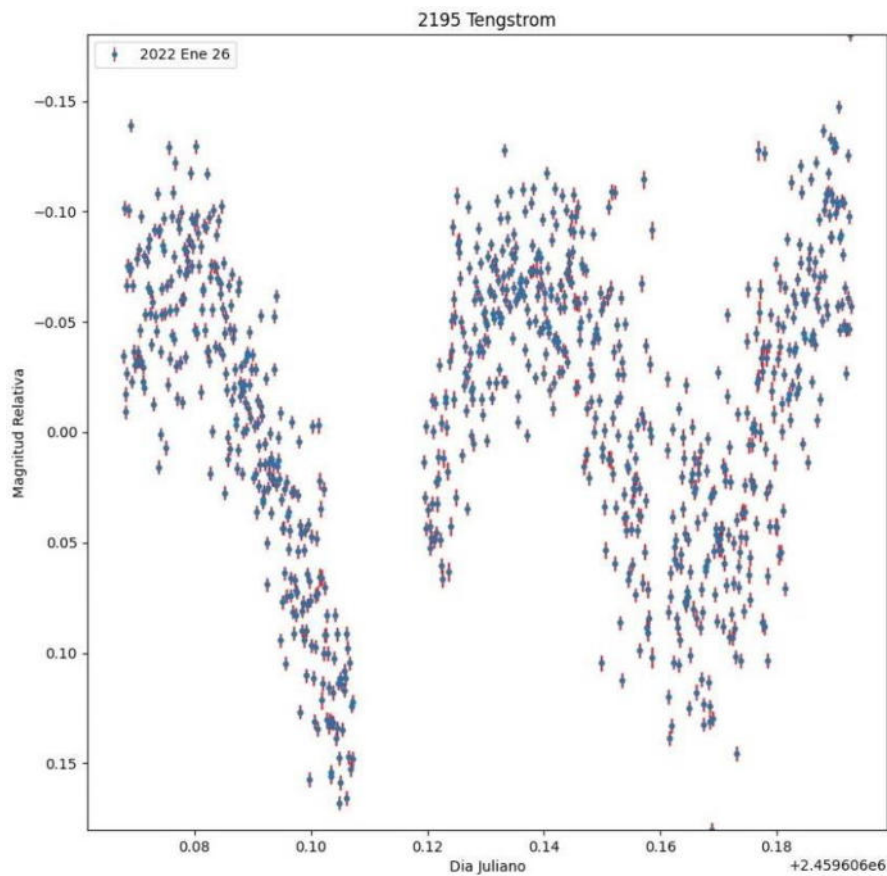


Figura 46: Curva de la magnitud de 2195 Tengstrom relativa a una de las estrellas de referencia para el día 26 de enero de 2022.

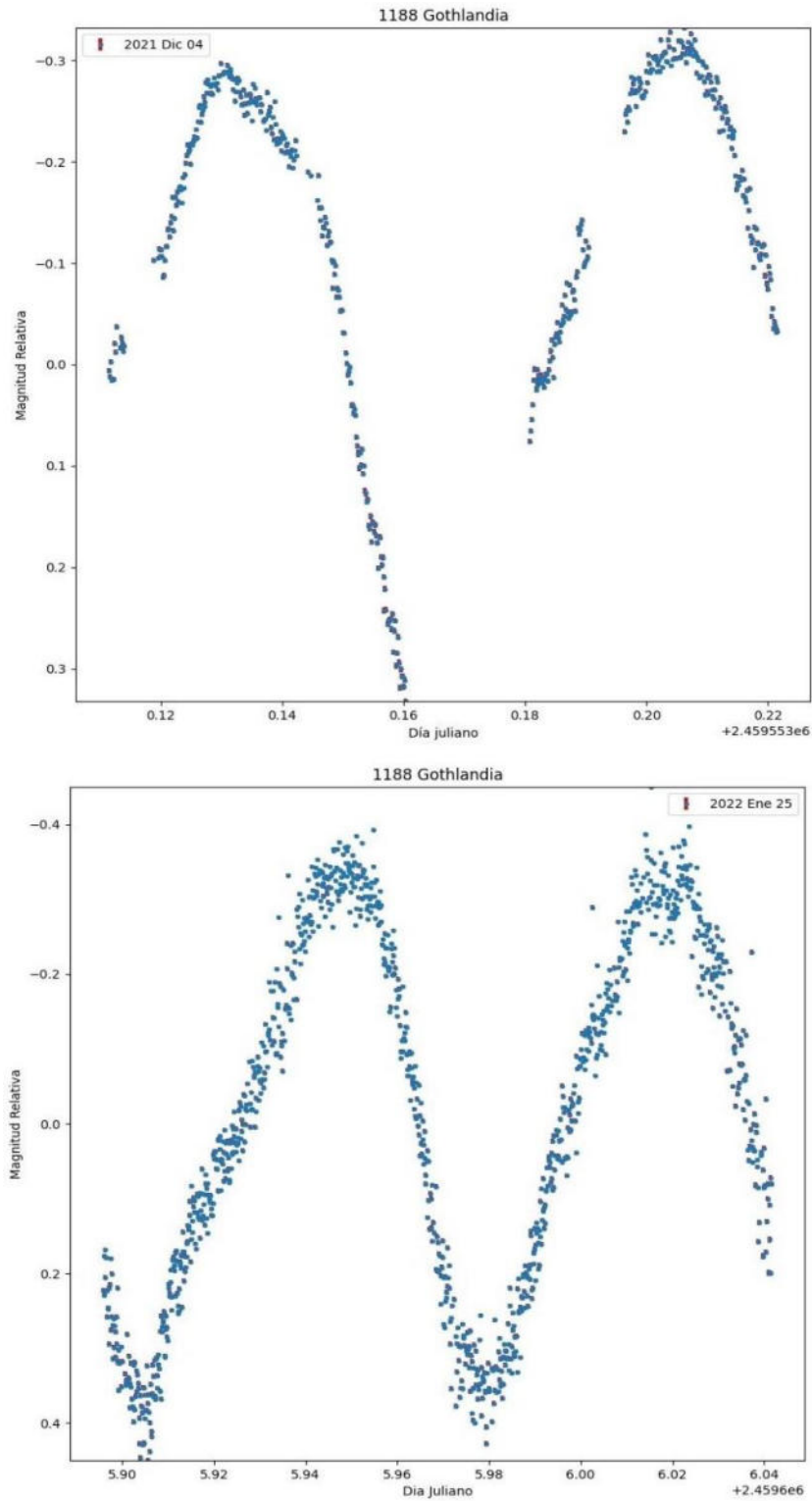


Figura 47: Curva de la magnitud de 1188 Gothlandia relativa a una de las estrellas de referencia para los días 4 de diciembre de 2021 (arriba) y 25 de enero de 2022 (abajo).

III.3.3. Obtención de curvas de fase rotacional

El tiempo que le toma a una asteroide completar un giro alrededor de su propio eje, se denomina periodo de rotación. Este periodo de rotación es visible en las curvas de luz como variaciones en el brillo del asteroide (Figura 48). Las curvas de fase rotacional representan un periodo completo del asteroide y permiten agrupar observaciones de diferentes fechas para formar una sola curva, esto solo será posible para unos cuantos valores (un par generalmente) de periodo rotacional fijos. Las gráficas se presentan como magnitud relativa contra la fase rotacional que va de 0 a 1, para un periodo dado.

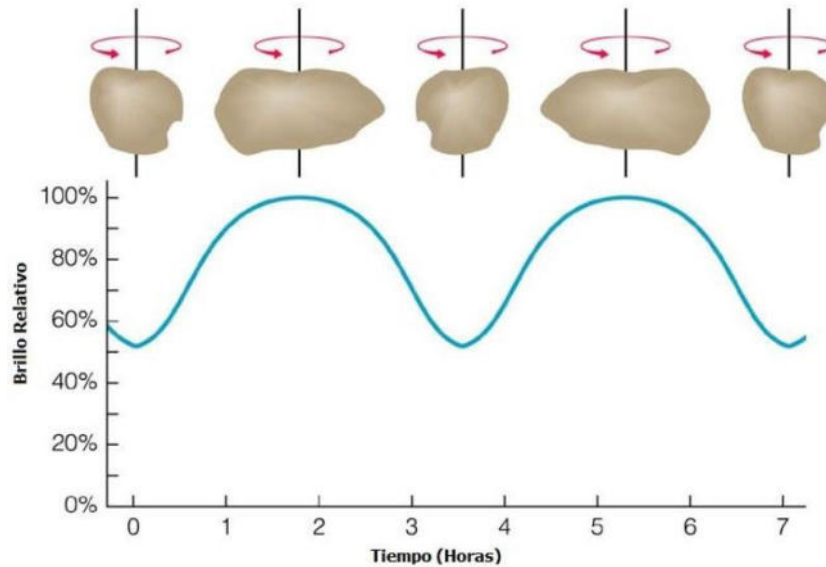


Figura 48: Representación de la rotación de un asteroide. Debido a su morfología irregular, las curvas de luz de los asteroides presentan variabilidad a medida que rotan en su propio eje. Gracias a esto es posible aprovechar la variabilidad de su brillo para calcular el periodo de rotación.

Cuando no se conoce el periodo de rotación del asteroide, este puede ser encontrado a partir de observaciones en diferentes fechas. Los periodos rotación típicos de la mayoría de los asteroides van de unos pocos minutos hasta semanas. Por lo tanto, se requiere de una metodología adecuada para calcular el periodo de rotación a partir de observaciones llevadas a cabo en diferentes épocas. En este trabajo se utilizaron tres algoritmos para calcular periodos rotacionales:

a) Lomb & Scargle (Lomb 1976), quien desarrolló una técnica basada en análisis frecuencial de mínimos cuadrados de datos no uniformemente espaciados. Posteriormente Press et al. (1992) realizó una modificación implementando análisis espectral de Fourier, donde la frecuencia con la potencia máxima se relaciona con el periodo de rotación del asteroide. Este método ya viene implementado en un módulo de Python para su aplicación directa. La función utilizada es *LombScargle* del módulo *astropy.timeseries*.

b) Minimización de Dispersión de Fase (PDM), que busca minimizar el valor de la dispersión θ al tratar de ajustar diversos periodos candidatos. En este caso el periodo puede tener variaciones no senoidales, pero requiere de observaciones espaciadas irregularmente (Stellingwerf 1978). Este algoritmo ya está implementado en Python para aplicarse directamente con las observaciones

proponiendo diferentes periodos candidatos para ser evaluados. La función utilizada es *pdm* del módulo *pwkit.pdm*.

c) Un método de análisis de Fourier implementado por Harris et al. (1989), que permite entre otras cosas tener un error formal calculado para cada cantidad simulada. Este algoritmo está implementado en Fortran y funciona interactivamente, por lo cual, es necesario que un usuario esté ingresando diferentes cantidades para encontrar el periodo más adecuado.

De los dos primeros métodos se puede obtener un gráfico que ilustra la potencia espectral, en el caso de Lomb & Scargle, y los valores del parámetro θ en el caso de PDM, contra la frecuencia más probable relacionada al periodo de rotación. En la Figura 49 se presentan estos gráficos, los cuales tomamos de referencia para comparar los resultados de los códigos aquí presentados. El máximo en la Figura 49a y en mínimo en 49b están relacionados con el periodo de rotación de 7.7 horas de 1994 CS8. Estos datos están tomados de un artículo en preparación con la colaboración del *FSI*.

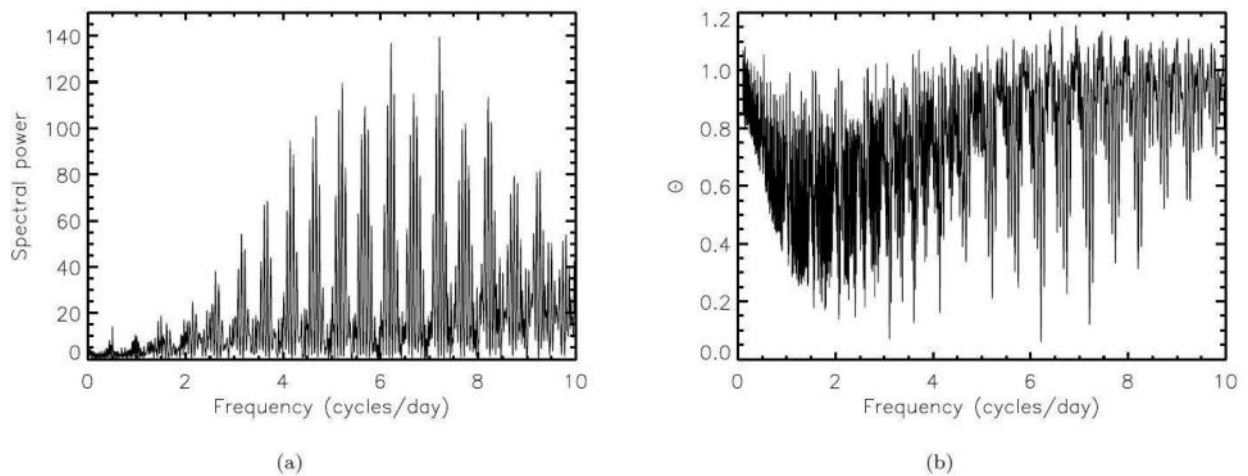


Figura 49: Periodogramas resultantes de los algoritmos de: a) Lomb & Scargle y b) PDM, los periodos de rotación son el inverso de los ciclos por día. Datos para el troyano 1994 CS8.

III.3.4. Ajuste por mínimos cuadrados

En algunas ocasiones, dependiendo de la forma del objeto, variaciones de albedo y de la calidad de las curvas de magnitud relativa, es posible que más de un periodo (generalmente armónicos) pueda ajustar correctamente una curva de fase rotacional. En estos casos es indispensable ajustar modelos para obtener información sobre los armónicos de la curva y decidir cuál de estos periodos obtenidos de los métodos mencionados es el más probable. En este trabajo implementamos ajuste por mínimos cuadrados a partir de un modelo general basado en series de Fourier:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{12} (a_n \cos n\pi t + b_n \sin n\pi t) \quad (6)$$

En la Figura 50 se presenta la gráfica de magnitud relativa contra fase rotacional de un asteroide troyano (1994 CS8) que en este trabajo estamos usando como referencia para caracterizar los códigos de reducción. La curva central es el ajuste al modelo. Los datos los hemos obtenido como parte de la colaboración que tenemos con el *FSI* para la caracterización de troyanos Júpiter y objetivos de la misión espacial LUCY (https://www.nasa.gov/mission_pages/lucy/overview/index).

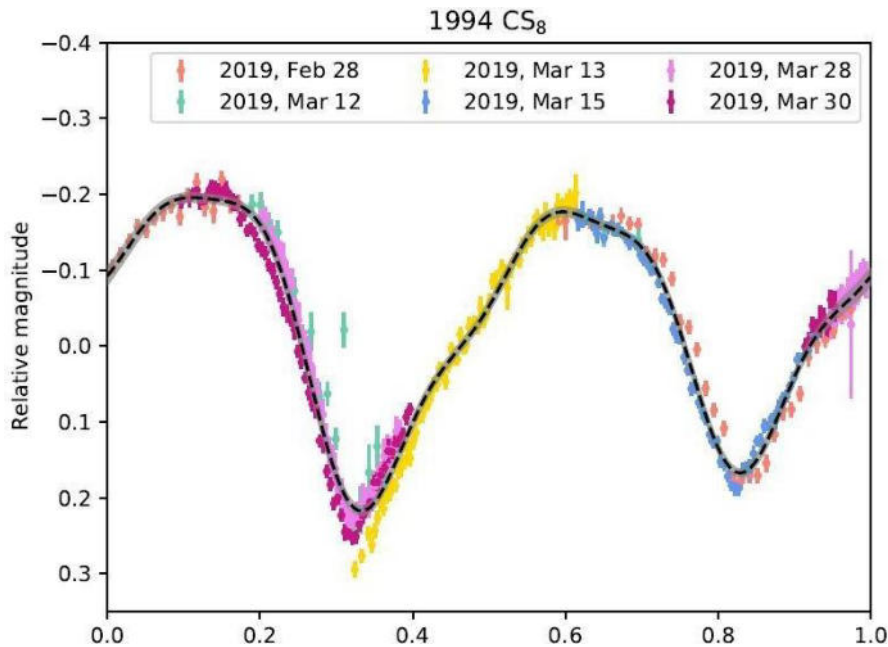


Figura 50: Curva de fase rotacional del troyano 1994 CS8 para un periodo de rotación de 7.727 horas. Este es un ensamble de observaciones realizadas en seis diferentes fechas. La curva central es un ajuste del modelo de rotación utilizando series de Fourier.

IV. Resultados

A continuación, se muestran los resultados de las observaciones en el OAU en el cerro El Picacho con los telescopios de 16" y 20" con cámaras QHY174M+GPS. Además, se han incluido datos del asteroide troyano 1994 CS8, como parte de una colaboración con la Dra. Esthela Fernández del *FSI* (Florida Space Insititute), para la determinación de propiedades físicas de asteroides troyanos de Júpiter a partir de fotometría. Estos últimos nos han servido como referencia en este trabajo para comparar los resultados de nuestros códigos con los resultados fotométricos disponibles en el *FSI*.

IV.1. Observaciones de El Picacho

IV.1.1. Asteroide 1188 Gothlandia

Gothlandia fue observado desde el OAU en dos ocasiones. La primera observación se llevó a cabo el 4 de diciembre del 2021. Debido a las malas condiciones de clima que se presentaron al transcurso de la noche fue necesario concluir con la observación y no fue posible obtener el periodo completo. La segunda observación ocurrió el 25 de enero de 2022, con una noche de buenas condiciones de clima se pudo observar el periodo de rotación completo del asteroide. En esta temporada logramos instalar y poner a punto el telescopio de Plane-Wave de 20" con la montura 1600 GTO de Astrophysics, por lo que se observaron de manera simultánea los mismos objetos. Los datos para ambos días permitieron generar la curva de fase rotacional que se muestra en la Figura 51.

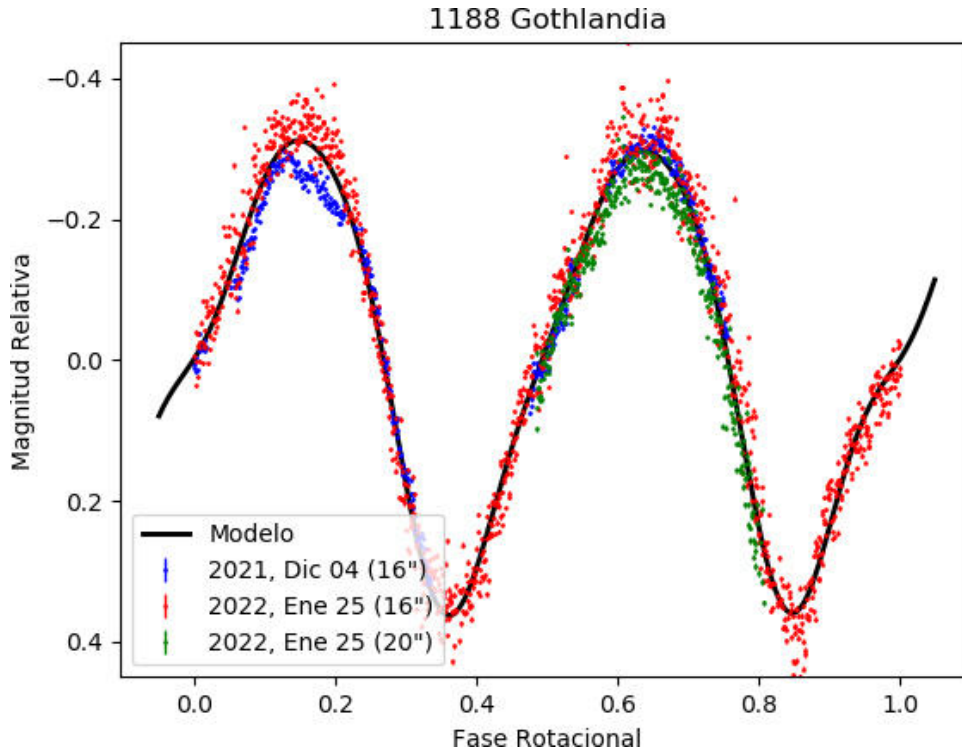


Figura 51: Curva de luz de magnitud relativa vs fase rotacional del asteroide 1188 Gothlandia obtenida de datos en El Picacho el 4 diciembre de 2021 y el 25 de enero de 2022 con los telescopios de 16" y 20". El modelo fue ajustado con la ecuación (6).

IV.1.1.1. Comparación con la literatura

Las curvas de luz generadas para 1188 Gothlandia por Hamanowa & Hamanowa (2009) reportaron un periodo de rotación de 3.49 h. Este periodo coincide con el obtenido por Baker et al. (2012) de 3.49 h. Por otra parte, Groezinger & Montgomery (2020) reportaron un periodo de 3.52 h. Ver figura 52.

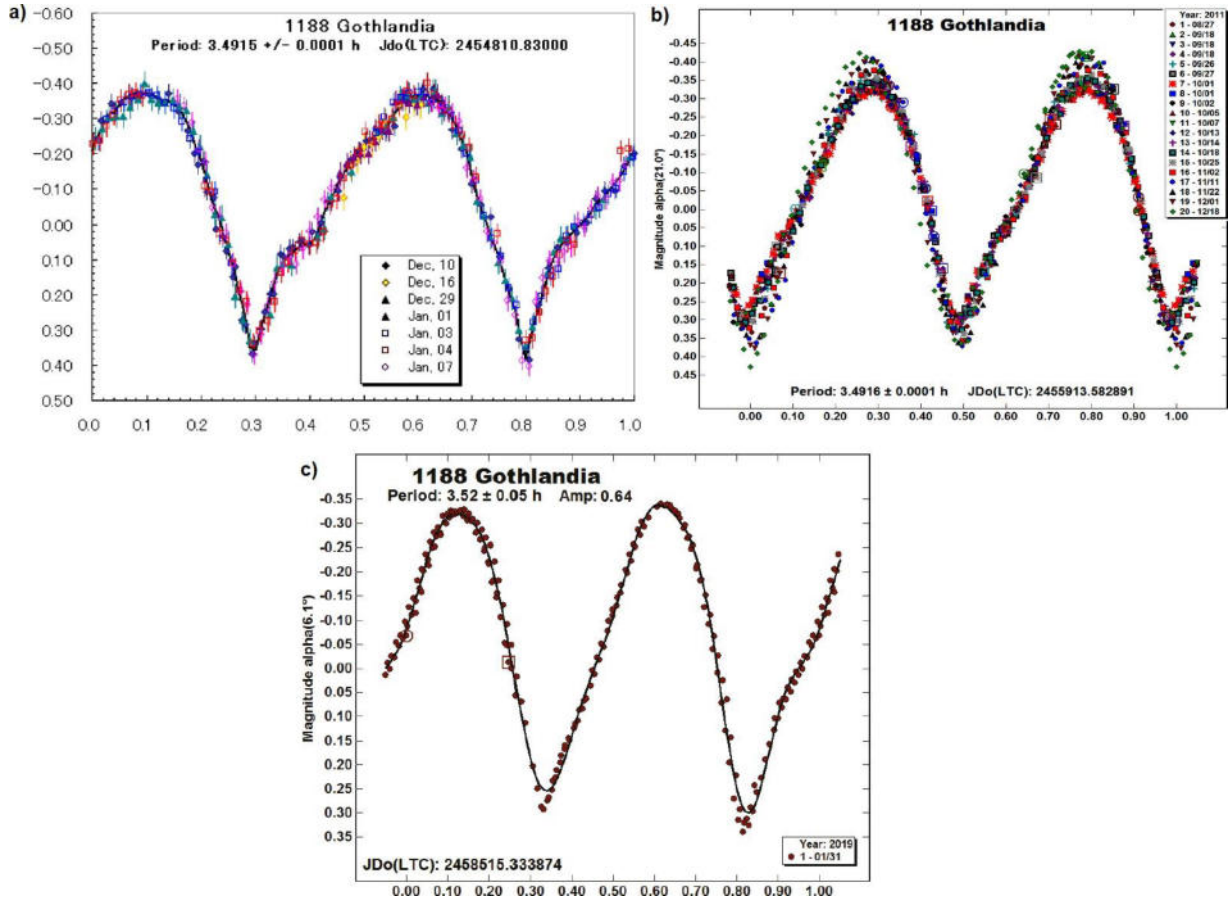


Figura 52: Curvas de luz de 1188 Gothlandia. a) Curva de luz obtenida para los meses de diciembre 2008 a enero 2009 (Hamanowa & Hamanowa, 2009); b) Curva de luz compuesta de las fechas de agosto a diciembre 2011 (Baker et al., 2012); c) Curva de luz para el mes de enero de 2019 (Groezinger & Montgomery, 2020).

Comparando nuestros resultados (Figura 51) contra la literatura (Figura 52), en cuanto a la dispersión de los datos es evidente que tenemos mayor variación, sin embargo, hay que considerar que son datos de solo dos noches con periodos casi completos, lo cual incrementa el número de imágenes adquiridas con mayor masa de aire. Por otro lado, en la Figura 51 se puede observar que para dos diferentes días hay diferencia en la amplitud y temporalidad de los datos, esto se entiende a partir del cambio de ángulo de aspecto y probablemente del tiempo de camino de la luz, debido a que los datos se adquirieron con casi 50 días de diferencia. Aun así, se puede observar que el ajuste es adecuado, además de que las escalas de la magnitud relativa coinciden.

Como ya se mencionó, de acuerdo con la literatura, 1188 Gothlandia tienen un periodo rotacional de ~ 3.5 h, ya que contamos con un par de observaciones para este asteroide intentamos encontrar el periodograma con los métodos mencionados en la sección III.3.4. Precisamente por la falta de observaciones en otras fechas, el método de Lomb & Scargle, no arrojó ningún resultado, pues siempre acumula toda la potencia en la frecuencia mínima. Sin embargo, tanto PDM como el método de Harris et al. (1989) resultan en un periodo muy cercano al reportado en la literatura 3.8 h y 3.4 h respectivamente. En la Figura 53 se presenta el periodograma encontrado con PDM, se puede apreciar que existe otro mínimo en 3.48 h, se espera que con más observaciones disponibles se pueda refinar mejor este resultado, sin embargo, con esto se ejemplifica que la calidad de los datos obtenidos en el OAU es suficiente para determinar periodos rotacionales.

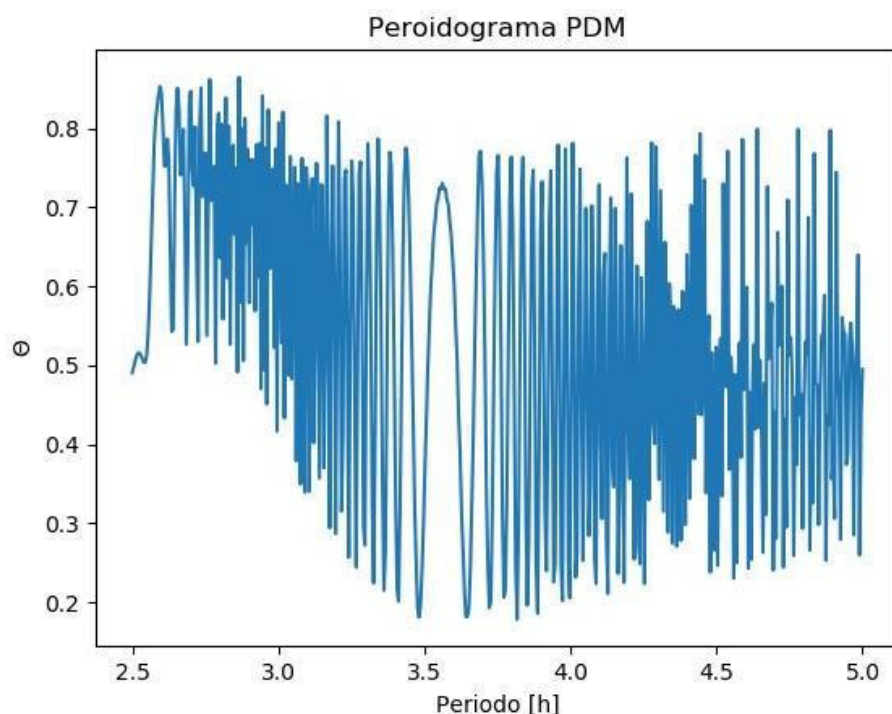


Figura 53: Periodograma obtenido con el algoritmo PDM para las observaciones de 1188 Gothlandia en el sitio de El Picacho en el OAU el 4/12/2021 y el 25/01/2022. Los mínimos de dispersión se ubican en 3.48 h y 3.8 h.

IV.1.2. Asteroide 2195 Tengstrom

Las observaciones del asteroide 2195 Tengstrom desde el OAU se llevaron a cabo el 26 de enero de 2022 con el telescopio de 16". Debido a que las condiciones del clima fueron favorables fue posible observar al asteroide de forma continua, lo que permitió obtener el periodo completo. La curva de fase rotacional se muestra en la Figura 54. La parte de la curva sin datos se debe a que el asteroide pasó muy cerca de una estrella y para evitar obtener errores en la fotometría de apertura, estos datos fueron descartados.

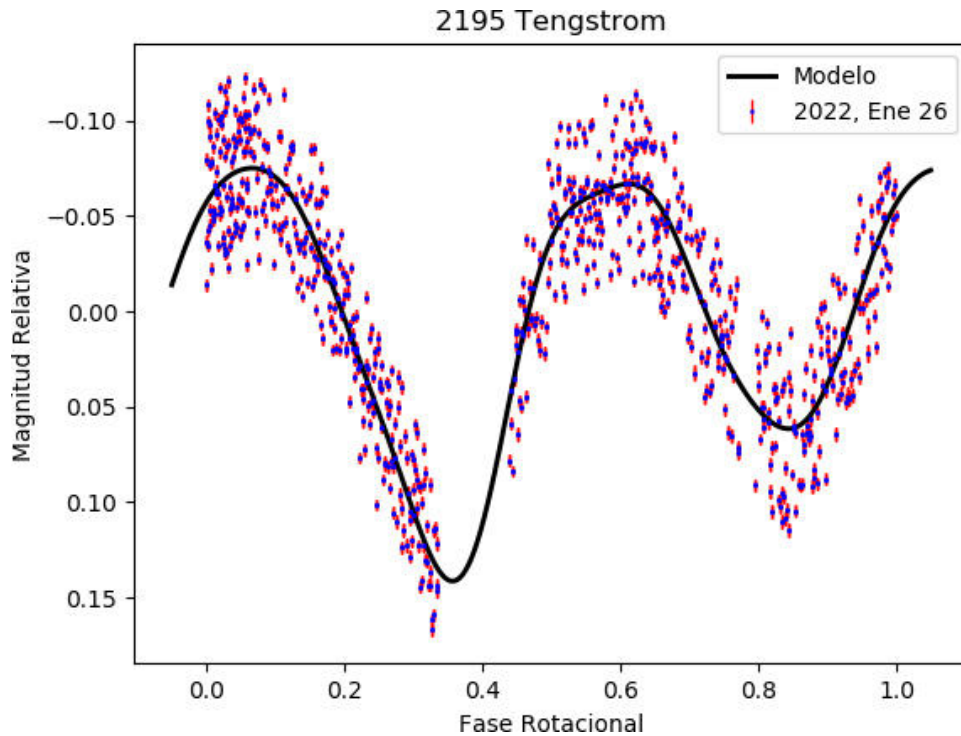


Figura 54: Curva de luz de magnitud relativa vs fase rotacional del asteroide 2195 Tengstrom para el 26 de enero de 2022. El modelo fue ajustado con la ecuación (6) utilizando un periodo rotacional de 2.8 h.

IV.1.2.1. Comparación con la literatura

Se han determinado periodos de rotación para 2195 Tengstrom de 2.816 h por parte de Higgins et al. (2006) y de 2.820 h reportado por Pray & Kusnirak (2011). Sus curvas correspondientes se muestran en la Figura 55.

Es evidente la diferencia que existe en las amplitudes de los picos y los valles entre las Figuras 54 y 55, de nuestros datos y la literatura respectivamente, sin embargo, las escalas coinciden. Esta diferencia puede deberse, en primer lugar, a la dispersión de los datos, debido a que esa noche el viento afectó la estabilidad de los telescopios y el *seeing* estuvo por encima de 2.5 toda la noche. En segundo lugar, no debe descartarse que, debido al ángulo de aspecto en combinación con la forma intrínseca del asteroide y/o su albedo, se genera una curva con una modulación de amplitud de baja

frecuencia. De cualquier manera, se observa que tanto en nuestros datos como en la literatura el periodo coincide y existen dos máximos y dos mínimos dentro de su fase rotacional.

En general, se puede ver que, a pesar de la dispersión de los datos en la curva, debido principalmente a factores climáticos y a la magnitud aparente del asteroide ($V=14.80$), ha sido posible ajustar el modelo con el periodo reportado del asteroide.

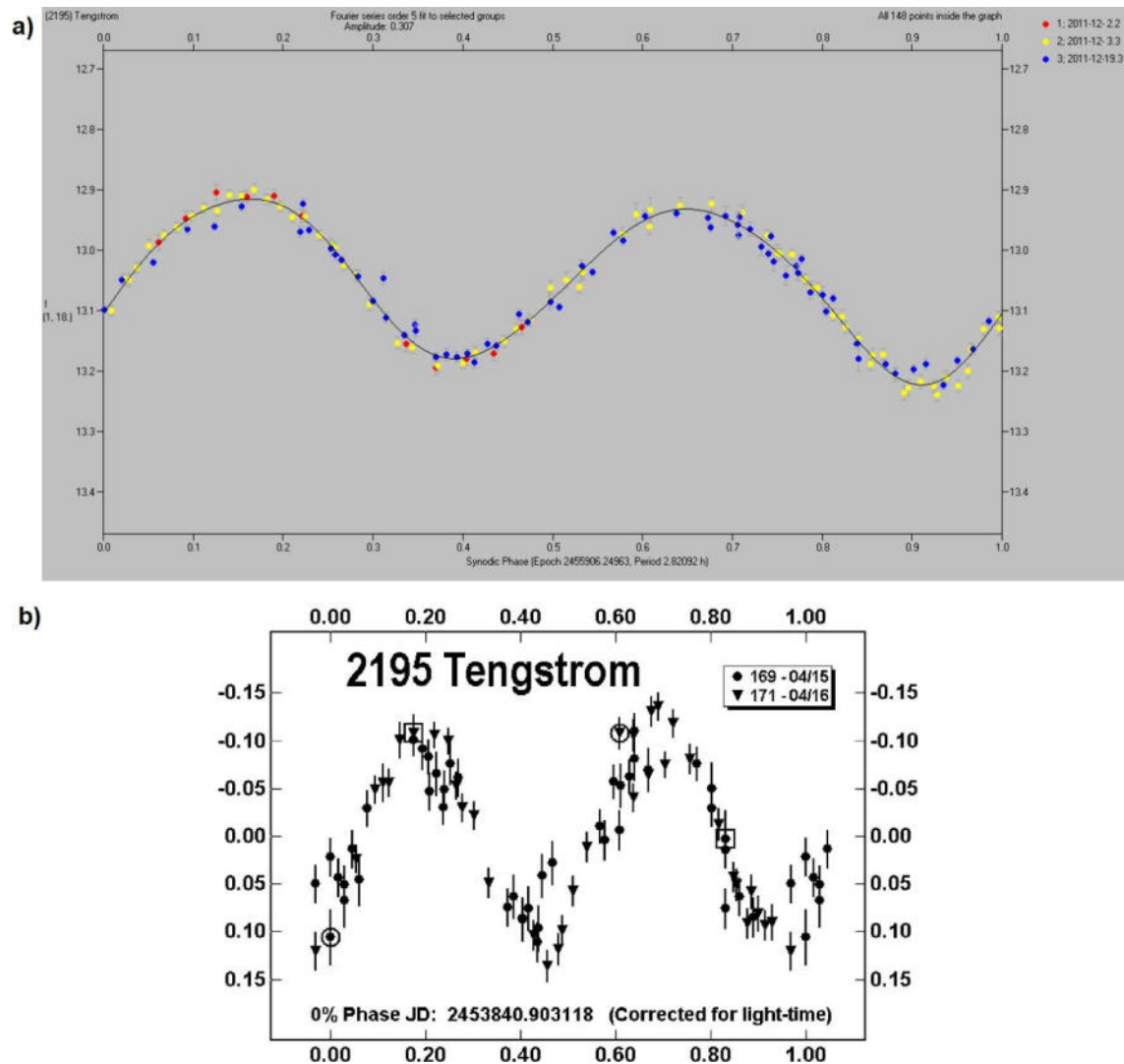


Figura 55: Curvas de luz de 2195 Tengstrom. a) Curva de luz para el mes de diciembre (Pray & Kusnirak, 2011); b) Curva de luz obtenida para el mes de abril (Higgins et al., 2006).

Los datos obtenidos son de una sola noche, por lo que el método de Lomb & Scargle para calcular el periodo rotacional no funcionaría, sin embargo, utilizando el método de PDM el periodo calculado es de 2.76 h (ver Figura 56), mientras que en la literatura el periodo reportado es de 2.82 h. Se espera que, con más observaciones por lo menos en las mismas condiciones climáticas, pueda lograrse refinar el periodo y confirmar la modulación de baja frecuencia que presenta la curva de fase rotacional.

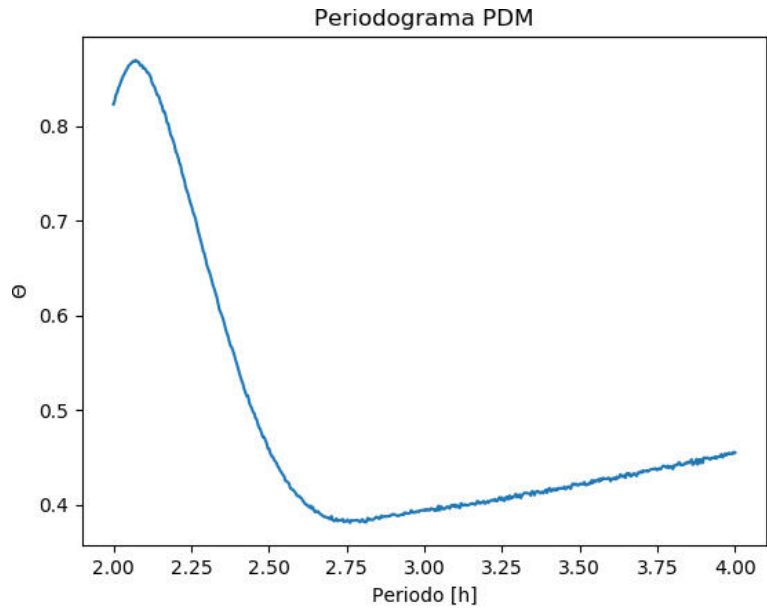


Figura 56: Periodograma obtenido con el algoritmo PDM para las observaciones de 2195 Tengstrom en el sitio de El Picacho del OAU el 26/01/2022. El mínimo de dispersión se encontró en 2.76 h.

IV.2. Troyanos, colaboración FSI.

IV.2.1. Troyano 1994 CS8

Los datos del asteroide troyano 1994 CS8 han sido obtenidos del Observatorio de Sierra Nevada (OSN) en Granada, España, con un telescopio de 1.5 m y una cámara Andor IXON 888 y del Observatorio Astronómico Nacional San Pedro Mártir (OAN-SPM) en Ensenada, Baja California, con un telescopio de 2.12 m y una cámara E2V-4240 spectral instrument.

Cabe mencionar que la metodología que se aplicó a los asteroides 1188 Gothlandia y 2195 Tengstrom, fue primero probada en este objeto lográndose generar su curva de fase rotacional (Figura 57). A diferencia de los pocos datos obtenidos para los asteroides observados desde el OAU, se pudo contar con más datos para el troyano 1994 CS8, estos corresponden a los días 28 de febrero y 12 de marzo de 2019 obtenidos del OSN y a los días 13, 15, 28 y 30 de marzo de 2019 obtenidos del OAN-SPM.

A diferencia de los objetos que observamos en El Picacho, este troyano aún no tiene bien refinado su periodo de rotación, por lo que los datos que estamos analizando aún no está publicados. El trabajo con los troyanos en colaboración con el FSI, generará por lo menos un par de artículos científicos y la metodología de reducción y análisis de los datos es la misma que se presenta en este trabajo de tesis.

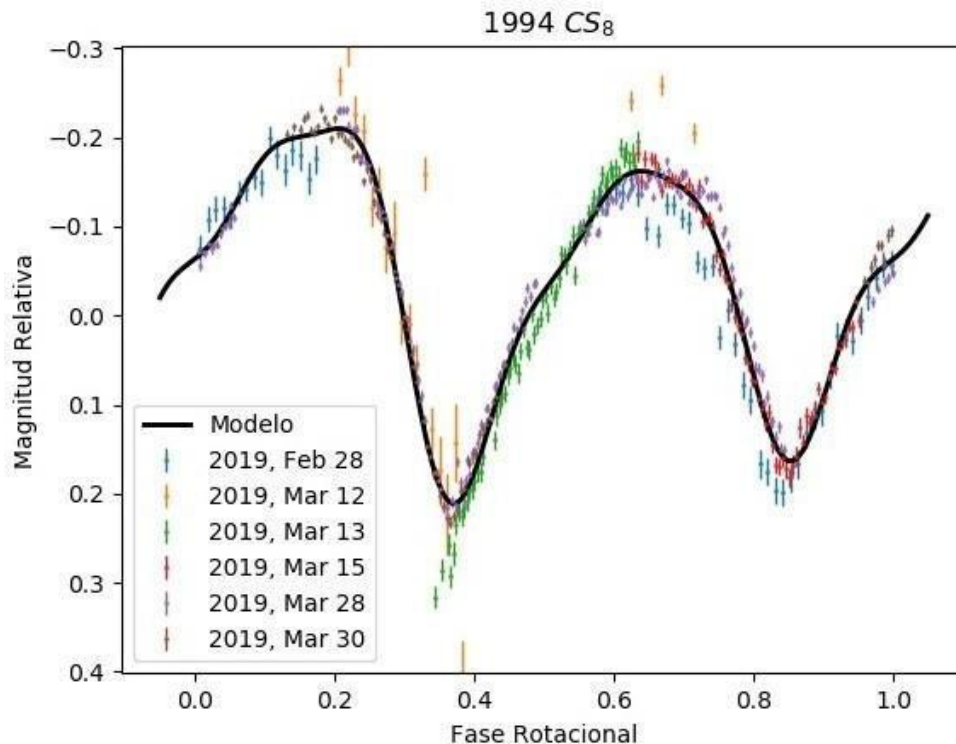


Figura 57: Curva de luz de magnitud relativa vs fase rotacional del asteroide troyano 1994 para 6 fechas de observación.

IV.2.1.2. Comparación con la literatura

Stephens et al., han observado este troyano en varias ocasiones (Stephens et al., 2014, 2015, 2016, 2017). En la Figura 58 se muestran las curvas de fase rotacional correspondientes a las observaciones en 2014 y 2017 encontrando un periodo de 7.81 h y 7.29 h, respectivamente.

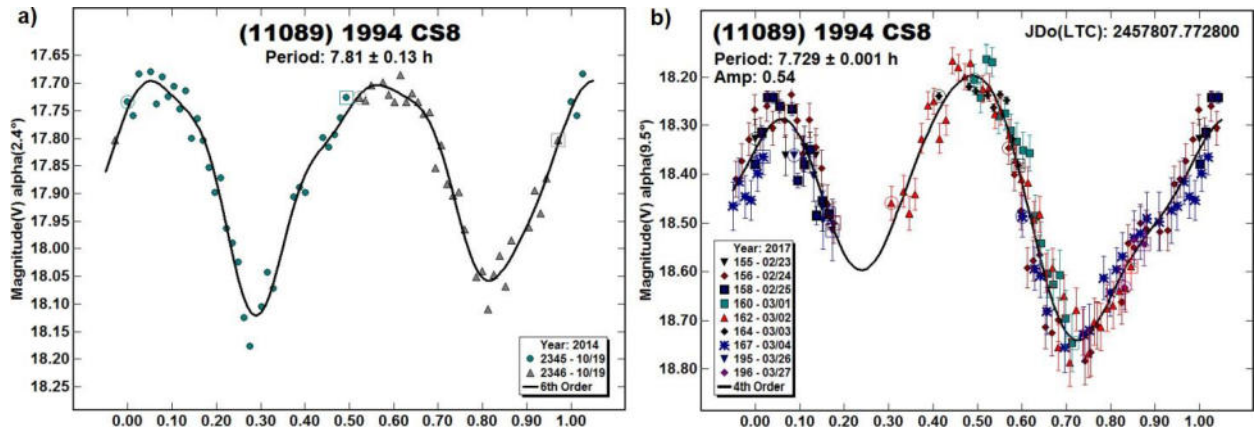


Figura 58: Curvas de luz de 1994 CS8. a) Curva de luz para los días 19 y 20 de octubre del 2014 (Stephens et al., 2015); b) Curva de luz obtenida para los días del 23 de febrero al 27 de marzo del 2017 (Stephens & Coley, 2017).

Comparando las Figuras 57 y 58 se puede observar que los datos que nosotros hemos procesado presentan mayor dispersión, esto más allá de ser a causa de la fotometría realizada, se debe a que nuestra grafica presenta todos los datos obtenidos, siendo que en las gráficas de la literatura ya se han filtrado todos los datos que están muy lejos del ajuste, así como también que diferencia de nosotros, se haya observado al asteroide con mejores condiciones de *seeing*. Sin embargo, tanto como para este como para los demás troyanos que estaremos analizando existe un banco de datos mucho más extenso, por lo que esperamos refinar nuestros resultados, aunque eso está fuera del alcance de esta tesis.

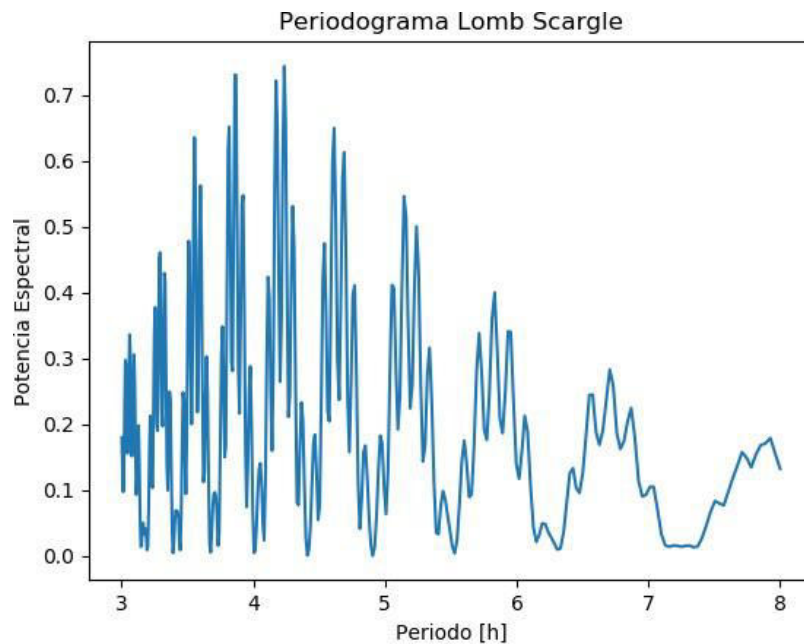


Figura 59: Periodograma obtenido con el algoritmo de Lomb & Scargle para las observaciones de 1994 CS8 adquiridas en el OSN en Granada, España y en el OAN-SPM en Ensenada, Baja California en 2019. Se muestran dos máximos a 3.87 y 4.23 h respectivamente.

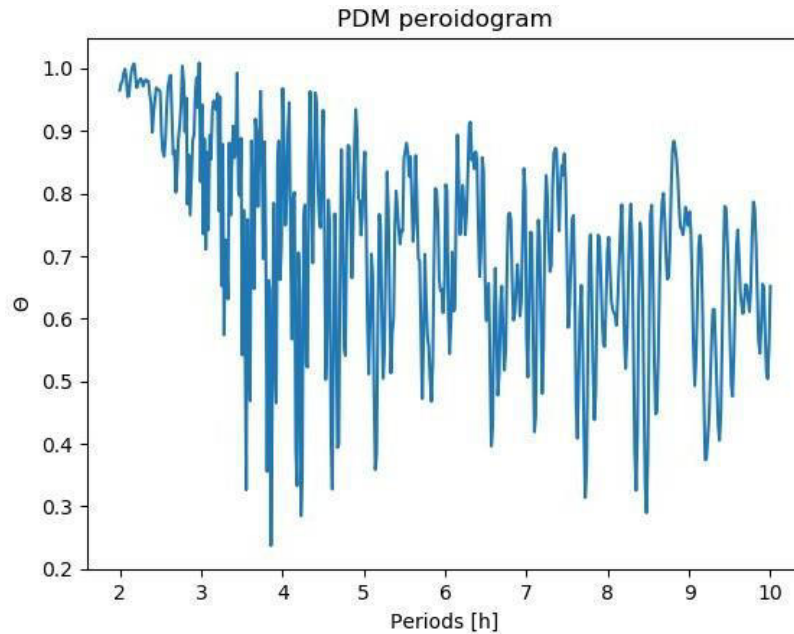


Figura 60: Periodograma obtenido con el algoritmo de PDM para las observaciones de 1994 CS8 adquiridas en el OSN en Granada, España y en el OAN-SPM en Ensenada, Baja California en 2019. en el OSN en España en 2019. El mínimo corresponde a 3.87 h.

En las Figuras 59 y 60 se puede observar que el periodo resultante de 3.87 h se repite tanto para Lomb & Scargle como para PDM. Por otro lado, con el método de Harris et al. (1989), hemos obtenido un periodo de 7.72 h. Aunque esto parece una discrepancia al principio, resulta que es común que Lomb & Scargle presente un armónico del verdadero periodo de rotación, que, en este caso por la dispersión de los datos, ocurre también para PDM. Sin embargo, anteriormente ya se ha descartado el periodo de 3.87 h porque el objeto se ha observado en diferentes ángulos de aspecto y los máximos en las curvas tienen morfología diferente, lo cual indica que se trata de un objeto elongado. Por el momento es muy complicado calcular la forma de este tipo de objetos, ya que sus rangos de ángulos de fase son muy cortos y no se puede hacer inversión de curva de luz para obtener la forma en 3D del troyano.

V. Conclusiones

- Se desarrollaron diferentes herramientas computacionales para la observación, reducción y análisis de datos que serán utilizadas para el estudio de cuerpos menores mediante observaciones en el OAU. Estas herramientas permitirán homogeneizar y automatizar las campañas observacionales y la reducción de datos, para poblar la base de datos de objetos caracterizados.
- Utilizando como referencia datos de un troyano (1994 CS8) y los procedimientos de reducción y análisis que se utilizan en el *FSI*, logramos analizar imágenes de asteroides observados desde el OAU.
- Se llevaron a cabo varias campañas de observación, sin embargo, solo de dos de ellas se obtuvieron datos útiles, debido principalmente al mal estado del tiempo y a algunas fallas técnicas en los equipos de observación.
- Se obtuvieron los primeros datos de connotación científica en el OAU y se corroboraron las observaciones con la información existente en la literatura.
- Mediante las observaciones, reducción y análisis de datos se evaluaron las condiciones instrumentales de los telescopios y las cámaras disponibles en el OAU.
- A partir del análisis de calidad de imagen se llevaron a cabo acciones correctivas para mejorar el desempeño de los telescopios, lo que permitió alcanzar tamaños de imágenes acordes al *seeing* medido en el estudio de sitio.
- A partir de la obtención de curvas de luz y se logró evaluar la calidad de las imágenes obtenidas en el OAU, y debido a que fue posible obtener los periodos de rotación de los objetos observados, a pesar de contar con pocas noches observadas, se concluye que el sitio del picacho y su infraestructura es suficiente para observar cuerpos menores y generar curvas de luz.
- De acuerdo con el análisis presentado en este trabajo es posible concluir que utilizando la infraestructura OAU es capaz de estudiar objetos de magnitud aparente $V < 15$ con seguimiento sidéreo y no sidéreo.
- Aunque consideramos que las observaciones tienen calidad suficiente para obtener al menos los periodos de rotación de los asteroides, es verdad que se requieren más datos para probar los límites observacionales del sitio.
- De momento no se puede concluir acerca de las capacidades del sitio para lograr obtener fotometría absoluta, debido a que no se instalaron filtros para llevar a cabo las observaciones.
- Con este estudio se sientan las bases para el desarrollo del sitio, probando que es posible obtener datos de calidad suficiente como para medir propiedades físicas de asteroides.
- Las observaciones se llevaron a cabo con cámaras QHY174M tipo CMOS, cuyo ruido es bastante alto comparado con cámaras científicas, por lo tanto, creemos que la calidad de la fotometría puede aumentar aún más

VI. Trabajos a futuro.

Con las herramientas que se han desarrollado y con la infraestructura existente en el OAU se pueden llevar a cabo campañas presenciales de observación, sin embargo, para lograr el objetivo de generar estadística de las propiedades de cuerpos menores del sistema solar, se requiere remotizar y posteriormente robotizar las observaciones.

Se requiere llevar a cabo observaciones en diferentes filtros para lograr obtener fotometría absoluta. Esto significa una adecuación técnica para los instrumentos y coordinación para llevar a cabo observaciones simultáneas.

Hasta ahora se han observado objetos con tiempos de exposición de entre 10 y 15 segundos, debido principalmente al guiado de los telescopios. Por la experiencia adquirida con los equipos creemos que ajustando la alineación de las monturas se puede mejorar el seguimiento. Sin embargo, consideramos pertinente la instalación de un guiador para obtener imágenes con mayor tiempo de exposición y aumentar la magnitud límite de los objetos a observar.

Por mi parte planeo seguir colaborando con el *FSI* y el Dr. Castro para analizar los datos de troyanos y participar en los artículos científicos que serán publicados.

Bibliografía

- Álvarez, M., & López, E. (2003). Los últimos diez años del Observatorio Astronómico Nacional. En M. A. Moreno Corral (comp.), *Historia de la astronomía en México* (235-255). México: FCE, SEP, CONACyT. [En Línea]. Recuperado desde: <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/04/html/astrono.html>
- Ayala, S., Colin, A., González, A., Rivas, M., Mona, J., Avilés, A., Núñez, J., Chávez, C., Adame, L., & Pérez-Tijerina, E. (2014). Site testing at Observatorio Astronómico UANL. 20.DA.10. Research and Teaching in Astrophysics in Guanajuato.
- Baker, R. E., Pilcher, F., & Klinglesmith, D. A. (2012). Rotation Period and H-G Parameters Determination for 1188 Gothlandia. *The Minor Planet Bulletin*, 39(2), 60-63.
- Barrios Arvelaez, C. V. (2019). Determinación de cuerdas y períodos de rotación sinódicos de asteroides mediante el empleo de técnicas de fotometría CCD para la obtención de sus curvas de luz. [Tesis de Licenciatura]. Universidad Central de Venezuela.
- Benner, L., Chodas, P., & Taylor, P. (2017). *Telescopes Worldwide Collaborate to Observe Asteroid Florence During its Recent Close Approach to Earth*. Center for Near Earth Object Studies (CNEOS). [En línea] Recuperado desde: <https://cneos.jpl.nasa.gov/news/news200.html>
- Borovička, J., Spurný, P., Brown, P., Wiegert, P., Kalenda, P., Clark, D., y Shrubený, L. (2013). The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor. *Nature*, 503(7475), 235–237.
- Bottke Jr., W. F., Cellino, A., Paolicchi, P., & Binzel, R. P. (2002). An Overview of the Asteroids: The Asteroids III Perspective. En W. F. Bottke Jr., A. Cellino, P. Paolicchi, & R. P. Binzel (Eds.), *Asteroids III* (3–15). Tucson: University of Arizona Press.
- Bronshten, V. (1999). The Nature of the Tunguska Meteorite. *Meteoritics & Planetary Science*, 34(5), 723-728.
- Brown, P. G., Assink, J. D., Astiz, L., Blaauw, R., Boslough, M. B., Borovička, J., Brachet, N., Brown, D., Campbell-Brown, M., Ceranna, L., Cooke, W., de Groot-Hedlin, C., Drob, D. P., Edwards, W., Evers, L. G., Garces, M., Gill, J., Hedlin, M., Kingery, A., ... Krzeminski, Z. (2013). A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors. *Nature*, 503(7475), 238–241.
- Byrd, D. (2019). *Chelyabinsk meteor exploded over Russia February 15, 2013*. EarthSky. <https://earthsky.org/space/chelyabinsk-meteor-exploded-over-russia-feb-15-2013/>
- Bus, S. J., & Binzel, R. P. (2002). Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey: A Feature-Based Taxonomy. *Icarus*, 158(1), 146-177.
- Center for Near Earth Object Studies (CNEOS). (s.f.). NEOs groups. [En línea]. Recuperado desde: https://cneos.jpl.nasa.gov/about/neo_groups.html
- Chamberlin, A. B. (2007). Asteroid Main-Belt Distribution. [En línea]. Recuperado desde: https://ssd.jpl.nasa.gov/diagrams/mb_hist.html
- Colazo, M. (2020). *Estudio de propiedades físicas de una muestra de asteroides*. [Tesis de licenciatura]. Universidad Nacional de Córdoba.

- Colin, A., Ayala, S., Vazquez, R., Olguin, L., Adame, L., Avilés, A., Chávez, C., & Pérez-Tijerina, E. (2014). The astronomical observatory of UANL Monterrey-México. 20.DA.10. Research and Teaching in Astrophysics in Guanajuato.
- Consortio Nacional de Recursos de Información Científica y Tecnológica (CONRICyT). (2017). Detectan basura espacial en observatorio de la UANL. *Foro Consultivo Científico y Tecnológico*.
- Cornejo Rodríguez, A. (2014). Los observatorios de México. *Revista Ciencia*, 48-56.
- DeMeo, F. E., Alexander, C. M. O., Walsh, K. J., Chapman, C. R., & Binzel, R. P. (2015). The compositional structure of the asteroid belt. En P. Michel, F. E. DeMeo, & W. F. Bottke (Eds.), *Asteroids IV* (13-41). Tucson: University of Arizona Press.
- DeMeo, F. E., Binzel, R. P., Slivan, S. M., & Bus, S. J. (2009). An extension of the Bus asteroid taxonomy into the near-infrared. *Icarus*, 202(1), 160-180.
- de Pater, I., & Lissauer, J. (2010). *Planetary Sciences* (2a ed). New York: Cambridge University Press.
- European Southern Observatory (ESO). (2009). *Paranal Observatory*. [En línea]. Recuperado desde: https://www.eso.org/public/chile/images/paranal_16-nov1999/?lang
- European Southern Observatory (ESO). (2015). *Spectroscopy*. [En línea]. Recuperado desde: <https://www.eso.org/public/teles-instr/technology/spectroscopy/>
- Farinella, P., Foschini, L., Froeschlé, C., Gonczi, R., Jopek, T., Longo, G., & Michel, P. (2001). Probable asteroidal origin of the Tunguska Cosmic Body. *Astronomy & Astrophysics*, 377(3), 1081–1097.
- Fernandez, Y. R., Li, J.-Y., Howell, E. S., & Woodney, L. M. (2015). Asteroids and Comets. En *Treatise on Geophysics* (2 ed., Vol. 10, 487-528). Amsterdam: Elsevier.
- Fontalvo, C. E., Peña, D. & Sarmiento, R. (2006). Caracterización de una cámara CCD para su uso como detector espectroscópico. *Revista colombiana de física*, 38(1), 245-248.
- Google Maps. (2021). *Major astronomical observatories on Earth*. [En Línea]. Recuperado desde: <https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=1KmpNeOPltDHEisXli1UwuvNa4b4&ie=UTF8&hl=en&msa=0&ll=-3.81666561775622e-14%2C13.870833000000005&spn=172.105191%2C360&t=h&z=1>
- Gregersen, E. (2010). Asteroids. En E. Gregersen (Ed.), *An explorer's guide to the universe. The Outer Solar System: Jupiter, Saturn, Uranus, Neptune and the Dwarf Planets* (20-47). New York: Britannica Educational Publishing.
- Gritzner, C. (1997). Human Casualties in Impact Events. WGN, *Journal of the International Meteor Organization*, 25(5), 222–226.
- Groezinger, S., & Montgomery, K. (2020). Determining rotational periods lightcurves main belt asteroids. *The Minor Planet Bulletin*, 47, 174-176.
- Hamanowa, H., & Hamanowa, H. (2009). Lightcurves of 494 Virtus, 556 Phyllis, 624 Hektor, 657 Gunlod, 1111 Reinmuthia, 1188 Gothlandia, and 1376 Michelle. *The Minor Planet Bulletin*, 36, 87-88.
- Harris, A. W. ; Young, J. W. ; Bowell, E. ; Martin, L. J. ; Millis, R. L. ; Poutanen, M. ; Scaltriti, F. ; Zappala, V. ; Schober, H. J. ; Debehogne, H. ; Zeigler, K. W. (1989). Photoelectric observations of asteroids 3, 24, 60, 261, and 863. *Icarus*, Volume 77, Issue 1, p. 171-186

- Hergesheimer, P. (2019). *Narrowband Astrophotography*. Photo PXL. [En línea]. Recuperado desde: <https://photopxl.com/narrowband-astrophotography/>
- Higgins, D., Pravec, P., Kusnirak, P., Galad, A., Kornos, L., Pray, D., & Koff, R. (2006). "Asteriod lightcurve analysis at Hunters Hill Observatory and collaborating stations - autumn 2006". *The Minor Planet Bulletin*, 33(4): 89–91.
- Hiriart, D., Valdez, J., Quiros, F., García, B., & Luna, E. (2005). Polima (Polarímetro óptico de imagen) manual de usuario. Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Hollow, R. (2006). Spectroscopy: Unlocking the Secrets of Star Light. *Science Teachers' Workshop*.
- Hough, J. (2006). Polarimetry: a powerful diagnostic tool in astronomy. *Astronomy & Geophysics*, 47(3).
- Karttunen, H. Kröger, P., Oja, H., Poutanen, M., & Donner, K.J. (2007). *Fundamental Astronomy* (5a ed.). New York: Springer.
- Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). (2009). El Observatorio Astrofísico Guillermo Haro en Cananea, Sonora. [En línea]. Recuperado desde: <https://www.inaoep.mx/~astrofi/cananea/>
- Jackson, S. L. (2021). *Revealing the surface of an asteroid using robotic telescopes*. The Open University. [En línea]. Recuperado desde <https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/astronomy/revealing-the-surface-asteroid-using-robotic-telescopes>
- Johnson, M. (2015). *Kepler and K2 Missions*. National Aeronautics and Space Administration (NASA). [En línea]. Recuperado desde: https://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/main/index.html
- Kutner, M. L. (2003). *Astronomy, A Physical Perspective* (2a ed.). EUA: Cambridge University Press.
- Littlefair, S. (2014). *Lectures*. PHY217 Observational Techniques for Astronomers. [En línea]. Recuperado desde: <https://slittlefair.staff.shef.ac.uk/teaching/phy217/index.html>
- Lomb, N. R. 1976. Least-Squares Frequency Analysis of Unequally Spaced Data. *Ap&SS*, 39, 447, doi: 10.1007/BF00648343
- Mahlke, M., Carry, B., & Denneau, L. (2021). Asteroid phase curves from ATLAS dual-band photometry. *Icarus*, 354, 1-18.
- Meunier, A. (2015). *Asteroids deflection using state of the art European technologies*. (Tesis de maestría). KTH, EES.
- Michimani Garcia, J. (2019). *3D Modelling of Near-Earth Asteroids using Lightcurve Database*. [Tesis de maestría]. Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.
- Morbidelli, A., Bottke Jr., W. F., Froeschlé, Ch., & Michel, P. (2002). Origin and Evolution of Near-Earth Objects. En W. F. Bottke Jr., A. Cellino, P. Paolicchi, & R. P. Binzel (Eds.), *Asteroids III* (409-420). Tucson: University of Arizona Press.
- Moreno Corral, M. A., & Torres Castilleja, S. (2012). Compilación sobre la Astronomía en México. Instituto de Astronomía de la UNAM. [En línea]. Recuperado desde: https://www.astroscu.unam.mx/IA/index.php?option=com_content&view=article&id=577&Itemid=237&lang=es

- NASA. (2022). Solar System Exploration: Asteroids. [En línea] Recuperado desde: <https://solarsystem.nasa.gov/asteroids-comets-and-meteors/asteroids/in-depth/>
- Observatorio Astronómico Nacional San Pedro Mártir (OAN-SPM). (2021). Telescopios. [En línea]. Recuperado desde: <https://www.astrossp.unam.mx/es/usuarios/instrumentos/fotometria/danes/10-espanol/telescopios>
- Ortiz, M., Carrasco, B. E., Carramiñana, A., & Pacheco, S. (2002). Site Characterization at the Observatorio Astrofísico Guillermo Haro. En Vernin, J., Benkhaldoun, Z., Muñoz-Tuñón, C. (Eds.), *ASP Conference Series*, 266, 470-473.
- Ojeda Vera, A. V. (2019). *Clasificación Taxonómica de Asteroides Cercanos a la Tierra*. (Tesis de maestría). Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Tonantzintla, Puebla.
- Peterson, R. (s.f.). Twin Keck Dusk Clouds Below. [En línea]. Recuperado desde: <https://keckobservatory.org/media/maunakea-summit/>
- Plauchu-Frayn, I., Richer, M., Colorado, E., Herrera, J., Cordova, A., Cesena, U., & Avila, F. (2017). Night Sky Brightness at San Pedro Mártir Observatory. *Astronomical Society of the Pacific*, 129(973).
- Popova, O. P. (2013). Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery and Characterization. *Science*, 342(6162), 1069-1073.
- Popescu, M. (2012). Techniques for asteroid spectroscopy. (Tesis de doctorado). Observatoire de Paris.
- Pray D., & Kusnirak, P. (2011). Light curve for 195 Tengstrom. [En línea]. Recuperado desde: <https://www.asu.cas.cz/~ppravec/newres.txt>
- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., & Flannery, B. P. 1992, Numerical recipes in FORTRAN. The art of scientific computing (Cambridge: University Press)
- Redfern, S. (2013). *Mystery solved: meteorite caused Tunguska devastation*. The Conversation. [En Línea]. Recuperado desde: <https://theconversation.com/mystery-solved-meteorite-caused-tunguska-devastation-15154>
- Roy, A. E., & Clarke, D. (2003). *Astronomy principles and practice* (4 ed., 315-329). Philadelphia: Institute of Physycs Publishing.
- Salazar, L. (2019). *Tlapiani, el guardián de asteroides*. Punto U - Universidad Autónoma de Nuevo León. [En Línea]. Recuperado desde: <https://puntou.uanl.mx/uanl-transforma/tetratelescopio-tlapiani-uanl-el-guardian-de-asteroides/>
- Siblini, A. (2017). Optimization of Antenna ARMA (Agile Matrix Antenna radiating by pixel elaborated with Meta-material) For beam forming for the RFID and Radar Applications. Electronics. Université de Limoges.
- Stephens, R., & Coley, D. (2017). Lightcurve Analysis of Trojan Asteroids at the Center for Solar System Studies 2017 January - March. *The Minor Planet Bulletin*, 44(3), 252-257.
- Stephens, R., Coley, D., & French, L. (2015). Dispatches from the Trojan Camp - Jovian Trojan L5 Asteroids Observed from CS3: 2014 October - 2015 January. *The Minor Planet Bulletin*, 42(3), 216-224.

- Stellingwerf, R. F. 1978. Period Determination Using Phase Dispersion Minimization. *The Astrophysical Journal*, 224, 953, doi: 10.1086/156444.
- Stock, J. (1964). Procedures for Location of Astronomical Observatory Sites. *Symposium - International Astronomical Union*, 19: 35-72.
- Tedesco, E. F., Tholen, D. J., & Zellner, B. (1982). The eight-color asteroid survey: Standard stars. *The Astronomical Journal*, 87(11), 1585-1592.
- Tedesco, E. F., Williams, J. G., Matson, D. L., Veeder, G. J., Gradie, J. C., & Lebofsky, L. A. (1989). A three-parameter asteroid taxonomy. *The Astronomical Journal*, 97(2), 580-606.
- The Astronomical Society of Las Cruces (ASLC). (2007). The High Desert Observer. The Bulletin of the Astronomical Society of Las Cruces.
- Tholen, D. J. (1984). *Asteroid taxonomy from cluster analysis of photometry*. (Ph.D. thesis). University of Arizona, Tucson.
- Thorp, R. (2016). *Astronomical Observatory Sites*. iSchools organization.
- Trigo-Rodríguez, J. M., & Madiedo Gil, J. M. (2013). Asteroides y cometas como cuerpos progenitores de meteoritos: su peligro de impacto con la Tierra. *Asociación Española para la Enseñanza de las Ciencias de la Tierra (AEPECT)*, 21(3), 293-301.
- Trippe, S. (2014). Polarization and polarimetry: A review. *Journal of The Korean Astronomical Society*, 47, 15-39.
- Valdés Parra, J. R., Guichard Romero, J., & Camacho Lara, S. (2017). Determinación de parámetros físicos de asteroides cercanos a la Tierra (NEAs). *Entorno UDLAP*, 3, 24-35.
- Vargha, M., & Kolláth, Z. (1999). The first century of Konkoly Observatory. *Astronomy & Geophysics*, 40(5), 5-17.
- Ventura González, S. (2011). *Mediciones de transmisión atmosférica y caracterización de filtros y películas delgadas en longitudes de onda sub-milimétricas y lejano infrarrojo con un espectrómetro de transformada de Fourier*. [Tesis de maestría]. Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.
- Wainscoat, R. (1998). *Mauna Kea Observatories viewed from the Northeast*. Institute for Astronomy, University of Hawaii. [En línea]. Recuperado desde: <http://www.ifa.hawaii.edu/images/aerial-tour/northeast.html>
- Warner, B. D. (2006). *A Practical Guide to Lightcurve Photometry and Analysis*. New York, NY: Springer.
- Wehinger, P., A. (2007). El observatorio de San Pedro Mártir: A world-class site for large telescopes. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, 28.
- Yau, K., Weissman, P., & Yeomans, D. (1994). Meteorite Falls In China And Some Related Human Casualty Events. *Meteoritics*, 29(6), 864-871.
- Zamorano, J., Cardiel, N., Pascual, S., & Gallego, J. (2020). Técnicas experimentales en astrofísica. Universidad Complutense Madrid. [En Línea]. Recuperado desde: http://guaix.fis.ucm.es/~jaz/master_TEA/tea_book/docs/index.html
- Zellner, B., Tholen, D., & Tedesco, E. (1985). The eight-color asteroid survey: Results for 589 minor planets. *Icarus*, 61(3), 355-416.

Apéndice A

Los códigos desarrollados para este trabajo, mencionados en la metodología, se presentan a continuación. Inicialmente se muestra el código *Mod_QHorizons.py* para la planeación de observaciones (sección III.1) que permite la selección de asteroides. Luego para la reducción de datos (ver sección III.3): los códigos *scrub_qhy_fits.py* y *redbasica_fot.py*. para la calibración de imágenes; *fotometria_P.py* y *RelMag.py* para la obtención de curvas de luz; y finalmente, el módulo *rotphase.py* para la obtención de curvas de fase rotacional y ajuste por mínimos cuadrados (ver secciones III.3.4 y III.3.5).

A.1 Planeación de observaciones

La función *cono_anytime()* sirve para explorar todos los objetos móviles disponibles a un lugar y fecha dados. Esta función es útil para hacer uso a su vez de la función *phys()* que permite buscar las características físicas sobre el periodo de rotación, el tipo espectral del objeto y si este es un neo o no. Los parámetros de entrada son el código del observatorio, sus coordenadas de longitud y latitud, la fecha de observación, el tamaño del cono alrededor del cenit y una magnitud límite para los objetos. Como resultado se genera la tabla de los objetos con la información consultada y de la cual se puede hacer la selección de objetos.

```
def cono_anytime
(LOC='720',Long=-99.9001,Lat=24.7247,ti='2021-12-03T06:05:00',cono=20,mag=15,arch='Objs.csv'):
    '''Func para consultar si objetos movibles estan cerca al cenit del sitio del
observatorio
LOC--> Código del observatorio. Por default: '720' del OAU
Long--> Longitud. Este: positivo, Oeste: negativo. Por default -99.9001 Iturbide
Lat--> Latitud. Norte: positivo, South: negativo. Por default 24.7247
ti--> Tiempo en UTC
cono--> Cono alrededor del cenit en grados. Por default = 20
mag--> Limite de magnitud más oscuro para filtrar los resultados
arch--> Archivo para guardar los resultados
OUT--> Resultados ...'''
t=Time(ti,scale='utc',format='isot')#convertir tiempo
ST=ST_calc(Long,t.jd)#Calculo de tiempo sideral local a fecha y hora capturadas
zenit=(ST*15,Lat)
KK= Skybot.cone_search(zenit, rad=cono, location=LOC, epoch=t.iso)
KK.remove_columns(['x','y','z','vx','vy','vz'])#limpiar tabla
KK.sort(['V','Name']) #Ordenar por magnitud y nombre
R=KK['V'].size #num de renglones
KP=KK.to_pandas(index='V') #Convertir a Pandas
Ki=KP.index #extraer valores de magnitud ordenados V
inds=np.where(Ki>mag)#filtrar por magnitudes
KK.remove_rows(inds)#Eliminar objetos menos brillantes
#print(KK)
KK.write(arch,format='csv',overwrite=True)
return KK
```

```

def phys
(LOC='720',Long=-99.9001,Lat=24.7247,ti='2020-10-16T03:34:00',cono=20,mag=15,arch='Objs.csv'):
    Tabla=cono_anytime(LOC=LOC,Long=Long,Lat=Lat,ti=ti,cono=cono,mag=mag,arch=arch)
    numeros=len(Tabla['Number'])
    for k in range(numeros):
        num=Tabla['Number'][k]
        nam=Tabla['Name'][k]
        Vm=Tabla['V'][k]
        RA=Tabla['RA'][k]
        DEC=Tabla['DEC'][k]

        if is_integer(num):
            try:
                val=SBDB.query(str(int(num)), phys=True)['phys_par']
['rot_per']#consulta el periodo rot
                spec_T=SBDB.query(str(int(num)), phys=True)['phys_par']
['spec_T']#consulta el tipo espectral
                spec_B=SBDB.query(str(int(num)), phys=True)['phys_par']
['spec_B']#consulta el tipo espectral
                NEO=SBDB.query(str(int(num)), phys=True)['object']
['neo']#consulta si es neo
            except KeyError:
                rstr=pyasl.coordsDegToSexa(float(RA.value),float(DEC.value))
                ral=rstr[:11]
                del=rstr[-13:]
                result=('Num:{:5}, Name:{:15}, RA:{:} DEC:{:}, V:{:2.2f},
RotPer:{:9}, Type:{:}/{:}, NEO:{:}... NO RotPer??!!'
                    .format(num,nam,ral,del,Vm,val,spec_T,spec_B,NEO))
                print(result)
                continue
                rstr=pyasl.coordsDegToSexa(float(RA.value),float(DEC.value))
                ral=rstr[:11]
                del=rstr[-13:]
                result=('Num:{:5}, Name:{:15}, RA:{:} DEC:{:}, V:{:2.2f}, RotPer:
{:9}, Type:{:}/{:}, NEO:{:}'
                    .format(num,nam,ral,del,Vm,val,spec_T,spec_B,NEO))
                print(result)

```

Código *Mod_Qhorizons.py* para la planeación de observaciones.

A.2 Reducción de datos

A.2.1 Calibración de imágenes

Para las observaciones realizadas con la cámara tipo CMOS, se utilizó el módulo *scrub_ghy_fits.py* que usa las funciones *mad()* y *robomad()* para calibrar las imágenes astronómicas. Es importante mencionar, que antes de correr el código es necesario crear una carpeta con el nombre “SCRUBB” donde se guardarán las imágenes reducidas. Al correr el código se pide ingresar la lista del archivo con las imágenes del objeto a corregir.


```

def MAD(im):
    '''Devuelve la mediana y la desviación absoluta de la mediana de una matriz'''

    m = np.median(im)
    dif = abs(im - m)
    s = np.median(dif)
    return(m, s)

#-----
def robomad(im, thresh=3):
    '''Supone que la matriz im tiene píxeles de fondo normalmente distribuidos y algunas
    fuentes, como estrellas, píxeles malos y rayos cósmicos. Thresh = no. de sigma para
    el rechazo (por ejemplo, 5).'''

    #PASO 1: Comienza por obtener la mediana y MAD como proxies robustos para la media y la
    desviación estándar, sd.
    m,s = MAD(im)
    sd = 1.4826 * s

    if (sd < 1.0e-14):
        return(m, sd)
    else:
        #PASO 2: Identifica los valores atípicos, vuelve a calcular la media y sd con los
        píxeles restantes.
        gdPix = np.where(abs(im - m) < (thresh*sd))
        m1 = np.mean(im[gdPix])
        sd1 = np.std(im[gdPix])

        #PASO 3: Repite el paso 2 con nuevos valores de media y sd.
        gdPix = np.where(abs(im - m1) < (thresh*sd1))
        m2 = np.mean(im[gdPix])
        sd2 = np.std(im[gdPix])
        return(m2, sd2)

#####-----MAIN-----#####
arch=input('Nombre de la lista con archivos .fits (incluyendo la extension del archivo):\n')
obj=[]
save_path='SCRUBB/' #Ojo: hay que crear este directorio
os.system('mkdir '+save_path) # Crear directorio
with open(arch, 'r') as f:
    objetos=f.readlines()
    for linea in objetos:
        obj.append(linea.strip('\n'))
for frame in obj: #nf resta las medianas de fila en cada cuadro y guarda en el nuevo
directorio "save path"
    d,h = pf.getdata(frame, header = True)
    xS = h['NAXIS1']
    yS = h['NAXIS2']
    #Restar DARKS Al parecer no sirve de nada, el ruido aleatorio varía mucho
    #d=d-MDark
    rowmeds = np.median(d, axis = 1)
    d_scrubbed = d - np.outer(rowmeds,np.ones((xS)))
    mn, std = robomad(d_scrubbed) #MAD
    d_scrubbed_bkg = np.float32(d_scrubbed - mn) #remuebe MAD de BKG
    d_scrubbed_bkg[:10,:] = mn #reemplaza píxeles calientes en la parte superior con MAD
    pf.writeto(save_path + 'Scrubbed_' + frame, d_scrubbed_bkg, header =
h,output_verify="ignore") #guarda scrubbed

```

Código *scrub_qhy_fits.py* para la reducción de datos con cámara CMOS.

Cuando los datos son obtenidos con cámara tipo CCD, la calibración se realiza con la función *reducir()* del modulo *redbasica_fot.py*. Al ejecutar la función, te pide ingresar las listas de los archivos con las imágenes del objeto y de los *bias* y *flats* tomados, estas últimas servirán para la creación de los “masters” de calibración.

```

def reducir(flats,bias,objetos):
    """ --> una vez ejecutado %run redbasica la forma de uso es:
    : reducir('FLAT.dat','BIAS.dat','OBJETOS.dat')
    --> Como resultado guardará los archivos procesados en el directorio
    de trabajo"""

    # armo listas para bias, flats y objetos
    archf=open(flats,'r')
    archb=open(bias,'r')
    archo=open(objetos,'r')

    listb=archb.readlines()
    lf=archf.readlines()
    listo=archo.readlines()
    listf=[]

    for ii in lf:
        listf.append(ii)

    flg=(len(listb) != 0)
    assert flg,"No hay imagenes de BIAS"
    flg=(len(listf) != 0)
    assert flg,"No hay imagenes de FLAT"
    print('Listas procesadas')

    # arma un cubo con los bias
    cubo=np.zeros((ft.getval(listb[0][:-1],'naxis2'),ft.getval(listb[0]
[:-1],'naxis1'),len(listb)),dtype=float)
    for ii in range(len(listb)):
        img,hdr=rghp.leefits(listb[ii][:-1],uint=True)
        cubo[:, :, ii]=img

```



```

# ordena pixel a pixel de menor a mayor
cubo1=np.sort(cubo,axis=2)

# calcula el valor medio despreciando el valor mas alto
bias=np.mean(cubo1[:, :, :len(listb)-1],axis=2)
hdr.add_comment('Combinacion de {:d} BIAS con Python'.format(len(listb)))
ft.writeto('master_bias.fit',bias,header=hdr,overwrite=True)
print('BIAS listo')

# arma un cubo con los flats
cubo=np.zeros((ft.getval(listf[0][:-1], 'naxis2'), ft.getval(listf[0]
[:-1], 'naxis1'), len(listf)), dtype=float)
# nchar es el num de caracteres previos al nombre en las listas de
archivos
nchar=9
for ii in range(len(listf)):
    img, hdr=rghp.leefits(listf[ii][:-1], uint=True)

    # corrige flats por bias
    img=img-bias
    cubo[:, :, ii]=img
    hdr.add_comment('Corregido por BIAS con Python')
print('Correccion de FLATS por BIAS. OK')

# ordena pixel a pixel de menor a mayor
cubo1=np.sort(cubo,axis=2)

# calcula el valor medio despreciando el valor mas alto
flat=np.mean(cubo1[:, :, :len(listf)-1],axis=2)
dim=np.shape(flat)
# calcula un valor medio para el flat resultante
# considerando solo la zona central
fm=np.mean(flat[dim[0]//2-250:dim[0]//2+250, dim[1]//2-250:dim[1]//2+250])
hdr.add_comment('Combinacion de {:d} FLATS con Python'.format(len(listf)))
hdr.add_comment('Valor medio del FLAT: {:.2f}'.format(fm))
ft.writeto('master_flat.fit', flat, header=hdr, overwrite=True)
print('FLAT listo')

# renormaliza el flat con el valor medio
flatv=flat/fm

# detecta valores igual a cero para evitar NaNs
inx=np.where(flatv == 0.)
if(len(inx) != 0):
    flatv[inx]=0.1

# procesa imagenes de objetos
for ii in range(len(listo)):
    img, hdr=rghp.leefits(listo[ii][:-1], uint=True)

# corrige por bias y flat
img=(img-bias)/flatv
hdr.add_comment('Corregido por BIAS con Python')
hdr.add_comment('Corregido por FLAT con Python')
hdr.add_comment('Valor medio del FLAT: {:.2f}'.format(fm))

ft.writeto(listo[ii][nchar:-2], img, header=hdr, overwrite=True)
print('Correccion de OBJETOS por FLAT. OK')

```

Código *redbasica_fot.py* para reducción de datos con cámara CCD.

El resultado para ambos casos son imágenes astronómicas corregidas y confiables para su extracción de datos.

A.2.2 Obtención de curvas de luz

La fotometría de apertura se realiza haciendo uso del módulo *fotometria_P.py* que permite seleccionar objetos con la clase *mou_clickN* y obtener sus coordenadas en la imagen con la función *centro()* para luego obtener los valores de flujo total y magnitud de los objetos a partir de la función *fot()*. Finalmente genera graficas de flujo y magnitud vs tiempo juliano para los objetos seleccionados.

```
# fotometria precisa en una serie de aperturas
#
def fot(img,obj,coo,rr,ri,re,tint=1.,cte=22.,gain=1.,rdnoise=1.,ring=True,modo='mean',fon=False):
    """
    Calcula el flujo total en e- y la magnitud de un objeto en una serie de aperturas circulares
    considerando la contribucion en el borde de la apertura por pixels fraccionales.
    Uso:
        val,sky=fot
        (img,obj,coo,rr,ri,re,tint=1.,cte=22.,gain=1.,rdnoise=1.,ring=True,modo='mean',fon=False)

    Parámetros:
    -----
    img      : imagen donde esta el objeto. [array]
    obj      : numero de identificacion del objeto. [int]
    coo      : tuple con coordenadas Y y X del objeto. Ojo con el orden. [int o float]
    rr       : tuple con el listado de aperturas. [float]
    ri       : radio interno de la apertura. radi tiene que ser menor que re. [float]
    re       : radio externo de la apertura. rade tiene que ser mayor que ri. [float]
    tint     : tiempo de integracion utilizado en seg. El default es tint=1 [float]
    cte      : constante para el calculo de la magnitud. El default es cte=22.0 [float]
    gain     : ganancia del detector. El default es gain=1 [float]
    rdnoise  : ruido de lectura del detector. El default es rdnoise=1 [float]
    ring     : flag que indica si en la estimacion del cielo considera todo el anillo y desprecia
    pixeles altos (True), o hace un calculo tomando octavos del anillo. El default es ring=True. [bool]
    modo     : indica si en la estimacion del cielo usa la mediana ('median') o el valor medio
    ('mean'). El default es modo='mean'. [string]
    fon      : si es True utiliza el valor en re como valor medio del fondo de cielo. El default es
    fon=False. [bool]
```

```

Returns
-----
val      : lista donde cada elemento es un vector que contiene:
           0) la identificacion del objeto,
           1) el radio de la apertura,
           2) el area total,
           3) el flujo neto,
           4) la magnitud,
           5) su error
           6) y la relacion S/N. [todos float menos el nro. de identificacion que es int]
sky      : vector que contiene:
           0) el area del anillo donde se estimo el cielo,
           1) el flujo total,
           2) el valor del flujo de cielo por pixel,
           3) y los radios interno
           4) y externo utilizados para el anillo.
           Si se utilizo un valor constante para el cielo ambos radios son cero. [float] ""

# dimensiones de la imagen, lado del box de extraccion y control de
# parametros ingresados
dim=np.shape(img)
box=re+1
assert ((ri >= 1.) & (re > 1.)), 'Radio de anillo para el cielo < 1. Aborta.'
assert (ri < re), 'Radio exterior es menor que el interior. Aborta.'
assert (ri+1 < re), 'Seccion minima de 2 pix para el anillo. Aborta.'
assert (np.max(rr) <= ri), 'Aperturas muy grandes para ese anillo. Aborta.'
assert (np.min(rr) >= 1.), 'Aperturas muy pequeñas (< 1 pix). Aborta.'
assert ((coo[0] >= 0.) & (coo[1] >= 0.)), 'Coord. del objeto incorrectas. Aborta.'
assert ((coo[0] >= box) & (coo[1] >= box) & (dim[0]-1-coo[0] >= box) & (dim[1]-1-coo[1] >= box)), 'Objeto
muy cerca del borde. Aborta.'
assert (tint > 0.), 'Tiempo de integracion debe ser positivo. Aborta.'
assert (gain > 0.), 'Ganancia debe ser positiva. Aborta.'
assert (rdnoise > 0.), 'Read-noise debe ser positivo. Aborta.'
fotom=[]

# estima valores para el cielo utilizando el valor medio o la mediana.
if(fon):
    sky=re*gain
else:
    ss=anillo(img, coo, ri, re, full=ring)
    if(modo == 'median'):
        sky=ss[3]*gain
    else:
        sky=ss[2]*gain

# bucle para cada apertura donde calcula la magnitud, el error y la relacion S/N.
for cr in rr:
    val=aper(img, coo, cr)
    flx=val[2]*gain-val[1]*sky
    if(flx > 0.):
        mag=cte-2.5*np.log10(flx/tint)
        sn=flx/np.sqrt(flx+val[1]*(1.+1./ss[0])*(sky+rdnoise**2))
        emag=2.5*np.log10(np.e)/sn
    else:
        mag=99.
        sn=0.
        emag=9.999
    fin=[obj, cr, val[1], flx, mag, emag, sn]
    fotom.append(fin)

if(fon):
    return fotom, [1., sky, sky, 0., 0.]
else:
    return fotom, [ss[0], ss[1]*gain, sky, ri, re]

```

```

#Funcion para seleccionar N posiciones de objeto
class mou_clickN:
    def __init__(self, img, Zsc=True, N=3):
        '''img--> matriz de datos de la imagen
        Zsc--> bandera para mejorar contraste tipo ZSCALE como DS9
        N--> Numero de Clicks en la imagen antes de cerrar
        OUT-->coords, pares de numeros que representan la coordenada extraida'''
        # Función simple de clic del mouse para almacenar coordenadas
        def onclickN(event):
            global ix, iy
            ix, iy = event.xdata, event.ydata
            # Asigna una variable global para acceder fuera de la función
            global coords
            coords.append((ix, iy))
            # Desconecta después de 2 clicks
            if len(coords) == N:
                fig.canvas.mpl_disconnect(cid)
                plt.close(1)

            return
        print("1)Click sobre objeto\n ")
        fig = plt.figure(1)
        if Zsc==True:
            a,b=zscale(img)
        else:
            a=np.min(img);b=np.max(img)
        plt.imshow(img,vmin=a,vmax=b)#Mejorar el contraste

        # Llama a la funcion click
        global coords
        coords=[]
        cid = fig.canvas.mpl_connect('button_press_event', onclickN)
        plt.show(block=True) #Bloquear prompt en la imagen para interactuar
        self.xy=coords

```



```

# funcion para encontrar el baricentro fotometrico de la
# imagen de un objeto utilizando promedios pesados en una seccion
# de la imagen centrada en el objeto.

def centro(img, coo, box=9, dmax=1, sat=62000, mod='margen'):
    """
    Encuentra el baricentro fotometrico de una imagen a partir de coordenadas aproximadas
    usando distribuciones marginales en lineas y columnas pesados con el flujo, o procesos
    morfologicos.
    La funcion no controla si la caja de busqueda esta completamente dentro de la imagen y
    es posible que en ciertos casos la caja varie sus dimensiones para no sobrepasar los bordes.
    En la salida se dan las coordenadas (Y, X) del baricentro fotometrico, las coordenadas
    (X, Y) para ds9, y flags de distancia respecto a las coord. iniciales y saturacion.

    Uso::
        cen=centro(img, coo, box=7, dmax=1, sat=62000, mod='margen')

    Parámetros:
    -----
    img      : imagen o array a procesar. [float o int]

    coo      : tuple con coordenadas (Y, X) aproximadas del centro de la imagen. Ojo con el
    orden. [float o int]

    box      : lado de la caja de busqueda. El default es box=9. [int]

    dmax     : numero maximo de pixels entre las posiciones inicial y final. El default es
    dmax=1. [float o int]

    sat      : nivel de saturacion. El default es sat=62000. [int]

    mod      : modo para determinar el baricentro. Puede ser 'margen' o 'morf' para metodos de
    sumas marginales o procesos morfologicos, respectivamente. El default es mod='margen'. [str]

    Returns
    -----
    cen      : lista con las coordenadas (Y, X) del baricentro fotometrico (en ese orden,
    float), las coordenadas (X,Y) para ds9 (se le suma lpx, float), un string que indica si la
    diferencia entre las coord. iniciales y finales es mayor que dmax ('Ok' o 'Err'), y un flag
    que indica si la fuente es util o esta saturada ('Ok' o 'Sat'). """

    # asegura que las coordenadas aproximadas sean enteras
    xa=int(coo[1]+0.5)
    ya=int(coo[0]+0.5)

    # box entero e impar
    box=int(box+0.5)
    box=(box//2)*2+1

    # dimensiones de la imagen y area de la caja de busqueda
    dim=np.shape(img)
    x0=max(xa-box//2, 0)
    x1=min(xa+box//2+1, dim[1])
    y0=max(ya-box//2, 0)
    y1=min(ya+box//2+1, dim[0])
    sec=np.copy(img[y0:y1, x0:x1])

    # resto valor minimo dentro de la caja de busqueda
    sec-=np.min(sec)
    if(mod == 'margen'):

    # asume como centro el pixel con el mayor valor en la caja de busqueda
    dim0=np.shape(sec)
    cen=np.argmax(sec)
    yc=cen//dim0[0]+y0
    xc=cen%dim0[1]+x0

```

```

# hace una nueva busqueda centrando la caja en el pixel encontrado con mayor valor
x0=max(xc-box//2,0)
x1=min(xc+box//2+1,dim[1])
y0=max(yc-box//2,0)
y1=min(yc+box//2+1,dim[0])
sec=np.copy(img[y0:y1,x0:x1])

# calcula las sumas marginales dentro de la caja de busqueda
yy,xx=np.indices(sec.shape)
yc=np.sum(sec*yy)/np.sum(sec)+y0
xc=np.sum(sec*xx)/np.sum(sec)+x0

else:

# define el objeto mediante procedimientos morfologicos y luego determina el baricentro
thr=img[ya,xa]/3.
secl,nn=nd.label(sec>thr,structure=np.ones((3,3)))
cen=nd.center_of_mass(sec,secl,[1])
yc=cen[0][0]+y0
xc=cen[0][1]+x0

# flag de distancia respecto del centro del box
if(np.sqrt((xa-xc)**2+(ya-yc)**2) < dmax): flg='Ok'
else: flg='Err'

# flag de saturacion
if(img[int(yc+0.5),int(xc+0.5)] < sat): flg1='Ok'
else: flg1='Sat'

return [(yc,xc),(xc+1,yc+1),flg,flg1]

#####fotometria de apertura
print('Ingresa el nombre de la lista con archivos .fit (incluyendo la extension del archivo):\n')
arch=input()
obj=[]
with open(arch,'r') as f:
    objetos=f.readlines()
    for linea in objetos:
        obj.append(linea.strip('\n'))
n=int(input('Numero de objetos a seleccionar (siendo el primer seleccionado el objeto de interés): \n'))
ban=input('Seguir objeto [y/n]?: ')#Obtener coordenadas de la primera imagen??
if ban=='y': #Preguntar valor de error maximo
    maxerr=float(input('Limite de error permitido [mag]: '))#definir error maximo para descartar
imagen
else:
    maxerr=0
ban0=1 #entrar a mouclick??
box=10 #Caja para buscar centroide
rr=(2.5,3.5,4.5,5.5,6.5,7.5,8.5) #Aperturas
ri=10 #Anulus
re=13 # Danulus
filenames = []
filenames2 = []
fignames = []
fignames2 = []
for i in range(1,n+1):
    filenames.append('Objeto' + str(i) + '_flujo.txt')
    filenames2.append('Objeto' + str(i) + '_magnitud.txt')
    fignames.append('Objeto' + str(i) + '_GRAFICAflujo.jpg')
    fignames2.append('Objeto' + str(i) + '_GRAFICAmagnitud.jpg')

```

```

for item in obj:
    im,hd=leefits(item)
    if ban0==1:
        out=mou_clickN(im,N=n)
        oxy=np.array(out.xy)
        if ban=='y':
            ban0=0 #ya no entrara a mou_clickN
    k=0
    for j in range(1,n+1):
        x=oxy[j-1,0]
        y=oxy[j-1,1]
        if x==None and y==None:    #!descarta imagen al dar click en area fuera de imagen
            print("IMAGEN DESCARTADA!! =",item)
            archivo_1 = open("Imagenes descartadas.txt","a") #archivo con imagenes
descartadas!!

            archivo_1.write(item)
            archivo_1.close()
            continue
        else:
            yx=centro(im, (y,x),box=box)
            if ban=='y':
                oxy[j-1,0]=yx[0][1] # guardar nuevo x
                oxy[j-1,1]=yx[0][0] # guardar nuevo y
            else:
                maxerr=0

            val,sky=fot(img=im,obj=1,coo=yx[0],rr=rr,ri=ri,re=re,tint=hd['EXPTIME'])
            R=[] #genera una nueva lista con los ultimos elementos
            for i in range(len(val)):
                R.append(val[i][5])
            mvalor=val[R.index(min(R))]
            if mvalor[5]>maxerr and ban=='y':    #!descarta imagen por error maximo
                print("IMAGEN DESCARTADA!! =",item)
                archivo_1 = open("Imagenes descartadas.txt","a") #archivo con
imagenes descartadas!!

                archivo_1.write(item)
                archivo_1.close()
                continue
            print("-- FILENAME =",item)
            area=(val[R.index(min(R))][2])
            flux1=(val[R.index(min(R))][3])
            magn=(val[R.index(min(R))][4])
            emagn=(val[R.index(min(R))][5])
            f1=10**((magn+emagn/2)/2.5)
            f2=10**((magn-emagn/2)/2.5)
            eflux=f1-f2
            flux2=flux1
            archivo_1 = open(filenamees[k],"a")
            archivo_1.write(f"{hd['JD']}\t{flux2}\t{eflux}\t{hd['EXPTIME']}\n") #JD puede
estar escrito diferente en algunos header
            archivo_1.close()
            archivo_2 = open(filenamees2[k],"a")
            archivo_2.write(f"{hd['JD']}\t{magn}\t{emagn}\t{hd['EXPTIME']}\n") #JD puede
estar escrito diferente en algunos header
            archivo_2.close()
            k=k+1

```

```

#####grafica flujo vs dia juliano
k=0
for i in range(1,n+1):
    data=pd.read_csv(filenamees[k],sep="\t",header=None)
    plt.figure(figsize=(10,10))
    x=data[:,0]
    y=data[:,1]
    plt.errorbar(x,y,yerr=data[:,2],fmt='.',ecolor="r",elinewidth=1.0)
    plt.xlabel('Día juliano')
    plt.ylabel('Flujo')
    plt.title('Grafica')
    plt.savefig(fignames[k])
#####grafica magnitud vs dia juliano
data=pd.read_csv(filenamees2[k],sep="\t",header=None)
plt.figure(figsize=(10,10))
x=data[:,0]
y=data[:,1]
plt.errorbar(x,y,yerr=data[:,2],fmt='.',ecolor="r",elinewidth=1.0)
plt.xlabel('Día juliano')
plt.ylabel('Magnitud')
plt.title('Grafica')
plt.savefig(fignames2[k])
k=k+1

```

Código *fotometria_P.py* para fotometría de apertura.

La fotometría diferencial se realiza con el código de *RelMag.py*, que obtiene la magnitud relativa del asteroide relativa a una de las estrellas de referencia elegida, y genera su curva de luz de magnitud relativa vs el tiempo juliano.


```

#####fotometria diferencial

name=input('Nombre del asteroide: \n')
date=input('Ingrese la fecha de observación: \n')
k=int(input('Numero de archivo (magnitud) de estrella de referencia: \n'))

magA=pd.read_csv('Objeto1_magnitud.txt',sep="\t",header=None)#archivo magnitud y error de asteroide
magE=pd.read_csv('Objeto'+str(k)+'_magnitud.txt',sep="\t",header=None)#archivo magnitud y error
# de estrella de referencia

#magnitud relativa y normalizacion
RelMag=magA[1]-magE[1]
magAError=magA[2]

vmax=np.max(RelMag)
vmin=np.min(RelMag)
offset=(vmax+vmin)/2

if offset > np.mean(magE[1]):
    RelMag=RelMag+offset
else:
    RelMag=RelMag-offset

#creacion de archivo con la magnitud relativa
archivo_1 = open('CurvaRelMag_'+str(k)+'.txt', "a")
for i in range(len(magA[0])):
    archivo_1.write(f"{magA[0][i]}\t{RelMag[i]}\t{magAError[i]}\n")
archivo_1.close()

#grafica magnitud relativa vs dia juliano
data=pd.read_csv('CurvaRelMag_'+str(k)+'.txt',sep="\t",header=None)
plt.figure(figsize=(10,10))
x=data[:,0]
y=data[:,1]
plt.errorbar(x,y,yerr=data[:,2], fmt='.',ecolor="r",elinewidth=3.0)
plt.ylim(max(y), min(y))
plt.legend([date])
plt.xlabel('Dia Juliano')
plt.ylabel('Magnitud Relativa')
plt.title(name)
plt.savefig('CurvaRelMag_Grafica_'+str(k)+'.jpg')

```

Código *RelMag.py* para fotometría diferencial.

A.2.3 Obtención de curvas de fase rotacional y ajuste por mínimos cuadrados

El periodo de rotación se obtiene empleando el código *rotphase.py* el cual utiliza los algoritmos de Lomb & Scargle, Minimización de Dispersión de Fase (PDM) y el método de análisis de Fourier implementado por Harris et al. (1989) para calcular periodos rotacionales. De los primeros dos métodos se obtiene un gráfico que ilustra la potencia espectral, en el caso de Lomb & Scargle, y los valores del parámetro θ en el caso de PDM, contra la frecuencia más probable relacionada al periodo de rotación. A su vez, se genera el gráfico correspondiente al valor de periodo de rotación dado como la magnitud relativa contra la fase rotacional que va de 0 a 1. Además, el código permite obtener un ajuste por mínimos cuadrados de esta curva de fase rotacional a partir de un modelo general basado en series de Fourier.

En las imágenes se muestra el código como ejemplo para datos de observaciones llevadas a cabo en diferentes épocas.

```

#####
#Se incluye el dia juliano para la fase 0 en la func. rotphase()
#Se agrega el calculo de periodos por PDM
#Se graba un archivo .dat para fortran
#(Harris, A. W., Young, J. W., Bowell, E., Martin, L. J., Millis, R. L.,
Poutanen,
#M., Scaltriti, F., Zappala, V., Schober, H. J., Debehogne, H., and Zeigler,
#K. W. (1989). Photoelectric observations of asteroids 3, 24, 60, 261, and
#863. Icarus, 77:171(186)
#
def rotphase (JD,Mg,Err,RP,JD0=0):
    JD=JD-JD0#fecha de fase rotacional 0
    JDhr=JD*24
    fase=np.mod(JDhr,RP)/RP
    matriz=np.array([fase,Mg,Err]).T
    fmatriz=matriz[matriz[:,0].argsort()]
    return fmatriz

def clipping(dat,mod,cut):
    '''Function to perform Sigma Clipping from data and model...
    note: both arrays have to have the same size'''
    kk=mod-dat
    kk1=sigma_clip(kk,sigma=cut)
    out=kk1+mod
    return out

#Fourier function:
def func(t, a0, a1, b1, a2, b2, a3, b3, a4, b4, a5, b5, a6, b6):
    out=a0 + a1*np.cos(2*np.pi*t) + b1*np.sin(2*np.pi*t) + a2*np.cos(4*np.pi*t)\
    + b2*np.sin(4*np.pi*t)+ a3*np.cos(6*np.pi*t) + b3*np.sin(6*np.pi*t) +\
    a4*np.cos(8*np.pi*t) + b4*np.sin(8*np.pi*t) + a5*np.cos(10*np.pi*t) +\
    b5*np.sin(10*np.pi*t) + a6*np.cos(12*np.pi*t) + b6*np.sin(12*np.pi*t)
    return out

def P_fit(x,y):
    '''Fitting function for modelFase
    rot-->rot Period
    magPr--> observed Pr'''
    X=(x,x)
    model = Model(func)
    model.set_param_hint('a0', value=0.1,min=-10,max=10)
    model.set_param_hint('a1', value=0.1,min=-10,max=10)
    model.set_param_hint('b1', value=0.1,min=-10,max=10)
    model.set_param_hint('a2', value=-0.1,min=-10,max=10)
    model.set_param_hint('b2', value=-0.1,min=-10,max=10)
    model.set_param_hint('a3', value=0.1,min=-10,max=10)
    model.set_param_hint('b3', value=0.1,min=-10,max=10)
    model.set_param_hint('a4', value=0.1,min=-10,max=10)
    model.set_param_hint('b4', value=-0.1,min=-10,max=10)
    model.set_param_hint('a5', value=-0.1,min=-10,max=10)
    model.set_param_hint('b5', value=-0.1,min=-10,max=10)
    model.set_param_hint('a6', value=-0.1,min=-10,max=10)
    model.set_param_hint('b6', value=-0.1,min=-10,max=10)
    params = model.make_params()
    # Fitting
    model_fit = model.fit(y, params,
        t=X,verbose=True,max_nfev=10000)
    return model_fit

```

```

#Carga de Datos
df1 = np.loadtxt('ObsFecha1_RelMag.txt',delimiter="\t")
df2 = np.loadtxt('ObsFecha2_RelMag.txt',delimiter="\t")
df3 = np.loadtxt('ObsFecha3_RelMag.txt',delimiter="\t")
df4 = np.loadtxt('ObsFecha4_RelMag.txt',delimiter="\t")
dataframes = np.vstack((df1,df2,df3,df4))
np.savetxt('Relative_Magnitudes.xls',dataframes,delimiter="\t")
data = np.loadtxt('Relative_Magnitudes.xls',delimiter="\t")
np.savetxt('TESTfortran.dat',data,fmt='%7.10f %1.3f %1.3f')#Grabar archivo
en formato para FORTRAN

JD = data[:,0]
RelMag = data[:,1]
Error = data[:,2]

#Busqueda de periodos#####
#LombScargle approach
frequency, power = LombScargle(JD, RelMag, Error).autopower(nyquist_factor=1,
minimum_frequency = 1., maximum_frequency=10.)
maxfr=frequency[np.where(power==np.max(power))]
rp=24/maxfr
print("LOMBSC...Maxfrm = ",maxfr,"\nRotPer[h] = ",rp)
###PDM Approach
guess=np.linspace(1, 10, 500) #periodos candidatos a ser evaluados en horas

RePDM=pdm(24*JD,RelMag,Error,guess,nbin=10,nsmc=8,numc=8)

print("PDM...RotPer[h] = ",RePDM.pmin)
plt.figure()
plt.clf()
plt.plot(24/frequency, power)
plt.xlabel('Periods [h]')
plt.ylabel('Spectral Power')
plt.title('Lomb Scargle peroidogram')

plt.figure()
plt.clf()
g=rotphase(df1[:,0],df1[:,1],df1[:,2],rp,JD0=df1[0,0])
plt.errorbar(g[:,0],g[:,1],yerr=g[:,2],fmt='.',elinewidth=2.0,label='Fecha 1')

g=rotphase(df2[:,0],df2[:,1],df2[:,2],rp,JD0=df1[0,0])
plt.errorbar(g[:,0],g[:,1],yerr=g[:,2],fmt='.',elinewidth=2.0,label='Fecha 2')

g=rotphase(df3[:,0],df3[:,1],df3[:,2],rp,JD0=df1[0,0])
plt.errorbar(g[:,0],g[:,1],yerr=g[:,2],fmt='.',elinewidth=2.0,label='Fecha 3')

g=rotphase(df4[:,0],df4[:,1],df4[:,2],rp,JD0=df1[0,0])
plt.errorbar(g[:,0],g[:,1],yerr=g[:,2],fmt='.',elinewidth=2.0,label='Fecha 4')
plt.legend()
plt.xlabel('Fase Rotacional')
plt.ylabel('Magnitud Relativa')
plt.title('nombre asteroide')

g=rotphase(JD,RelMag,Error,RP,JD0=df1[0,0])
plt.ylim(max(g[:,1]), min(g[:,1]))
plt.savefig('Curvapharot.jpg')

plt.figure()
plt.clf()
g=rotphase(JD,RelMag,Error,RP,JD0=df1[0,0])
plt.ylim(max(g[:,1]), min(g[:,1]))
plt.errorbar(g[:,0],g[:,1],yerr=g[:,2],fmt='.',ecolor="r",elinewidth=2.0)
plt.xlabel('Fase Rotacional')
plt.ylabel('Magnitud Relativa')
plt.title('nombre asteroide')

```



```

np.savetxt('objeto.csv', g, delimiter=',')
plt.figure()
plt.clf()
plt.plot(guess, RePDM.thetas)
plt.xlabel('Periods [h]')
plt.ylabel('$\Theta$')
plt.title('PDM peroidogram')

#Inicia el Ajuste por minimos cuadrados
dat=np.loadtxt('objeto.csv',delimiter=',')
x=dat[:,0]; y=dat[:,1]; e=dat[:,2]
LC_fit=P_fit(x,y) #Run Fitting

x1=np.arange(-.2,1.2,.001)#va siempre de 0 a 1 para cubrir el periodo de
rotacion
y1=LC_fit.eval(t=x1)
f1=interpld(x1,y1)
print(LC_fit.best_values)
y2=clipping(y,f1(x),2)
plt.figure();plt.clf()
plt.plot(x,y,'+',label='Data')
plt.plot(x,y2,'.',label='Clipping')
plt.plot(x1,y1,'-',label='Model')
plt.xlabel(r'RotPhase [$\rho$]');plt.ylabel(r'Pr($\rho$)')
plt.legend()
#invertir ejes
ax = plt.gca()
ax.set_ylim(ax.get_ylim()[::-1])
plt.show()

```

Código *rotphase.py* para obtención de periodo rotacional y ajuste de curva de fase rotacional.