



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

Astrometría de asteroides: adquisición del código MPC para
la Cámara Schmidt de Tonantzintla

Tesis presentada al

Colegio de Física

como requisito parcial para la obtención del grado de

LICENCIADO EN FÍSICA APLICADA

por

Néstor Alan López López

Asesorado por

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

Puebla Pue.
6 de septiembre de 2025



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

Astrometría de asteroides: adquisición del código MPC para
la Cámara Schmidt de Tonantzintla

Tesis presentada al

Colegio de Física

como requisito parcial para la obtención del grado de

LICENCIADO EN FÍSICA APLICADA

por

Néstor Alan López López

Asesorado por

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

Puebla Pue.
6 de septiembre de 2025

Título: Astrometría de asteroides: adquisición del código MPC para la Cámara Schmidt de Tonantzintla

Estudiante: NÉSTOR ALAN LÓPEZ LÓPEZ

COMITÉ

Dra. Ana Aurelia Avilez López
Presidente

Dr. Sergio Camacho Lara
Secretario

Dr. Severino Muñoz Aguirre
Vocal

Mtro. Guillermo Cerdán Hernández
Vocal

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

*Reyna hermosa de mi vida;
que no sólo mi aporte quede constatado en este
pequeño, pero honesto trabajo,
sino también mi inmensurable amor por usted.*

Resumen

En este trabajo se presenta la reducción y análisis de imágenes astronómicas adquiridas con la Cámara Schmidt del Observatorio Astrofísico Nacional de Tonantzintla. Se utilizaron técnicas de calibración fotométricas y astrométricas con el objetivo de obtener posiciones precisas de asteroides para su posterior envío al Minor Planet Center. El proceso incluye la adquisición, procesamiento, análisis y evaluación de la calidad de los datos.

Los resultados confirman la viabilidad del sistema para observaciones astrométricas de cuerpos menores, cumpliendo con los criterios de calidad exigidos por la comunidad astronómica internacional.

Palabras clave: Asteroides, astrometría, reducción de imágenes CCD, Minor Planet Center, Tycho Tracker, Python

Abstract

This thesis presents the reduction and analysis of astronomical images acquired with the Schmidt Camera of the Tonantzintla National Astrophysical Observatory. Photometric and astrometric calibration techniques were implemented in order to obtain accurate asteroid positions for submission to the Minor Planet Center. The process includes data acquisition, preprocessing, and quality assessment.

The results confirm the system's viability for scientific observations of minor bodies, meeting the quality criteria required by the international astronomical community.

Keywords: Asteroids, astrometry, CCD image reduction, Minor Planet Center, Tycho Tracker, Python

Índice general

Resumen	VII
Agradecimientos	1
1. Introducción	3
1.1. Origen y evolución del sistema solar	4
1.2. Planetas, planetas enanos y cuerpos menores	5
1.3. Asteroides	8
1.3.1. Descubrimiento	8
1.3.2. Denominación	9
1.3.3. Parámetros físicos	11
1.3.4. Distribución	13
1.3.5. Asteroides Cercanos a la Tierra (NEAs)	15
1.4. La Cámara Schmidt de Tonanzintla	18
1.4.1. Historia	18
1.4.2. Ventajas de una “Cámara Schmidt”	20
1.5. Astrometría	24
1.5.1. Sistemas de coordenadas esféricas	25
1.5.2. Elementos orbitales	28
1.5.3. Detectores para la obtención de imágenes	29
1.6. Justificación y objetivos del trabajo	31
1.7. Estructura de la tesis	32
2. Selección de la muestra y observaciones	33
2.1. Selección de la muestra	33
2.1.1. Proceso de selección	33
2.1.2. La muestra	36
2.2. Las observaciones	36
2.2.1. Características técnicas de la Cámara Schmidt de Tonanzintla	36
2.2.2. Calendario de observaciones	37
2.2.3. Sesiones de observación	38
3. Procesamiento de datos	41
3.1. Contribuciones espurias	41
3.1.1. Modelo de una imagen cruda	42
3.2. Imágenes obtenidas por CCD para la reducción	42
3.2.1. Obtención de imágenes individuales	42
3.2.2. Construcción de imágenes maestras	43
3.3. Reducción de imágenes	45
3.3.1. Python	45

4. Análisis y resultados	47
4.1. Resolución de placa	47
4.1.1. Algoritmo	47
4.1.2. Tycho Tracker	49
4.2. Astrometría de asteroides	52
4.2.1. Obtención	52
4.2.2. Análisis	53
4.3. Resultados	56
5. Conclusiones y trabajo a futuro	59
A. Requisitos del MPC	61
B. Bitácora de observaciones	63
C. Observaciones obtenidas	69
D. Códigos en Python	73
D.1. Modificación del <i>header</i>	73
D.2. Creación del <i>bias</i> maestro	74
D.3. Creación del (de los) <i>dark</i> (s) maestro(s)	74
D.4. Creación del (de los) <i>flat</i> (s) maestro(s)	75
D.5. Corrección de imágenes crudas	76
D.6. Evaluación de astrometría bajo las efemérides del JPL	77
Glosario	79
Acrónimos	81
Bibliografía	83

Agradecimientos

Servirse de la ciencia y de la técnica con un profundo espíritu humanista, conducidas, encauzadas hacia el bienestar y la paz, es la tarea fundamental de nuestra época.

Guillermo Haro Barraza (Haro, 2012)

Durante mi paso por la licenciatura viví hermosas y divertidas anécdotas, conocí a personas y lugares extraordinarios, y aprendí a valorar lo que antes creía garantizado. Por permitirme vivir todas esas experiencias, quiero agradecer a mi mamá, Reyna. Su resiliencia frente a las adversidades del pasado, su apoyo incondicional y sus enseñanzas hicieron posible este camino. Gran parte de quien soy hoy, y de quien puedo sentirme orgulloso, se lo debo a ella. Mis logros son también suyos.

Agradezco también a mis hermanas, Itan y Betza, quienes han enriquecido mi vida con sus perspectivas, retándome a confrontar mis valores e ideales. Gracias por ser las hermanas mayores que necesité, por regalarme sonrisas, paciencia y parte de su valioso tiempo.

A mi papá, Néstor, por dejarme experimentar, por cuidarme cuando fui pequeño y por enseñarme con el ejemplo el valor del trabajo duro.

Cuando mi visión de la academia se volvía rígida y dogmática, el Dr. Raúl Mújica —además de ser mi asesor y tenerme una paciencia extraordinaria— me mostró que la comunión entre la academia y la benevolencia es posible. Gracias por su labor en la ciencia, por ampliar mi horizonte y ayudarme a confiar más en mí mismo.

A Xóch, por estar siempre ahí y escucharme con interés; a Lulas, por ser mi modelo de lucha; a Memo, por ser el mejor jugador de Dr. Mario; a Ernesto, por escuchar mis quejas durante dos años; al equipo de servicio social y práctica profesional quienes también trabajaron en asteroides; y a mis demás amigos y compañeros, por acompañarme durante estos años.

Le doy las gracias también a los integrantes de mi jurado, la Dra. Ana Avilez, el Dr. Severino Muñoz y el Dr. Sergio Camacho, así como a mi coasesor, el Dr. Javier Hernández, cuyas valiosas observaciones transformaron este texto y mejoraron su claridad y fluidez.

Asimismo, agradezco al [INAOE](#) por el apoyo económico brindado en los primeros meses de trabajo, el cual, sin lugar a dudas, me permitió desarrollar mis actividades con un provechoso flujo de trabajo.

Por último, agradezco profundamente a Alexandra Elbakyan y al equipo detrás de Library Genesis y Anna's Archive, por defender el acceso libre al conocimiento y ayudarme a ejercer mi derecho a la información; extendiendo mi gratitud a todas aquellas personas que han luchado contra la desigualdad: su huella en la historia ha hecho posible mi educación.

Capítulo 1

Introducción

Lea el que quiera las maravillas que
ocurrieron en años idos y compare con
nuestros días. He aquí, se han visto
portentos y horribles monstruos, llamas y
coronas, rayos que refulgen en el cielo,
estrellas diurnas, antorchas, terremotos y
abismos en la tierra, y proyectiles,
huracanes, un cielo sangriento.

Sebastian Brant (Brant, 1992)

Aunque el impacto de un objeto celeste contra la Tierra comenzó a ser tema de conversación en la cultura popular hace apenas unas cuatro décadas —probablemente por su aparición en los medios de comunicación masivos—, lo cierto es que su relevancia puede rastrearse siglos atrás. Por mencionar un par de ejemplos: la primera señal de preocupación entre la comunidad científica ocurrió en 1694, cuando Halley sugirió que el gran diluvio universal pudo ser una consecuencia del impacto de un cometa (Atkinson et al., 2000); mientras que su aparición en la literatura se puede encontrar aún más atrás en la historia, específicamente hasta 1492, cuando Sebastian Brant, un escritor alemán, se refirió a la trayectoria de un meteorito de 127 kg que impactó cerca de la ciudad de Ensheim como: «un cielo sangriento» (Brant, 1992; Marvin, 1992).

Estas referencias demuestran que este tipo de evento nunca fue ajeno para los astrónomos, ni mucho menos; todo lo contrario, se mantuvieron vigentes y ganando cada vez más atención entre la comunidad. Sin embargo, no fue sino hasta décadas recientes que salió a la luz lo que quizá sea el principal catalizador del creciente interés en el tema, no sólo por parte de investigadores, sino también de instituciones privadas y gubernamentales. En 1980, se publicó una investigación basada en evidencia que apoyaba la posibilidad de que la extinción masiva del Cretácico-Paleógeno fuese provocada en gran parte por un asteroide masivo que impactó contra la Tierra en lo que ahora es la zona de Chicxulub, México (Alvarez et al., 1980). Con este hito, la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA, por sus siglas en inglés), en colaboración con el Congreso de los Estados Unidos, y más adelante la Organización de las Naciones Unidas (ONU), incentivaron esfuerzos para la detección de Asteroides Cercanos a la Tierra (NEAs, por sus siglas en inglés) (Morrison, 1992) y el diseño de estrategias de defensa planetaria en caso de un posible riesgo de impacto (Canavan et al., 1993). Así, para febrero de 2013, la ONU recomendó la creación de la Red Internacional de Alerta de Asteroides y la del Grupo Asesor para la Planificación de Misiones Espaciales (IAWN y SMPAG, por sus siglas en inglés, respectivamente), estableciéndose ambos formalmente en 2014.

En particular, la IAWN es una red de trabajo —conformada por un amplio espectro de ins-

tituciones, incluyendo al Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE)— que tiene la misión de, entre otras cosas, descubrir, vigilar y caracterizar a los Objetos Cercanos a la Tierra, y más específicamente a los Asteroides Potencialmente Peligrosos (NEOs y PHAs, por sus siglas en inglés, respectivamente). Esto es importante ya que es posible determinar con precisión la gravedad que tendría el impacto de un asteroide contra nuestro planeta una vez determinados su tamaño, ángulo de impacto, densidad, velocidad, entre otros parámetros (Hills & Goda, 1993; Rumpf et al., 2017); y a la vez, permite el diseño de estrategias de defensa planetaria efectivas. Más aún, con la recolección de sus posiciones astronómicas es factible estimar una predicción del impacto hasta décadas antes de que ocurra —ya que, generalmente, los cuerpos pasan cerca de la Tierra unas cuantas veces antes de entrar en su atmósfera (Chesley & Spahr, 2004; Chesley et al., 2002; Milani et al., 2000)—, lo que daría el tiempo suficiente para activar las estrategias que mitigarían al máximo los efectos del evento.

1.1. Origen y evolución del sistema solar

Por diversas razones, la humanidad siempre ha encontrado fascinación por las historias y mucho más por aquellas que narran un origen. De ahí que la teoría del origen y evolución de nuestro sistema solar llame tanto la atención; queremos saber de dónde provenimos y cómo encajamos en el gran esquema de las cosas.

La teoría más aceptada actualmente, después de varias modificaciones al modelo, es la hipótesis nebular (Karttunen et al., 2017). Esta sostiene que hace 4.56 mil millones de años una nube densa de gas y polvo, en rotación, comenzó a condensarse debido a perturbaciones en el medio, como la onda de choque que genera una supernova o por la radiación de estrellas jóvenes. Luego de ese colapso, la nube pudo dividirse en dos grandes regiones. Una de esas regiones, la interna, se compactó con mayor rapidez, formó una protoestrella que luego evolucionó hasta convertirse en el Sol. La otra región, la externa, se fue moldeando por conservación del momento angular hasta converger en un plano perpendicular al eje de rotación, el disco protoplanetario. En este disco, las partículas de polvo comenzaron a recolectar material de su vecindad hasta formar, primero a los planetesimales —cuerpos irregulares que abarcaban desde los metros hasta los kilómetros de diámetro— y segundo a los protoplanetas —objetos con tamaños aproximados a los de la Luna y considerados la primera etapa de los planetas—. Distintas colisiones, resonancias e interacciones dinámicas, entre estos cuerpos, provocaron cambios en el joven sistema solar hasta obtener una distribución similar a la actual, con los planetas rocosos y los planetas jovianos en las zonas interior y exterior, respectivamente. Además, estos impactos —en conjunto con procesos físicos, geológicos y químicos— provocaron la concentración de los elementos más pesados en el centro de los planetas, a diferencia de los más ligeros que se mantuvieron en su superficie.

Los cuerpos del interior del sistema solar consisten mayormente de material rocoso, debido a que las altas temperaturas de entonces evitaron que gases y hielos se mantuvieran ligados a ellos; a comparación de los exteriores, en donde las bajas temperaturas de sus alrededores permitieron la formación de cuerpos gaseosos y helados. El resto del material, como los planetesimales y protoplanetas, que no pudieron formar cuerpos más grandes, pasó a ser lo que ahora conocemos como planetas enanos, satélites naturales y cuerpos menores del sistema solar. Algunos se concentraron en zonas como el Cinturón Principal de Asteroides (MBA, por sus siglas en inglés), el Cinturón de Kuiper o la Nube de Oort, mientras que otros se encuentran dispersos en el área del sistema solar con órbitas estables.

Bajo este contexto, los asteroides juegan un papel protagónico en la investigación del origen y evolución del sistema solar, pues son al sistema solar lo que los fósiles a la paleontología. Esto es, desde un acercamiento geológico, aquellos asteroides primordiales, es decir, que experimentaron poca o nula diferenciación, preservan un registro prácticamente intacto de la composición inicial de la nebulosa solar. En tanto que los planetesimales ayudan, tanto a entender cómo las partículas se aglomeraron hasta formar cuerpos más grandes, como a brindar información acerca de los procesos

de calentamiento y [diferenciación](#) de las diferentes etapas evolutivas de los planetas (Montmerle et al., 2006). En cambio, desde una perspectiva gravitacional, sus características y distribución proporcionan pistas sobre las perturbaciones gravitacionales y la migración de los planetas gigantes, que ocurrieron después de que comenzó la formación planetaria (Chambers & Mitton, 2017).

1.2. Planetas, planetas enanos y cuerpos menores

Para la Unión Astronómica Internacional (IAU, por sus siglas en inglés) —que se encarga de estandarizar nomenclatura y clasificaciones astronómicas— no existe una definición técnica de qué es un cuerpo menor del sistema solar, sino que ésta depende completamente de otras definiciones. De acuerdo con la IAU: «todos los otros objetos [que no sean planetas o planetas enanos], excepto satélites, que orbiten alrededor del Sol se denominarán colectivamente Cuerpos Menores del Sistema Solar» (General Assembly, 2006); de modo que es necesario conocer las definiciones de planeta y planeta enano para entender la —aparente— definición de asteroide. A saber, un planeta se define como un cuerpo celeste del sistema solar que i) está en órbita alrededor del Sol, ii) tiene la suficiente masa como para alcanzar el equilibrio hidrostático y iii) ha limpiado la vecindad de su órbita. Por su parte, un planeta enano se define como un cuerpo celeste del sistema solar que i) está en órbita alrededor del Sol, ii) tiene la suficiente masa como para alcanzar el equilibrio hidrostático, iii) no ha limpiado la vecindad de su órbita, y iv) no es un satélite. Así que, pese a la diferencia entre polvo interestelar, cometas, asteroides, etc., no existe, en esta clasificación, una definición puntual de cada uno de ellos, por lo que su categorización se refiere más a sus distintivos visuales o a su tipo de órbita.

A continuación se mencionan las características principales de algunos de ellos; posteriormente se abordan a profundidad los asteroides en la Sección 1.3.

Polvo interplanetario

Se trata de pequeñas partículas, también llamadas micrometeoroides, concentradas principalmente cerca del plano de la eclíptica, con dimensiones entre los 10 y 100 μm , tamaño a partir del cual pasan a ser clasificados como meteoroides. Además de ser parte de los remanentes del desarrollo del sistema solar, es el material que sale despedido por las interacciones entre los demás cuerpos de nuestro sistema planetario, es decir, cometas, meteoroides más grandes, planetas enanos, y los planetas, sus lunas y sus anillos (Krüger & Grün, 2014). En cuanto a los cometas como fuente de polvo interplanetario, ya que estos provienen de la Nube de Oort y el Cinturón de Kuiper, es decir, regiones cuyas variaciones a lo largo del tiempo han sido mínimas, el estudio de estas partículas ha sido cada vez de mayor relevancia para la adquisición de información de los primeros años de nuestro sistema.

El polvo interplanetario es el causante de la luz zodiacal, una columna de luz difusa que se extiende desde el horizonte y que se puede ver sin el uso de instrumentos, en áreas sin contaminación, antes del amanecer y del anochecer (Figura 1.1a).

Cometas

Los cometas son cuerpos con diámetros en un intervalo que va de los cientos de metros hasta las decenas de kilómetros con una superficie compuesta de hielo, nieve y polvo, un interior gaseoso y con hielo de agua; y, si es que hay, un núcleo rocoso (Nesvorný et al., 2017).

Se clasifican según su [periodo orbital](#), de período largo, si es mayor a 200 años; y de período corto, si es menor a 200 años. Sus principales fuentes de origen son la Nube de Oort, una nube esférica de aproximadamente un [año luz](#) de radio que rodea al Sol; y el Cinturón de Kuiper, una región más allá de la órbita de Neptuno que contiene una gran cantidad de cuerpos helados y planetas enanos.

Al estar tan poco conectados gravitacionalmente con el Sol, algunas perturbaciones de Júpiter y Saturno pueden llegar a modificar la órbita de los cometas, provocando que los de período largo pasen a clasificarse como de período corto (Karttunen et al., 2017). Asimismo, debido a su composición volátil, cuando se encuentran entre las 5 – 10 UA del Sol, los cometas presentan una atmósfera alrededor del núcleo conocida como coma. Conforme el cometa se aproxima cada vez más al Sol, su momento aumenta, así como su interacción con la actividad solar, lo que provoca que la coma presente cambios y que el cometa adquiera su característica cola (Figura 1.1b). La formación de esta cola constituye el criterio observacional clave para diferenciarlos de los asteroides, que carecen de actividad superficial. No obstante, tras múltiples acercamientos al Sol, el material volátil se agota, y el cometa puede perder sus rasgos distintivos. Esta *muerte cometaria* es un proceso que ha llevado en algunos casos a reclasificarlos como asteroides, como lo fue el caso del asteroide 4015 Wilson-Harrington (1979 VA) que en un principio fue descrito como el cometa 1951 *i* (Wilson-Harrington) antes de perder su rastro y volverlo a encontrar hasta 1979, cuando ya no presentaba características de cometa (Moore, 2005).

Objetos transneptunianos

Son cuerpos que están orbitando alrededor del Sol más allá de la órbita de Neptuno, es decir, cuerpos cuya órbita se encuentra completa o parcialmente más allá de las 30.1 UA, ya sean asteroides, cometas, o planetas menores. En esta clasificación se incluyen todos los cuerpos que se encuentran en las regiones del Cinturón de Kuiper y la Nube de Oort.

Centauros

Fueron nombrados así en honor a los centauros de la mitología griega, mitad hombre y mitad caballo, pues comparten características tanto de cometas como de asteroides.

Los Centauros son objetos que se encuentran entre las órbitas de los planetas gigantes, por lo que cuentan con órbitas entre las 5 – 30 UA. Se cree que son una fase intermedia entre los objetos transneptunianos y los cometas de período corto (Dobson et al., 2023), ya que al tener características de cometa es muy probable que provengan de la Nube de Oort, además de que, gracias a las fuertes perturbaciones de los planetas exteriores, sus órbitas son inestables.

Meteoroides, meteoros y meteoritos

La línea que distingue a los asteroides de los meteoroides es arbitraria. Usualmente se considera como meteoroides a todo asteroide con diámetro menor a los 50 m (Asphaug, 2009), aunque también suele suceder que se les llame así a los asteroides que ya fueron identificados, pero que no han sido observados lo suficiente como para conocer con precisión sus características (Karttunen et al., 2017).

Se estima que entre 30 y 180 toneladas de material entran a la atmósfera de la Tierra cada día (Drolshagen et al., 2017), la mayor parte de ella en forma de meteoroides, con un tamaño de entre 10 μm y 1 mm. Cuando un meteoroides con una masa de al menos 1 gr entra a la atmósfera, la fricción genera temperaturas lo suficientemente altas como para irradiar en el espectro visible y ser apreciable por las noches. A este fenómeno se le conoce como *meteoro*, o *estrella fugaz* (Figura 1.1c).

En algunos casos, la cantidad de energía que expulsan estos eventos es tan grande que lucen más brillantes que objetos con magnitud -4 (Subsección 1.3.3) por un par de segundos, en ese caso son llamados *bólidos*. Más aún, si brillan tanto como una magnitud -17 (Subsección 1.3.3), se les considerará un *súper bólido* (Figura 1.1d) (Cephecha et al., 1999). Y si el objeto sobrevive a su viaje por la atmósfera e impacta contra el suelo, se le llama *meteorito*. La gran mayoría de estos meteoritos no sobrepasa el tamaño que tendría un guijarro; de hecho, lo más probable es que en vez de meteorito, sea un *micrometeorito*, una partícula más pequeña que 1 mm.



Figura 1.1: Cuerpos menores del sistema solar, exceptuando asteroides. (a) Fotografía tomada de la luz zodiacal en el *Skull Valley*. Al final de la columna de luz, es posible ver a las Pléyades y, un poco por debajo de ellas, a Marte. (b) Fotografía compuesta con imágenes del Telescopio Espacial Hubble del cometa ISON, estrellas y múltiples galaxias. (c) Fotografía de 20 segundos de exposición de un meteorito que cruzó el cielo cerca de Park City, Utah durante las perseidas, aunque sin ser parte de ellas, sino probablemente del cometa Swift-Tuttle. (d) Uno de los súper bólidos que más llamó la atención en los medios, y que más de 100 personas pudieron reportar a la American Meteor Society mediante su aplicación web [Report a Fireball](#), fue avistado el 18 de mayo de 2024 en parte de Portugal y España. El causante habría sido un asteroide de tipo carbonáceo (Subsección 1.3.3) de aproximadamente 1 m de diámetro. Según testigos, su brillo habría sido tanto o más que el de una luna llena. Un video del evento se puede encontrar en [Brilliant meteor caught on video over Europe](#). Imágenes tomadas de Dunford, NASA (2021, 2023), NASA; ESA; Hubble Heritage Team (STScI/AURA) (2013) y Peña-Asensio et al. (2024), respectivamente.

Cabe señalar que estos fenómenos no están exentos de ocurrir en otros cuerpos diferentes a la Tierra; se han encontrado meteoritos y cráteres de impacto en la superficie de Marte (Daubar et al., 2013; Fairén et al., 2011), y se han observado súper bólidos en la atmósfera de Júpiter (Hueso et al., 2013), así como destellos causados por el impacto de meteoroides en la superficie de la Luna (Suggs et al., 2014).

Como ya se ha mencionado, por su naturaleza, el estudio de estos fenómenos, con o sin la

presencia de un meteorito, permite tener información directa de los efectos de un asteroide en la Tierra, además de la distribución, propiedades físicas y composición (Subsección 1.3.3) de aquellos que crucen su órbita (Borovička et al., 2015).

1.3. Asteroides

A partir de la definición de cuerpo menor del sistema solar y la posterior exposición sobre algunos de ellos vista en la Sección 1.2, es claro que para la ciencia existen casos en los que para definir a un grupo de objetos es más sencillo establecer lo que no cumple, en lugar de lo que sí cumple, lo que puede llevar a confusiones o generar ambigüedades. Para el caso de los asteroides, —nombre proveniente del griego *asteroeides* que significa “similar a una estrella”— la convención, para definirlos, es que son pequeños cuerpos rocosos distribuidos en varias regiones del sistema solar. Por supuesto que esta definición puede ser atinada si se trabaja superficialmente, incluso es suficiente en muchos casos; sin embargo, en su simpleza aborda características de los asteroides que requieren una mayor atención. Primero, ¿cuál es el intervalo al que se refiere cuando se habla de “pequeño”?; segundo, ¿cuáles son esas “regiones” en las que están distribuidos?, ¿alguna está cerca de la Tierra?; y tercero, para la geología, “rocoso” es un término que puede referirse tanto a un solo material como a varios, entonces, ¿cuáles son los materiales que componen a los asteroides?

Estas cuestiones existen no por falta de exhaustividad, sino por la extensa población de objetos, cada uno con su respectiva órbita y sus propiedades físicas, que engloba la designación “asteroide”, de modo que es necesaria una mayor precisión en su descripción.

1.3.1. Descubrimiento

Tal como indica Peebles (2001), la llamada ‘ley’ de Titius-Bode para el sistema solar se conoce desde 1772, cuando apareció por primera vez en un pie de página de la segunda edición alemana del libro “Contemplación de la naturaleza”, añadida por su traductor, el astrónomo Johann Daniel Titius. Esta ‘ley’ en realidad es una norma empírica que describe aproximadamente el semieje mayor de la órbita de los planetas en UA: $a_n = 0.4 + 0.3 \times 2^{n+1}$ donde $a_0 = 0.4$, $n = 1, 2, \dots$ y a_n es el semieje mayor de la órbita del planeta número $n + 1$.

El autor también señala que, aunque desde años antes los astrónomos ya habían notado que entre las órbitas de Marte y Júpiter había un espacio más amplio en comparación con el que hay entre los otros planetas, no fue sino con el descubrimiento de Urano por William Herschel que, a finales del siglo XVIII, tuvo un mayor apoyo la propuesta de que existía un planeta entre las órbitas de estos planetas. Esto debido a que la ‘ley’ tuvo una mayor relevancia, pues la órbita de Urano coincidía con su predicción y para entonces no se había descubierto un planeta para el que el término a_4 estuviera asociado.

Por su parte, de acuerdo con el artículo del Agency (2025), el deseo por ser el descubridor del supuesto nuevo planeta era tal que provocó que 25 astrónomos se aliaran en su búsqueda, llamándose a sí mismos: La Policía Celeste. Desgraciadamente, sus esfuerzos fueron eclipsados por Guiseppe Piazzi, quien en 1801 descubrió a Ceres, un cuerpo que se encuentra entre las órbitas de Marte y Júpiter; catalogándolo como el nuevo planeta del sistema solar y dando por terminada la búsqueda. Sin embargo, posteriores observaciones revelaron que Ceres tenía un diámetro de apenas 940 km, por lo que se le reclasificó como asteroide¹. Así que la búsqueda por el nuevo planeta se reanudó. Esta historia se volvería a repetir otro par de veces con 2 Pallas, 3 Juno, 4 Vesta y 5 Astraea, y aunque es cierto que ello desalentó las esperanzas de los astrónomos por encontrar a un nuevo planeta, estos descubrimientos posteriormente provocaron un interés por el nuevo tipo de objetos; lo que encaminó a los astrónomos al descubrimiento del MBA, el mayor reservorio de asteroides del sistema solar.

¹Actualmente Ceres está catalogado como planeta enano, sin embargo, en su momento fue designado como asteroide. De hecho, extraoficialmente, se le suele considerar como el primer asteroide en ser descubierto.

Para entonces, con la tecnología de la época, el descubrimiento de asteroides era más un hecho fortuito. El proceso consistía en revisar cada estrella visible a través del telescopio y compararla con un catálogo estelar. Cualquier estrella que no estuviera registrada sería observada la noche siguiente; si la estrella tenía un movimiento respecto a las estrellas de fondo, entonces se trataba de un posible nuevo asteroide (Burbine, 2016; Gehrels, 1979). Con la llegada de la fotografía, esta tarea, aunque esencialmente sigue el mismo principio, se volvió más metódica y eficiente: ahora, es posible la detección de múltiples objetos en una sola noche de observación, logrando resultados que antes eran extraordinarios, en cuestión de días.

1.3.2. Denominación

Aunque en años anteriores existían diferentes sistemas de nomenclatura de acuerdo con la institución que registraba los cuerpos menores del sistema solar², desde 1925 el Minor Planet Center (MPC) implementó un sistema de nomenclatura en el que cualquier asteroide cuenta con dos designaciones para referirse a él: uno provisional y otro permanente. El provisional se les asigna a aquellos asteroides que cuentan con al menos dos noches diferentes de observación, pero que no han sido identificados por su órbita luego de ser reportados. Mientras que el permanente se les asigna únicamente a aquellos de los que su órbita no coincide con ninguno de los registros previos.

Designación provisional. Formato expandido

Este nombre está relacionado directamente con su fecha de avistamiento. Los primeros cuatro caracteres indican el año, seguido de un espacio, una letra que indica la quincena y otra para el número de descubrimiento de esa quincena. Los alias de la primera y segunda letra del nombre temporal se explican en las Tablas 1.1 y 1.2, respectivamente. Así, 2025 AA se refiere al primer asteroide descubierto en la primera quincena de 2025.

En caso de que en una quincena hayan sido descubiertos más de 25 asteroides, al final del nombre se agrega un número que indica el número de veces que la segunda letra se ha repetido para continuar el conteo, es decir, para señalar a los descubrimientos del 26 al 50, se repiten las letras del abecedario y se añade un “1” al final del nombre; de haber entre 51 y 75 descubrimientos, el número final entonces será “2”; si son entre 76 y 100, será “3”; entre 101 y 125, entonces es “4”, y así sucesivamente. Usualmente este último dígito se escribe como un subíndice. De modo que 2023 WG₄₂ denota al asteroide número 1,057 en ser reportado como descubrimiento en la vigésima segunda quincena (segunda quincena de noviembre) de 2023. Este sistema se amplió para aquellos asteroides que fueron descubiertos antes de 1925, funcionando de la misma manera, pero sustituyendo el primer dígito de la fecha por una “A”. De modo que A893 ED es el cuarto asteroide descubierto en la quinta quincena (primera quincena de marzo) de 1893.

Designación provisional. Formato comprimido

Para un mejor ordenamiento y optimización del espacio en las bases de datos, se ideó un formato comprimido para las designaciones provisionales. Prácticamente es un reordenamiento del formato expandido: el primer carácter es una letra que indica el siglo del descubrimiento, con I siendo el equivalente al siglo 18, J al 19, K al 20, etc.; el segundo y tercer carácter son los últimos dos dígitos de ese año; el cuarto y séptimo son las letras que indican la quincena y el número de descubrimiento, respectivamente, es decir, las dos letras del final del formato expandido; y, finalmente, la cuenta de las veces que el ciclo en el que la letra que representa el número de descubrimiento se ha repetido se indica con el quinto y sexto carácter (en caso de que la cuenta sobrepase los 99 ciclos, el quinto carácter pasa a ser una letra del alfabeto, primero en mayúsculas y luego en minúsculas). Así, 2023 WG₄₂ en este formato se escribe como K23W42G.

²Para más información sobre estos sistemas, visite [Temporary Minor Planet Designations](#)

Letra	Quincena	Letra	Quincena
A	01 al 15 de enero	B	16 al 31 de enero
C	01 al 15 de febrero	D	16 al 31 de febrero
E	01 al 15 de marzo	F	16 al 31 de marzo
G	01 al 15 de abril	H	16 al 31 de abril
J	01 al 15 de mayo	K	16 al 31 de mayo
L	01 al 15 de junio	M	16 al 31 de junio
N	01 al 15 de julio	O	16 al 31 de julio
P	01 al 15 de agosto	Q	16 al 31 de agosto
R	01 al 15 de septiembre	S	16 al 31 de septiembre
T	01 al 15 de octubre	U	16 al 31 de octubre
V	01 al 15 de noviembre	W	16 al 31 de noviembre
X	01 al 15 de diciembre	Y	16 al 31 de diciembre

Tabla 1.1: Esquema para descubrimientos por quincena. Las letras I y Z no son usadas.

Letra	Descubrimiento	Letra	Descubrimiento
A	1ro	B	2do
C	3ro	D	4to
E	5to	F	6to
G	7mo	H	8vo
J	9no	K	10mo
L	11ro	M	12do
N	13ro	O	14to
P	15to	Q	16to
R	17to	S	18vo
T	19no	U	20mo
V	21ro	W	22do
X	23ro	Y	24to
Z	25to		

Tabla 1.2: Código para el número de descubrimiento por quincena. La letra I no es usada.

Designación permanente

Básicamente se trata del número de asteroide oficialmente descubierto en un formato de cinco caracteres de longitud. Si el número del asteroide es menor a 10,000, entonces se rellena de ceros a la izquierda hasta comprender los 5 dígitos, mientras que, si es mayor a 99,999, se sustituyen los dos primeros dígitos por una letra del alfabeto, primero en mayúsculas y después con minúsculas. De modo que “A” equivale a 10, “B” a 11, ..., “a” a 36, etc. Si el número es mayor a 619,999, entonces el primer caracter se sustituye por una virgullita, “~”, mientras que los siguientes 4 dígitos, representados por los dígitos del 0 al 9 y después por las letras del alfabeto, primero en mayúsculas y luego en minúsculas, estarán en base 62. Con este sistema, el asteroide z9999 es el número 619,999 y el ~0KoB es el número 699,991. Tomando en cuenta que actualmente³ el MPC tiene aproximadamente 790,000 objetos identificados y que con este sistema se pueden llegar a contabilizar más de 15 millones de asteroides, no es difícil decir que, por ahora, están cubiertos.

³Consultado el 05 de mayo de 2025. Para información más actualizada, consulte [Discovery Circumstances: Numbered Minor Planets](#)

Nombres

Una vez establecida su designación permanente, los descubridores pueden sugerir un nombre propio para el asteroide —al igual que los cometas y los meteoritos que pueden tener el nombre de su(s) descubridor(es) y el del lugar de la Tierra en donde fueron encontrados, respectivamente—, y de hecho la tradición era nombrarlos en forma femenina y con base en las mitologías romana, griega o troyana, aunque luego esa costumbre se extendió hasta permitir nombres que reconocían a mascotas, amigos, personajes de ficción, etc., lo que ha dado lugar a nombres de lo más curioso como 2309 Mr. Spock, 3325 TARDIS, 9000 HAL o, mi favorito, 3552 Don Quixote.

Cabe aclarar que, contrario a lo que se pueda ver en los medios, no es posible comprar un cuerpo menor del sistema solar y nombrarlo a gusto; si alguien desea tener este derecho, debe descubrirlo primero.

1.3.3. Parámetros físicos

Desde el nacimiento de la astronomía, los astrónomos han tenido la fantasía de traer a los astros hasta sus centros de investigación, cosa físicamente imposible; por lo que se han tenido que conformar con manejar al espacio como su propio laboratorio y descifrar la forma en la que su —prácticamente— única manera de obtener información, la luz, puede darles datos sobre los cuerpos que están estudiando.

Esta dependencia de la luz como único mensajero cósmico llevó a los astrónomos a desarrollar métodos observacionales cada vez más precisos que transformaran las observaciones cualitativas de los antiguos en un lenguaje cuantitativo capaz de revelar secretos imposibles de descifrar a simple vista.

Fotometría

De manera general, la fotometría se puede entender como la medición de cantidades asociadas a la luz, ya sea visualmente, mediante comparaciones hechas por el ojo humano; o tecnológicamente, con receptores físicos («The Authoritative Dictionary of IEEE Standards Terms, Seventh Edition», 2000). En este sentido, el primero en ejercer la fotometría astronómica fue Hiparco en el siglo II a. C., quien clasificó cualitativamente el brillo de las estrellas como “de luz brillante”, “de segundo grado” o “difusas”. Actualmente se utiliza el sistema de *magnitudes* estelares, el cual es una extensión matemática de la escala que utilizó Ptolomeo en su catálogo estelar “Almagesto”. En este, las estrellas más brillantes tienen valores de magnitud más pequeños, y las menos, valores más grandes.

Aquí, vale la pena comentar que existen dos tipos de magnitudes: la aparente (m) y la absoluta (M). La primera se refiere a la medida del brillo que aparenta tener la estrella desde la Tierra, por lo que no toma en cuenta la distancia que hay entre el cuerpo y la Tierra; y la segunda es la magnitud aparente que tendría la estrella de estar localizada a 10 pc de la Tierra. En el caso de los asteroides, ya que no emiten luz propia, su magnitud absoluta (H) se define como la magnitud aparente que tendría el asteroide de estar a 1 UA tanto del Sol como de la Tierra y en oposición⁴.

La importancia de la fotometría en el estudio de los asteroides radica en que permite determinar algunos de sus parámetros físicos. Por mencionar algunos, con su metodología es posible determinar su diámetro (D) (Harris & Harris, 1997), su composición (Chapman et al., 1971), si es un sistema binario (Chiorny et al., 2025), e incluso la forma que tiene (Kaasalainen & Torppa, 2001; Kaasalainen et al., 2001). Además de que también ayuda a entender fenómenos, como los efectos YORP y Yarkovsky, que modifican sus órbitas.

⁴Físicamente, esto no es posible, sin embargo, existen expresiones matemáticas que permiten el cálculo de H (Dymock, 2007)

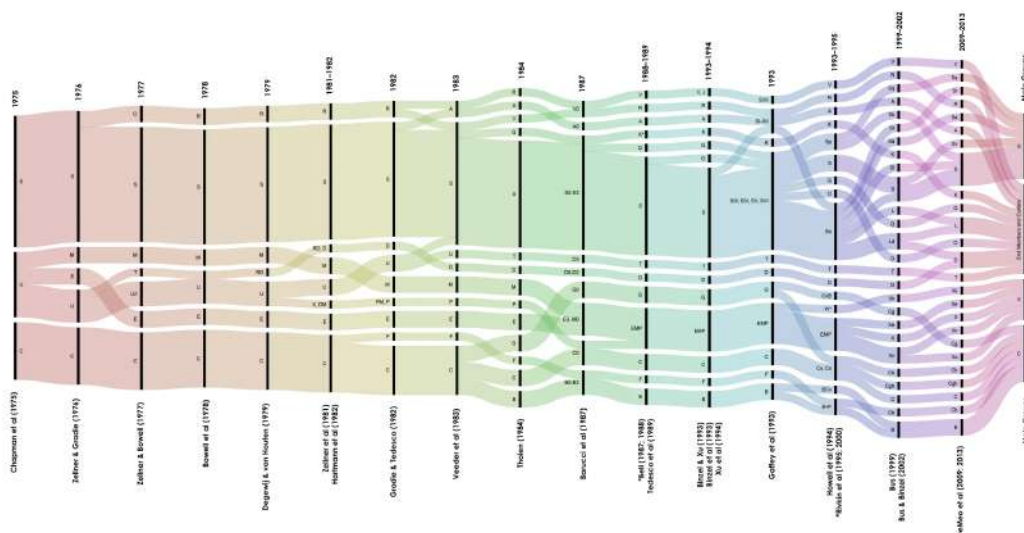


Figura 1.2: Evolución de la taxonomía de asteroides desde 1975 hasta ahora. Imagen tomada de Murphy (2019).

Taxonomía

En el siglo XIX, se vivió una revolución en la ciencia al descubrir que el **espectro** (electromagnético) puede revelar propiedades físicas de la materia. Para los astrónomos, esto significó la posibilidad de determinar finalmente la composición superficial de los objetos celestes con mediciones hechas desde la Tierra, mientras que, en el estudio de los asteroides, desmitificó la idea de que estos eran simplemente pedazos de roca que bailaban por el espacio y fue posible comenzar a conocer su complejidad mineralógica.

De esto se encarga la taxonomía de asteroides, de clasificarlos con base en sus características espectrales; según sea el análisis cuantitativo y cualitativo del espectro que genera un asteroide al reflejar la luz del Sol, es posible especular sobre su composición superficial e incluso su composición interna —si es que el asteroide no cuenta con la masa necesaria como para haber diferenciado su estructura—.

A lo largo de la historia, han habido decenas de trabajos sobre taxonomía de asteroides, eliminando y agregando clases o proponiendo nuevas clasificaciones (Figura 1.2). Actualmente se utilizan mayoritariamente los sistemas de Bus-DeMeo (DeMeo et al., 2009), Tholen (Tholen, 1984) y Gaffey (Gaffey et al., 1993). Si bien cada uno tiene sus múltiples subclases, se puede decir que todas concuerdan en que existen cuatro grandes complejos, según el material dominante en la estructura de los asteroides, a saber: los de tipo C, por carbonáceo (*carbonaceous*) —la mayoría de los asteroides en el **MBA** (Subsección 1.3.4) son de este tipo; los de tipo S, por silicatos (*siliceous* o *stony*) —el tipo más común de los **NEAs**; los de tipo X, que cuentan con un gran porcentaje de material metálico en su estructura; y los de tipo U, que no presentan una composición que pueda clasificarse en alguna de las anteriores.

Efectos Yarkovsky y YORP

Por mucho tiempo, se creía que las órbitas de los astros eran dominio absoluto de la gravedad, de modo que la comunidad científica tenía la convención de que la evolución en la dinámica de los astros tenía sus orígenes únicamente en las colisiones entre ellos y en perturbaciones gravitacionales. Sin embargo, esto habría de cambiar para 1901, cuando el ingeniero ruso Yarkovsky señaló que

los cuerpos celestes que rotan en sentido [prógrado](#), estarían siendo empujados al irradiar en forma de calor la radiación solar absorbida, lo que compensaría la resistencia del entonces famoso éter y explicaría por qué los planetas no se frenaban con el tiempo (Vokrouhlický et al., [2015](#)).

Aunque el contexto en el que planteó su trabajo es erróneo, no así la observación de que los cuerpos que orbitan alrededor del Sol están sujetos a perturbaciones debido a efectos no gravitacionales provocados por la absorción de radiación solar y emisión de radiación térmica, cosa que no pasó desapercibida años después para el astrónomo Öpik, quien discutió el impacto que tendría el —ahora llamado— efecto Yarkovsky en la probabilidad de impacto de meteoroides contra los planetas (Öpik, [1951](#)). Además, de Öpik, Paddack también se interesó en el trabajo de Yarkovsky, ya que, en conjunto con la idea del radiómetro de Crookes⁵, era un precedente que podía servir para explicar la reducida población de [meteoroides esporádicos](#) (Paddack, [1969](#)) y que daría paso al efecto [Yarkovsky](#), O’Keefe, Radzievskii y Paddack, conocido desde entonces como efecto [YORP](#).

Tal como lo indican Bottke et al. ([2006](#)), la idea básica detrás del efecto Yarkovsky es que la cara que está en dirección hacia el Sol se calienta por la radiación solar y, tiempo después, ya sea por seguir su órbita o rotar, esa cara dejará de tener un contacto directo con la radiación solar y se enfriará; es decir, irradiará su energía térmica hacia el espacio. Luego, los fotones, al tener momento lineal, imprimen su momento al cuerpo en dirección opuesta a la que son emitidos. Este impulso adicional es muy pequeño, pero al acumularse durante largos periodos puede producir desde variaciones orbitales mensurables en unas pocas décadas, hasta alteraciones profundas tras millones o incluso miles de millones de años (Vokrouhlický et al., [2015](#)).

Este fenómeno se nota principalmente en los cuerpos de $0.1 \text{ m} < D < 10 \text{ m}$, debido a que, para los cuerpos más grandes, el momento que se les imprime se distribuye sobre una masa mayor, haciendo que la aceleración resultante sea muy pequeña y solo apreciable tras millones de años. En cambio, para los cuerpos más pequeños, la rápida conducción y equilibrado de calor a través de toda su superficie reduce significativamente la diferencia de temperatura entre sus caras iluminadas y sombreadas, lo que provoca que la emisión de fotones sea prácticamente la misma en todas direcciones y anule el efecto neto.

Por su parte, los autores también indican que el efecto [YORP](#), aunque también sigue el principio de la absorción y reemisión de energía en forma de calor, toma en cuenta las irregularidades de los asteroides para explicar parte de la modificación de sus vectores de rotación. Si el asteroide en parte de su superficie cuenta con asimetrías —como áreas con albedo desiguales o cráteres—, la energía no se emite de la misma manera en todas las direcciones; lo que genera un momento angular neto.

Afecta principalmente a los cuerpos cuyo $D < 40 \text{ km}$; y entre sus implicaciones se encuentran la formación de asteroides binarios, desintegración de asteroides del tipo “pila de escombros”, y una mayor contribución en el cambio de los vectores de rotación que las colisiones entre los cuerpos del [MBA](#).

1.3.4. Distribución

Cinturón Principal de Asteroides

En esta región habita la mayoría de los asteroides del sistema solar. Se ha propuesto que son los vestigios de un planeta que falló en su formación debido a que la masa de Júpiter lo impidió. También existen hipótesis que afirman que la región nunca tuvo la suficiente masa como para formar a un planeta (Safronov, [1979](#)). Esto, pues, pese a que abarca un volumen considerable —extendiéndose desde una distancia al Sol de 2 [UA](#) hasta 4.2 [UA](#)— el material que contiene sería el suficiente para formar a un objeto con solo el 0.05 % de la masa de la Tierra —siendo la de 1 Ceres el 0.02 % la de la Tierra — (Burbine, [2016](#)). Aunque la teoría del planeta fallido contraargumenta esto con el hecho de que su masa inicial era mayor que la que tiene hoy en día.

En 1866, Daniel Kirkwood notó, mientras aplicaba la Tercera Ley de Kepler sobre los asteroides

⁵[Radiómetro de Crookes](#)

en el **MBA**, que existían zonas en las que hay pocos o ningún asteroide en comparación con otras (Figura 1.3); hoy se les conoce como *Huecos de Kirkwood*. En estas zonas ocurren resonancias orbitales con Júpiter, es decir, el cociente, $n:m$, de sus períodos orbitales es un número entero, siendo n el número de veces que el asteroide orbita al Sol por cada m veces que Júpiter lo hace. El efecto de estas resonancias es que toda perturbación, por más pequeña que sea, provocará un efecto dominó en los asteroides que estén en estos huecos y eventualmente hará que sus órbitas sean inestables y migren (Karttunen et al., 2017). Una vez que los pequeños asteroides se desplazan hacia fuera del **MBA**, su vida se reduce a unas cuantas decenas de millones de años, ya sea por el impacto con un planeta o el Sol, al intersectarse sus órbitas, o por ser despedidos hacia el espacio interestelar (Gladman et al., 1997).

Posteriormente se demostró que los asteroides en el **MBA** no caen en estos huecos *per se*, sino que son llevados a ellos a causa del efecto Yarkovsky (Bottke et al., 2000).

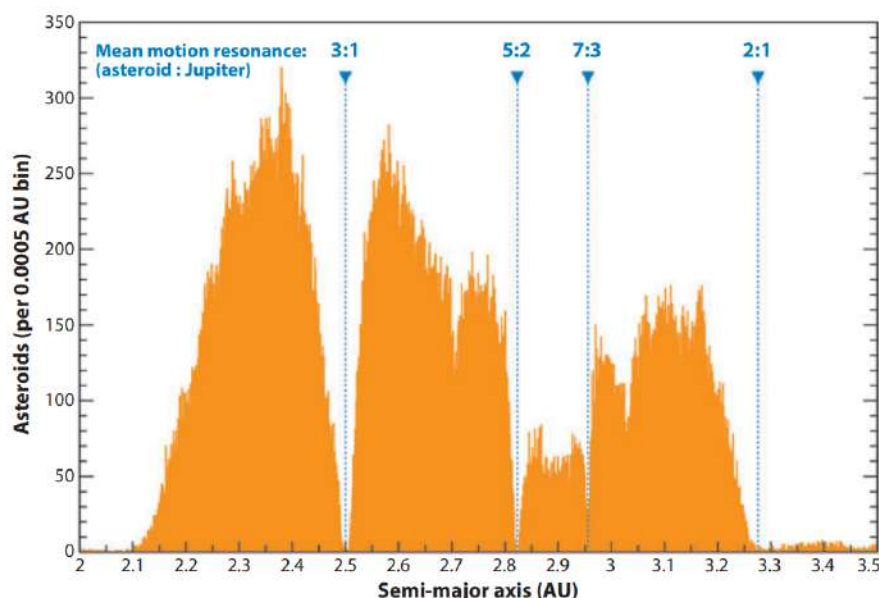


Figura 1.3: Los 156,929 asteroides conocidos en 2007 representados en un histograma de distancia al Sol. El efecto de estas resonancias de Júpiter con los asteroides del **MBA** es una inestabilidad en las órbitas de estos últimos, dejando estas regiones prácticamente deshabitadas. Imagen tomada de Chamberlin, JPL/Caltech (2007).

Asteroides troyanos, griegos e hildas

El resultado de las resonancias, no siempre es la desestabilización de las órbitas de los objetos; en algunos casos, los cuerpos que se encuentran en resonancia pueden quedar ‘ligados’ a órbitas estables en otras regiones. Tal es el caso de los asteroides troyanos, griegos e hildas (Karttunen et al., 2017).

Como se recoge en el trabajo de Bottke et al. (2023), los términos asteroides troyanos y griegos hacen referencia a un par de grupos de asteroides que comparten órbita con un planeta en sus puntos de Lagrange, L_4 y L_5 , respectivamente, y son las soluciones estacionarias del problema restringido de los tres cuerpos. En este problema, a diferencia del original, se asumen dos condiciones: que la masa de uno de los tres cuerpos es despreciable en comparación con las de los otros, y que la proporción entre las masas de los dos grandes sea mayor o igual a las 24.96 unidades; condiciones que cumplen la mayoría de los planetas con el Sol y algún otro cuerpo menor. Los puntos están en los vértices de dos triángulos equiláteros cuya base común es la recta que une a los dos cuerpos,

estando L_4 y L_5 a 60° por delante y por detrás del cuerpo menor visto desde el cuerpo mayor, respectivamente. En ellos, los cuerpos con masa despreciable pueden mantenerse estacionarios con respecto al segundo cuerpo más masivo, es decir, que tienen resonancia orbital 1 : 1. Júpiter, al ser el planeta con mayor masa del sistema solar, es el que cuenta con una mayor densidad de troyanos, aunque no es el único en tenerlos; otros planetas, como Neptuno, Marte e incluso la Tierra, también cuentan con ellos. Siendo exacto, según el [MPC](#), actualmente⁶ se conocen 15, 276 asteroides troyanos; 1 de la Tierra, 18 de Marte, 15, 226 de Júpiter, ninguno de Urano y 31 de Neptuno.

Otros asteroides que también están por fuera del [MBA](#) y en resonancia orbital con Júpiter, aunque esta vez en una razón de 3 : 2, son el grupo Hilda. Si bien siguen una órbita elíptica, la población total constituye una formación triangular cerca de las 4 UA, contando con unos 6, 094 asteroides identificados para el 14 de febrero de 2024 (Vokrouhlický et al., 2025).

Una imagen de la distribución de estos tres grupos, además del [MBA](#), se muestra en la Figura 1.4.

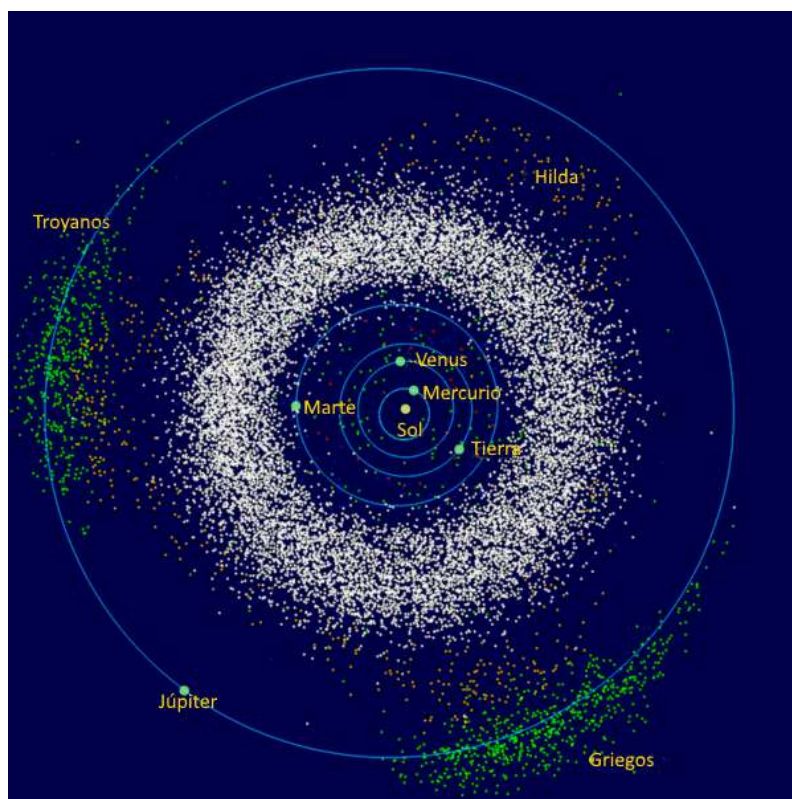


Figura 1.4: Imagen esquemática que representa la distribución de la población de asteroides. En ella se distinguen los asteroides del [MBA](#), representados en color blanco; los grupos Troyano y Griego, ambos en verde; y los asteroides Hilda, en naranja. Imagen tomada de Wikimedia Commons (2024).

1.3.5. Asteroides Cercanos a la Tierra (NEAs)

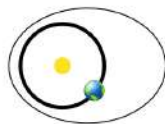
Los ya mencionados [NEAs](#), como su nombre lo indica, son asteroides cuyas órbitas están próximas a la de la Tierra; más concretamente, se definen como aquellos asteroides cuyo $q \leq 1.3$ UA.

Si bien la mayoría de ellos tienen una vida relativamente corta —con vidas promedio de unos pocos millones de años (Morbidelli et al., 2002)—, se sabe que debe existir un continuo

⁶Consultado el 16 de junio de 2025 en [Trojan Minor Planets](#)

Amors

Sus órbitas encierran a la de la Tierra y a su vez está contenida en la de Marte (nombrados así luego del descubrimiento de [1221] Amor)



$$a > 1.0 \text{ AU} \\ 1.017 \text{ AU} < q < 1.3 \text{ AU}$$

Apolos

Sus órbitas cruzan con la de la Tierra con semiejes mayores mayores que el de la Tierra (nombrados así luego del descubrimiento de [1862] Apolo)



$$a > 1.0 \text{ AU} \\ q < 1.017 \text{ AU}$$

Atenas

Sus órbitas cruzan con la de la Tierra con semiejes mayores menores que el de la Tierra (nombrados así luego del descubrimiento de [2062] Aten)



$$a < 1.0 \text{ AU} \\ Q > 0.983 \text{ AU}$$

Atiras

Sus órbitas están completamente contenidas en la órbita de la Tierra (nombrados así luego del descubrimiento de [163693] Atira)



$$a < 1.0 \text{ AU} \\ Q < 0.983 \text{ AU}$$

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

Figura 1.5: Las cuatro clases de NEA según su órbita. Adaptado de CNEOS/JPL (2025).

reabastecimiento, ya sea por la migración desde el MBA o por su origen cometario, debido a que el número de encuentros que la Tierra ha tenido con ellos ya habría acabado con la población inicial conocida (Binzel et al., 2015).

Según sean sus órbitas, un NEA puede ser una de cuatro clases: Amor, Apolo, Atenas o Atiras, siendo los asteroides Amor y Apolo los que componen el 90 % de los NEAs (Binzel et al., 2015). Cada clase fue llamada así en referencia al primer asteroide que se le descubrió con esas características —una definición de la clasificación de los NEAs se puede ver en la Figura 1.5—.

Para Binzel et al. (2015), además de la posible amenaza que representan, otra de las razones para el emergente interés por el estudio de los NEAs se halla en su mayor accesibilidad para la exploración *in situ* mediante misiones espaciales —como ya se demostró con NEAR-Shoemaker, OSIRIS-Rex o Hayabusa 2, y algunas otras—, o para la prueba de técnicas de defensa planetaria —como lo fueron las misiones *Deep Impact* y DART, y próximamente la sonda Hera, la cual estudiará más de cerca los resultados de DART—. Incluso el Centro para el Estudio de Objetos Cercanos a la Tierra (CNEOS, por sus siglas en inglés) cuenta con un listado de NEAs candidatos para misiones espaciales tripuladas por astronautas disponible en Accesible NEAs.

Una subclasificación de los NEAs, son los PHAs. De acuerdo con CNEOS/JPL (2025), estos se definen como aquellos cuerpos con $H \leq 22$ —lo que corresponde a un diámetro de 140 m si se asume un albedo del 14%— y cuya mínima distancia entre sus órbitas y la Tierra es de 0.05 UA —alrededor de 7.5 millones de kilómetros—. Hasta ahora⁷, el MPC registra a 2,477 de estos cuerpos.

Riesgo de impacto

Como ya se mencionó, si bien existen varios parámetros que determinan la peligrosidad de un NEO, ya que la energía del impacto depende de la tercera potencia de su diámetro⁸, D , su tamaño es la característica que se le asocia a su nivel de amenaza (Grav et al., 2023).

⁷Consultado el 17 de junio de 2025 en List of Potentially Hazardous Asteroids (PHA)

⁸Los cuerpos menores del sistema solar, de los cuales forman parte los NEO, son objetos amorfos. Cuando se hable del “tamaño” o “diámetro” de uno de ellos, se estará haciendo referencia al diámetro que tendría una esfera

Según la investigación de Harris y Chodas (2021), se estima que la población de NEOs con $D > 1$ km es de 940 ± 10 . De ser correcta esta estimación, y si se tiene en consideración que el CNEOS cuenta con el registro de 872, se conocen, como mínimo, al 91.7 % de ellos (NASA/JPL CNEOS, 2025a). Afortunadamente, se sabe que ninguno de estos está en trayectoria de colisión contra la Tierra en un lapso de al menos un siglo —aunque ya hay intentos por aumentar esta ventana de advertencia— (Fuentes-Muñoz et al., 2023); así que la humanidad tiene la certidumbre de que, por parte de los asteroides, no existen mayores riesgos de una extinción masiva en el futuro cercano. Además, según Grav et al. (2023), se estima que para 2027 ya se habrá registrado entre el 76 % y el 77 % de la población de NEO cuyos tamaños están comprendidos entre los 140 m y 1 km; por lo que la incertidumbre de impacto de parte de los asteroides más masivos es cada vez más estrecha.

De modo que el enfoque actual se encuentra en la búsqueda de aquellos asteroides que, aún con un tamaño relativamente pequeño, pueden causar severos daños al ecosistema terrestre. Ésta es una cuestión que deja en jaque a la humanidad, ya que mientras más pequeños sean los asteroides —además de que su población es más numerosa— son más difíciles de detectar, haciendo menos factible su advertencia antes de un inminente impacto.

Por poner un ejemplo, desde 1988, el CNEOS tiene registrada la entrada a la atmósfera de la Tierra de más de 1,000 asteroides con diámetros en el intervalo de entre 1 y 60 metros (NASA/JPL CNEOS, 2025b)⁹(Figura 1.6); de los cuales, para 2024, sólo nueve —aunque algunas referencias mencionan que en realidad han sido 11— fueron avistados antes de su impacto, ninguno con una ventana de advertencia mayor a un día (Brown, 2024). Esto nos demuestra que, si bien la atmósfera brinda una intrínseca línea de defensa contra los NEOs con $D < 30$ m —la mayoría de ellos, si sobreviven a la fricción contra el aire e impactan contra el suelo, lo hacen en forma de pequeños guijarros no mayores a los 15 cm (Morrison, 2006)—; la realidad es que existen asteroides que tienen el potencial de causar daños significativos sin ser relativamente grandes, tales fueron los casos de los bólidos de Cheliábinsk y de Tunguska.

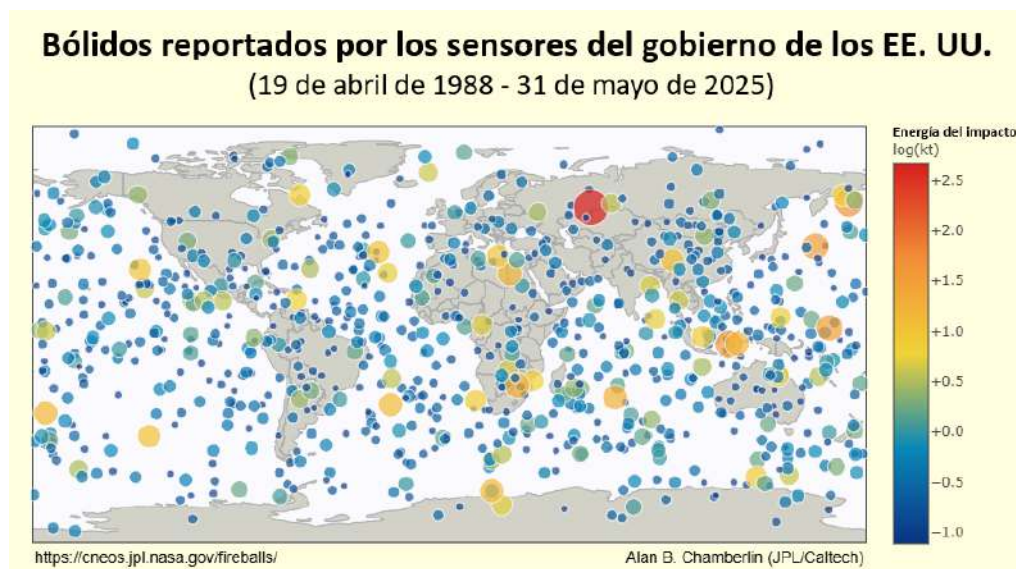


Figura 1.6: Representación visual de los datos disponibles en la página web de CNEOS, el cual provee información cronológica de los asteroides que más energía han liberado al impactar contra la atmósfera terrestre. Adaptada de Chamberlin, JPL/Caltech (2025).

con un volumen igual que al del cuerpo irregular

⁹En su página web, el CNEOS aclara que este número de registros no es el real, sino únicamente el de los más brillantes

Los bólidos de Cheliábinsk y Tunguska

El bólido de Cheliábinsk debe su nombre a la ciudad homónima donde ocurrió este evento, el 15 de febrero de 2013. Dado el amplio uso de *dashcams* por los conductores de Rusia, la explosión del asteroide se pudo registrar desde diferentes ángulos; así como sus distintas etapas¹⁰, de esta forma produciéndose una cantidad de información insólita para un evento como éste.

Con aquella información, pronto se supo que el evento fue causado por un asteroide con un diámetro de ≈ 19 metros y que provino del MBA (Borovička et al., 2013); y, aunque su ángulo de entrada a la atmósfera fue de $\approx 18^\circ$ (Popova et al., 2013) —lo que prolongó el contacto con la atmósfera el tiempo suficiente como para explotar a una altura de entre 24 y 30 kilómetros (Brown et al., 2013)—, eso no evitó que más de 1,500 personas resultaran heridas debido a que se acercaron a las ventanas, llamadas por la curiosidad de saber qué era ese inusual destello momentos antes del alba; mismas ventanas que fueron rotas por la onda de choque producida por la liberación de energía de la explosión (Gorkavyi, 2020).

Por otra parte, el mayor impacto registrado en la historia reciente, el bólido de Tunguska, ocurrió el 30 de junio de 1908. El resultado del impacto fue la devastación de una área boscosa de $\approx 2,000$ km² alrededor del epicentro (Gladysheva, 2020), algo que, de haber ocurrido en un área poblada, habría acabado con prácticamente toda la ciudad —lo cual no estuvo muy lejos de suceder, puesto que la ciudad de Moscú se encuentra a 4,000 km de distancia—. Según declaraciones de un agricultor que se encontraba a 80 km del impacto: «vio una luz ennegecedora y casi al instante sintió que el calor era tanto que creyó que su ropa se incendiaría. (...) Cuatro minutos después, una ensordecedora explosión y una onda de choque que lo lanzó por los aires y demolió parte de su casa» (Rodríguez, 1997).

Se teoriza que el bólido de Tunguska fue causado por la entrada a la atmósfera de un cometa que liberó cerca de 10 megatones de TNT —similar a mil bombas de Nagasaki— a 10 km de altura. Sin embargo, aún no se cuenta con evidencia concluyente de su verdadera naturaleza (Gladysheva, 2020); razón por la cual, si bien se presume que no dejó heridos, sí dejó consternados a los astrónomos al ser conscientes de lo que implicaría reconocer el tipo de objeto que causó el incidente. De acuerdo con las declaraciones de Steel (2008), las discusiones de la verdadera naturaleza del bólido de Tunguska no son meramente académicas, sino que obedecen a la búsqueda de certidumbre en la seguridad planetaria. Para el astrónomo, de tratarse del impacto de un cometa, se cambian las reglas del juego y se pone sobre la mesa la posibilidad de que la población de NEO se reabastezca cada cierto tiempo por la fragmentación de un cometa; lo que aumentaría las probabilidades de impacto con un objeto de tamaño similar al de Tunguska —parafraseando al Dr. Steel—: «muy pequeños como para no ser fácilmente advertidos, pero lo suficientemente grandes como para causar estragos en caso de impacto».

Este par de eventos deja en claro lo imperante que es que los astrónomos se conserven resilientes en la búsqueda y monitoreo de NEOs, se mantengan abiertos a cualquier tipo de cooperación que amplíe sus redes de observación —además de fomentar la colaboración entre observatorios y organismos científicos—; ya que, como bien señalaron Chapman y Morrison (1994), incluso los NEOs de pequeñas dimensiones pueden tener consecuencias significativas para la vida humana, especialmente si ocurren sobre zonas urbanas.

1.4. La Cámara Schmidt de Tonanzintla

1.4.1. Historia

Similar a lo que sucedió con la física, por un tiempo algunas personas tenían la percepción de que la comunidad científica estaba cerca de llegar a los límites de las posibilidades humanas para explicar y conocer los fenómenos celestes; que llegaría un punto en el que la única innovación posible

¹⁰Un video del evento se puede encontrar en [15.02.2013](#)



Figura 1.7: Inauguración del [Observatorio Astrofísico Nacional de Tonanzintla](#). Imagen tomada de Mújica, INAOE (2002).

sería hacer mediciones más cuidadosas y refinar la maquinaria de los observatorios. Por ejemplo, Auguste Comte, filósofo positivista, decía¹¹, refiriéndose a las estrellas, que: «nunca sabremos de ninguna manera cómo estudiar sus composiciones estructurales» (Comte, 1835). Sin embargo, esta perspectiva resultaría errónea, pues la historia nos demostró que la astronomía, en conjunto con la física clásica, daría paso a la astrofísica, que brindaría tanto otra capa de complejidad a los cuerpos celestes como una nueva perspectiva al Universo, mucho más amplia.

Para el siglo XIX, si bien la astronomía había encontrado un lugar en México, desde 1878, en el [Observatorio Astronómico Nacional \(OAN\)](#) —ubicado primero en el Castillo de Chapultepec para luego ser trasladado a la Villa de Tacubaya— se estaba fomentando una cultura de estancamiento. Joaquín Gallo, el entonces director del observatorio, pese a su invaluable aportación a la ciencia en México, estaba —en palabras de Luis Enrique Erro, diplomático, político y astrónomo aficionado— «convencido de que la astrofísica era una locura temporal en la astronomía, (...) pero que, con el tiempo, su importancia disminuiría, y la astronomía recobraría su cordura y regresaría al trabajo astrométrico riguroso» (Rodríguez, 1997), por lo que Erro sabía que la astrofísica, que ya había comenzado a ganar reconocimiento en la comunidad internacional, tendría que tomar otro rumbo para consolidarse también en México.

El plan que Erro tenía en mente era aprovechar sus influencias políticas para fundar un nuevo observatorio en vez de intentar cambiar al de Tacubaya. De este modo, asesorado por Harlow Shapley, director en aquella época del Observatorio de Harvard, se hizo de varios instrumentos, entre los que destacaba un telescopio de tipo “Cámara Schmidt” y decidió que el asentamiento del proyecto fuera en Tonanzintla, un pueblo ubicado a menos de 20 km de la ciudad de Puebla, como una acción que abogaba por la descentralización de la ciencia en México y como una especie de favor al entonces presidente Manuel Ávila Camacho, que insistía en que quedase en su estado de origen. Así, el 17 de febrero de 1942, se fundaría el [Observatorio Astrofísico Nacional de Tonanzintla \(OANTON\)](#).

El problema era que Erro, aunque contase con conocimientos clave para conciliar su ambiciosa idea, era consciente de que sus capacidades no serían suficientes para coordinar por su cuenta el manejo de todo un observatorio, por lo que decidió becar a Guillermo Haro, también entusiasta

¹¹Los errores en la traducción recaen en el autor de esta tesis

de la astronomía, para que trabajase en el observatorio de Harvard durante cuatro años y así adquiriera los conocimientos necesarios para aprovechar las herramientas con las que se contaba en Puebla. Ya para 1950, Guillermo Haro toma posesión en la dirección del [OANTON](#) como sucesor de Erro.

Bajo su directiva, la investigación astronómica en México se llevó a niveles de talla internacional, publicando sus contribuciones más importantes entre los años de 1952 y 1959, siendo particularmente pionera en la observación de objetos Hergib-Haro, estrellas ráfaga, nebulosas planetarias y galaxias azules¹². Desafortunadamente, con el tiempo, las implicaciones negativas en la elección del lugar donde se establecería el [OANTON](#) comenzaron a hacerse patentes; la rápida expansión urbana provocó la pérdida de un cielo con las normas de calidad necesarias para su observación, imposibilitando la astrofísica de vanguardia.

Debido a esto, para finales de 1960, el [OAN](#) se ve obligado a migrar a la sierra de San Pedro Mártir, ubicada en Baja California. Mientras que el Observatorio de Tonanzintla pasó a ser reorganizado como el [Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica \(INAOE\)](#) por decreto presidencial, en 1971, a fin de, además de continuar con sus labores de investigación, preparar y formar investigadores, técnicos y profesores en los ámbitos de la astrofísica, óptica y electrónica (Presidencia de la República, 1971), fundando así el primer instituto de investigación a nivel nacional fuera de la ciudad de México.

A lo largo de los años, las observaciones con la [Cámara Schmidt de Tonantzintla \(CST\)](#) se vieron afectadas por el deterioro acumulativo ocasionado por la creciente contaminación lumínica, la falta de mantenimiento durante la década de 1990 y las limitaciones tecnológicas inherentes al uso de placas astronómicas como detectores (Sección 1.4.2). Estas condiciones redujeron progresivamente su utilidad científica, relegándola principalmente a actividades de divulgación y docencia durante cierto periodo.

No obstante, en 2015, inició un proyecto de renovación con el objetivo de reactivar su uso científico. Este esfuerzo marcó el inicio de una etapa de modernización instrumental que permitiría recuperar la capacidad operativa de la Cámara Schmidt para investigaciones astronómicas actuales.

Considerando la capacidad de observación de la [CST](#), a finales de ese año, el Grupo de Investigación de Planetas Menores del [INAOE](#) se dispuso al seguimiento de un programa de observaciones fotométricas y astrométricas de [NEOs](#), [PHAs](#) y de cualquier otro cuerpo menor que pudiera ser objetivo de futuras misiones espaciales, como un compromiso adoptado al ser parte de la [IAWN](#) desde 2016.

Desde entonces, la [CST](#) ha servido, nuevamente, como un centro de observación que ha consolidado su legado no solo como instrumento científico, sino como un faro de compromiso social a través de la astronomía. Su actual dedicación al estudio de cuerpos menores —del que reitero, es imperante para la defensa planetaria—, refleja cómo la investigación de frontera puede aliarse con el bienestar común.

Hoy, sus instalaciones combinan observaciones activas con exhibiciones interactivas, llevando al público general a comprender el cosmos desde la tradición y la innovación.

La [CST](#), con su doble vocación de descubrimiento y divulgación, encarna el ideal de que el cielo no es solo territorio de especialistas, sino patrimonio de todos.

A continuación se dará una breve revisión de las características técnicas y funcionalidad de un telescopio de tipo “Cámara Schmidt”.

1.4.2. Ventajas de una “Cámara Schmidt”

Sin importar la época en la que se revise la historia moderna, es seguro que la innovación tecnológica estará presente. El más claro ejemplo en nuestros días es la evolución de las computadoras: mientras que los primeros sistemas requerían ingeniería pesada y de espacios considerables, hoy

¹²Una revisión de la contribución a la investigación astronómica de parte de Guillermo Haro está disponible en (Peimbert, 1983)

dispositivos de uso diario como los teléfonos logran capacidades similares —o superiores— en un tamaño radicalmente reducido.

La evolución técnica de los telescopios se vio inspirada por la necesidad de corregir limitaciones en la óptica y de mejorar su eficiencia observacional. Por ejemplo, la decisión de implementar espejos en su diseño por parte de Newton fue porque los primeros [telescopios refractores](#) —además de presentar [aberración cromática](#)—, debido a la calidad de la época, era común que las lentes tuvieran restos del horno en donde fueron fundidas, burbujas de aire, superficies mal pulidas, etc., lo que terminaba perjudicando sus observaciones (Kitchin, 2013).

A principios del siglo XX, la mayoría de los telescopios utilizados en investigación astronómica eran de tipo “Cassegrain” o diseños derivados. Estos instrumentos, debido al uso de espejos parabólicos, estaban limitados a campos de observación no mayores a 20 [minutos de arco](#), principalmente por la presencia de [coma](#), aunque también presentaban [astigmatismo](#). Estas restricciones afectaron considerablemente a los proyectos que requerían cubrir grandes regiones del cielo, al punto de que algunos de ellos tardaron décadas en completarse.

Un ejemplo emblemático es el proyecto *La Carte du Ciel*, cuyo objetivo fue fotografiar el cielo completo en dos ocasiones, con la participación de 18 observatorios internacionales. A pesar de que sus telescopios ofrecían un campo de visión relativamente amplio para la época —en promedio, $2^\circ \times 2^\circ$ —, la iniciativa tomó más de 70 años en concluirse (Rodríguez, 1997).

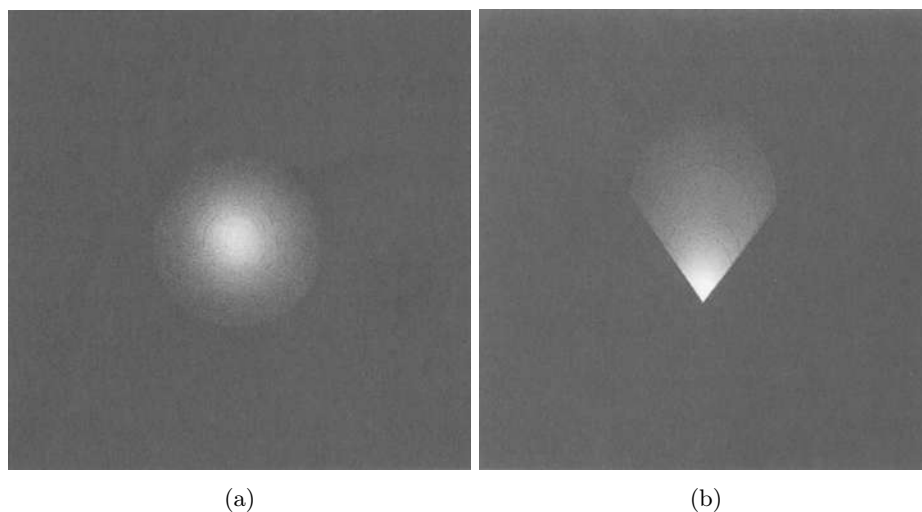


Figura 1.8: Efectos de [aberración esférica](#) o [aberración cromática](#) y de [coma](#) en una fuente puntual (Figuras 1.8a y 1.8b, respectivamente). Imágenes tomadas de Kitchin (2013).

Para solucionar este problema, Bernhard Schmidt, un óptico estoniano, publicó, en 1932, el diseño de un [telescopio catadióptrico](#) que utiliza un espejo esférico como objetivo primario para eliminar la [coma](#) y el [astigmatismo](#) (Schmidt, 1932). Gracias a esto, en contraste con la mayoría de los telescopios de la época, su diseño presentaba la ventaja de manejar amplios campos visuales de entre $6 - 10^\circ$ (Kitchin, 2013). Hoy, los telescopios de tipo cámara Schmidt y derivados son los más utilizados en estudios de mapeo y/o sondeo, por lo que para las observaciones de asteroides de este trabajo, se utilizó la CST (Figura 1.9) que, como sugiere su nombre, es de este tipo.

Funcionalidad de la Cámara Schmidt de Tonanzintla

Como ya se mencionó, en la estructura de una cámara Schmidt estándar (Figura 1.10) se utiliza un espejo esférico como objetivo (Figura 1.11a) en pro de eliminar la [coma](#) y el [astigmatismo](#) de las imágenes producidas por un telescopio con un espejo parabólico como objetivo, y para corregir

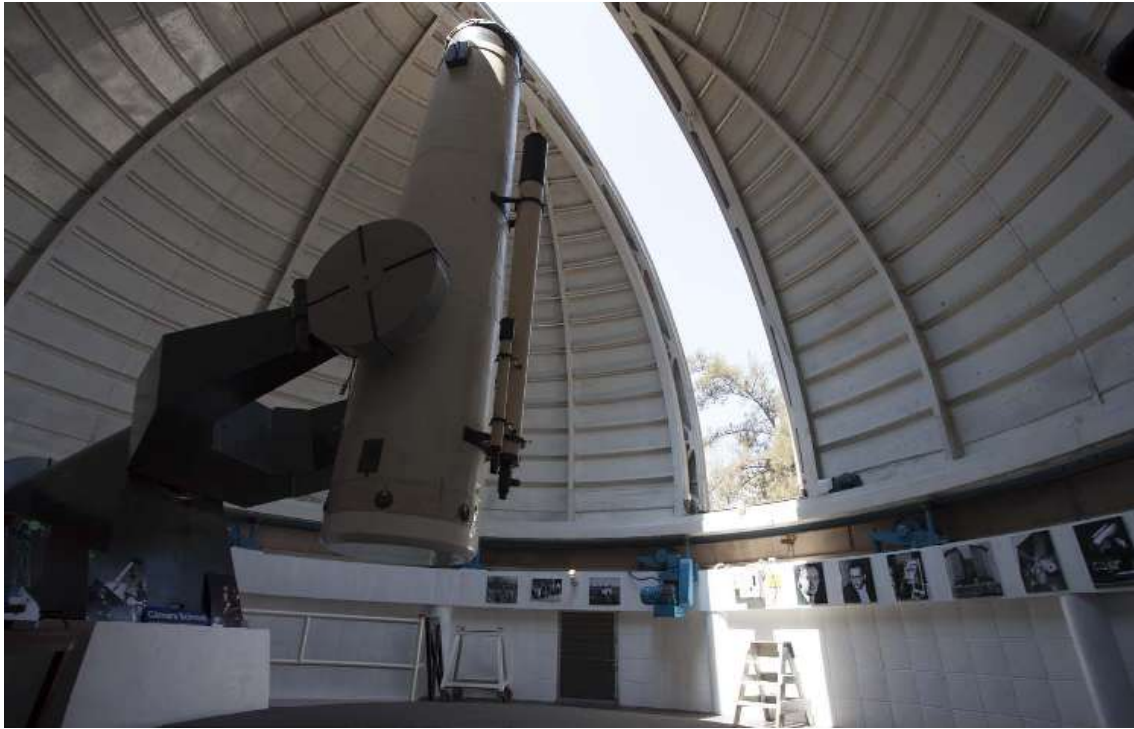


Figura 1.9: Telescopio Cámara Schmidt de Tonanzintla del INAOE. Imagen tomada de Díaz (2017).

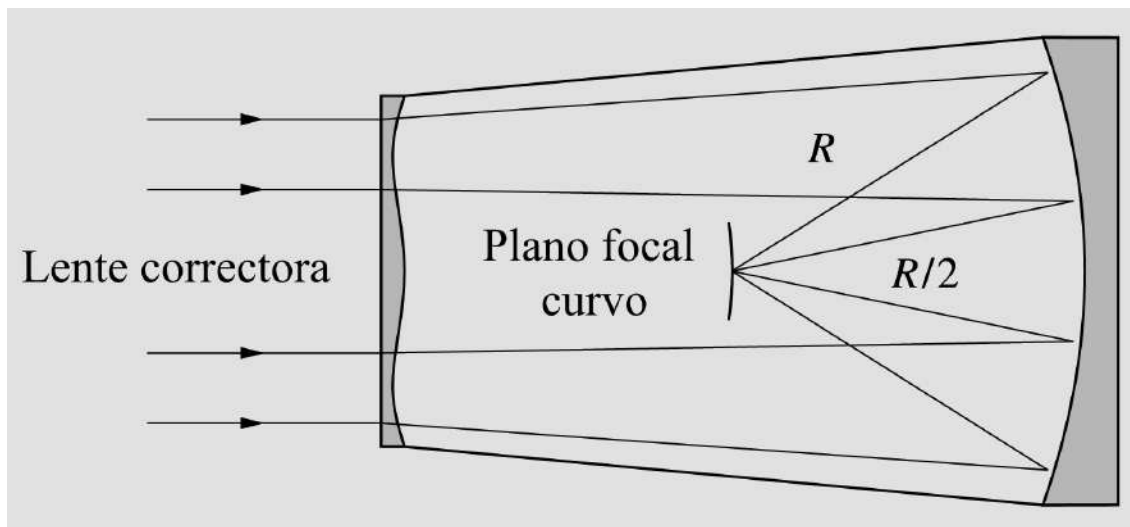


Figura 1.10: Esquema general del funcionamiento de una Cámara Schmidt adaptado de (Karttunen et al., 2017). Una lente correctora situada en el centro del espejo esférico, que no presenta coma ni aberración cromática, ajusta los rayos de luz para neutralizar la aberración esférica. Su plano focal se ubica a una distancia $\frac{R}{2}$ del espejo y, al ser curvo, con la fotografía tradicional se requiere, ya sea doblar la placa fotográfica, o la implementación de una lente correctora adicional que aplane el campo.

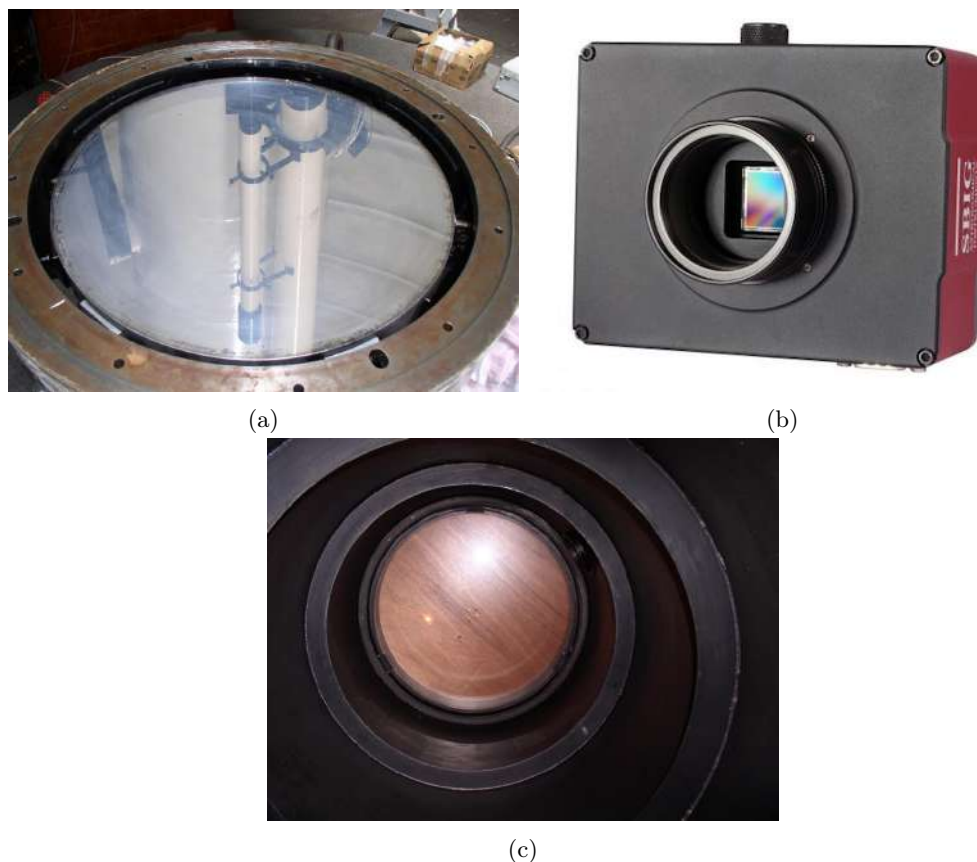


Figura 1.11: Elementos del sistema óptico de la CST. Figura 1.11a, espejo esférico (Cardona et al., 2011); Figura 1.11b, detector CCD SBIG STF-8300 (Diffraction Limited, 2018); y Figura 1.11c, lente aplanadora (Cardona et al., 2011).

la **aberración esférica** que el uso de un espejo esférico produce, se coloca una **lente asférica** en la trayectoria de la luz entrante, siendo esta lente lo suficientemente plana y delgada como para que la **aberración cromática** y la cantidad de luz absorbida por ella sean ambas mínimas.

Una aparente desventaja de un telescopio de tipo “Cámara Schmidt” es que su “plano” focal es curvo. Anteriormente, esto se solucionaba, ya sea colocando una lente correctora extra poco antes del plano focal, o moldeando la forma de las placas fotográficas con la ayuda de una placa correctora, siendo esta última la utilizada para el caso de la CST, hasta que, a mediados de la década de los noventa, su uso ya no fue rentable —cada una de las placas costaba alrededor de \$100 dólares por la falta de manufactura nacional—. Para compensarlo, se realizaron experimentos con placas de acetato para sustituir a las placas fotográficas de cristal, pero no se obtuvieron resultados satisfactorios debido a que existían zonas de la placa que quedaban fuera de foco por la maleabilidad del material. Afortunadamente, para el 2015, se le instaló al telescopio un detector electrónico plano con un sensor **CCD** para mejorar su funcionamiento (Figura 1.11b). Aunque este tipo de sensores puede fabricarse con una forma curva, su costo se eleva considerablemente, volviéndolo inviable. Un ejemplo de esto es la misión Kepler, que utilizó 42 cámaras **CCD** curvas, cada una con un costo aproximado de entre 75,000 y 100,000 dólares. Por esta razón, se optó por una solución más económica: implementar una lente aplanadora antes del sensor **CCD** para corregir el campo y optimizar su rendimiento (Figura 1.11c).

Por otra parte, tanta importancia tiene la montura del telescopio y su sistema de movimiento,

como su sistema óptico; todo telescopio debe contar con una montura que le permita al observador apuntar a la región del cielo que desea estudiar, y más aún, seguirla durante todo el tiempo que dure esa observación, tanto para compensar su movimiento aparente debido a la rotación de la Tierra, como su movimiento propio. En el caso de la CST, su montura ha sido de tipo ecuatorial desde el inicio de sus operaciones. No obstante, hasta la década de los cincuenta —cuando, por razones técnicas, fue trasladada unos metros al sur— utilizaba la variante inglesa con un sistema de movimiento montado en la pared, con círculos horarios marcados en ella. A partir de ese momento, se adoptó la variante de horquilla y su sistema de movimiento por uno remoto, pasando a usar una consola de comandos al lado del telescopio conectada a una PC de escritorio. Esta configuración se mantiene hasta la actualidad.

En una montura de tipo ecuatorial (Figura 1.12), el movimiento se basa en el sistema de coordenadas ecuatoriales (Sección 1.5.1), esto es, cuenta con dos ejes de movimiento: el de ascensión recta y el de declinación, siendo, respectivamente, paralelo y perpendicular al eje polar. Esta característica permite compensar el movimiento de rotación de la Tierra mediante un movimiento continuo del telescopio alrededor del eje de ascensión recta, que en el caso de las estrellas de fondo es de una revolución por cada 23 h 56 min.

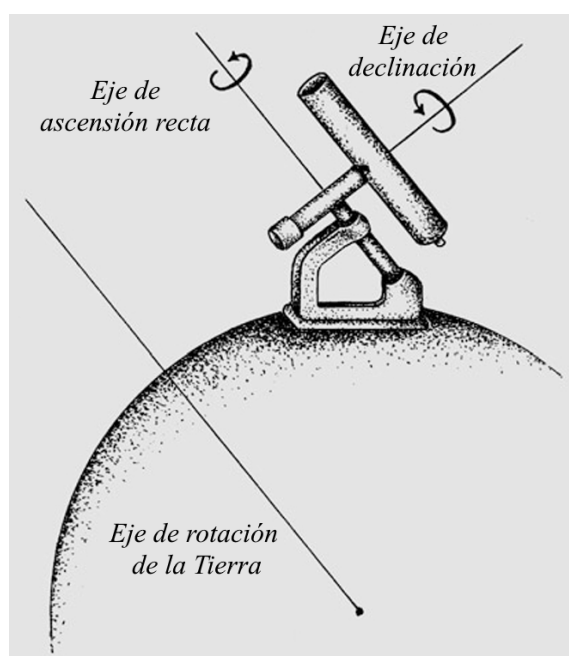


Figura 1.12: Esquema de una montura ecuatorial estándar. Imagen adaptada de Karttunen et al. (2017).

1.5. Astrometría

La astrometría, o astronomía de posición, se encarga de proporcionar las posiciones y movimientos de los cuerpos celestes. Esto, en opinión de Kovalevsky y Seidelmann (2004), incluye las técnicas de observación, la instrumentación, el procesamiento y análisis de datos observacionales, las posiciones y movimientos de los objetos, marcos de referencia y el fenómeno astronómico resultante.

En este sentido, la astrometría ha estado presente desde los inicios de la humanidad, ya que los nómadas de la prehistoria ya eran conscientes de la utilidad que tiene conocer las posiciones relativas de las estrellas. Según explican de Santillana y von Dechend (1969), los relatos asociados

a las constelaciones, probablemente, tenían la función de ayudar a los nómadas de la prehistoria a recordar sus posiciones relativas en el cielo como una suerte de mnemotecnia, y no tanto de contar una epopeya aleatoria. Más aún, la astrometría se presenta como un pilar para el desarrollo de la humanidad, pues sin ella, herramientas como el calendario o los sistemas de navegación y guiado no habrían sido posibles; y la consolidación de civilizaciones antiguas habría sido improbable al carecer de referencias precisas para la orientación, la medición del tiempo y la planificación agrícola.

Bajo este contexto, es innegable que la astrometría se ha desarrollado como la rama más antigua de la astronomía. Pese a su antigüedad, con el desarrollo de nuevas herramientas, como los telescopios, un mayor control de los errores de medición, misiones espaciales, etc., los astrónomos han sabido mantenerse a la vanguardia de la ciencia. Además, al ser pocos los escenarios en los que sólo el conocimiento de las posiciones es suficiente como objetivo final de un trabajo astrométrico —siendo más bien como un paso necesario para desentrañar la naturaleza de nuestro universo—, la astrometría ha sabido expandir la relación entre ella y otras ramas, e incluso con otras disciplinas de la ciencia.

Un ejemplo notable es la misión *Gaia*, lanzada en 2013 con el objetivo de medir las posiciones de cerca de dos mil millones de objetos con una precisión del orden de los microsegundos de arco, y construir así el catálogo tridimensional más grande y preciso de la Vía Láctea. Entre sus principales contribuciones se encuentran evidencias de una posible fusión de la Vía Láctea con otra galaxia, el descubrimiento de estrellas hiperveloces, exoplanetas, además de asteroides del sistema solar, así como mejoras significativas en el cálculo de órbitas de NEAs.¹³

En la práctica, la astrometría tiene dos enfoques principales. El primero es la astrometría de campo amplio, que abarca las técnicas de medición aplicadas a grandes ángulos o aquellas que requieren transformar las observaciones desde el sistema de coordenadas del instrumento hacia un marco de referencia extragaláctico fijo. Su importancia radica en la definición y mantenimiento de los marcos de referencia celestes. El segundo enfoque es la astrometría de campo pequeño, la cual se basa en observaciones diferenciales: determina las posiciones de los cuerpos celestes en relación con estrellas cercanas, cuyas coordenadas ya han sido establecidas mediante astrometría de campo amplio (Kovalevsky, 2002).

En ambos casos —ya sea para describir posiciones absolutas o relativas—, las mediciones deben expresarse en un sistema de referencia común. Por convención, este sistema es de tipo esférico, ya que proyecta las posiciones sobre la esfera celeste: una construcción ideal que imagina al universo recubierto por una cáscara de radio infinito, sobre la cual las estrellas se encuentran fijas. Aunque este modelo tiene su origen en la antigua concepción geocéntrica, resulta sumamente útil desde el punto de vista matemático, pues permite trabajar con coordenadas esféricas sin necesidad de conocer la componente radial, que frecuentemente es inaccesible. Así, la posición de un objeto puede describirse, al menos como una primera aproximación, mediante únicamente dos coordenadas. Por ello, los sistemas de referencia esféricos constituyen la base sobre la cual se articulan y comparan todas las observaciones astrométricas.

1.5.1. Sistemas de coordenadas esféricas

Comúnmente, todo sistema de coordenadas esféricas cuenta con un plano de referencia que pasa por el centro de la esfera y la divide en dos hemisferios mediante un [gran círculo](#). Una de las coordenadas representa la distancia angular desde un punto de referencia arbitrario sobre ese plano hasta la proyección del objeto también sobre el plano. La otra coordenada corresponde a la distancia angular desde dicho plano hasta la posición del cuerpo sobre la esfera, medida a lo largo del único gran círculo que pasa por él y que es perpendicular al plano de referencia. Según sea el propósito de definir la posición de un objeto sobre una esfera, se utiliza uno u otro sistema de coordenadas. En este trabajo, se da especial énfasis en los sistemas de coordenadas geográficas, horizontales y ecuatoriales.

¹³La lista completa de sus resultados hasta la fecha se puede hallar en la página [ESA - Gaia factsheet](#)

Sistema de coordenadas geográficas

Contrario a los sistemas de coordenadas celestes, los sistemas de coordenadas terrestres no tuvieron un desarrollo hasta que fueron necesarios para la comunicación entre regiones que antes estaban separadas por la geografía de la Tierra o por restricciones políticas. En lo que respecta a la astrometría, el interés se halla en la necesidad de tener las posiciones precisas de los telescopios con respecto al centro de masa de la Tierra. Esto se logra con el sistema de coordenadas geográficas¹⁴. En el sistema de coordenadas geográficas se utilizan dos coordenadas: la latitud (Lat. o ϕ) y la longitud (Long. o λ), que se consiguen en base a la dirección de la gravedad local. La latitud es el ángulo entre la dirección de la gravedad y el plano de la ecuatorial, mientras que la longitud es el ángulo entre el meridiano de Greenwich y el plano que contiene el eje polar de la Tierra y la vertical de la gravedad local (Kovalevsky & Seidelmann, 2004).

Cabe destacar que, para la obtención de las coordenadas de la CST si bien se ha utilizado la aplicación [Google Earth](#) —la cual utiliza el modelo ideal de la Tierra WGS84 y no cuenta con las correcciones recomendadas para fines científicos de alta precisión—, la información que brinda la herramienta de Google es lo suficientemente precisa para los fines de esta tesis, ya que permite establecer la ubicación geográfica de la CST con un nivel de exactitud compatible con los requerimientos del análisis astrométrico.

Sistema de coordenadas horizontales

Su plano de referencia es el plano tangente al punto de la Tierra donde esté el observador, por lo que es catalogado como el más intuitivo. Al círculo que interseca a la esfera celeste al expandir el plano de la tangente se le llama horizonte; a los puntos por encima y por debajo del observador, el cenit y el nadir, respectivamente; y los grandes círculos que atraviesan el cenit, las verticales. Una de sus coordenadas es la altitud o altura (Alt. o h); ésta se define como $h = 90^\circ - z$, donde z es el ángulo entre la dirección del cenit y el objeto; su intervalo de valores va desde los -90° a los $+90^\circ$, con los valores positivos para los objetos que están por encima del horizonte y los negativos para aquellos que están por debajo. La otra coordenada es el acimut (Az. o A), que mide el ángulo entre la dirección del norte y la proyección de la dirección del objeto sobre el plano tangente. Se mide en sentido horario y su intervalo va desde los 0° a los 360° (Figura 1.13).

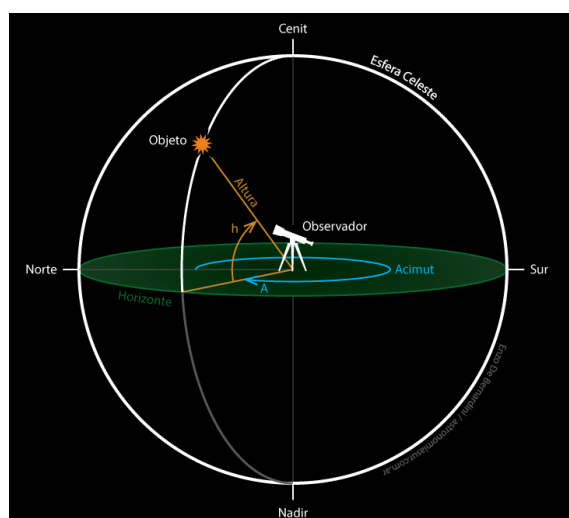


Figura 1.13: Sistema de coordenadas horizontales. Imagen tomada de De Bernardini (2025).

Este sistema, debido a que es relativo a la posición del observador, presenta una desventaja: las coordenadas de un mismo objeto pueden variar si se le observa en diferentes instantes o desde

distintas posiciones (Figura 1.14), es decir, el sistema de coordenadas horizontales presenta dependencia temporal y espacial; por lo mismo, no es utilizado en catálogos estelares. Sin embargo, su uso en la planificación de observaciones se ha extendido debido, mayormente, a su practicidad al momento de verificar las condiciones de visibilidad.

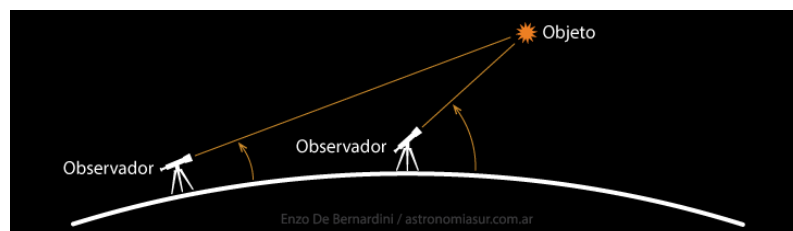


Figura 1.14: En coordenadas horizontales, dos observadores en distintas posiciones tendrán distintas coordenadas para un mismo objeto. Imagen tomada de De Bernardini (2025).

Sistema de coordenadas ecuatoriales

Para evitar la dependencia espacial de las coordenadas horizontales, el sistema de coordenadas ecuatoriales utiliza la proyección del plano ecuatorial de la Tierra sobre la esfera celeste, el ecuador celeste, como plano de referencia. A sus polos se les conoce como el norte y sur celestes, mientras que a sus dos coordenadas, como declinación (DEC o δ) y ascensión recta (AR o α). La declinación es la mensura del ángulo que forman el objeto y el ecuador celeste con un intervalo de valores entre -90° y $+90^\circ$; se mide desde el ecuador celeste hacia el norte o hacia el sur, siendo positiva si el objeto está en dirección hacia el norte o negativa si está en dirección hacia el sur. Por su parte, la ascensión recta se mide sobre el ecuador celeste y cuantifica el ángulo entre la proyección del objeto sobre el ecuador celeste y el punto vernal (γ), siendo el punto vernal el punto en el que el plano de eclíptica y el del ecuador celeste se intersecan de sur a norte, es decir, el punto sobre la eclíptica en el que el Sol aparenta pasar del hemisferio sur celeste al hemisferio norte celeste (Figura 1.15a). El valor de la ascensión recta varía en el intervalo de valores que va desde las 0 hasta las 24 h, midiéndose en sentido anti-horario (Figura 1.15b).

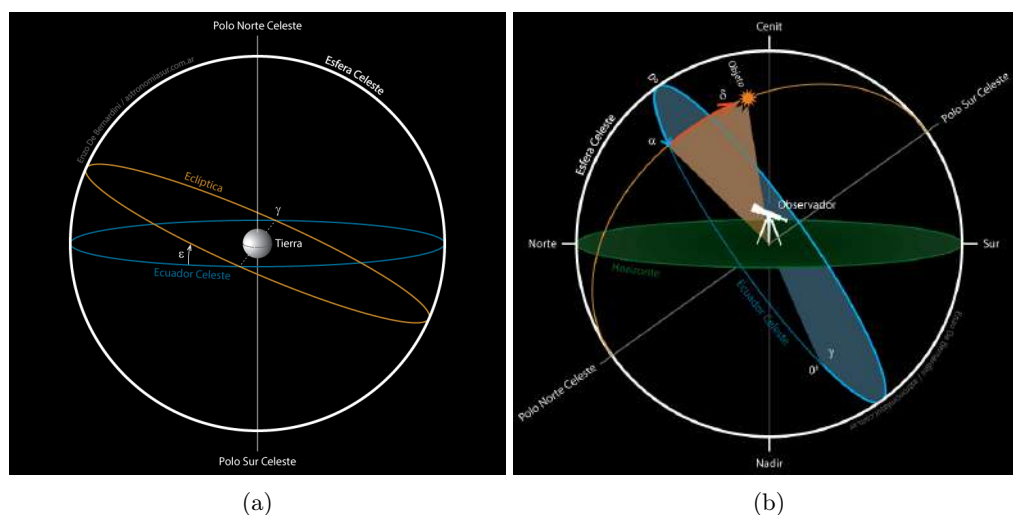


Figura 1.15: En la Figura 1.15a se muestran los planos de la esfera celeste, mientras que en la Figura 1.15b se expone el sistema de coordenadas ecuatoriales. Imágenes tomadas y adaptada —en el caso de la Figura 1.5.1— de De Bernardini (2025).

Un fenómeno curioso que se produce como consecuencia del movimiento de rotación terrestre es el trazo de círculos o semicírculos que las estrellas aparentan dibujar alrededor del polo norte celeste (Figura 1.16). Una de las ventajas de utilizar el ecuador celeste como plano de referencia es que, desde esta perspectiva, la declinación no se ve afectada por dicho movimiento. Además, al elegir el punto vernal como origen para la ascensión recta, esta coordenada también permanece inalterada frente a la rotación del planeta. La propiedad de ser independiente tanto de la rotación terrestre —a escalas de tiempo humanas— como de la posición del observador convierte al sistema de coordenadas ecuatoriales en el más ampliamente utilizado por las instituciones oficiales para registrar posiciones astronómicas.



Figura 1.16: Fotografía de exposición larga que captura el fenómeno visual que causa la rotación de la Tierra, tomada de Dyches, NASA/JPL (2024).

1.5.2. Elementos orbitales

El punto de conseguir las coordenadas astronómicas de un objeto es adquirir información sobre su mecánica celeste. Para esto, se han desarrollado a través de la historia varios métodos, todos centrados en el cómputo de los elementos orbitales del objeto. Éstos constan de seis parámetros variables asociados al astro; a saber, el semieje mayor (a) y la excentricidad (e), determinan su tamaño y su forma, respectivamente; la longitud del nodo ascendente (Ω), la inclinación (i) y el argumento del perihelio (ω) definen la orientación de la órbita con respecto a sus ejes; y la anomalía media (M) que precisa la posición del objeto dentro de la órbita en un momento específico (Roy, 2004) (Figura 1.17).

El semieje mayor es la longitud de la mitad del eje mayor de la órbita en caso de tener una forma elíptica. La excentricidad, definida como $e = \sqrt{1 - b^2/a^2}$, donde b es el semieje menor, mide qué tanto se asemeja la órbita a una circunferencia (si $e = 0$), a una elipse (si $0 < e < 1$), a una parábola (si $e = 1$), o a una hipérbola (si $e > 1$). La inclinación es la separación angular entre el plano orbital del cuerpo y la eclíptica, y su intervalo de valores se encuentra entre $[0^\circ, 90^\circ]$ si el movimiento del cuerpo es en sentido antihorario, o en el de $(90^\circ, 180^\circ]$ si es en sentido horario. La longitud del nodo ascendente es la separación angular entre la dirección del mismo y la del punto vernal, y se mide en sentido horario desde el nodo ascendente. El argumento del perihelio, ω , también mide el ángulo desde el nodo ascendente, pero esta vez hasta el perihelio y en sentido del movimiento del cuerpo. Por último, la anomalía media indica el ángulo que habría entre la dirección del perihelio y el cuerpo en un determinado momento si este siguiera una órbita circular con un radio igual a su semieje mayor (Figura 1.17). Una vez que se obtienen estos parámetros, es

posible determinar la geometría de la órbita del objeto en el espacio.

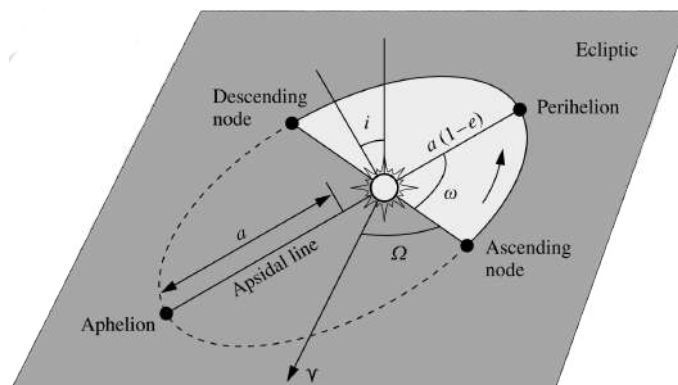


Figura 1.17: Elementos orbitales de un cuerpo que orbita alrededor del Sol. Imagen tomada de Karttunen et al. (2017).

1.5.3. Detectores para la obtención de imágenes

La diferencia entre la iluminación y una imagen, es que la imagen se encuentra organizada. En otras palabras, para la obtención de una imagen, recibir únicamente la luz no es suficiente; también es necesaria su organización por intensidad, dirección y color. De esta tarea se encarga un detector.

Un detector es un dispositivo que genera una señal en respuesta a un fenómeno —como la luz que incide en él—. Hasta antes de los años de 1990, el detector utilizado por la CST fue la placa fotográfica. Se trata de una placa de vidrio que recubre una matriz gelatinosa en la que están dispersos haluros de plata, siendo el bromuro de plata el más utilizado. Estos cristales, cuando son expuestos a la luz y después de un proceso químico de revelado, forman una imagen constituida por granos de plata metálica (Figura 1.18).

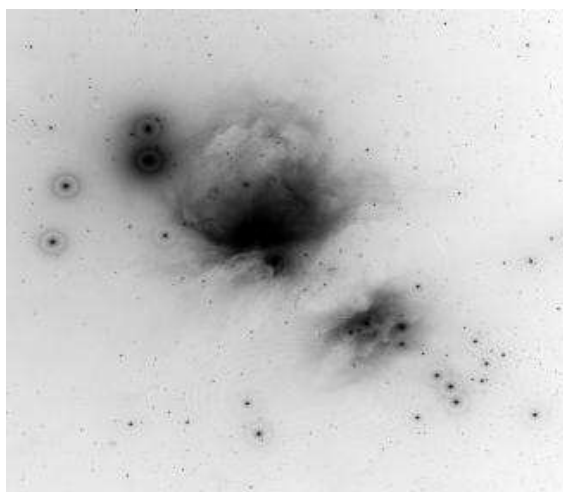


Figura 1.18: Fotografía de la Nebulosa de Orión en una placa de la CST, tomada de Díaz, INAOE (2003).

En su tiempo, la placa fotográfica ofreció claras ventajas con respecto al ojo humano para la observación del cielo, aunque, con la llegada de los detectores electrónicos, sus desventajas fueron cada vez más evidentes. Una de ellas es su respuesta no lineal, es decir, duplicar la cantidad de

fotones incidentes no duplica la cantidad de granos de plata metálica en la imagen; de modo que una fotometría de alta precisión es inviable. Otra de sus desventajas es que cuenta con [eficiencias cuánticas](#) típicas del 1 – 2 %, por lo que sus tiempos de exposición son relativamente más largos que otros detectores —una placa fotográfica necesita entre 20 y 60 veces el tiempo que le tomaría a un detector electrónico obtener un resultado comparable— (Berry & Burnell, 2005). Por estas razones, su uso en la astronomía vanguardista del momento fue impráctico.

Sin embargo, algunos observatorios cuentan con reservorios de placas astronómicas con décadas de antigüedad —el Observatorio de la Universidad de Harvard conserva cerca de medio millón de placas con más de 100 años de antigüedad—, por lo que, debido al valor histórico de su información astrométrica, hoy día existen diversos proyectos que buscan crear sus propios reservorios digitales de imágenes obtenidas por placa fotográfica, como [APPLAUSE](#) o [SIMBAD](#). De hecho, el [INAOE](#) ha desarrollado también su propia base digital gracias a la colaboración entre estudiantes e investigadores, aunque a la fecha de este trabajo aún no es completamente accesible para el público.

Los CCDs

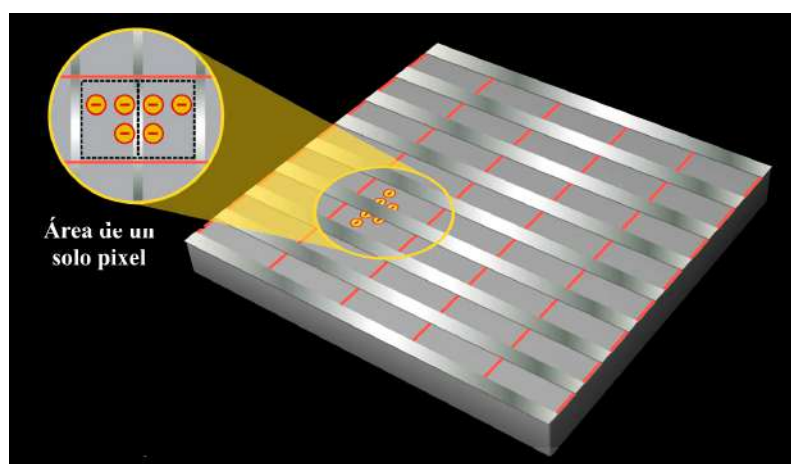


Figura 1.19: Modelo de la estructura de un detector [CCD](#). Las líneas rojas representan a las secciones aislantes, mientras que las áreas plateadas a las placas de metal. Adaptado de [engineerguy \(2012\)](#).

Si bien un [CCD](#), al igual que una placa fotográfica, consiste en una superficie con áreas sensibles a la luz dispuestas en un arreglo matricial, su diferencia radica en que las placas consiguen el registro de imágenes mediante procesos químicos, mientras que los [CCD](#) lo consiguen mediante señales eléctricas, a través de uniones fotoreceptoras o fotositos.

Para crear estos fotositos, donde cada uno corresponde a un pixel, se construyen en la losa secciones aislantes que la dividen en filas y por encima de ella se coloca una delgada capa de sílice, sobre la que a su vez se instalan, perpendicularmente a las secciones aislantes, tiras de metal —usualmente de aluminio—. Así, la estructura de un [CCD](#) puede verse, en esencia, como una matriz de condensadores [MOS](#), y al aplicar un voltaje en las placas conductoras, la carga de cada fotosito se mantiene aislada de los adyacentes (Figura 1.19).

Una de las razones para que los [CCD](#) sean los detectores más utilizados desde hace décadas es su innovación en la forma de transmitir la información de la imagen. Al comienzo de cada exposición, los fotositos son cargados positivamente y luego son desconectados. A medida que los fotones inciden sobre la losa de silicio, los electrones liberados son después capturados por el pozo de carga, parcialmente descargando al fotosito. Terminada la exposición, el [CCD](#) desplaza, renglón

por renglón, las cargas acumuladas por cada fotosito a un búfer de lectura mediante la aplicación de voltajes en las placas conductoras. Una vez en el búfer de lectura, las cargas son nuevamente desplazadas, aunque esta vez fotosito por fotosito, hacia un [Analogue Digital Converter \(ADC\)](#) que, como su nombre lo indica, convierte la señal eléctrica analógica de cada fotosito en un valor numérico, a los que se les conoce como [Analog-to-Digital Unit \(ADU\)](#) o cuentas —la relación entre estas dos magnitudes está dada por la [ganancia](#) del detector, la cual depende del fabricante—. Finalmente, estas cuentas son transmitidas a la computadora.

Otras razones para su éxito como detector son sus propiedades, puesto que permiten: i) [eficiencias cuánticas](#) de entre 40 % y 90 % en el espectro visible - infrarrojo —alcanzando sus máximos de entre 80 % y 90 % en el intervalo de los 800 – 900 nm—; ii) respuestas eléctricas directamente proporcionales al número de fotones incidentes, es decir, el [CCD](#) es un detector lineal¹⁵; iii) múltiples exposiciones por detector, con tiempos de lectura que van desde un minuto hasta fracciones de segundo; y iv) versatilidad de tamaños.

1.6. Justificación y objetivos del trabajo

Bajo todo este contexto, es claro que, en las últimas décadas, la comunidad astronómica internacional ha puesto un énfasis creciente en el descubrimiento, monitoreo y caracterización de los [NEOs](#), debido a tanto el riesgo potencial que algunos de ellos representan para el planeta, como también por su importancia para el entendimiento de las primeras etapas de evolución del sistema solar.

Así, buscando organizar el esfuerzo global que esto conlleva, las observaciones astrométricas de cuerpos menores —como asteroides y cometas— deben ser sistemáticamente reportadas al [MPC](#), organismo dependiente de la [IAU](#) responsable de recopilar, validar y distribuir dicha información.

En su sitio oficial, el [MPC](#) se describe como: «el centro que se encarga de recibir y distribuir la información de las posiciones de los cuerpos menores del sistema solar, además de identificarlos, designarlos y calcular la órbita de cada uno de estos objetos» (Minor Planet Center, [2025a](#)). Para que las mediciones sean consideradas válidas, es requisito que el observatorio que las genera cuente con un código de observación otorgado por este organismo.

Dicho código, compuesto por tres caracteres alfanuméricos, identifica de forma única a cada instalación astronómica con ubicación fija dedicada a la observación regular de cuerpos menores, generalmente mediante el uso de detectores [CCD](#). Hasta la fecha, existen 2,614¹⁶ códigos activos a nivel mundial, lo que refleja la magnitud del esfuerzo colaborativo para la vigilancia del sistema solar.

Contar con un código de observación no sólo permite que las mediciones generadas sean integradas a la base de datos oficial del [MPC](#), sino que además formaliza la participación del observatorio en campañas de descubrimiento, seguimiento y análisis de cuerpos menores, aportando así datos fundamentales para estudios dinámicos, estadísticos y de prevención de impactos.

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo principal obtener un código del [MPC](#) para la [CST](#) del [INAOE](#). Con ello se busca integrar formalmente a dicho telescopio a la red internacional de observatorios —regulada por la [IAU](#)— que contribuyen al monitoreo de cuerpos menores del sistema solar. Para alcanzar este objetivo será necesario demostrar la capacidad del sistema para generar astrometría confiable y precisa.

En consecuencia, se establece como objetivo secundario evaluar cuantitativamente el error astrométrico en las imágenes adquiridas con la [CST](#), con el propósito de verificar que se cumplen los criterios mínimos establecidos por el [MPC](#), los cuales exigen una precisión típica mejor a 1".

Finalmente, como objetivo complementario, se propone la elaboración de un manual técnico que documente detalladamente el procedimiento completo para la obtención y procesamiento de datos

¹⁵Siempre que no se presente [blooming](#). Afortunadamente, este fenómeno es fácilmente evitable, por lo que, en la mayoría de casos, no representa mayor adversidad

¹⁶Consultado el 9 de mayo de 2025 en [IAU Observatory Codes](#).

astrométricos con la [CST](#); de modo que este documento tendrá como propósito también servir de guía práctica para futuros usuarios del telescopio, facilitando así nuevas campañas de seguimiento o descubrimiento de cuerpos menores.

1.7. Estructura de la tesis

Esta tesis se organiza en cinco capítulos, acompañados por varios apéndices, un glosario y una lista de acrónimos. En conjunto, estos elementos documentan el proceso llevado a cabo para obtener un código de observación del [MPC](#) para la [CST](#) del [INAOE](#).

En el Capítulo 1, hemos contextualizado la importancia del estudio de asteroides y [NEOs](#), destacando tanto su relevancia científica como su papel en la defensa planetaria. Además, se presentó el objetivo principal de esta tesis: demostrar la capacidad de la [CST](#) para generar astrometría de alta precisión y obtener un código de observación otorgado por el [MPC](#).

El Capítulo 2 describe el proceso de selección de asteroides utilizando herramientas como el [Minor Planet & Comet Ephemeris Service](#) y [STARALT](#), con las cuales se construyó un calendario observacional. También se incluyen tablas con las especificaciones técnicas del detector [CCD](#) de la [CST](#), un resumen de las sesiones realizadas durante abril de 2024, y una descripción de los desafíos enfrentados durante las noches de observación.

En el Capítulo 3 se explican las fuentes de error presentes en las imágenes [CCD](#) y el proceso de reducción realizado para corregirlas. Se detalla la creación de imágenes maestras mediante técnicas estadísticas, implementadas en Python con el uso de las paqueterías [Astropy](#) y [ccdproc](#), y se presentan ejemplos visuales que ilustran la mejora en la calidad tras la calibración.

El Capítulo 4 aborda el proceso de resolución de placa, necesario para determinar posiciones astronómicas precisas. Se describe la obtención de astrometría diferencial para asteroides, el análisis de los errores presentes y la validación de los resultados. Finalmente, se presenta el reporte enviado al [MPC](#), en formato MPC1992, con las mediciones obtenidas.

El Capítulo 5 resume los principales resultados alcanzados, propone líneas de trabajo futuro y subraya el potencial de la [CST](#) tanto para la ciencia planetaria como para la formación de estudiantes en astronomía observacional.

Por último, los Apéndices [A](#), [B](#), [C](#) y [D](#) incluyen, respectivamente: los requisitos formales para la obtención del código de observación del [MPC](#); la bitácora con los detalles de observación correspondientes a las noches del 25, 26 y 28 de abril de 2024; una colección de imágenes calibradas de los objetos estudiados; y los códigos en Python desarrollados para el procesamiento y análisis de los datos.

Capítulo 2

Selección de la muestra y observaciones

Mesoamérica es heredera de ancestrales observadores del cielo y hoy sus descendientes continúan con esa maravillosa labor de entender el cosmos. Los mexicanos somos hijos de las estrellas, y en particular de la nuestra, el Sol.

Jesús Galindo Trejo (Trejo, 2022)

2.1. Selección de la muestra

Con la intención de cumplir con las condiciones que establece el [MPC](#) para obtener el código de observación (Apéndice [A](#)), se elaboró un calendario de observaciones siguiendo un proceso de selección de una muestra de objetos a observar que consta de tres fases que se detallan más adelante.

El objetivo principal de este proceso fue identificar asteroides que pudieran ser observados de forma efectiva durante las fechas programadas para la campaña, asegurando que cumplieran con criterios de visibilidad, magnitud y posición.

2.1.1. Proceso de selección

Fase 1. Búsqueda preliminar de objetivos

En esta primera fase, se utilizó la herramienta *Observations Target Search* del [MinorPlanet.info](#). Ésta, genera una lista de asteroides que, con base en el mes y año de observación, están cerca de su oposición y/o en el punto sobre su órbita donde alcanzan su máximo brillo y, con base en los parámetros de búsqueda introducidos, filtra aquellos que cumplan con las condiciones.

Para este trabajo fue necesario configurar filtros específicos para acotar la búsqueda a objetos con magnitudes aparentes entre 14 y 17, intervalo dentro del cual el [MPC](#) acepta reportes y en el cual la [CST](#) puede operar con eficiencia (con magnitudes de hasta 17.5 en condiciones óptimas, Cerdán H. (Cerdán, 2019)). Asimismo, se estableció un límite inferior de declinación de -10° , lo cual garantiza que los objetos seleccionados alcancen al menos 30° de altitud sobre el horizonte local durante la noche de observación, lo que proporciona condiciones óptimas de visibilidad y seguimiento. Además, en un segundo ejercicio de selección, con el propósito específico de identificar [NEAs](#) observables durante las fechas de interés, se utilizó la opción *Family/Group* del sistema de

búsqueda para seleccionar el grupo *9101:NEA** (Figura 2.1).

En total, el *Observations Target Search* mostró más de 350 candidatos. Por lo que un segundo filtro para optimizar las observaciones fue necesario.

Run Search Reset		
Table Filtering Options Results are sorted by order of date of brightest		
Value	Range Low/Qualifier	Range High/Selection
Number	0	9999999
Name	Any	Ignored if "Any"
Year/Month	2025 May	Selecting "All" without filters limits the result set to 200 records.
Family/Group	Group numbers precede the colon Any 2041: 1933 VV7 2043: 1981 EY40 2038: 1990 RA3 2039: 1992 DY7 615: 1993 FY12 2037: 1994 UD1 2045: 1995 SU37 006: 1996 RJ 2046: 1997 EM	More than one family can be selected. If "Any" is chosen, any other selected families will be ignored. The family list is based on Nesvorny et al. (2015) with additional families from the AstDys site as well as broad groups that contain objects not in the families. See Section 3 of the LCDB Readme PDF for more information about families and a list of family numbers/names.
Favorable	Ignore	Favorable is one of the top five brighter apparitions between 1995-2050
CALL Status	Ignore	Filter by CALL notifications and/or submission postings
LCDB Status	Ignore	Filter by LCDB entries
Period Range	(h)	(h) One or both blank = No Filter
Mag Range	14	17
Dec Range	-10	90
PhA Range	0.00	120.00
Diameter	8000	Maximum diameter (km)
Run Search Reset		

Figura 2.1: Configuración de la herramienta *Observations Target Search* del MinorPlanet.info.

Fase 2. Verificación de condiciones de observación mediante efemérides

Utilizando el *Minor Planet & Comet Ephemeris Service* (Figura 2.2) y con base en la ubicación del telescopio (Tabla 2.1), fue posible la generación de efemérides de los candidatos para las fechas de observación. Entre las ventajas que ofrece este sistema respecto a otros es que es posible suprimir automáticamente fechas y/u horas en las que los objetos no son observables —ya sea por estar bajo el horizonte o por la presencia de luz solar— al seleccionar las casillas *Suppress output if object below local horizon* y *Suppress output if sun above local horizon*, además de que puede manejar hasta 100 cuerpos a la vez.

En esta fase se aplicaron condiciones de filtrado que excluyeron a los objetos cuya altitud no superaba los 30° durante intervalos suficientemente prolongados como para permitir al menos tres mediciones por noche, así como a aquellos cuyo brillo no se encontraba en el intervalo de magnitudes 14 – 16.

Cabe mencionar que, si bien el *Observations Target Search* cuenta con un sistema generador de

efemérides, éste las genera en un período de 40 días en lapsos de un día, lo que puede ser desafortunado si, como en este trabajo, se cuenta con más de 50 candidatos. Por lo que se recomienda utilizar un sistema generador de efemérides distinto.

Ephemeris Options (applicable only if selecting ephemeris return):

By default, ephemerides are geocentric, begin now and are for 20 days at 1 day intervals.

Ephemeris start date: 2025 05 04 Number of dates to output 10

Ephemeris interval: 1 Ephemeris units: ☐ days ☒ hours ☐ minutes ☐ For daily ephemerides, enter desired offset from 0h UT:
0 hours

You may enter an observatory code or your observing site's coordinates:

Observatory code:

Longitude -98 ° E, latitude +19 °, altitude 2180 m.

Longitudes and latitudes should be entered in decimal degrees.

Display R.A./Decl. positions in: ☐ truncated sexagesimal or ☒ full sexagesimal or ☐ decimal units or ☐ decimal degrees

☐ heliocentric position vector ☐ heliocentric position/velocity vector
☐ geocentric position vector

☒ Total motion and direction

☐ Separate R.A. and Decl. coordinate motions

☐ Separate R.A. and Decl. sky motions

Display motions as: ☐ "/sec ☒ "/min ☐ "/hr ☐ °/day

☒ Suppress output if sun above local horizon

☒ Suppress output if object below local horizon

Output data for photometric reductions

☐ Generate perturbed ephemerides for unperturbed orbits

Measure azimuths:

☒ westwards from the south meridian

☐ eastwards from the north meridian

Also display elements for epoch

Figura 2.2: Configuración de la herramienta [Minor Planet & Comets Ephemeris Service](#) del [MPC](#).

Fase 3. Confirmación final con curvas de altitud

Finalmente, se empleó la herramienta [STARALT](#) para generar curvas de altitud detalladas de cada objeto durante la noche de observación (Figura 2.3). Esta visualización permitió determinar con precisión el intervalo óptimo de tiempo disponible para realizar las observaciones, así como identificar el punto límite antes de que la proximidad del amanecer impidiera seguir registrando datos útiles. Con esta información, se descartaron candidatos que, a pesar de cumplir con los criterios anteriores, no ofrecían una ventana de observación suficientemente amplia o presentaban condiciones desfavorables al final de la noche.

Este procedimiento permitió depurar progresivamente la muestra inicial hasta obtener una selección final de objetivos que cumplieran con los requerimientos técnicos y científicos necesarios para reportar con éxito observaciones al [MPC](#), maximizando tanto la eficiencia como la calidad de los datos obtenidos durante la campaña.

Mode	Staralt v
Night	02 v May v 2025 v or date when the local night starts. Staralt, Startrack only.
Observatory	Roque de los Muchachos Observatory (La Palma, Spain) v Select one above or specify your own site with this format: Longitude(°E) Latitude(°N) Altitude(metres) UT-offset(hours) Ex.: 289.2767 -30.2283 2725 -4 -98.0 +19.0 2180 -6
Coordinates	Formats can be any of these: name hh mm ss ±dd mm ss name hh:mm:ss ±dd:mm:ss name ddd.ddd dd.ddd name must be a single word with no dots, avoid using single numbers. Every entry must be in the same format, do not use different formats with different entries. We recommend a maximum of 100 targets per submission. 164121 07 15 47.6 +57 09 15 Alternatively, you can upload a file with coordinates. You can use the same format as in the TCS catalog . Target names must be single words with no dots. Choose File No file chosen
Options	Moon distance v Included on plot. Moon coordinates at ~02:00 UT. Staralt only. 10°, X=5.8 v Min. elevation (or max. airmass X). Starobs, Starmult only. GIF [inline] v Output format
Submit	Retrieve
Telescope limits	WHT: 89.8° < Elevation < 12° (plot). Targets with +28:57:40>Dec>+28:33:40 won't be accessible when transiting the zenithal blind spot (~0.2° size). INT: 90° < Elevation < 33° (20° if lower shutter raised), -6h < HA < +6, +90°>Dec>-30° 09' 30" (HA-Dec plot - lower shutter raised; lowest altitude-Dec plot).
Help	Help
More	These are other useful resources for planning observations: iObserve , astronomy tools , obstools , NOT's visplot .

Figura 2.3: Configuración correspondiente a la herramienta [STARALT](#) del Isaac Newton Group of Telescopes.

2.1.2. La muestra

El resultado de este proceso fue la selección de once asteroides, a saber; siete del [MBA](#), 226 Weringia (A882 OA), 286 Iclea (4889 PB), 359 Georgia (A893 ED), 477 Italia (A901 QC), 625 Xenia (A907 CG), 770 Bali (A913 UG) y 891 Gunhild (A918 KB), con uno de la familia Veritas, 490 Veritas (A902 RE) y otro de la familia Phocaea, 2 830 Greenwich (1980 GA); y dos [NEAs](#), 2 063 Bacchus (1977 HB) y 25 330 (1999 KV4).

2.2. Las observaciones

2.2.1. Características técnicas de la Cámara Schmidt de Tonanzintla

A continuación se resumen la ubicación, las especificaciones físicas y las propiedades ópticas de la [CST](#), así como los detalles técnicos de su detector [CCD](#) en las Tablas [2.1](#), [2.2](#), [2.3](#) y [2.4](#), respectivamente.

	Valor
Latitud	19° 01' 55" N
Longitud	98° 18' 54" W
Altitud	2160 MASL
Zona horaria	UTC−6

Tabla 2.1: Ubicación de la CST obtenida de Google Earth (2023).

Elemento	Parámetro	Valor
Espejo primario	Diámetro	774 mm
	Diámetro efectivo	762 mm
	Radio de curvatura	4,314.825 mm
	Distancia focal	2,157.412 mm
Lente aplanadora de campo	Diámetro	190 mm
	Radio de curvatura 1	−1,455.3095 mm
	Radio de curvatura 2	1,455.3095 mm
Lente correctora	Diámetro	660.4 mm
	Grosor	22.352 mm

Tabla 2.2: Especificaciones físicas del sistema óptico de la CST.

Propiedad	Valor
Distancia focal	2,135.24 mm
Razón focal	3.23
Escala de la placa	95.6 $\frac{\text{arcseg}}{\text{mm}}$
Campo de visión	28.8 arcmin $\times$ 21.7 arcmin
Escala de imagen	0.52 arcseg $\times$ 0.52 arcseg
Escala de imagen con bin 2×2	1.04 arcseg ²

Tabla 2.3: Propiedades del sistema óptico de la CST.

Especificación	Valor
Modelo	SBIG STF-8300
Dimensiones físicas	17.96mm $\times$ 13.52 mm
Número de píxeles	3,326 $\times$ 2,504
Tamaño de pixel	5.4 μm
Ganancia	0.37 $\frac{e^-}{\text{ADU}}$
ADC	16 bits
Matriz	Monocromática

Tabla 2.4: Detalles técnicos de la cámara CCD acoplada a la CST.

2.2.2. Calendario de observaciones

Con la información recolectada a partir del [Minor Planet & Comet Ephemeris Service](#) y [STARALT](#) fue posible la elaboración de un calendario observacional (Tabla 2.5). Este fue diseñado con el objetivo de priorizar y organizar las sesiones de observación de manera estratégica, asegurando que la captura de datos de asteroides se realizara de manera eficiente y dentro de las ventanas de

visibilidad, maximizando de este modo la productividad de la cámara Schmidt y la calidad de los datos obtenidos.

Noche	Objeto	Magnitud	Hora inicio (hrs.)	Hora fin (hrs.)	Intervalo de tiempo (hh:mm)
2024-04-25	2063	14.26	21:45	00:00	02:15
	490	14.31	20:00	23:00	03:00
	359	14.16	20:00	00:00	04:00
	477	14.13	20:00	00:00	04:00
	286	14.47	20:00	00:00	04:00
	226	14.45	20:00	00:00	04:00
	770	14.48	20:00	00:15	04:15
	25330	14.99	22:00	02:30	04:30
	2830	14.46	21:15	02:15	05:00
	625	14.25	20:30	01:45	05:15
2024-04-26	891	14.46	20:00	01:45	05:45
	2063	14.42	21:30	02:30	05:00
	490	14.32	20:00	00:30	04:30
	359	14.18	20:00	01:30	05:30
	477	14.15	20:00	01:50	05:50
	286	14.49	20:00	01:00	05:00
	226	14.47	20:00	01:30	05:30
	770	14.51	20:00	01:40	05:40
	25330	15.01	21:15	03:50	06:35
	2830	14.46	21:15	03:40	06:25
2024-04-28	625	14.26	20:30	03:15	06:45
	891	14.47	20:00	03:00	07:00
	2063	14.71	21:15	02:15	05:00
	490	14.36	20:00	00:30	04:30
	359	14.22	20:00	01:20	05:20
	477	14.19	20:00	01:40	05:40
	286	14.52	20:00	01:00	05:00
	226	14.5	20:00	01:20	05:20
	770	14.57	20:00	01:40	05:40
	25330	15.07	21:00	03:30	06:30
	2830	14.48	21:00	03:20	06:20
	625	14.28	20:10	03:00	06:50
	891	14.5	20:00	03:00	07:00

Tabla 2.5: Calendario de observaciones

2.2.3. Sesiones de observación

Las sesiones de observación con la CST, con las características mencionadas en las Tablas 2.2 y 2.3, y el detector CCD SBIG STF–8300, con las características vistas en la Tabla 2.4, dieron como resultado diferentes grupos de imágenes, cada uno con un número promedio de 19 observaciones por objeto y 70 segundos de exposición por imagen. Aquellos asteroides de los que no se obtuvieron imágenes efectivas en la primera noche, pasaron a ser de menor prioridad, por lo que, en conjunto con la limitación del tiempo en el que los cuerpos eran visibles en el cielo, las perturbaciones del ambiente y del clima, tiempo de maniobra de parte del sistema de movimiento, tiempos de exposición, etc., provocaron que no fuera posible la obtención de las imágenes de los asteroides 226 Weringia (A882 OA), 770 Bali (A913 UG) y 25 330 (1999 KV4).

Fecha (UT)	Objeto	Total de observaciones
2024-04-26	359	4
	477	7
	490	5
	625	3
	891	3
	2063	18
	2830	17
2024-04-27	286	7
	359	3
	477	4
	490	9
	625	6
	891	3
	2063	15
2024-04-28	2830	8
	286	5
	359	5
	477	3
	490	4
	625	5
	891	4
	2063	6
	2830	7

Tabla 2.6: Resultados de las sesiones de observación.

En la Tabla 2.6 se presenta un resumen de las sesiones de observación realizadas; cada uno de los objetos presentes en ella cuenta con al menos tres observaciones efectivas por noche, es decir, las imágenes que no alcanzaron una calidad visual evidente no fueron consideradas como observaciones efectivas. Para una revisión más amplia de la bitácora de observación y de las observaciones que se tomaron en cuenta para su posterior procesamiento, véanse los Apéndices B y C.

Capítulo 3

Procesamiento de datos

Entonces me he sentido como aquel
observador de los cielos cuando ve un
nuevo planeta llegar a su alcance

(Keats, 1905)

En un contexto de análisis de datos, ‘reducir’ hace referencia al proceso de simplificar, resumir o transformar un conjunto de datos para su óptimo manejo, aunque sin la pérdida de información esencial; por tanto, si se toma en cuenta que una imagen digital no es más que la interpretación visual de un arreglo matricial de datos, es comprensible que una imagen no esté exenta de este proceso.

En lo que respecta a las imágenes generadas por un [CCD](#), aún con sus ventajas mencionadas en la Sección [1.5.3](#), inmediatamente después de finalizar la exposición y transmitir la información a una computadora, en sus cuentas estarán presentes contribuciones que no son propias de los objetos que se están observando.

3.1. Contribuciones espurias

Nivel de *bias*

Durante la conversión de electrones a unidades digitales, el dispositivo de lectura puede registrar contribuciones no deseadas ya que introduce variaciones de voltaje durante este proceso —conocidas como *readout noise*—; lo que, en el caso de recuentos generados por fuentes de luz tenues, puede resultar en valores negativos. Para evitarlo, el sistema electrónico añade intencionalmente un voltaje a cada pixel al finalizar la exposición, incluso cuando el tiempo de exposición es cero (Howell, [2006](#)), a este voltaje de compensación se le conoce como nivel de *bias*. Gracias a este ajuste, se asegura que las lecturas digitales se mantengan dentro de un intervalo positivo y representable por el sistema.

Corriente oscura

El ruido térmico genera ‘corriente oscura’, una señal generada por los procesos térmicos del [CCD](#) que se acumula en cada pixel del detector, incluso cuando no hay luz. Estos procesos térmicos generan electrones libres que, al ser indistinguibles de los generados por la luz del objeto, provocan un recuento erróneo que termina por afectar al brillo aparente de los objetos y a la uniformidad de la imagen (Howell, [2006](#)).

Una forma de reducir esta contribución es manteniendo al [CCD](#) a bajas temperaturas durante todo el tiempo de observación. S bien la [CST](#) tiene incorporado un ventilador y un enfriador

electrónico que permite mantener su temperatura constante —a $\sim -1^\circ \text{C}$ —, dado a que las observaciones fueron sobre objetos relativamente débiles y a la precaria estabilidad en la temperatura del CCD, este contrarresto no resulta suficiente para los fines de este trabajo; por lo que aún resulta necesario cuantificar y eliminar esta contribución de las imágenes.

Variaciones

Además del nivel de *bias* y la corriente oscura, también es común que existan otras anomalías en la respuesta del detector y en la transmisión óptica del sistema, como la variación en la sensibilidad entre píxeles del CCD u obstrucciones como partículas de polvo o componentes del propio telescopio.

Debido a las limitaciones en el proceso de fabricación, cada píxel puede presentar una ganancia o eficiencia cuántica ligeramente distinta a la de sus vecinos, entre un 1 % y un 2 % (Cerdán, 2019), lo que introduce variaciones artificiales en el brillo registrado, incluso bajo una iluminación uniforme. Del mismo modo, en la imagen pueden aparecer tanto sombras causadas por partículas de polvo u otras obstrucciones en lentes o filtros, como una caída progresiva de intensidad hacia los bordes del campo —efecto conocido como viñeteo—, provocada por el sistema óptico. Estas variaciones entre píxeles provoca que las señales producidas por los fotones incidentes se vean mermadas.

Ruido aleatorio

Asimismo, el ruido aleatorio se compone de fluctuaciones impredecibles que aparecen en cada píxel y que no siguen un patrón fijo ni en el tiempo ni en el espacio del detector.

3.1.1. Modelo de una imagen cruda

Así, la imagen cruda registrada por un sensor CCD puede modelarse como una combinación de estas contribuciones. Expresada de forma aproximada en una ecuación matemática, esto sería

$$\text{imagen}_{\text{cruda}} \approx \text{bias} + \text{dark} + \text{flat} \times [\text{objeto} + \text{cielo}] + \text{ruido}, \quad (3.1)$$

donde *bias* representa tanto al ruido de lectura como el nivel de *bias*; *dark*, la corriente oscura; *flat*, la variación entre píxeles; *ruido*, el ruido aleatorio; y ‘cielo’, a la señal ocasionada por el cielo y las estrellas del campo.

3.2. Imágenes obtenidas por CCD para la reducción

Así pues, en concordancia con la Ecuación 3.1, y de acuerdo con Howell (2006), el proceso de reducción de imágenes contempla el uso de tres conjuntos de tomas obtenidas con el CCD, con cada uno siendo de un tipo diferente: *bias*, *darks* y *flats*. Cada uno de estos conjuntos tiene el objetivo de corregir las distintas contribuciones no deseadas que, respectivamente, ya fueron mencionadas.

3.2.1. Obtención de imágenes individuales

Los *bias* son imágenes obtenidas, idealmente, con un tiempo de exposición nulo y con el obturador cerrado, de modo que los únicos datos registrados corresponden a los leídos de píxeles que no han recibido luz ni han sido afectados por la corriente oscura (Figura 3.1a). Para simular ese tiempo de exposición, se tomaron imágenes con tiempos de exposición de sólo 0.09 segundos.

Por su parte, los *darks* se consiguen también mediante la toma de imágenes con el obturador cerrado, aunque esta vez con un tiempo de exposición igual al de los objetos (Figura 3.1c); de este modo, la señal térmica del CCD es cuantificada para cada tiempo de exposición. Nótese que si se realiza una corrección por *darks*, entonces una corrección por *bias* no es explícitamente necesaria,

puesto que, intrínsecamente, el nivel de *bias* ya está presente en los *darks*, lo cual es el caso de este trabajo.

Finalmente, para los *flats*, el CCD es expuesto a una fuente que produce una luz uniforme, sin gradientes ni sombras. De esta forma, al no entrar en juego la variabilidad de los objetos ni las condiciones del cielo, se hacen evidentes la diferencia de sensibilidad entre los píxeles, el viñeteo y la presencia de manchas o sombras (Figura 3.1e). En el caso específico de la CST, el detector se expone a una lámpara halógena hasta que los píxeles se encuentren a $\sim 70\%$ de su valor de saturación, cerca de las 45,500 cuentas (Cerdán, 2019), lo cual se consigue con un tiempo de exposición de ~ 0.2 segundos.

3.2.2. Construcción de imágenes maestras

Debido a que incluso las imágenes de calibración contienen ruido aleatorio, es necesario generar una imagen que i) conserve las contribuciones espurias que se desean corregir y ii) reduzca al mínimo dicho ruido.

Para la creación de una imagen maestra, utilizar una sola imagen de *bias*, *dark* o *flat* para calibrar resultaría contraproducente, ya que el ruido contenido en ella podría amplificarse en lugar de disminuir. Para evitarlo, se combinan múltiples imágenes del mismo tipo, ya sea mediante su media aritmética o su mediana. Por ejemplo, si se cuenta con k imágenes de tamaño $n \times n$ píxeles, la imagen maestra consiste en una imagen en la que, para cada pixel en la posición (i, j) , se le asigna el valor de la estadística de los correspondientes píxeles (i, j) en todas las imágenes. Visto en una expresión matemática, esto es,

$$X_{\text{maestra}}(i, j) = \text{comb}_{\text{mediana}}[X_1(i, j), \dots, X_k(i, j)].$$

En este trabajo se empleó la mediana como método de combinación, por su mayor robustez frente a valores atípicos como rayos cósmicos, errores electrónicos puntuales o descargas térmicas aleatorias. Cada combinación se logró con 10 imágenes por tipo.

En el caso de las imágenes *bias* y *dark* maestras, ambas se obtuvieron combinando 10 imágenes de su tipo, esto es,

$$\begin{aligned} \text{bias}_{\text{maestro}}(i, j) &= \text{comb}_{\text{mediana}}[\text{bias}_1(i, j), \dots, \text{bias}_{10}(i, j)], \\ \text{dark}_{\text{maestro}}(i, j) &= \text{comb}_{\text{mediana}}[\text{dark}_1(i, j), \dots, \text{dark}_{10}(i, j)], \end{aligned}$$

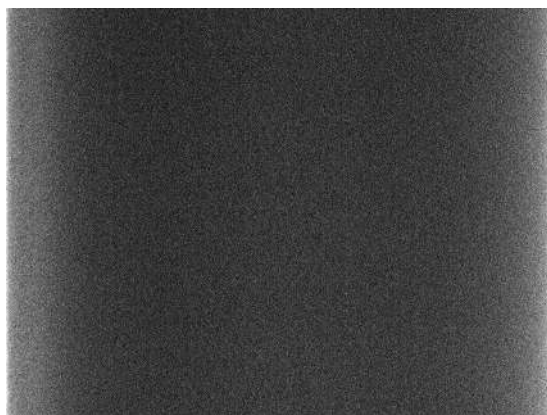
respectivamente (Figuras 3.1b y 3.1d). Para generar el *flat* maestro, en cambio, se requiere de dos pasos. El primero es obtener 10 imágenes intermedias, denominadas flat_k^c , que se obtuvieron al sustraer el *bias* maestro de cada una de ellas:

$$\text{flat}_k^{\text{corr}} = \text{flat}_k - \text{bias}_{\text{maestro}}.$$

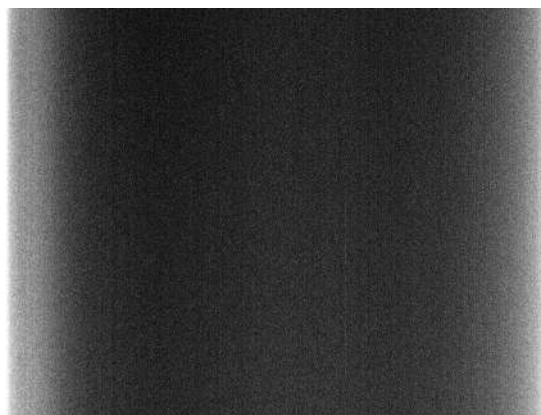
En el segundo se normalizaron y combinaron las imágenes resultantes con su mediana, es decir,

$$\text{flat}_{\text{maestro}}(i, j) = \text{comb}_{\text{mediana}} \left[\frac{\text{flat}_1^c(i, j)}{\text{mediana}(\text{flat}_1^c)}, \dots, \frac{\text{flat}_{10}^c(i, j)}{\text{mediana}(\text{flat}_{10}^c)} \right].$$

Esto, permite al *flat* maestro tener una mediana unitaria, lo que facilita su aplicación como factor de corrección multiplicativo (Figura 3.1f).



(a) *Bias* individual



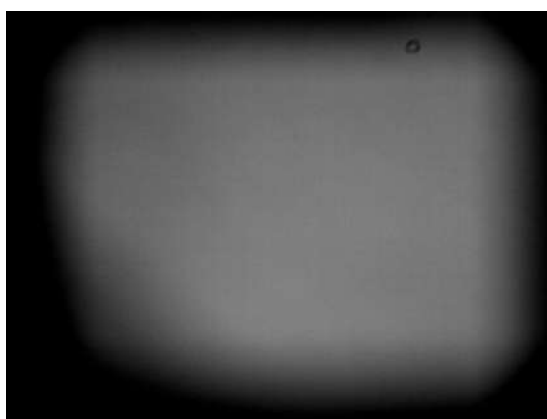
(b) *Bias* maestro



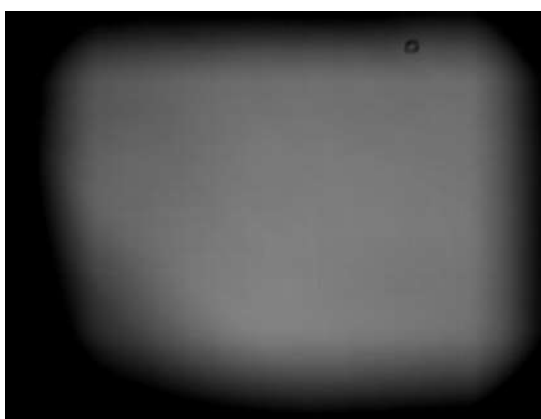
(c) *Dark* individual de 60 segundos



(d) *Dark* maestro de 60 segundos



(e) *Flat* individual de filtro rojo



(f) *Falt* maestro de filtro rojo

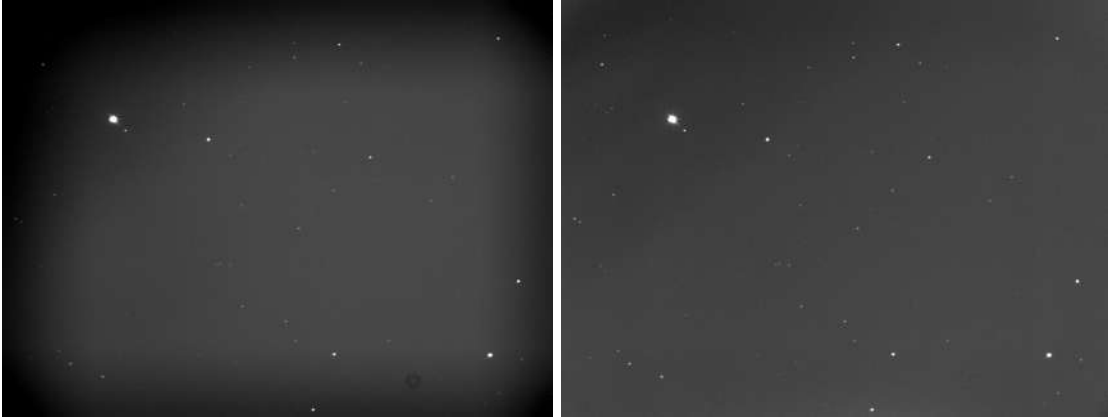
Figura 3.1: Ejemplos de imágenes individuales (izquierda) y sus respectivas imágenes maestras (derecha) para cada tipo de calibración: *bias*, *dark* y *flat*. Las imágenes maestras se obtienen mediante la combinación de varias tomas del mismo tipo, con el fin de reducir el ruido aleatorio y representar fielmente las características sistemáticas del detector.

3.3. Reducción de imágenes

Obtenidas las imágenes maestras, la reducción de imágenes consiste en aislar, en la medida de lo posible, al objeto y al cielo de la Ecuación 3.1. Esto es, primero, sustraer el *dark* maestro de la imagen en crudo del objeto; y, segundo, dividir la imagen resultante por el *flat* maestro, al cual, previamente, le fue restado el nivel de *bias* con el *bias* maestro. El primer paso permite eliminar corriente oscura y el nivel de *bias* de la señal real provocada por el objeto. Mientras que el segundo paso corrige las variaciones de sensibilidad entre píxeles y otros defectos del sistema óptico al compensar, mediante la división de un número mayor o menor que 1, píxeles que responden de más o de menos, respectivamente. Así, el proceso de calibración puede ser escrito como (Howell, 2006),

$$\text{imagen}_{\text{reducida}} \approx \frac{\text{imagen}_{\text{cruda}} - \text{dark}_{\text{maestro}}}{\text{flat}_{\text{maestro}}}.$$

El resultado final es entonces una imagen con el nivel de *bias* eliminado, la corriente oscura corregida, las variaciones de sensibilidad de los píxeles subsanados y el ruido aleatorio minimizado.



(a) Toma previo a la reducción

(b) Toma posterior a la reducción

Figura 3.2: Tomas del objeto 359 Georgia (A893 ED). Previo a la reducción (Figura 3.2a), se puede notar el efecto de viñeteo en los alrededores, así como una sombra en la parte inferior derecha, probablemente causada por el sistema óptico. Posterior al proceso (Figura 3.2b), esas imperfecciones ópticas han sido claramente aminoradas.

3.3.1. Python

Para llevar a cabo el procesamiento de las imágenes, se utilizó el lenguaje de programación **Python**, específicamente **Astropy** y **ccproc**, dos paqueterías que proveen herramientas para el manejo de datos astronómicos y procesamiento de imágenes **CCD**, respectivamente. Los códigos elaborados para la corrección de las imágenes astronómicas están basados en el trabajo de Craig y Chambers (2023) y se pueden encontrar en el Apéndice D. El procedimiento general implementado con los códigos fue el siguiente:

1. Para facilitar el manejo de las imágenes, con el módulo `fits` de `astropy.io`, se modificaron y/o añadieron entradas al *header*, una sección correspondiente a la imagen **CCD** que contiene información sobre la noche de observación, su tiempo de exposición, el filtro, etc.
2. Se cargaron las imágenes *bias*, *dark*, *flat* y de los objetos utilizando `CCDData` de `Astropy`.
3. Se creó un *bias* maestro combinando las imágenes correspondientes mediante la mediana con el método `ccdproc.combine`
4. De igual forma, se utilizó el mismo método para generar las imágenes *dark* y *flat* maestras, combinados por filtro utilizado y tiempo de exposición, respectivamente y con la respectiva

resta para las imágenes *flat* hecha a partir del método `ccdproc.subtract_bias`.

5. A cada imagen de los objetos se le sustrajo el *dark* maestro según su tiempo de exposición con el método `ccdproc.subtract_dark`.
6. Luego, la imagen resultante fue dividida por el *flat* maestro con `ccdproc.flat_correct` en función del filtro utilizado.

Estas operaciones fueron automatizadas mediante funciones personalizadas, lo cual permitió aplicar el mismo procedimiento a varias imágenes de forma eficiente y coherente. Un ejemplo del resultado de la reducción se puede apreciar en la Figura [3.2](#)

Capítulo 4

Análisis y resultados

4.1. Resolución de placa

La fotografía de una región del cielo es el resultado de diversas transformaciones, a saber, la proyección de una región de la esfera celeste en el plano tangente que observa el detector, la refracción atmosférica, las deformaciones introducidas por el sistema óptico y las propiedades del detector (Kovalevsky, 2002). Por ello, antes de medir la posición de los objetos celestes y luego de realizar la calibración fotométrica, es necesario establecer un modelo geométrico que permita ‘resolver’ estos efectos. Este proceso se conoce como resolución de placa o plate solving —nombre que hace alusión a las antiguas placas fotográficas (véase Sección 1.5.3)—, y consiste en asignarle sus coordenadas celestes representativas (α, δ) a cada par de coordenadas (x, y) de los píxeles en la imagen; lo que es posible una vez determinadas la orientación, escala y rotación de la imagen.

Para realizar esta tarea, existen diversos programas, como Astrometrica.net, MPO Canopus o Plate Solve. No obstante, debido a sus funcionalidades integradas que posteriormente facilitaron el análisis de mediciones y la generación del reporte al MPC, en este trabajo se empleó el programa Tycho Tracker.

4.1.1. Algoritmo

Tycho Tracker utiliza el programa `solve-field`, el cual forma parte de la paquetería de Astrometrica.net desarrollada por Lang et al., que *a grosso modo* realiza lo siguiente:

1. Se distinguen los objetos celestes con respecto del fondo del cielo por medio de un algoritmo de detección de fuentes —como SExtractor— y se registran las coordenadas (x, y) de los píxeles del centroide.
2. Se toma una muestra representativa de las estrellas que aparecen en la imagen —usualmente se toman a las ~ 75 más brillantes— y, a partir de un catálogo estelar, se obtienen sus coordenadas celestes (α_i, δ_i) . Para esto, es necesario una transformación inicial aproximada o un algoritmo de emparejamiento iterativo. La explicación de cómo se lleva a cabo este algoritmo, para el caso de `solve-field`, se encuentra en Lang et al. (2010).
3. Luego, a través de una proyección gnomónica, las coordenadas celestes son proyectadas sobre un plano tangente a la región de la esfera celeste que se construye alrededor de un punto de referencia —normalmente este punto es el centro del campo, ya que se suele describir en las especificaciones de la imagen CCD—. De esta manera, se obtienen las coordenadas estandarizadas (ξ_i, η_i) de cada estrella detectada.
4. Mediante identidades de trigonometría esférica, como en Tatum (2023), se establecen relaciones entre las coordenadas (x_i, y_i) de los píxeles en la imagen con sus coordenadas estandarizadas (ξ_i, η_i) en el plano tangente. Estas relaciones, luego de un ajuste por mínimos cuadrados

con un conjunto de estrellas representativas, permite determinar la transformación polinómica de tercer orden que modela las transformaciones geométricas de la imagen mencionadas el inicio de este capítulo.

5. Una vez determinada la transformación, es posible obtener las coordenadas celestes de cualquier objeto en la imagen, con lo que se dice que la placa estará resuelta.

Observatory Info

Label
Camara Schmidt de Tonanzintla

Minor Planet Center (MPC) Status
☐ Already have an MPC code
☒ Applying for a new MPC code
☐ Temporary (roving observer)

Location of the Observatory
MPC (Observatory) Code: XXX Apply location from MPC code
Observatory Name: Observatorio Astrofisico Nacional de Tonanzintla
Longitude (ddd.ddddd): 98.315000 ☒ West ☐ East
Latitude (dd.ddddd): 19.031940 ☒ North ☐ South
Height (meters): 2160.0

Telescope
Design: Schmidt (example: reflector)
Aperture (meters): 0.77 (example: 0.3)
Focal Ratio: f/3.23 (example: f/4.5)

Cancel Next...

Figura 4.1: Configuración del observatorio con los parámetros específicos del OANTON

Camera Details

DATE-OBS (Timestamp)
☒ Refers to beginning of exposure
☐ Refers to middle of exposure
☐ Refers to end of exposure
☐ Offset DATE-OBS: 0.000 seconds
☐ Include "rmsTime": 0.000 seconds
☐ Include "uncTime": 0.000 seconds

Camera Type
CCD

Precision (for MPC report)
Timestamp: Normal
Position: Normal
Note: The MPC permits only a few observatories to use extra precision in the position (RA/Dec) field.
If unsure, please use the default "Normal" precision.

Additional Parameters
Gain (e-/count): 0.37
Readout noise (e-):
Dark current (e-/pix/second):

Cancel Finished

Figura 4.2: Configuración del detector CCD con los parámetros específicos de la CST

4.1.2. Tycho Tracker

Para realizar adecuadamente la resolución de placa, Tycho Tracker requiere la configuración de varias pestañas. Las dos primeras, **Observatory Info** y **Camera Details**, se relacionan con la configuración de la **CST** (Figuras 4.1 y 4.2). En ellas se especifican tanto la ubicación del sitio como las características del sistema óptico y del detector (Tablas 2.1, 2.2, 2.3 y 2.4). Los campos **readout noise** y **dark current** se dejaron en blanco, ya que las imágenes fueron calibradas previamente con archivos *dark* y *flat* (Capítulo 3).

A continuación, en la ventana **Star Catalog Settings** (Figura 4.3), se seleccionó el catálogo Gaia DR2 como fuente para obtener las coordenadas celestes de las estrellas del campo. Esta elección sigue la recomendación del **MPC** para reportes astrométricos de asteroides (Apéndice A, requisito 8). Además de que Tycho Tracker permite acceder a este catálogo sin necesidad de tener una copia local.

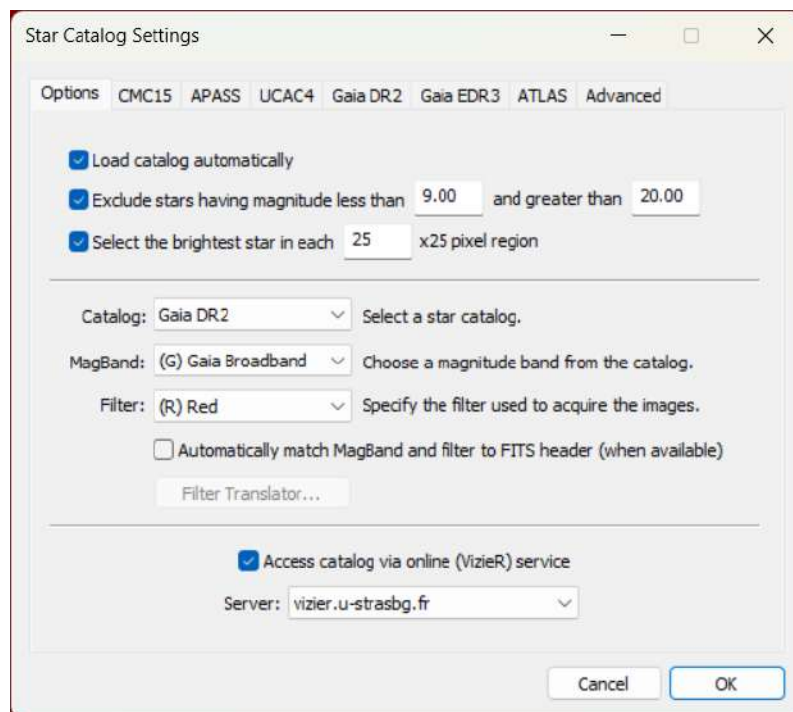


Figura 4.3: Configuración de la pestaña **Star Catalog Settings**

Finalmente, se configuraron las pestañas **Image Calibration**, **Plate Solve Images** y **Align Images** (Figuras 4.4, 4.5 y 4.6, respectivamente). En la primera se desactivó la calibración mediante *bias*, *dark* y *flat* maestros, ya que la corrección se había realizado previamente con Python (Capítulo 3), puesto que de esta manera se consiguió un mayor control en el proceso de calibración.

En la segunda, se definieron los límites inferior y superior de la escala de placa con base en una escala estimada de $\sim 1.05 \frac{\text{arcseg}}{\text{pixel}}$ (Tabla 2.4), considerando una tolerancia del 12.5 %. Para la extracción de estrellas se eligió la opción **Extend**, recomendada cuando el número de estrellas en la imagen es bajo, como ocurrió con las observaciones de algunos de los objetos.

Mientras que en la tercera pestaña se activó la alineación de imágenes. Aunque esta función es opcional, resulta especialmente útil cuando se cuenta con múltiples observaciones, ya que permite confirmar visualmente que la resolución de placa se ha aplicado correctamente en todas las imágenes. Además, proporciona una referencia visual adicional para verificar, más adelante, si el asteroide fue detectado con éxito.

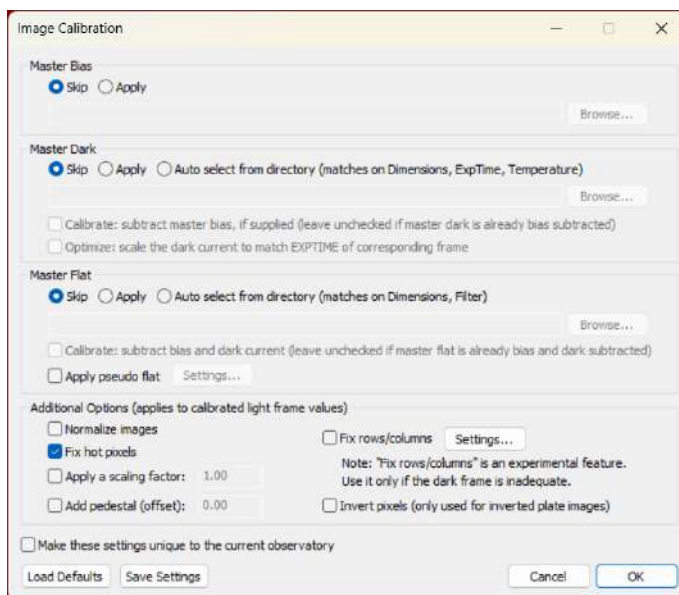


Figura 4.4: Configuración de la ventana **Image Calibration** de Tycho Tracker. La única reducción aceptada fue la reparación de los pixeles calientes, ya que la demás calibración fue realizada previamente con Python

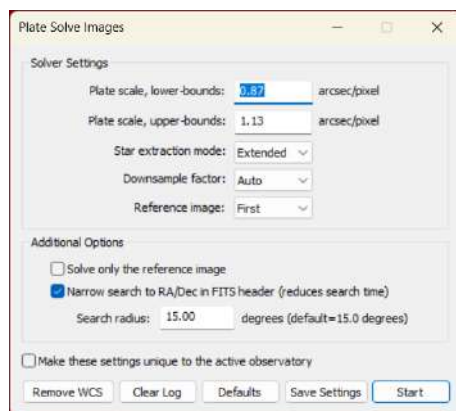


Figura 4.5: Configuración de la ventana **Plate Solve Images** de Tycho Tracker

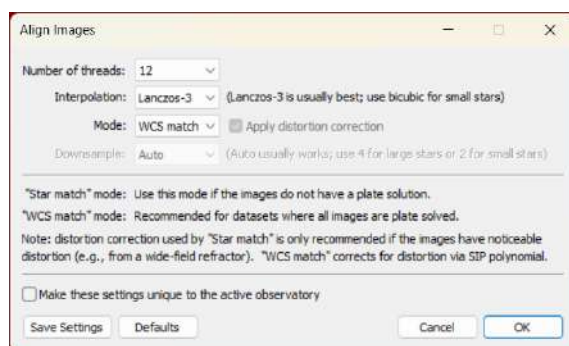
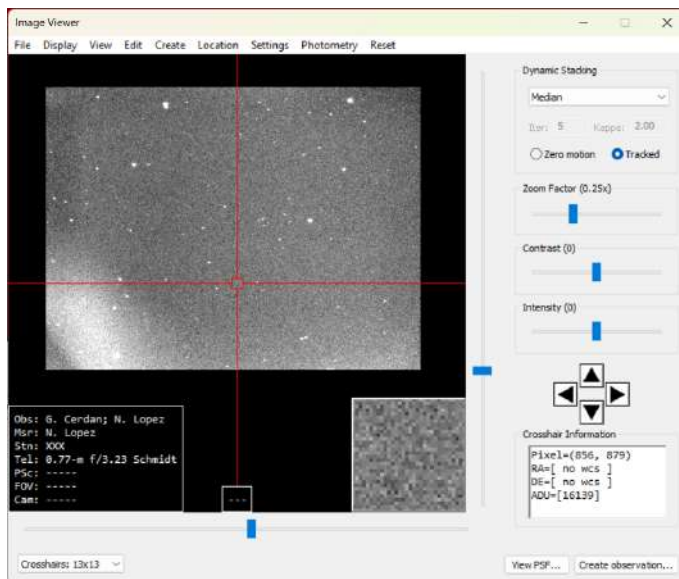
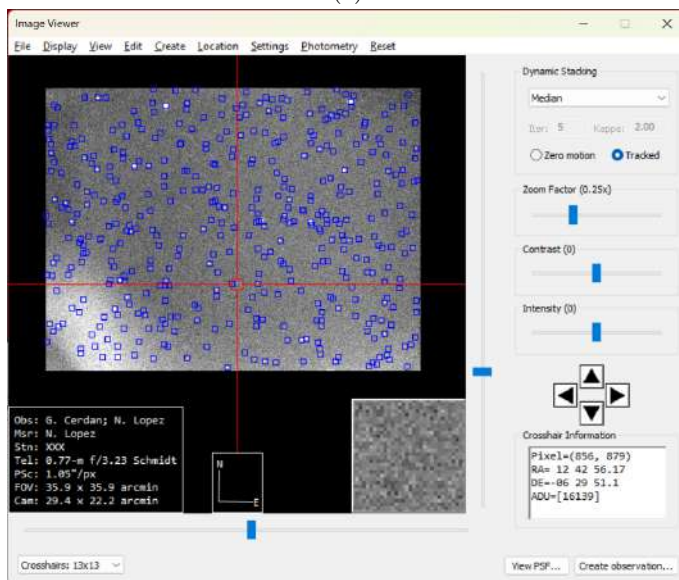


Figura 4.6: Configuración de la ventana **Align Images** de Tycho Tracker

Establecida la configuración de cada una de estas pestañas, se procedió a resolver cada conjunto de imágenes —agrupadas por objeto y por noche de observación— mediante la opción **Action** → **Express Mode** de Tycho Tracker. Esta función permite ejecutar automáticamente las tres tareas mencionadas anteriormente, y en el orden en que fueron presentadas, sobre todas las imágenes abiertas por el programa. Un ejemplo del resultado del proceso de resolución de placa se muestra en la Figura 4.7.



(a)



(b)

Figura 4.7: Observación de 477 Italia (A901 QC) antes y después de la resolución de placa (Figuras 4.7a y 4.7b, respectivamente). Los recuadros azules corresponden a las estrellas que fueron detectadas. Después de la resolución de placa, Tycho Tracker reconoce las coordenadas celestes asociadas a cada pixel (recuadro inferior derecho), la orientación de la imagen (recuadro inferior central) y el campo de visión efectivo y teórico (recuadro inferior izquierdo, FOV y Cam)

4.2. Astrometría de asteroides

4.2.1. Obtención

Una vez realizada la calibración astrométrica de las imágenes, es posible llevar a cabo la astrometría del asteroide a partir de paquetes de tres imágenes. El procedimiento consiste en lo siguiente:

1. Con su módulo **Track Navigator**, Tycho Tracker reconoce y modela la trayectoria esperada de los objetos que, según las efemérides del archivo MPCORB —la base de datos del [MPC](#) donde se encuentran registrados los elementos orbitales de todos los cuerpos menores conocidos—, deberían ser visibles en el campo de cada imagen.
2. Utilizando la transformación obtenida en la resolución de placa, el programa calcula las coordenadas ecuatoriales (α, δ) de todas las fuentes de luz detectadas en la imagen, así como las del centro del campo. Estas últimas se comparan con las coordenadas de las estrellas que, de acuerdo con el catálogo estelar, deberían aparecer en la imagen; aquellas fuentes que no coincidan con una estrella catalogada se registran como posibles candidatos a asteroides, cometas, novae o artefactos.
3. Luego, Tycho Tracker compara las coordenadas de los asteroides conocidos con las de los candidatos; si coinciden dentro de un margen de tolerancia, el cuerpo es identificado y relacionado con su designación oficial. En caso contrario, se descarta el objeto y el reporte de sus mediciones y deducción de la naturaleza del objeto queda a sujeta al usuario¹.
4. Terminado el algoritmo, la interfaz muestra una lista de sus candidatos de detección —el objeto de interés normalmente se encuentra entre los primeros diez, pues se encuentran listados en orden de calidad— con sus respectivas trayectorias calculadas en la imagen (Figura 4.8a). Finalmente, una vez identificado el objeto con el apoyo del módulo **Verify Track**, la función **Create Observation(s)** realiza un ajuste de perfil sobre la distribución de brillo del cuerpo (véase Figura 4.8b) para determinar con precisión su centroide. El programa genera entonces una ventana con un archivo de texto que contiene la posición astronómica, la fecha de observación, la magnitud estimada y la designación oficial del objeto.

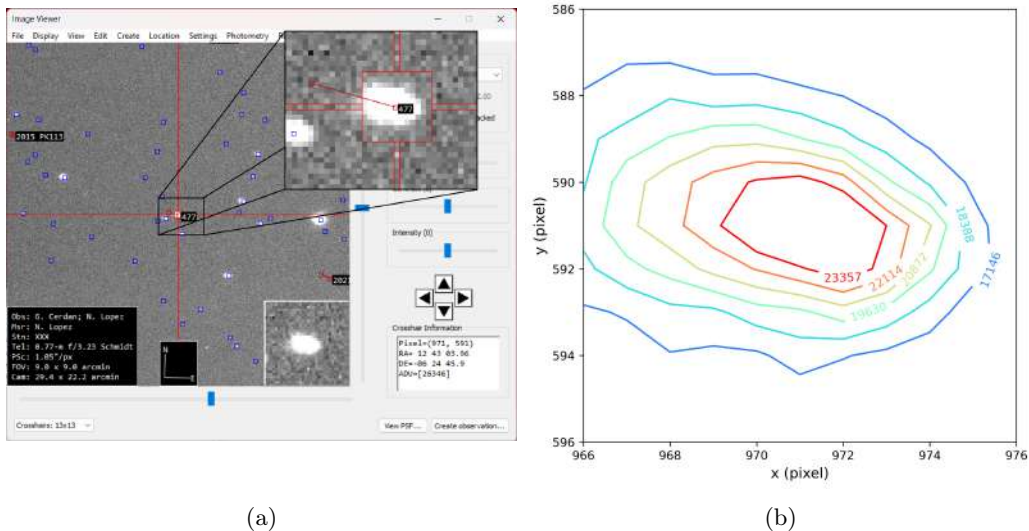
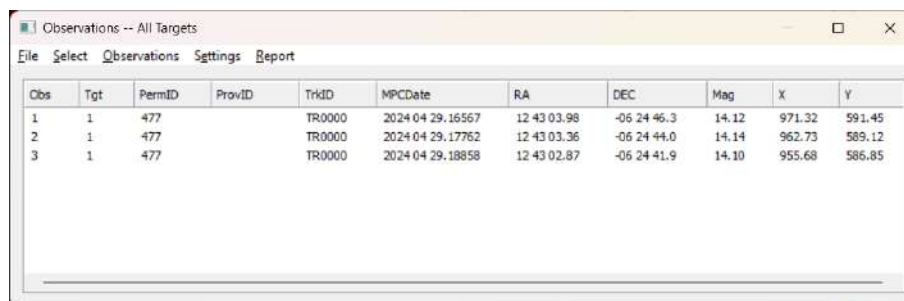


Figura 4.8: La figura 4.8b, muestra las curvas de nivel del asteroide 477 Italia (A901QC). Cada una de ellas representa el número de cuentas registradas en la región alrededor del objeto.

¹En caso de que las observaciones de un objeto no coincidan con un objeto registrado por el [MPC](#), antes de reportar las mediciones, se recomienda enviar las mediciones a [Minor Planet Checker](#), ya que con ella se produce una lista de observaciones realizadas en una región alrededor de las mediciones compartidas e información que puede, o no, indicar si el objeto es uno que, efectivamente, no ha sido observado lo suficiente o registrado.



Obs	Tgt	PermID	ProvID	TrkID	MPCDate	RA	DEC	Mag	X	Y
1	1	477		TR0000	2024 04 29.16567	12 43 03.98	-06 24 46.3	14.12	971.32	591.45
2	1	477		TR0000	2024 04 29.17762	12 43 03.36	-06 24 44.0	14.14	962.73	589.12
3	1	477		TR0000	2024 04 29.18858	12 43 02.87	-06 24 41.9	14.10	955.68	586.85

Figura 4.9: Mediciones obtenidas del asteroide 477 Italia (A901QC) a partir de sus tres observaciones tomadas en la noche del 28 de abril de 2024

En lo que concierne a este trabajo, las únicas observaciones de objetos que se realizaron fueron las de aquellos que se encuentran en la lista de la Sección 2.1.2. Un ejemplo de las observaciones resultantes de un objeto, y en una noche de observación, se puede apreciar en la Figura 4.9

4.2.2. Análisis

Entre los criterios que considera el MPC para aceptar astrometrías reportadas por un observatorio se encuentra la necesidad de mantener una precisión típica mejor que 1'' (véase Apéndice A, requisito 7). Una estrategia útil para evaluar la exactitud de las mediciones —cuando se trabaja con objetos conocidos y, por tanto, con trayectorias bien determinadas— consiste en comparar las posiciones observadas con las calculadas. Si los residuos resultan pequeños, aleatorios y sin tendencias sistemáticas, puede concluirse que la astrometría cumple con los estándares exigidos por el MPC.

Para verificar esta condición, se aplicaron dos métodos equivalentes. El primero utilizó el módulo **Quality Analysis** de Tycho Tracker, que realiza esta comparación de forma automática. El segundo consistió en evaluar las posiciones observadas mediante las efemérides generadas con la herramienta [Horizons Web Application](#) del Laboratorio de Propulsión a Chorro (JPL, por sus siglas en inglés)² y un script en Python (Apéndice D, Listing D.6).

Los resultados se presentan en las siguientes tablas. Las mediciones con error menor a 0.5'' ($\approx 87\%$) se muestran en verde; aquellas con error entre 0.5'' y 1'' ($\approx 10\%$) en amarillo; y las que superan 1'' ($\approx 3\%$) en rojo. En conjunto, más del 95 % de las posiciones reportadas cumplen con el estándar de calidad exigido por el MPC.

Astrometría del asteroide 286 Iclea (A889 PB)					
UT	RA (α)	O–C	DEC (δ)	O–C	Error total
2024-04-27					
03:17:27	11 20 33.24	0.261	+16 53 15.4	0.157	0.305
04:14:48	11 20 32.84	0.075	+16 53 18.7	0.036	0.083
04:21:04	11 20 32.77	0.433	+16 53 18.7	0.300	0.527
2024-04-29					
	11 20 17.66	0.170	+16 55 31.3	0.179	0.247
03:10:48	11 20 17.56	0.139	+16 55 32.1	0.119	0.183
03:36:35	11 20 17.43	0.080	+16 55 33.2	0.060	0.100

²A diferencia del generador de efemérides del MPC (utilizado en la Sección 2.1.1), la herramienta del JPL permite especificar la posición del observatorio con mayor precisión, lo cual resulta crucial para una evaluación más rigurosa de las mediciones.

Astrometría del asteroide 359 Georgia (A893 ED)					
UT	RA (α)	O–C	DEC (δ)	O–C	Error total
2024-04-26					
05:31:15	12 22 30.35	0.213	-04 17 13.4	0.098	0.234
07:43:31	12 22 26.67	0.116	-04 16 58.7	0.069	0.135
07:55:03	12 22 26.34	0.289	-04 16 57.3	0.050	0.293
2024-04-27					
06:28:24	12 21 50.52	0.510	-04 14 30.9	0.021	0.510
06:40:26	12 21 50.20	0.411	-04 14 29.7	0.111	0.426
06:50:45	12 21 49.92	0.420	-04 14 28.4	0.084	0.428
2024-04-29					
03:51:13	12 20 41.40	0.090	-04 09 50.6	0.221	0.239
04:09:25	12 20 40.93	0.084	-04 09 48.9	0.119	0.146
04:21:07	12 20 40.61	0.351	-04 09 47.8	0.061	0.356

Astrometría del asteroide 477 Italia (A905 UK)					
UT	RA (α)	O–C	DEC (δ)	O–C	Error total
2024-04-26					
05:37:23	12 45 25.03	0.066	-06 34 48.2	0.167	0.180
08:13:12	12 45 19.47	0.025	-06 34 25.1	0.110	0.113
08:20:56	12 45 19.20	0.030	-06 34 24.2	0.145	0.148
2024-04-27					
06:47:52	12 44 33.33	0.089	-06 31 07.8	0.017	0.091
07:14:38	12 44 32.39	0.045	-06 31 03.8	0.114	0.123
07:27:09	12 44 31.96	0.056	-06 31 02.1	0.007	0.056
2024-04-29					
03:57:49	12 43 03.98	0.015	-06 24 46.3	0.248	0.248
04:15:01	12 43 03.36	0.612	-06 24 44.0	0.196	0.643
04:30:48	12 43 02.87	0.014	-06 24 41.9	0.136	0.137

Astrometría del asteroide 490 Veritas (A902 RE)					
UT	RA (α)	O–C	DEC (δ)	O–C	Error total
2024-04-26					
04:47:04	11 08 53.15	0.443	+05 41 07.3	0.258	0.513
07:12:29	11 08 52.12	0.071	+05 41 24.0	0.499	0.504
07:24:12	11 08 52.04	0.042	+05 41 25.8	0.099	0.108
2024-04-27					
03:05:57	11 08 44.92	0.400	+05 43 45.6	0.240	0.466
03:28:36	11 08 44.79	0.771	+05 43 48.0	0.486	0.911
04:10:27	11 08 44.45	0.078	+05 43 53.2	0.130	0.152
2024-04-29					
02:41:57	11 08 30.23	0.259	+05 49 01.8	0.031	0.261
03:02:09	11 08 30.10	0.094	+05 49 03.9	0.006	0.094
03:14:27	11 08 30.06	0.276	+05 49 05.2	0.013	0.276

Astrometría del asteroide 625 Xenia (A907 CG)					
UT	RA (α)	O-C	DEC (δ)	O-C	Error total
2024-04-26					
06:49:54	13 38 23.47	0.136	+08 56 25.1	0.094	0.165
08:46:27	13 38 19.34	0.254	+08 56 44.5	0.083	0.267
09:04:02	13 38 18.70	0.088	+08 56 47.6	0.112	0.142
2024-04-27					
08:20:20	13 37 30.73	0.353	+09 00 37.6	0.034	0.355
08:37:36	13 37 30.10	0.034	+09 00 40.6	0.227	0.230
08:53:38	13 37 29.46	1.090	+09 00 42.9	0.014	1.090
2024-04-29					
05:12:34	13 35 59.47	0.061	+09 07 28.3	0.017	0.063
05:57:02	13 35 57.91	0.166	+09 07 34.8	0.104	0.196
06:20:30	13 35 57.08	0.324	+09 07 38.2	0.135	0.351

Astrometría del asteroide 891 Gunhild (A918 KB)					
UT	RA (α)	O-C	DEC (δ)	O-C	Error total
2024-04-26					
06:53:34	13 26 32.01	0.235	+12 21 45.9	0.051	0.240
08:49:27	13 26 28.27	0.147	+12 21 51.4	0.181	0.233
09:07:14	13 26 27.77	1.070	+12 21 52.4	0.029	1.070
2024-04-27					
08:14:29	13 25 44.76	0.192	+12 22 57.2	0.024	0.193
08:33:29	13 25 44.18	0.125	+12 22 57.8	0.176	0.216
08:47:34	13 25 43.72	0.092	+12 22 58.3	0.229	0.247
2024-04-29					
06:29:17	13 24 20.74	0.172	+12 24 30.0	0.051	0.179
06:48:28	13 24 20.13	0.273	+12 24 30.4	0.002	0.273
07:03:52	13 24 19.66	0.171	+12 24 30.8	0.046	0.177

Astrometría del asteroide 2063 Bacchus (1977 HB)					
UT	RA (α)	O-C	DEC (δ)	O-C	Error total
2024-04-26					
07:07:57	13 49 58.08	0.251	-13 49 00.1	0.111	0.274
07:37:25	13 49 52.55	0.014	-13 49 20.6	0.135	0.136
08:03:37	13 49 47.67	0.244	-13 49 38.6	0.180	0.303
2024-04-27					
03:59:48	13 46 25.87	0.374	-14 03 22.0	0.220	0.434
06:23:42	13 46 00.05	0.276	-14 04 58.8	0.106	0.296
06:36:56	13 45 57.69	0.211	-14 05 07.7	0.110	0.238
2024-04-29					
04:55:45	13 38 42.18	0.029	-14 33 49.6	0.223	0.225
05:52:06	13 38 33.17	0.199	-14 34 22.1	0.024	0.200
06:12:39	13 38 29.87	0.016	-14 34 34.0	0.101	0.102

Astrometría del asteroide 2830 Greenwich (1980 GA)					
UT	RA (α)	O–C	DEC (δ)	O–C	Error total
2024-04-26					
06:44:51	14 09 28.97	0.065	+03 33 41.3	0.008	0.065
08:42:22	14 09 21.02	0.194	+03 32 28.1	0.169	0.257
09:01:24	14 09 19.79	0.804	+03 32 16.9	0.376	0.888
2024-04-27					
07:42:41	14 07 51.22	0.065	+03 18 04.3	0.203	0.213
07:59:35	14 07 50.11	0.375	+03 17 53.6	0.182	0.417
08:10:53	14 07 49.34	0.227	+03 17 46.4	0.116	0.255
2024-04-29					
06:42:48	14 04 49.19	0.298	+02 47 58.4	0.098	0.314
06:59:04	14 04 48.09	0.085	+02 47 48.0	0.075	0.113
07:16:44	14 04 46.89	0.242	+02 47 36.3	0.140	0.280

4.3. Resultados

Reporte enviado al MPC

Existen dos formatos para presentar mediciones al [MPC](#), el formato MPC1992, también llamado obs80, y el Estándar de Intercambio de Datos Astrométricos ([ADES](#), por sus siglas en inglés). Si bien este último es el que el [MPC](#) recomienda comenzar a usar, aún no cuenta con soporte para el reporte de parte de observatorios que no cuenten con el código del [MPC](#); de modo que, para esta primera entrega de datos, se adoptará el modelo antiguo.

Finalmente, el reporte que se envió al [MPC](#) se muestra en el Listing [4.1](#)

```

COD XXX
CON R. Valdes
OBS G. Cerdan; N. Lopez
MEA N. Lopez
AC2 jvaldes@inaoep.mx
COM Long. 261 41 6.0 E, Lat. 19 1 55.0 N, Alt. 2160m, Google Earth
COM Observatorio Astrofisico Nacional de Tonantzintla
TEL 0.77-m f/3.23 Schmidt + CCD
NET Gaia DR2
00286      C2024 04 27.13758 11 20 33.24 +16 53 15.4      14.2 G      XXX
00286      C2024 04 27.17729 11 20 32.84 +16 53 18.7      14.3 G      XXX
00286      C2024 04 27.18164 11 20 32.77 +16 53 18.7      14.3 G      XXX
00286      C2024 04 29.12044 11 20 17.66 +16 55 31.3      14.4 G      XXX
00286      C2024 04 29.13302 11 20 17.56 +16 55 32.1      14.4 G      XXX
00286      C2024 04 29.15093 11 20 17.43 +16 55 33.2      14.4 G      XXX
00359      C2024 04 26.23021 12 22 30.35 -04 17 13.4      13.9 G      XXX
00359      C2024 04 26.32212 12 22 26.67 -04 16 58.7      13.8 G      XXX
00359      C2024 04 26.33013 12 22 26.34 -04 16 57.3      13.6 G      XXX
00359      C2024 04 27.27007 12 21 50.52 -04 14 30.9      13.8 G      XXX
00359      C2024 04 27.27843 12 21 50.20 -04 14 29.7      13.9 G      XXX
00359      C2024 04 27.28559 12 21 49.92 -04 14 28.4      13.8 G      XXX
00359      C2024 04 29.16109 12 20 41.40 -04 09 50.6      14.0 G      XXX
00359      C2024 04 29.17373 12 20 40.93 -04 09 48.9      14.0 G      XXX
00359      C2024 04 29.18185 12 20 40.61 -04 09 47.8      14.0 G      XXX
00477      C2024 04 26.23464 12 45 25.03 -06 34 48.2      14.1 G      XXX
00477      C2024 04 26.34273 12 45 19.47 -06 34 25.1      14.0 G      XXX
00477      C2024 04 26.34810 12 45 19.20 -06 34 24.2      14.2 G      XXX
00477      C2024 04 27.28370 12 44 33.33 -06 31 07.8      14.1 G      XXX
00477      C2024 04 27.30218 12 44 32.39 -06 31 03.8      14.1 G      XXX
00477      C2024 04 27.31087 12 44 31.96 -06 31 02.1      14.0 G      XXX
00477      C2024 04 29.16567 12 43 03.98 -06 24 46.3      14.1 G      XXX
00477      C2024 04 29.17762 12 43 03.36 -06 24 44.0      14.1 G      XXX

```

00477	C2024	04	29.18858	12	43	02.87	-06	24	41.9	14.1	G	XXX
00490	C2024	04	26.19970	11	08	53.15	+05	41	07.3	14.2	G	XXX
00490	C2024	04	26.30068	11	08	52.12	+05	41	24.0	13.8	G	XXX
00490	C2024	04	26.30882	11	08	52.04	+05	41	25.8	13.9	G	XXX
00490	C2024	04	29.11299	11	08	30.23	+05	49	01.8	13.9	G	XXX
00490	C2024	04	29.12701	11	08	30.10	+05	49	03.9	14.0	G	XXX
00490	C2024	04	29.13556	11	08	30.06	+05	49	05.2	14.0	G	XXX
00625	C2024	04	26.28500	13	38	23.47	+08	56	25.1	14.2	G	XXX
00625	C2024	04	26.36594	13	38	19.34	+08	56	44.5	14.3	G	XXX
00625	C2024	04	26.37803	13	38	18.70	+08	56	47.6	14.3	G	XXX
00625	C2024	04	29.21758	13	35	59.47	+09	07	28.3	14.5	G	XXX
00625	C2024	04	29.24846	13	35	57.91	+09	07	34.8	14.4	G	XXX
00625	C2024	04	29.26476	13	35	57.08	+09	07	38.2	14.3	G	XXX
00891	C2024	04	27.34374	13	25	44.76	+12	22	57.2	14.3	G	XXX
00891	C2024	04	27.35693	13	25	44.18	+12	22	57.8	14.3	G	XXX
00891	C2024	04	27.36671	13	25	43.72	+12	22	58.3	14.4	G	XXX
00891	C2024	04	29.27068	13	24	20.74	+12	24	30.0	14.3	G	XXX
00891	C2024	04	29.28418	13	24	20.13	+12	24	30.4	14.3	G	XXX
00891	C2024	04	29.29487	13	24	19.66	+12	24	30.8	14.3	G	XXX
02063	C2024	04	26.29736	13	49	58.08	-13	49	00.1	14.4	G	XXX
02063	C2024	04	26.31788	13	49	52.55	-13	49	20.6	14.3	G	XXX
02063	C2024	04	26.33608	13	49	47.67	-13	49	38.6	14.6	G	XXX
02063	C2024	04	27.16676	13	46	25.87	-14	03	22.0	14.5	G	XXX
02063	C2024	04	27.26681	13	46	00.05	-14	04	58.8	14.5	G	XXX
02063	C2024	04	27.27600	13	45	57.69	-14	05	07.7	14.6	G	XXX
02063	C2024	04	29.20590	13	38	42.18	-14	33	49.6	14.7	G	XXX
02063	C2024	04	29.24503	13	38	33.17	-14	34	22.1	14.8	G	XXX
02063	C2024	04	29.25931	13	38	29.87	-14	34	34.0	14.8	G	XXX
02830	C2024	04	27.32177	14	07	51.22	+03	18	04.3	14.5	G	XXX
02830	C2024	04	27.33351	14	07	50.11	+03	17	53.6	14.4	G	XXX
02830	C2024	04	27.34135	14	07	49.34	+03	17	46.4	14.4	G	XXX
02830	C2024	04	29.28024	14	04	49.19	+02	47	58.4	14.2	G	XXX
02830	C2024	04	29.29154	14	04	48.09	+02	47	48.0	14.1	G	XXX
02830	C2024	04	29.30381	14	04	46.89	+02	47	36.3	14.2	G	XXX
----- end -----												

Listing 4.1: Reporte astrométrico enviado al MPC

Capítulo 5

Conclusiones y trabajo a futuro

Este trabajo se reportan los resultados de mediciones astrométricas para siete asteroides del [MBA](#) y un [NEA](#) a partir de imágenes obtenidas en tres noches de observación. El objetivo fue demostrar la capacidad de la Cámara Schmidt de Tonantzintla del [INAOE](#) para generar observaciones astrométricas confiables de cuerpos menores, y así solicitar el código de observación ante el [MPC](#).

El proceso incluyó el diseño e implementación de un calendario de observaciones mediante la generación de listas de cuerpos observables desde la localización del telescopio, así como la elaboración de efemérides y curvas de altitud mediante las aplicaciones en línea [Observations Target Search](#) del Minor Planet Info, [Minor Planet & Comet Ephemeris Service](#) del [MPC](#) y [Object Visibility - STARALT](#) del Isaac Newton Group of Telescopes. Se desarrolló también un algoritmo de trabajo completo para la adquisición y calibración de imágenes [CCD](#), implementado en Python con la paquetería Astropy. Se utilizó el software Tycho Tracker y la herramienta [Horizons Web Application](#) para el análisis y validación astrométrica.

La calidad de las mediciones fue evaluada rigurosamente, mostrando que más del 95 % de las posiciones reportadas presentan errores menores a $1''$, cumpliendo con los estándares exigidos por el [MPC](#). De no presentarse inconvenientes, el reporte de datos permitirá incorporar oficialmente a la Cámara Schmidt del [INAOE](#) a la red internacional de observatorios dedicados al monitoreo de cuerpos menores del sistema solar.

Además, se adquirió conocimiento técnico relevante, incluyendo la caracterización instrumental, la calibración fotométrica, la resolución astrométrica de las imágenes y la comparación con efemérides precisas. Las detecciones, identificaciones y mediciones de asteroides conocidos se realizaron de forma consistente, y los residuos obtenidos evidencian una alta precisión sin tendencias sistemáticas significativas.

Trabajo a futuro

Como parte del trabajo futuro, se proponen tres líneas de desarrollo. Primero, se sugiere ampliar la muestra de objetos e incorporar cuerpos de naturaleza cometaria, con el fin de estudiar cómo la presencia de atmósfera y coma puede influir en la precisión de la medición astrométrica. En segundo lugar, aunque algunos errores observados pueden atribuirse a condiciones atmosféricas desfavorables y a limitaciones del sistema de seguimiento, se considera fundamental estimar una función de distribución del error atribuible específicamente a este último. Cabe mencionar que, en los casos donde el error superó el $1''$, se encontró el registro de la presencia de nubes durante la exposición, lo que podría explicar de manera razonable dichas desviaciones. Por último, se propone automatizar el proceso de reducción y análisis de imágenes, lo cual permitirá reducir los tiempos de procesamiento y minimizar posibles errores humanos durante el flujo de trabajo.

Más allá de confirmar la funcionalidad del equipo y el software utilizado, este trabajo establece una base metodológica sólida para futuras campañas astrométricas con la Cámara Schmidt de Tonantzintla y refuerza el papel del [INAOE](#) en la colaboración científica internacional para el seguimiento y caracterización de cuerpos menores y especialmente de [NEOs](#), con aplicaciones tanto académicas como operativas.

Finalmente, este proyecto abre la posibilidad de participar en programas de descubrimiento, seguimiento y recuperación de [NEOs](#) y [PHAs](#), representa también una contribución al desarrollo de capacidades formativas en astronomía observacional dentro del Instituto, y evidencia el potencial aún vigente de la Cámara Schmidt para contribuir significativamente a la astronomía contemporánea.

Apéndice A

Requisitos del MPC

Los siguientes puntos forman parte de las condiciones que el [MPC](#) establece para la obtención del código de observatorio:

1. Reportar mediciones de, al menos, seis cuerpos menores previamente registrados; uno de ellos debe ser un [NEA](#).
2. No incluir entre los cuerpos seleccionados a cometas, satélites naturales, ni objetos que aún no tengan numeración designada.
3. Cada objeto observado debe ser más débil que uno de magnitud 14.
4. La astrometría de cada objeto de ser adquirida en dos noches distintas, preferentemente con menos de una semana entre las observaciones; no obstante, si el clima lo impide, también serán válidas aquellas que tengan varios días más de separación.
5. No reportar mediciones únicas; todos los objetos deben contar con entre tres y cinco mediciones por noche¹.
6. Al menos una medición por cada objeto debe contar con su respectiva magnitud aparente.
7. Las mediciones deben presentar una precisión constante menor a 1".
8. Se recomienda el uso de los catálogos Gaia DR2 y DR3, aunque también son aceptados mediciones hechas con base en los catálogos UCAC4 y UCAC5.

Una lista detallada con todas las demás condiciones e indicaciones se encuentra en Minor Planet Center ([2025b](#)).

¹Se puede suponer que el requisito de obtener al menos tres mediciones por noche y por objeto se debe a que son necesarias, como mínimo, tres posiciones angulares de un objeto para determinar su órbita según sus elementos orbitales (Gronchi, [2004](#)).

Apéndice B

Bitácora de observaciones

Fecha (UTC)	Objeto	<i>AR</i> (Calculada)	<i>DEC</i> (Calculada)	Magnitud (Calculada)	Tiempo de exposición (s)
24-04-27 04:40	490	11 09 06.1	+05 37 30.3	14.31	30
24-04-27 04:48	490	11 09 06.1	+05 37 30.3	14.31	60
24-04-27 04:53	2063	13 55 40.9	-13 25 29.3	14.26	60
24-04-27 04:59	2063	13 55 40.9	-13 25 29.3	14.26	60
24-04-27 05:03	2063	13 55 40.9	-13 25 29.3	14.26	30
24-04-27 05:05	2063	13 55 40.9	-13 25 29.3	14.26	30
24-04-27 05:07	2063	13 55 40.9	-13 25 29.3	14.26	30
24-04-27 05:09	2063	13 55 40.9	-13 25 29.3	14.26	30
24-04-27 05:19	25330	14 23 59.5	+08 58 12.2	14.99	60
24-04-27 05:24	25330	14 23 59.5	+08 58 12.2	14.99	30
24-04-27 05:26	25330	14 23 59.5	+08 58 12.2	14.99	30
24-04-27 05:31	359	12 23 19.5	-04 20 36.7	14.16	30
24-04-27 05:34	477	12 46 28.0	-06 39 18.1	14.13	30
24-04-27 05:37	477	12 46 28.0	-06 39 18.1	14.13	60
24-04-27 05:41	286	11 20 55.9	+16 50 02.2	14.47	60
24-04-27 05:46	226	11 38 18.9	+20 32 28.1	14.45	60
24-04-27 05:49	226	11 38 18.9	+20 32 28.1	14.45	60
24-04-27 05:51	226	11 38 18.9	+20 32 28.1	14.45	60
24-04-27 05:54	770	12 25 38.7	+00 46 47.4	14.48	60
24-04-27 05:56	770	12 25 38.7	+00 46 47.4	14.48	60
24-04-27 06:03	770	12 25 38.7	+00 46 47.4	14.48	60
24-04-27 06:05	770	12 25 38.7	+00 46 47.4	14.48	60
24-04-27 06:10	2830	14 11 30.6	+03 52 25.6	14.46	60
24-04-27 06:13	2830	14 11 30.6	+03 52 25.6	14.46	60
24-04-27 06:16	2830	14 11 30.6	+03 52 25.6	14.46	60
24-04-27 06:19	2830	14 11 30.6	+03 52 25.6	14.46	30
24-04-27 06:23	2830	14 11 30.6	+03 52 25.6	14.46	60
24-04-27 06:35	2830	14 11 30.6	+03 52 25.6	14.46	60
24-04-27 06:39	2830	14 11 30.6	+03 52 25.6	14.46	60
24-04-27 06:42	2830	14 11 30.6	+03 52 25.6	14.46	60

Tabla B.1: Registro de observaciones astronómicas (primera parte, continua en la siguiente página). Se listan fecha, objeto, coordenadas *AR/DEC* (HH MM SS.s y $\pm$ DD MM SS.s, respectivamente) y magnitud calculadas, y tiempo de exposición en segundos.

Fecha (UTC)	Objeto	<i>AR</i> (Calculada)	<i>DEC</i> (Calculada)	Magnitud (Calculada)	Tiempo de exposición (s)
24-04-27 06:44	2830	14 11 30.6	+03 52 25.6	14.46	60
24-04-27 06:49	625	13 39 28.5	+08 50 58.5	14.25	60
24-04-27 06:53	891	13 27 31.2	+12 19 54.8	14.46	60
24-04-27 06:59	2063	13 55 40.9	-13 25 29.3	14.26	60
24-04-27 07:01	2063	13 55 40.9	-13 25 29.3	14.26	60
24-04-27 07:05	2063	13 55 40.9	-13 25 29.3	14.26	30
24-04-27 07:07	2063	13 55 40.9	-13 25 29.3	14.26	30
24-04-27 07:12	490	11 09 06.1	+05 37 30.3	14.31	60
24-04-27 07:22	490	11 09 06.1	+05 37 30.3	14.31	60
24-04-27 07:24	490	11 09 06.1	+05 37 30.3	14.31	60
24-04-27 07:28	2063	13 55 40.9	-13 25 29.3	14.26	60
24-04-27 07:30	2063	13 55 40.9	-13 25 29.3	14.26	30
24-04-27 07:33	2063	13 55 40.9	-13 25 29.3	14.26	30
24-04-27 07:35	2063	13 55 40.9	-13 25 29.3	14.26	30
24-04-27 07:37	2063	13 55 40.9	-13 25 29.3	14.26	40
24-04-27 07:41	359	12 23 19.5	-04 20 36.7	14.16	30
24-04-27 07:43	359	12 23 19.5	-04 20 36.7	14.16	40
24-04-27 07:55	359	12 23 19.5	-04 20 36.7	14.16	40
24-04-27 07:58	2063	13 55 40.9	-13 25 29.3	14.26	40
24-04-27 08:01	2063	13 55 40.9	-13 25 29.3	14.26	40
24-04-27 08:03	2063	13 55 40.9	-13 25 29.3	14.26	40
24-04-27 08:07	477	12 46 28.0	-06 39 18.1	14.13	30
24-04-27 08:08	477	12 46 28.0	-06 39 18.1	14.13	40
24-04-27 08:10	477	12 46 28.0	-06 39 18.1	14.13	40
24-04-27 08:13	477	12 46 28.0	-06 39 18.1	14.13	40
24-04-27 08:20	477	12 46 28.0	-06 39 18.1	14.13	40
24-04-27 08:17	770	12 25 38.7	+00 46 47.4	14.48	60
24-04-27 08:25	226	11 38 18.9	+20 32 28.1	14.45	40
24-04-27 08:27	226	11 38 18.9	+20 32 28.1	14.45	60
24-04-27 08:33	2830	14 11 30.6	+03 52 25.6	14.46	60
24-04-27 08:36	2830	14 11 30.6	+03 52 25.6	14.46	60
24-04-27 08:40	2830	14 11 30.6	+03 52 25.6	14.46	60
24-04-27 08:46	625	13 39 28.5	+08 50 58.5	14.25	60
24-04-27 08:49	891	13 27 31.2	+12 19 54.8	14.46	60
24-04-27 08:52	2830	14 11 30.6	+03 52 25.6	14.46	60
24-04-27 08:55	2830	14 11 30.6	+03 52 25.6	14.46	60
24-04-27 08:58	2830	14 11 30.6	+03 52 25.6	14.46	30
24-04-27 08:59	2830	14 11 30.6	+03 52 25.6	14.46	30
24-04-27 09:01	2830	14 11 30.6	+03 52 25.6	14.46	40
24-04-27 09:04	625	13 39 28.5	+08 50 58.5	14.25	40
24-04-27 09:07	891	13 27 31.2	+12 19 54.8	14.46	40
24-04-28 03:03	490	11 08 55.9	+05 40 30.3	14.32	30
24-04-28 03:05	490	11 08 55.9	+05 40 30.3	14.32	60
24-04-28 03:09	286	11 20 45.0	+16 51 38.3	14.49	30
24-04-28 03:11	286	11 20 45.0	+16 51 38.3	14.49	60

Tabla B.2: Registro de observaciones astronómicas (segunda parte, continua en la siguiente página). Se listan fecha, objeto, coordenadas *AR/DEC* (HH MM SS.s y $\pm$ DD MM SS.s, respectivamente) y magnitud calculadas, y tiempo de exposición en segundos.

Bitácora de observaciones

Fecha (UTC)	Objeto	<i>AR</i> (Calculada)	<i>DEC</i> (Calculada)	Magnitud (Calculada)	Tiempo de exposición (s)
24-04-28 03:15	286	11 20 45.0	+16 51 38.3	14.49	60
24-04-28 03:17	286	11 20 45.0	+16 51 38.3	14.49	80
24-04-28 03:21	490	11 08 55.9	+05 40 30.3	14.32	60
24-04-28 03:26	490	11 08 55.9	+05 40 30.3	14.32	80
24-04-28 03:28	490	11 08 55.9	+05 40 30.3	14.32	80
24-04-28 03:40	286	11 20 45.0	+16 51 38.3	14.49	80
24-04-28 03:53	2063	13 51 16.7	-13 43 33.1	14.42	30
24-04-28 03:56	2063	13 51 16.7	-13 43 33.1	14.42	30
24-04-28 03:58	2063	13 51 16.7	-13 43 33.1	14.42	30
24-04-28 03:59	2063	13 51 16.7	-13 43 33.1	14.42	40
24-04-28 04:04	490	11 08 55.9	+05 40 30.3	14.32	80
24-04-28 04:06	490	11 08 55.9	+05 40 30.3	14.32	80
24-04-28 04:08	490	11 08 55.9	+05 40 30.3	14.32	80
24-04-28 04:10	490	11 08 55.9	+05 40 30.3	14.32	80
24-04-28 04:14	286	11 20 45.0	+16 51 38.3	14.49	60
24-04-28 04:21	286	11 20 45.0	+16 51 38.3	14.49	60
24-04-28 05:54	2063	13 51 16.7	-13 43 33.1	14.42	30
24-04-28 05:56	2063	13 51 16.7	-13 43 33.1	14.42	30
24-04-28 05:59	2063	13 51 16.7	-13 43 33.1	14.42	30
24-04-28 06:01	2063	13 51 16.7	-13 43 33.1	14.42	30
24-04-28 06:03	2063	13 51 16.7	-13 43 33.1	14.42	30
24-04-28 06:05	2063	13 51 16.7	-13 43 33.1	14.42	40
24-04-28 06:22	2063	13 51 16.7	-13 43 33.1	14.42	30
24-04-28 06:23	2063	13 51 16.7	-13 43 33.1	14.42	60
24-04-28 06:28	359	12 22 40.0	-04 17 53.9	14.18	60
24-04-28 06:32	2063	13 51 16.7	-13 43 33.1	14.42	60
24-04-28 06:34	2063	13 51 16.7	-13 43 33.1	14.42	60
24-04-28 06:36	2063	13 51 16.7	-13 43 33.1	14.42	60
24-04-28 06:40	359	12 22 40.0	-04 17 53.9	14.18	60
24-04-28 06:45	477	12 45 37.5	-06 35 41.8	14.15	60
24-04-28 06:47	477	12 45 37.5	-06 35 41.8	14.15	80
24-04-28 06:50	359	12 22 40.0	-04 17 53.9	14.18	60
24-04-28 07:14	477	12 45 37.5	-06 35 41.8	14.15	60
24-04-28 07:00	2830	14 09 56.4	+03 37 44.2	14.46	60
24-04-28 07:02	2830	14 09 56.4	+03 37 44.2	14.46	30
24-04-28 07:04	2830	14 09 56.4	+03 37 44.2	14.46	30
24-04-28 07:11	2830	14 09 56.4	+03 37 44.2	14.46	30
24-04-28 07:27	477	12 45 37.5	-06 35 41.8	14.15	60
24-04-28 07:36	2830	14 09 56.4	+03 37 44.2	14.46	80
24-04-28 07:42	2830	14 09 56.4	+03 37 44.2	14.46	80
24-04-28 07:59	2830	14 09 56.4	+03 37 44.2	14.46	80
24-04-28 08:10	2830	14 09 56.4	+03 37 44.2	14.46	80
24-04-28 08:14	891	13 26 45.8	+12 21 19.9	14.47	60
24-04-28 08:17	625	13 38 38.5	+08 55 12.4	14.26	60
24-04-28 08:20	625	13 38 38.5	+08 55 12.4	14.26	60

Tabla B.3: Registro de observaciones astronómicas (tercera parte, continua en la siguiente página). Se listan fecha, objeto, coordenadas *AR/DEC* (HH MM SS.s y $\pm$ DD MM SS.s, respectivamente) y magnitud calculadas, y tiempo de exposición en segundos.

Fecha (UTC)	Objeto	<i>AR</i> (Calculada)	<i>DEC</i> (Calculada)	Magnitud (Calculada)	Tiempo de exposición (s)
24-04-28 08:33	891	13 26 45.8	+12 21 19.9	14.47	60
24-04-28 08:35	625	13 38 38.5	+08 55 12.4	14.26	60
24-04-28 08:37	625	13 38 38.5	+08 55 12.4	14.26	60
24-04-28 08:47	891	13 26 45.8	+12 21 19.9	14.47	60
24-04-28 08:53	625	13 38 38.5	+08 55 12.4	14.26	60
24-04-28 09:15	625	13 38 38.5	+08 55 12.4	14.26	60
24-04-29 02:39	490	11 08 38.6	+05 46 06.6	14.36	60
24-04-29 02:41	490	11 08 38.6	+05 46 06.6	14.36	90
24-04-29 02:46	286	11 20 26.7	+16 54 18.9	14.52	90
24-04-29 02:52	286	11 20 26.7	+16 54 18.9	14.52	90
24-04-29 03:02	490	11 08 38.6	+05 46 06.6	14.36	90
24-04-29 03:07	286	11 20 26.7	+16 54 18.9	14.52	90
24-04-29 03:10	286	11 20 26.7	+16 54 18.9	14.52	90
24-04-29 03:14	490	11 08 38.6	+05 46 06.6	14.36	90
24-04-29 03:36	286	11 20 26.7	+16 54 18.9	14.52	90
24-04-29 03:46	359	12 21 24.1	-04 12 44.3	14.22	90
24-04-29 03:51	359	12 21 24.1	-04 12 44.3	14.22	90
24-04-29 03:57	477	12 43 59.6	-06 28 43.9	14.19	90
24-04-29 04:04	359	12 21 24.1	-04 12 44.3	14.22	90
24-04-29 04:09	359	12 21 24.1	-04 12 44.3	14.22	90
24-04-29 04:15	477	12 43 59.6	-06 28 43.9	14.19	90
24-04-29 04:21	359	12 21 24.1	-04 12 44.3	14.22	90
24-04-29 04:29	477	12 43 59.6	-06 28 43.9	14.19	90
24-04-29 04:47	2063	13 43 10.7	-14 16 02.2	14.71	90
24-04-29 04:51	2063	13 43 10.7	-14 16 02.2	14.71	90
24-04-29 04:55	2063	13 43 10.7	-14 16 02.2	14.71	90
24-04-29 05:02	625	13 36 59.6	+09 03 03.5	14.28	90
24-04-29 05:05	625	13 36 59.6	+09 03 03.5	14.28	90
24-04-29 05:12	625	13 36 59.6	+09 03 03.5	14.28	90
24-04-29 05:52	2063	13 43 10.7	-14 16 02.2	14.71	90
24-04-29 05:57	625	13 36 59.6	+09 03 03.5	14.28	90
24-04-29 06:09	2063	13 43 10.7	-14 16 02.2	14.71	90
24-04-29 06:12	2063	13 43 10.7	-14 16 02.2	14.71	90
24-04-29 06:20	625	13 36 59.6	+09 03 03.5	14.28	90
24-04-29 06:26	891	13 25 16.8	+12 23 30.6	14.5	90
24-04-29 06:29	891	13 25 16.8	+12 23 30.6	14.5	60
24-04-29 06:33	2830	14 06 49.0	+03 07 36.9	14.48	90
24-04-29 06:37	2830	14 06 49.0	+03 07 36.9	14.48	90
24-04-29 06:40	2830	14 06 49.0	+03 07 36.9	14.48	90
24-04-29 06:42	2830	14 06 49.0	+03 07 36.9	14.48	90
24-04-29 06:48	891	13 25 16.8	+12 23 30.6	14.5	90
24-04-29 06:59	2830	14 06 49.0	+03 07 36.9	14.48	90
24-04-29 07:03	891	13 25 16.8	+12 23 30.6	14.5	90
24-04-29 07:14	2830	14 06 49.0	+03 07 36.9	14.48	90
24-04-29 07:16	2830	14 06 49.0	+03 07 36.9	14.48	90

Tabla B.4: Registro de observaciones astronómicas (última parte). Se listan fecha, objeto, coordenadas *AR/DEC* (HH MM SS.s y $\pm$ DD MM SS.s, respectivamente) y magnitud calculadas, y tiempo de exposición en segundos.

Apéndice C

Observaciones obtenidas

A continuación se presentan imágenes representativas de cada objeto, con un campo de visión de 18×18 minutos de arco. En todas ellas, el objeto ha sido marcado con un recuadro rojo. En la esquina inferior izquierda se incluye información técnica sobre la CST; en el centro inferior, la orientación de la imagen; y en la esquina inferior derecha, una ampliación del objeto que permite apreciar su perfil de brillo.

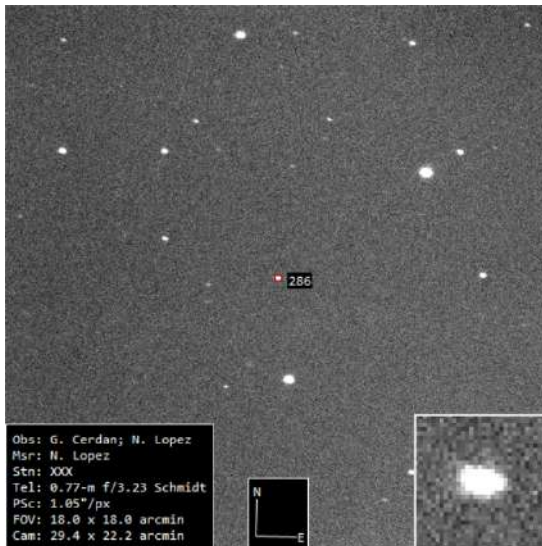


Figura C.1: Asteroide 286 Iclea (A889 PB).

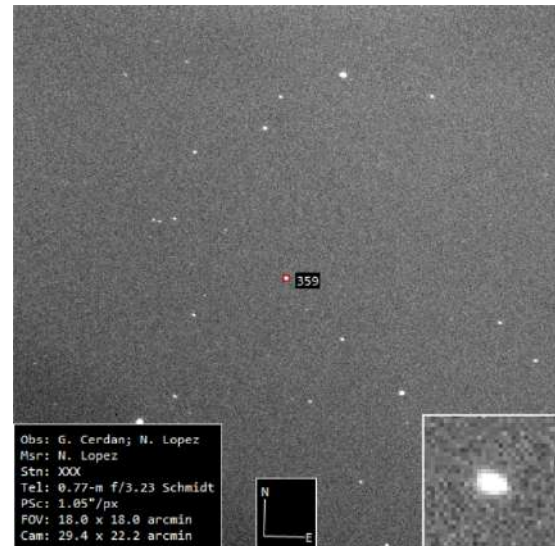


Figura C.2: Asteroide 359 Georgia (A893 ED).



Figura C.3: Asteroide 477 Italia (A901 QC).

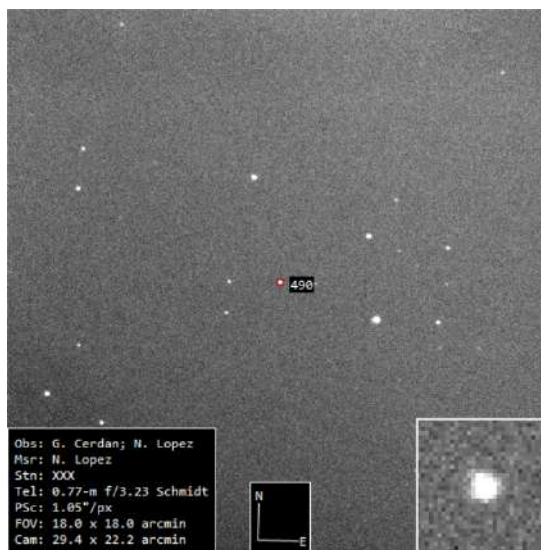


Figura C.4: Asteroide 490 Veritas (A902 RE).

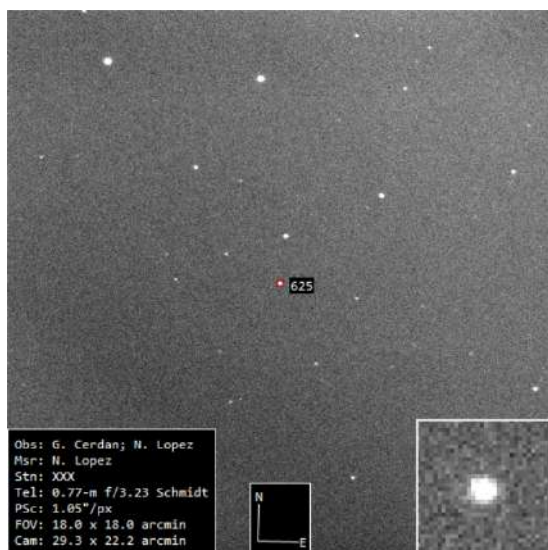


Figura C.5: Asteroide 625 Xenia (A907 CG).

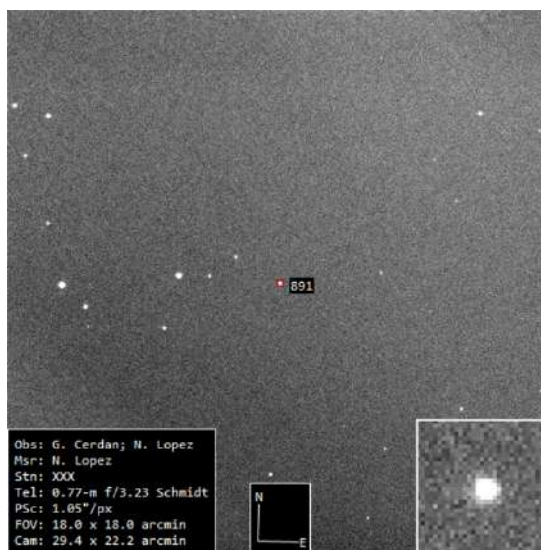


Figura C.6: Asteroide 891 Gunhild (A918 KB).

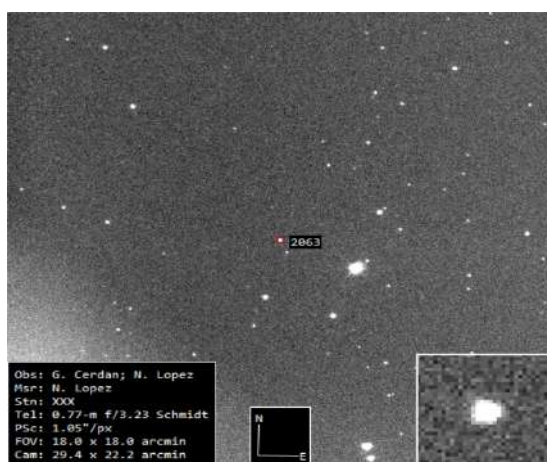


Figura C.7: Asteroide 2063 Bacchus (1977 HB).

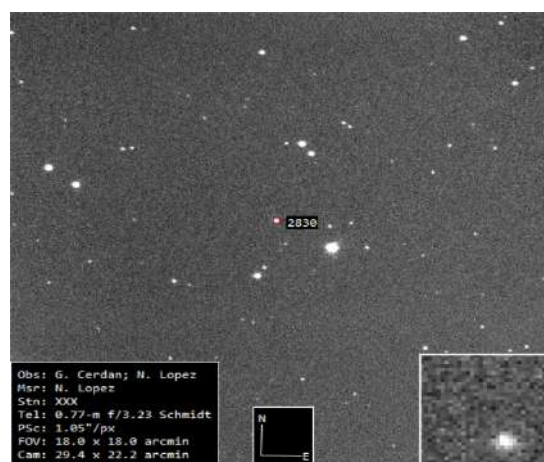


Figura C.8: Asteroide 2830 Greenwich (1980 GA).

Apéndice D

Códigos en Python

D.1. Modificación del *header*

```
1 from pathlib import Path
2 from astropy.io import fits
3 from astropy.io.fits.verify import VerifyWarning
4 import ccdproc as ccdp
5 import warnings
6 import logging
7
8 warnings.simplefilter('ignore', category=VerifyWarning)
9 logging.getLogger('astropy').setLevel(logging.ERROR)
10
11 science_imagetype = 'light'
12 bias_imagetype = 'bias'
13 dark_imagetype = 'dark'
14 flat_imagetype = 'flat'
15 exposure = 'exptime'
16 image_unit = 'adu'
17
18 observation_folder = './25042024'
19 calib_folder_name = '/calibration'
20 raw_folder_name = '/raw'
21
22 calib_path = Path(observation_folder + calib_folder_name)
23 calib_collection = ccdp.ImageFileCollection(calib_path)
24
25 raw_path = Path(observation_folder + raw_folder_name)
26 raw_collection = ccdp.ImageFileCollection(raw_path)
27
28 for file_name in calib_collection.files:
29     file_path = calib_path / file_name
30
31     with fits.open(file_path, mode='update') as hdul:
32         header = hdul[0].header
33         header['BUNIT'] = 'adu'
34
35         if 'EXPOSURE' in header and 'EXPTIME' not in header:
36             header['EXPTIME'] = header['EXPOSURE']
37             del header['EXPOSURE']
38
39         if 'bias' in file_name.lower():
40             header['IMAGETYP'] = bias_imagetype
41         elif 'dark' in file_name.lower():
42             header['IMAGETYP'] = dark_imagetype
43         elif 'flat' in file_name.lower():
44             header['IMAGETYP'] = flat_imagetype
45
46         hdul.flush()
47
48 for file_name in raw_collection.files:
49     file_path = raw_path / file_name
50
51     with fits.open(file_path, mode='update') as hdul:
```

```
52 header = hdul[0].header
53 header['IMAGETYP'] = 'light'
54 header['BUNIT'] = 'adu'
55
56 if 'EXPOSURE' in header and 'EXPTIME' not in header:
57     header['EXPTIME'] = header['EXPOSURE']
58     del header['EXPOSURE']
59
60 hdul.flush()
```

Listing D.1: Código para la modificación del header de las imágenes astronómicas

D.2. Creación del *bias* maestro

```
1 from pathlib import Path
2 from astropy.stats import mad_std
3 from astropy.io.fits.verify import VerifyWarning
4 import astropy.units as u
5 import ccdproc as ccdp
6 import numpy as np
7 import warnings
8 import logging
9
10 warnings.simplefilter('ignore', category=VerifyWarning)
11 logging.getLogger('astropy').setLevel(logging.ERROR)
12
13 observation_folder = './25042024'
14 calib_folder_name = '/calibration'
15
16 calib_path = Path(observation_folder + calib_folder_name)
17 calib_collection = ccdp.ImageFileCollection(calib_path)
18
19 bias_imagetype = 'bias'
20
21 bias_paths = calib_collection.files_filtered(imagetype=bias_imagetype, include_path=True)
22 for bias in bias_paths:
23     if 'master' in bias:
24         bias_paths.remove(bias)
25
26 master_bias = ccdp.combine(bias_paths,
27                             method='median',
28                             sigma_clip=True,
29                             sigma_clip_low_thresh=3,
30                             sigma_clip_high_thresh=3,
31                             sigma_clip_func=np.ma.median,
32                             sigma_clip_dev_func=mad_std,
33                             unit=u.adu
34                             )
35 master_bias.meta['combined'] = True
36 master_bias.write(calib_path / 'master_bias.FIT', overwrite=True)
```

Listing D.2: Código para la combinación de los *bias* individuales

D.3. Creación del (de los) *dark*(s) maestro(s)

```
1 from pathlib import Path
2 from astropy.stats import mad_std
3 from astropy.io.fits.verify import VerifyWarning
4 import ccdproc as ccdp
5 import numpy as np
6 import warnings
7 import logging
8
9 warnings.simplefilter('ignore', category=VerifyWarning)
10 logging.getLogger('astropy').setLevel(logging.ERROR)
11
12 observation_folder = './25042024'
13 calib_folder_name = '/calibration'
14
```

```
15 calib_path = Path(observation_folder + calib_folder_name)
16 calib_collection = ccdp.ImageFileCollection(calib_path)
17
18 dark_imagetype = 'dark'
19 exposure = 'exptime'
20
21 dark_times = set(h[exposure] for h in calib_collection.headers(imagetype=dark_imagetype))
22
23 dark_by_exposure = {exp_time: calib_collection.files_filtered(imagetype=dark_imagetype,
24                                                                exptime=exp_time, include_path=True) for exp_time in dark_times}
25 for exp_time in dark_times:
26     for dark in dark_by_exposure[exp_time]:
27         if 'master' in dark:
28             dark_by_exposure[exp_time].remove(dark)
29
30 for exp_time in sorted(dark_times):
31     master_dark = ccdp.combine(dark_by_exposure[exp_time],
32                               method='median',
33                               sigma_clip=True, sigma_clip_low_thresh=3,
34                               sigma_clip_high_thresh=3,
35                               sigma_clip_func=np.ma.median,
36                               sigma_clip_dev_func=mad_std,
37                               )
38     master_dark.meta['combined'] = True
39     master_dark_name = 'master_dark_{:2.0f}.FIT'.format(exp_time)
40     master_dark.write(calib_path / master_dark_name)
```

Listing D.3: Código para la combinación de los *darks* individuales según su tiempo de exposición

D.4. Creación del (de los) *flat*(s) maestro(s)

```
1 from pathlib import Path
2 from astropy.stats import mad_std
3 from astropy.nddata import CCDData
4 from astropy.io.fits.verify import VerifyWarning
5 import ccdproc as ccdp
6 import numpy as np
7 import warnings
8 import logging
9
10 warnings.simplefilter('ignore', category=VerifyWarning)
11 logging.getLogger('astropy').setLevel(logging.ERROR)
12
13 def inv_median(a):
14     return 1 / np.median(a)
15
16 observation_folder = './25042024'
17 calib_folder_name = '/calibration'
18
19 calib_directory = observation_folder + calib_folder_name
20 calib_path = Path(calib_directory)
21 calib_collection = ccdp.ImageFileCollection(calib_path)
22
23 bias_imagetype = 'bias'
24 flat_imagetype = 'flat'
25
26 flat_filters = set(h['filter'] for h in calib_collection.headers(imagetype=flat_imagetype))
27
28 flat_paths = calib_collection.files_filtered(imagetype=flat_imagetype, include_path=True)
29
30 flat_by_filter = {filt: calib_collection.files_filtered(imagetype=flat_imagetype,
31                                                         filter=filt, include_path=True) for filt in flat_filters}
32 for filt in flat_filters:
33     for flat in flat_by_filter[filt]:
34         if 'master' in flat:
35             flat_paths.remove(flat)
36             flat_by_filter[filt].remove(flat)
37
38 master_bias_name = calib_collection.files_filtered(imagetype=bias_imagetype, combined=True)[0]
39 master_bias = CCDData.read(calib_directory + '/' + master_bias_name)
40
41 for uncalib_flat in flat_paths:
42     calib_flat = CCDData.read(uncalib_flat)
```

```
43     calib_flat = ccdp.subtract_bias(calib_flat, master_bias)
44     calib_flat_path = Path(calib_directory + '/calibrated_' + Path(uncalib_flat).name)
45     calib_flat.write(calib_flat_path, overwrite=True)
46
47 calib_collection = ccdp.ImageFileCollection(calib_path)
48
49 for filt in flat_filters:
50     calib_flat_paths = []
51     for flat in calib_collection.files_filtered(imagetype=flat_imagetype, filter=filt,
52                                                include_path=True):
53         if 'calibrated' in flat:
54             calib_flat_paths.append(flat)
55
56     combined_flat = ccdp.combine(calib_flat_paths,
57                                method='median', scale=inv_median,
58                                sigma_clip=True,
59                                sigma_clip_low_thresh=3,
60                                sigma_clip_high_thresh=3,
61                                sigma_clip_func=np.ma.median,
62                                sigma_clip_dev_func=mad_std,
63                                )
64     combined_flat.meta['combined'] = True
65     master_flat_name = 'master_flat_{}.FIT'.format(filt.lower().replace("'", "p"))
66     combined_flat.write(calib_path / master_flat_name, overwrite=True)
```

Listing D.4: Código para la normalización y combinación de los *flats* individuales según su filtro

D.5. Corrección de imágenes crudas

La función `find_nearest_dark_exposure`, que se puede ver en el código, fue tomada de Craig y Chambers (2023).

```
1  from pathlib import Path
2  from astropy.nddata import CCDData
3  from astropy.io.fits.verify import VerifyWarning
4  import astropy.units as u
5  import ccdproc as ccdp
6  import numpy as np
7  import warnings
8  import logging
9
10 warnings.simplefilter('ignore', category=VerifyWarning)
11 logging.getLogger('astropy').setLevel(logging.ERROR)
12
13 def find_nearest_dark_exposure(image, dark_exposure_times, tolerance=0.5):
14     dark_exposures = np.array(list(dark_exposure_times))
15     idx = np.argmin(np.abs(dark_exposures - image.header['exptime']))
16     closest_dark_exposure = dark_exposures[idx]
17
18     if (tolerance is not None and
19         np.abs(image.header['exptime'] - closest_dark_exposure) > tolerance):
20
21         raise RuntimeError('Closest dark exposure time is {} for flat of exposure '
22                            'time {}'.format(closest_dark_exposure, image.header['exptime']))
23
24
25     return closest_dark_exposure
26
27 observation_folder = './25042024'
28 calib_folder_name = '/calibration'
29 raw_folder_name = '/raw'
30 reduced_folder_name = '/reduced'
31
32 calib_directory = observation_folder + calib_folder_name
33 calib_path = Path(calib_directory)
34 calib_collection = ccdp.ImageFileCollection(calib_path)
35
36 raw_directory = observation_folder + raw_folder_name
37 raw_path = Path(raw_directory)
38 raw_collection = ccdp.ImageFileCollection(raw_path)
39
40 reduced_directory = observation_folder + reduced_folder_name
```

```

41 reduced_path = Path(reduced_directory)
42
43 science_imagetyp = 'light'
44 bias_imagetyp = 'bias'
45 dark_imagetyp = 'dark'
46 flat_imagetyp = 'flat'
47 exposure = 'exptime'
48
49 master_bias_name = calib_collection.files_filtered(imagetyp=bias_imagetyp, combined=True)[0]
50 master_bias = CCDDData.read(calib_directory + '/' + master_bias_name)
51
52 dark_times = set(h[exposure] for h in calib_collection.headers(imagetyp=dark_imagetyp))
53
54 master_dark_by_exposure = {exp_time: calib_collection.files_filtered(imagetyp=dark_imagetyp,
55                               exptime=exp_time, combined=True, include_path=True) for exp_time in dark_times}
56
57 flat_filters = set(h['filter'] for h in calib_collection.headers(imagetyp=flat_imagetyp))
58
59 master_flat_by_filter = {filt: calib_collection.files_filtered(imagetyp=flat_imagetyp,
60                               filter=filt, combined=True, include_path=True) for filt in flat_filters}
61
62 light_paths = raw_collection.files_filtered(imagetyp=science_imagetyp, include_path=True)
63
64 for light in light_paths:
65     reduced = CCDDData.read(light)
66     closest_dark = find_nearest_dark_exposure(reduced, master_dark_by_exposure.keys())
67     reduced = ccdp.subtract_dark(reduced,
68                                 CCDDData.read(master_dark_by_exposure[closest_dark][0]),
69                                 exposure_time=exposure, exposure_unit=u.second
70                                 )
71     good_flat = CCDDData.read(master_flat_by_filter[reduced.header['filter']][0])
72     reduced = ccdp.flat_correct(reduced, good_flat)
73     reduced_dir = reduced_path / Path(light).name
74     reduced.write(reduced_dir, overwrite=True)

```

Listing D.5: Código para la corrección de imágenes astronómicas por *bias*, *dark* y *flat*.

D.6. Evaluación de astrometría bajo las efemérides del JPL

```

1 from astropy.time import Time
2 from astropy.coordinates import Angle
3 import astropy.units as u
4
5 number = '286'
6 file_obs = f'./{number}/{number}_obs.txt'
7 file_eph = f'./{number}/{number}_eph.txt'
8
9 with open(file_obs, 'r') as file_obs:
10     lines_obs = file_obs.readlines()
11 with open(file_eph, 'r') as file_eph:
12     lines_eph = file_eph.readlines()
13
14 print(f'Residuales de {number}')
15 residual_by_date = dict()
16 for obs, eph in zip(lines_obs, lines_eph):
17     date = Time(obs[:17], format='jd', scale='utc').iso
18
19     ra_obs = Angle(obs[19:30], unit=u.hourangle).degree
20     dec_obs = Angle(obs[31:].strip(), unit=u.deg).degree
21
22     ra_eph = Angle(eph[19:30], unit=u.hourangle).degree
23     dec_eph = Angle(eph[31:].strip(), unit=u.deg).degree
24
25     residual_ra = abs(ra_obs - ra_eph) * 3600
26     residual_dec = abs(dec_obs - dec_eph) * 3600
27     residual_total = (residual_ra**2 + residual_dec**2)**0.5
28
29     residual_by_date[date] = [residual_ra, residual_dec]
30     print(f'Date {date} -> residualRA: {residual_ra:.3f} |\
31 residualDEC: {residual_dec:.3f} | Total error: {residual_total:.3f}')

```

Listing D.6: Código para la evaluación de calidad de la astrometría obtenida con la Cámara Schmidt de Tonantzintla.

Glosario

Aberración esférica. Defecto óptico que ocurre cuando los rayos de luz que inciden en una lente o espejo esférico a diferentes distancias del eje óptico se enfocan en planos distintos, lo que impide la formación de un único punto focal nítido. [21](#), [22](#), [23](#)

Aberración cromática. Efecto óptico que se produce cuando una lente refracta la luz de manera distinta según su longitud de onda, generando franjas de colores en los contornos de los objetos observados. [21](#), [22](#), [23](#)

Año luz. Unidad de longitud que equivale a la distancia que recorre la luz en el vacío durante un año, aproximadamente 9.42×10^{12} km. [5](#)

Astigmatismo. Aberración óptica que ocurre cuando un sistema no enfoca por igual los rayos de luz en diferentes planos, produciendo imágenes alargadas o desenfocadas en ciertas direcciones.. [21](#)

Blooming. Efecto que ocurre cuando un pixel de un [CCD](#) almacena más electrones de los que puede. El exceso de carga se desborda hacia sus pixeles vecinos, lo que merma su efecto lineal y genera una saturación local. [31](#)

Coma. Aberración óptica presente en espejos y lentes, que afecta a los objetos situados fuera del eje óptico, generando imágenes alargadas y asimétricas que recuerdan a la cola de un cometa. [21](#), [22](#)

Diferenciación (planetaria). Proceso en el que un cuerpo se separa en capas de diferente composición y densidad debido al calor interno y la gravedad. [4](#), [5](#)

Efeméride. Tabla con los valores de las posiciones astronómicas y de los elementos orbitales conocidos de una lista de cuerpos celestes para un conjunto de fechas plural. [34](#), [35](#)

Eficiencia cuántica. Razón entre el número de fotones registrados por el detector y el total de fotones incidentes. [30](#), [31](#), [42](#)

Espectro. Distribución de todas las ondas electromagnéticas. [12](#)

Ganancia. Factor de conversión entre el número de electrones que inciden sobre un pixel de un [CCD](#) y las cuentas o [ADU](#). [31](#), [37](#), [42](#)

Gran círculo. Intersección entre una esfera y un plano que pasa por su centro. [25](#)

Lente asférica. Lente diseñada con una forma similar a la de una esfera, aunque no es completamente esférica. [23](#)

Meteoroides esporádicos. Meteoroides que no pertenecen a un cúmulo de meteoroides. [13](#)

Minuto de arco. Medida angular con un valor de $\frac{1}{60}$ de un grado. [21](#), [80](#)

Oposición. Arreglo en la que están dos objetos cuando está en el lado opuesto de la Tierra con respecto al Sol. [11](#)

Parsec Unidad de longitud para la que 1 UA subtiende un ángulo de un [segundo de arco](#), aproximadamente 3.26 años luz. [11](#)

Perihelio. Punto en la órbita de un cuerpo que orbita al Sol en el que está más lejos de este. [28](#)

Periodo orbital. Tiempo que tarda un objeto en completar una órbita alrededor del Sol. [5](#)

Prógrado. Que rota en el mismo sentido en el que rota alrededor del Sol. [13](#)

Segundo de arco. Medida angular con un valor de $\frac{1}{60}$ del [minuto de arco](#) o $\frac{1}{3600}$ de un grado. [80](#)

Sistema binario. Sistema en el que dos cuerpos, que están unidos gravitacionalmente y orbitan el mismo centro de masa. [11](#)

Telescopio catadióptrico. Telescopio con un diseño basado en una combinación de espejos y lentes. [21](#)

Telescopio refractor. Telescopio con un diseño basado completamente en lentes. [21](#)

Unidad Astronómica. Unidad de medida y se refiere a la distancia promedio que hay entre la Tierra y el Sol, por definición 149,597,870,700 m. [6](#), [8](#), [11](#), [13](#), [15](#), [16](#)

Acrónimos

ADC Analogue Digital Converter. [31](#), [37](#)

ADES Astrometric Data Exchange Standard. [56](#)

ADU Analog-to-Digital Unit. [31](#), [37](#), [79](#)

CCD Charge-Coupled Device. [23](#), [30](#), [31](#), [32](#), [36](#), [38](#), [41](#), [42](#), [43](#), [45](#), [47](#), [48](#), [59](#), [79](#)

CNEOS Center for Near-Earth Object Studies. [16](#), [17](#)

CST Cámara Schmidt de Tonantzintla. [20](#), [21](#), [23](#), [24](#), [26](#), [29](#), [31](#), [32](#), [33](#), [36](#), [37](#), [38](#), [41](#), [43](#), [48](#), [49](#), [69](#)

IAU International Astronomical Union. [5](#), [31](#)

IAWN International Asteroid Warning Network. [3](#), [20](#)

INAOE Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica. [1](#), [4](#), [20](#), [22](#), [30](#), [31](#), [32](#), [59](#), [60](#)

JPL Jet Propulsion Laboratory. [53](#)

MASL Meters Above Sea Level. [37](#)

MBA Main-Belt Asteroid. [4](#), [8](#), [12](#), [13](#), [14](#), [15](#), [16](#), [18](#), [36](#), [59](#)

MOS Metal-Oxide Semiconductor. [30](#)

MPC Minor Planet Center. [9](#), [10](#), [15](#), [16](#), [31](#), [32](#), [33](#), [35](#), [47](#), [49](#), [52](#), [53](#), [56](#), [59](#), [61](#)

NASA National Aeronautics and Space Administration. [3](#)

NEA Near-Earth Asteroid. [3](#), [12](#), [15](#), [16](#), [25](#), [33](#), [36](#), [59](#), [61](#)

NEO Near-Earth Object. [4](#), [16](#), [17](#), [18](#), [20](#), [31](#), [32](#), [60](#)

OAN Observatorio Astronómico Nacional. [19](#), [20](#)

OANTON Observatorio Astrofísico Nacional de Tonantzintla. [19](#), [20](#), [48](#)

ONU Organización de las Naciones Unidas. [3](#)

PHA Potentially Hazardous Asteroid. [4](#), [16](#), [20](#), [60](#)

SMPAG Space Mission Planning Advisory Group. [3](#)

UTC Coordinated Universal Time. [37](#)

YORP Yarkovsky, O’Keefe, Radzievskii y Paddack. [13](#)

Bibliografía

- Agency, E. S. (2025). *Asteroids: The discovery of asteroids*. Consultado el 16 de junio de 2025, desde https://www.esa.int/About_Us/50_years_of_ESA/Asteroids_The_discovery_of_asteroids
- Alvarez, L. W., Alvarez, W., Asaro, F., & Michel, H. V. (1980). Extraterrestrial Cause for the Cretaceous-Tertiary Extinction. *Science*, 208(4448), 1095-1108. <https://doi.org/10.1126/science.208.4448.1095>
- Asphaug, E. (2009). Growth and Evolution of Asteroids. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 37, 413-448. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.36.031207.124214>
- Atkinson, H., Tickell, C., & Williams, D. (2000). *Report of the Task Force on potentially hazardous Near Earth Objects*. British National Space Centre, London.
- The Authoritative Dictionary of IEEE Standards Terms, Seventh Edition. (2000). *IEEE Std 100-2000*, 822.
- Berry, R., & Burnell, J. (2005). *The Handbook of Astronomical Image Processing*. Willmann-Bell, Inc.
- Binzel, R. P., Reddy, V., & Dunn, T. (2015). The Near-Earth Object Population: Connections to Comets, Main-Belt Asteroids, and Meteorites. En P. Michel, F. E. DeMeo & W. F. Bottke Jr. (Eds.), *Asteroids IV* (pp. 243-256). University of Arizona Press. https://doi.org/10.2458/azu_uapress_9780816532131-ch013
- Borovička, J., Spurný, P., & Brown, P. (2015). Small Near-Earth Asteroids as a Source of Meteorites. En P. Michel, F. E. DeMeo & W. F. Bottke Jr. (Eds.), *Asteroids IV* (pp. 257-280). University of Arizona Press. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1502.03307>
- Borovička, J., Spurný, P., Brown, P., Wiegert, P., Kalenda, P., Clark, D., & Shrbený, L. (2013). The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor. *Nature*, 503(7475), 235-237. <https://doi.org/10.1038/nature12671>
- Bottke, W. F., Marschall, R., Nesvorný, D., & Vokrouhlický, D. (2023). Origin and Evolution of Jupiter's Trojan Asteroids. *Space Science Reviews*, 219. <https://doi.org/10.1007/s11214-023-01031-4>
- Bottke, W. F. J., Rubincam, D. P., & Burns, J. A. (2000). Dynamical evolution of main belt meteoroids: Numerical simulations incorporating planetary perturbations and Yarkovsky thermal forces. *Icarus*, 145(2), 301-331. <https://doi.org/10.1006/icar.2000.6361>
- Bottke, W. F. J., Vokrouhlický, D., Rubincam, D. P., & Nesvorný, D. (2006). The Yarkovsky and YORP Effects: Implications for Asteroid Dynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 34, 157-191. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.34.031405.125154>
- Brant, S. (1992). De fulgetra anni 1492 Sebastianus Brant [Versión en español por Néstor López a partir de la traducción al inglés de I. D. Rowland] (I. D. Rowland, Trad.). En U. B. Marvin (Ed.), *The Meteorite of Ensisheim: 1492 to 1992* (pp. 28-31, Vol. 27). The Meteoritical Society. https://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-iarticle_query?1992Metic..27...28M&defaultprint=YES&filetype=.pdf
- Brown, D. (2024). We're getting better at seeing asteroids that may hit Earth. Consultado el 8 de junio de 2025, desde <https://earthsky.org/space/spotting-asteroids-before-collision-catastrophe/>

- 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., Garcés, 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, 238-241. <https://doi.org/10.1038/nature12741>
- Burbine, T. H. (2016). *Asteroids: Astronomical and Geological Bodies*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781316156582>
- Canavan, G. J., Solem, J. C., & Rather, J. D. G. (Eds.). (1993). *Proceedings of the Near-Earth-Object Interception Workshop*. NASA Technical Reports Server. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19930019383>
- Cardona N., O., Carramiñana A., A., Carrasco L., B. E., & Escamilla C., C. A. (2011). *Nuevo sistema de adquisición de imágenes astronómicas de la cámara Schmidt usando un CCD enfriado* (inf. téc.). Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). <http://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1009/911>
- Cepilecha, Z., Spalding, E. R., Jacobs, C., Revelle, D. O., Tagliaferri, E., & Brown, P. (1999). Superbolides. En W. J. Baggeley & V. Porubčan (Eds.), *Meteoroids 1998, Proceedings of the International Conference, held at Tatranska Lomnica, Slovakia, August 17–21, 1998* (pp. 37-54). Astronomical Institute of the Slovak Academy of Sciences. <https://adsabs.harvard.edu/full/1999md98.conf...37C>
- Cerdán H., G. (2019). *Morphological properties determination of main belt asteroids* [Tesis de maestría, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE)]. <http://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1009/1707>
- Chamberlin, JPL/Caltech. (2007). *Histogram of Asteroid Distribution in the Main Belt (Kirkwood Gaps)*. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. Consultado el 16 de junio de 2025, desde https://ssd.jpl.nasa.gov/diagrams/mb_hist.html
- Chamberlin, JPL/Caltech. (2025). Fireballs Reported by US Government Sensors. *NASA Jet Propulsion Laboratory*. Consultado el 10 de junio de 2025, desde <https://cneos.jpl.nasa.gov/fireballs/>
- Chambers, J., & Mitton, J. (2017). *From Dust to Life: The Origin and Evolution of Our Solar System*. Princeton University Press. <https://doi.org/10.2307/j.ctt1vwmgjm>
- Chapman, C. R., Johnson, T. V., & McCord, T. B. (1971). A Review of Spectrophotometric Studies of Asteroids. En *International Astronomical Union Colloquium, Volume 12: Physical Studies of Minor Planets* (pp. 51-65). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/S0252921100088904>
- Chapman, C. R., & Morrison, D. (1994). Impacts on the Earth by asteroids and comets: assessing the hazard. *Nature*, 367, 33-40. <https://doi.org/10.1038/367033a0>
- Chesley, S. R., Chodas, P. W., Milani, A., Valsecchi, G. B., & Yeomans, D. K. (2002). Quantifying the Risk Posed by Potential Earth Impacts. *Icarus*, 159(2), 423-432. <https://doi.org/10.1006/icar.2002.6910>
- Chesley, S. R., & Spahr, T. B. (2004). Earth Impactors: Orbital Characteristics and Warning Times. En M. J. S. Belton, T. H. Morgan, N. H. Samarasinha & D. K. Yeomans (Eds.), *Mitigation of Hazardous Comets and Asteroids* (pp. 22-37). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511525049.003>
- Chiorny, V. G., Krugly, Y. N., Shevchenko, V. G., Slyusarev, I. G., & Mikhalechenko, O. I. (2025). Absolute photometry of small main-belt binary asteroids. Physical properties. *Planetary and Space Science*, 262, 106118. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2025.106118>
- CNEOS/JPL. (2025). NEO Groups: Classification of Near-Earth Objects by Orbital Families. *Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology*. Consultado el 17 de junio de 2025, desde https://cneos.jpl.nasa.gov/about/neo_groups.html
- Comte, A. (1835). *Cours de Philosophie Positive* (Vol. 2). Paris, Bachelier.

- Craig, M., & Chambers, L. (2023). *CCD Data Reduction and Photometry Guide*. Consultado el 20 de julio de 2025, desde <https://www.astropy.org/ccd-reduction-and-photometry-guide/v/dev/notebooks/00-00-Preface.html>
- Daubar, I. J., McEwen, A. S., Byrne, S., Kennedy, M. R., & Ivanov, B. (2013). The current martian cratering rate. *Icarus*, 225(1), 506-516. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.04.009>
- De Bernardini, E. (2025). Coordenadas. Consultado el 1 de agosto de 2025, desde <https://astronomiasur.com.ar/instrumental-coordenadas.html>
- de Santillana, G., & von Dechend, H. (1969). *Hamlet's Mill: An Essay on Myth & the Frame of Time*. Gambit Incorporated.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2009.02.005>
- Díaz, S. (2017). INAOE_FOTOS_002.jpg [Online]. Consultado el 13 de mayo de 2025, desde https://www.poblanerias.com/wp-content/archivos/2017/04/INAOE-FOTOS_002.jpg
- Díaz Hernández, R. (2003). Fotografía de la Nebulosa de Orión (INAOE) [Tesis de doctorado]. Consultado el 1 de agosto de 2025, desde <https://www.inaoep.mx/~raqueld/>
- Diffraction Limited. (2018). *STF-8300 Camera Specifications and Low Profile Off-Axis Guider*. SBIG. Consultado el 17 de mayo de 2025, desde https://diffractionlimited.com/wp-content/uploads/2018/06/AAS_STF.pdf
- Dobson, M. M., Schwamb, M. E., Benecchi, S. D., Verbiscer, A. J., Fitzsimmons, A., Shingles, L. J., Denneau, L., Heinze, A. N., Smith, K. W., Tonry, J. L., Weiland, H., & Young, D. R. (2023). Phase Curves of Kuiper Belt Objects, Centaurs, and Jupiter Family Comets from the ATLAS Survey. *The Planetary Science Journal*, 4(4), 75. <https://doi.org/10.3847/PSJ/acc463>
- Drolshagen, G., Koschny, D., Drolshagen, S., Kretschmer, J., & Poppe, B. (2017). Mass accumulation of earth from interplanetary dust, meteoroids, asteroids and comets. *Planetary and Space Science*, 143, 21-27. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2016.12.010>
- Dunford, NASA. (2021). Zodiacal Light (Skull Valley, Utah; March 1, 2021). *Jet Propulsion Laboratory (JPL), California Institute of Technology*. Consultado el 12 de junio de 2025, desde https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2021/03/zodiacal_light.jpg
- Dunford, NASA. (2023). Falling from Space. Consultado el 4 de mayo de 2025, desde <https://science.nasa.gov/resource/falling-from-space/>
- Dymock, R. (2007). The H and G magnitude system for asteroids. *Journal of the British Astronomical Association*, vol. 117, no. 6, p. 342-343, 117, 342-343. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2007JBAA..117..342D/abstract>
- engineerguy. (2012). *CCD: The heart of a digital camera (how a charge-coupled device works)*. Consultado el 6 de junio de 2025, desde <https://www.youtube.com/watch?v=wsdmt0De8Hw>
- Fairén, A. G., Dohm, J. M., Baker, V. R., Thompson, S. D., Mahaney, W. C., Herkenhoff, K. E., Rodríguez, J. A. P., Davila, A. F., Schulze-Makuch, D., El Maarry, M. R., Uceda, E. R., Amils, R., Miyamoto, H., Kim, K. J., Anderson, R. C., & McKay, C. P. (2011). Meteorites at Meridiani Planum provide evidence for significant amounts of surface and near-surface water on early Mars. *Meteoritics & Planetary Science*, 46(12), 1832-1841. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2011.01297.x>
- Fuentes-Muñoz, O., Scheeres, D. J., Farnocchia, D., & Park, R. S. (2023). The Hazardous km-sized NEOs of the Next Thousands of Years. *The Astronomical Journal*, 166(1), 10. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/acd378>
- Gaffey, M. J., Bell, J. F., Brown, R. H., Burbine, T. H., Piatek, J. L., Reed, K. L., & Chaky, D. A. (1993). Mineralogical Variations within the S-Type Asteroid Class. *Icarus*, 106(2), 573-602. <https://doi.org/10.1006/icar.1993.1194>
- Gehrels, T. (1979). The asteroids: history, survey, techniques, and future work. En T. Gehrels & M. S. Matthews (Eds.), *Asteroids* (pp. 3-24). The University of Arizona Press. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1979aste.book....3G>

- General Assembly, I. 2. (2006). *Result of the IAU Resolution votes*. Consultado el 3 de mayo de 2025, desde <https://web.archive.org/web/20061107022302/http://www.iau2006.org/mirror/www.iau.org/iau0603/index.html#expand>
- Gladman, B. J., Migliorini, F., Morbidelli, A., Zappalà, V., Michel, P., Cellino, A., Froeschlé, C., Levison, H. F., Bailey, M., & Duncan, M. (1997). Dynamical Lifetimes of Objects Injected into Asteroid-Belt Resonances. *Science*, 277(5323), 197-201. <https://doi.org/10.1126/science.277.5323.197>
- Gladysheva, O. G. (2020). The Tunguska event. *Icarus*, 348, 113837. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2020.113837>
- Google Earth. (2023). *Ubicación GPS (19 01 55.5 N 98 18 54.3 W) de la Cámara Schmidt del INAOE, Tonantzinla, Puebla*. Google LLC. Consultado el 14 de mayo de 2025, desde <https://earth.google.com/web/search/19%C2%B001%E2%80%B255.5%E2%80%B3N+98%C2%B018%E2%80%B254.3%E2%80%B3W>
- Gorkavyi, N. N. (2020). Meteors, meteorites and the Chelyabinsk superbolide: main facts. En R. Nick (Ed.), *Chelyabinsk Superbolide* (pp. 1-34). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22986-3_1
- Gray, T., Mainzer, A. K., Masiero, J. R., Dahlen, D. W., Spahr, T., Bottke, W. F., & Masci, F. J. (2023). The NEO Surveyor Near-Earth Asteroid Known Object Model. *Planetary Science Journal*, 4(12), 228. <https://doi.org/10.3847/PSJ/ad072e>
- Gronchi, G. F. (2004). Classical and modern orbit determination for asteroids (D. W. Kurtz, Ed.). *Proceedings of the International Astronomical Union, 2004* (IAUC196), 293-303. <https://doi.org/10.1017/S174392130500147X>
- Haro, G. (2012). *En el cielo y en la Tierra. Discurso de ingreso*. El Colegio Nacional.
- Harris, A. W., & Chodas, P. W. (2021). The population of near-earth asteroids revisited and updated. *Icarus*, 365, 114452. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2021.114452>
- Harris, A. W., & Harris, A. W. (1997). On the revision of radiometric albedos and diameters of asteroids. *Icarus*, 126(2), 450-454. <https://doi.org/10.1006/icar.1996.5664>
- Hills, J. G., & Goda, M. P. (1993). The Fragmentation of Small Asteroids in the Atmosphere. *The Astronomical Journal*, 105(3), 1114-1144. <https://doi.org/10.1086/116499>
- Howell, S. B. (2006). *Handbook of CCD Astronomy* (2.^a ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511807909>
- Hueso, R., Pérez-Hoyos, S., Sánchez-Lavega, A., Wesley, A., Hall, G., Go, C., Tachikawa, M., Aoki, K., Ichimaru, M., Pond, J. W. T., Korycansky, D. G., Palotai, C., Chappell, G., Rebeli, N., Harrington, J., Delcroix, M., Wong, M., de Pater, I., Fletcher, L. N., ... Moreno, J. C. (2013). Impact flux on Jupiter: From superbolides to large-scale collisions. *Astronomy & Astrophysics*, 560, A55. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201322216>
- Kaasalainen, M., & Torppa, J. (2001). Optimization Methods for Asteroid Lightcurve Inversion. I. Shape Determination. *Icarus*, 153(1), 24-36. <https://doi.org/10.1006/icar.2001.6673>
- Kaasalainen, M., Torppa, J., & Muinonen, K. (2001). Optimization Methods for Asteroid Lightcurve Inversion. II. The Complete Inverse Problem. *Icarus*, 153, 37-51. <https://doi.org/10.1006/icar.2001.6674>
- Karttunen, H., Kröger, P., Oja, H., Poutanen, M., & Donner, K. J. (Eds.). (2017). *Fundamental Astronomy*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-53045-0>
- Keats, J. (1905). *The Poems of John Keats* (E. De Selincourt, Ed.). Dodd, Mead; Company.
- Kitchin, C. R. (2013). *Telescopes and Techniques* (3.^a ed.). Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4891-4>
- Kovalevsky, J. (2002). *Modern Astrometry*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04730-9>
- Kovalevsky, J., & Seidelmann, P. K. (2004). *Fundamentals of Astrometry*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139106832>

-
- Krüger, H., & Grün, E. (2014). Dust in the Solar System. En T. Spohn, D. Breuer & T. V. Johnson (Eds.), *Encyclopedia of the Solar System (Third Edition)* (3.^a ed., pp. 657-682). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415845-0.00029-3>
- Lang, D., Hogg, D. W., Mierle, K., Blanton, M., & Roweis, S. (2010). Astrometry.net: Blind astrometric calibration of arbitrary astronomical images. *The Astronomical Journal*, 139(5), 1782-1800. <https://doi.org/10.1088/0004-6256/139/5/1782>
- Marvin, U. B. (1992). The meteorite of Ensisheim: 1492 to 1992. *Meteoritics*, 27(1), 28-72. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.1992.tb01056.x>
- Milani, A., Chesley, S. R., Boattini, A., & Valsecchi, G. B. (2000). Virtual Impactors: Search and Destroy. *Icarus*, 145(1), 12-24. <https://doi.org/10.1006/icar.1999.6324>
- Minor Planet Center. (2025a). *About the Minor Planet Center (MPC)*. International Astronomical Union / Smithsonian Astrophysical Observatory. Consultado el 14 de junio de 2025, desde <https://www.minorplanetcenter.net/about>
- Minor Planet Center. (2025b). *Guide to Minor Body Astrometry*. Consultado el 27 de julio de 2025, desde <https://www.minorplanetcenter.net/iau/info/Astrometry.html>
- Montmerle, T., Augereau, J.-C., Chaussidon, M., Gounelle, M., Marty, B., & Morbidelli, A. (2006). Solar System Formation and Early Evolution: the First 100 Million Years. *Earth, Moon, and Planets*, 98, 39-95. <https://doi.org/10.1007/s11038-006-9087-5>
- Moore, P. (2005). SOLAR SYSTEM | Asteroids, Comets and Space Dust. En R. C. Selley, L. R. M. Cocks & I. R. Plimer (Eds.), *Encyclopedia of Geology* (1.^a ed., pp. 220-227, Vol. 5). Elsevier.
- Morbidelli, A., Bottke, W. F. J., Froeschlé, C., & Michel, P. (2002). Origin and Evolution of Near-Earth Objects. En W. F. J. Bottke, A. Cellino, P. Paolicchi & R. P. Binzel (Eds.), *Asteroids III* (pp. 409-422). University of Arizona Press. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2002aste.book.409M>
- Morrison, D. (1992). *The Spaceguard Survey: Report of the NASA International Near-Earth-Object Detection Workshop* (inf. téc. N.º NASA-TM-107979). NASA Ames Research Center. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19920025001>
- Morrison, D. (2006). Asteroid and comet impacts: the ultimate environmental catastrophe. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 364(1845), 2041-2051. <https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1812>
- Mújica García, R., & INAOE. (2002). Inauguración del Observatorio Astrofísico de Tonantzintla, 17 de febrero de 1942. Consultado el 1 de agosto de 2025, desde <https://www.inaoep.mx/~rmujica/60years/sv420421.jpg>
- Murphy, M. (2019). A History of Asteroid Classification. Consultado el 6 de mayo de 2025, desde <https://vissiniti.com/asteroid-classification/>
- NASA; ESA; Hubble Heritage Team (STScI/AURA). (2013). A unique Hubble view of Comet ISON. Consultado el 1 de agosto de 2025, desde <https://science.nasa.gov/image-detail/a-unique-hubble-view-of-comet-ison/>
- NASA/JPL CNEOS. (2025a). *Discovery Statistics*. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. Consultado el 11 de junio de 2025, desde <https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/totals.html>
- NASA/JPL CNEOS. (2025b). Fireballs – Center for Near Earth Object Studies (CNEOS). Consultado el 8 de junio de 2025, desde <https://cneos.jpl.nasa.gov/fireballs/>
- NASA/JPL-Caltech & Dyches, P. (2024). ¿Qué es la estrella polar y cómo la podemos encontrar? Consultado el 1 de agosto de 2025, desde <https://ciencia.nasa.gov/ciencias-terrestres/observacion-del-cielo/que-es-la-estrella-polar-y-como-la-podemos-encontrar/>
- Nesvorný, D., Vokrouhlický, D., Dones, L., Levison, H. F., Kaib, N., & Morbidelli, A. (2017). Origin and Evolution of Short-period Comets. *The Astrophysical Journal*, 845(1), 27. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa7cf6>
- Öpik, E. J. (1951). Collision Probabilities with the Planets and the Distribution of Interplanetary Matter. *Proceedings of the Royal Irish Academy. Section A: Mathematical and Physical Sciences*, 54, 165-199. <https://www.jstor.org/stable/20488532>
-

- Paddack, S. J. (1969). Rotational bursting of small celestial bodies: Effects of radiation pressure. *Journal of Geophysical Research*, 74(17), 4379-4381. <https://doi.org/10.1029/JB074i017p04379>
- Peebles, C. (2001). *Asteroids: A History*. Smithsonian Institution Scholarly Press.
- Peimbert, M. (1983). The Astronomy of Haro, Guillermo. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, 7, 15-20. <https://adsabs.harvard.edu/full/1983RMxAA...7...15P>
- Peña-Asensio, E., Grèbol-Tomás, P., Trigo-Rodríguez, J. M., Ramírez-Moreta, P., & Kresken, R. (2024). The 18 May 2024 Iberian superbolide from a sunskirting orbit: USG space sensors and ground-based independent observations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 533(1), L92-L99. <https://doi.org/10.1093/mnrasl/slae065>
- Popova, O. P., Jenniskens, P., Emel'yanenko, V., Kartashova, A., Biryukov, E., Khaibrakhmanov, S., Shuvalov, V., Rybnov, Y., Dudorov, A., Grokhovsky, V. I., Badyukov, D. D., Yin, Q.-Z., Gural, P. S., Albers, J., Granvik, M., Evers, L. G., Kuiper, J., Kharlamov, V., Solovyov, A., ... Consortium), (C. A. (2013). Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization. *Science*, 342(6162), 1069-1073. <https://doi.org/10.1126/science.1242642>
- DECRETO por el que se crea el Instituto Nacional de astrofísica, Óptica y Electrónica como organismo descentralizado de interés público, con personalidad jurídica y patrimonio propio., en 1971, Consultado el 11 de mayo de 2025, desde <https://www.inaoep.mx/~jgob/hjg/Facultades/Creacion.pdf>
- Rodríguez, L. F. (1997). La astronomía en México: El pasado reciente y los retos del futuro. *Las ciencias exactas en México*, 207-236.
- Roy, A. (2004). *Orbital Motion* (4.^a ed.). CRC Press.
- Rumpf, C. M., Lewis, H. G., & Atkinson, P. M. (2017). Asteroid impact effects and their immediate hazards for human populations. *Geophysical Research Letters*, 44(8), 3433-3440. <https://doi.org/10.1002/2017GL073191>
- Safronov, V. (1979). On the origin of asteroids. En T. Gehrels (Ed.), *Asteroids* (pp. 975-1014). University of Arizona Press. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1979aste.book..975S/abstract>
- Schmidt, B. (1932). Ein lichtstarkes komafreies Spiegelsystem. *Mitteilungen der Hamburger Sternwarte in Bergedorf*, 7(36), 15-17.
- Steel, D. (2008). Planetary science: Tunguska at 100. *Nature*, 453, 1157-1159. <https://doi.org/10.1038/4531157a>
- Suggs, R., Moser, D., Cooke, W., & Suggs, R. (2014). The flux of kilogram-sized meteoroids from lunar impact monitoring. *Icarus*, 238, 23-36. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.04.032>
- Tatum, J. (2023). Standard Coordinates and Plate Constants. https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Astronomy__Cosmology/Celestial_Mechanics_%28Tatum%29/11%3A_Photographic_Astrometry/11.02%3A_Standard_Coordinates_and_Plate_Constants
- Tholen, D. J. (1984). *Asteroid taxonomy from cluster analysis of Photometry* [Tesis doctoral, University of Arizona]. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1984PhDT.....3T/abstract>
- Trejo, J. G. (2022). La astronomía prehispánica en Mesoamérica. En S. Lizano & L. F. R. Jorge (Eds.), *La astronomía en México antes y después de la conquista* (pp. 17-56). Colegio Nacional.
- Vokrouhlický, D., Nesvorný, D., Brož, M., Bottke, W. F., Deienno, R., Fuls, C. D., & Shelly, F. C. (2025). Orbital and absolute magnitude distribution of Hilda population. *The Astronomical Journal*, 169(134), 41. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.04403>
- Vokrouhlický, D., Bottke, W. F., Chesley, S. R., Scheeres, D. J., & Statler, T. S. (2015). The Yarkovsky and YORP Effects. En P. Michel, F. E. DeMeo & W. F. Bottke Jr. (Eds.), *Asteroids IV*. The University of Arizona Press. https://doi.org/10.2458/azu_uapress_9780816532131-ch027

BIBLIOGRAFÍA

Wikimedia Commons. (2024). File:InnerSolarSystem-en.png. Consultado el 16 de junio de 2025, desde <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:InnerSolarSystem-en.png&oldid=840039700>

