

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS



**RESULTADOS DE LA CAMPAÑA DE POLARIMETRÍA DE ASTEROIDES
DESDE EL OAGH Y EL OAN-SPM (2017-2022)**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

FÍSICO

PRESENTA

IRIDIAN DANIELA CASTREJÓN HERNÁNDEZ

Director de Tesis:

Dr. Joel Humberto Castro Chacón

Ensenada, B.C.

Octubre de 2023



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS, CAMPUS ENSENADA



**“RESULTADOS DE LA CAMPAÑA DE POLARIMETRÍA DE ASTEROIDES
DESDE EL OAGH Y EL OAN-SPM (2017-2022)”**

TESIS

PARA CUBRIR LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA OBTENER EL TÍTULO DE

Físico

PRESENTA

IRIDIAN DANIELA CASTREJÓN HERNÁNDEZ

354121

A quien el Comité de Tesis autoriza el trabajo terminal y de acuerdo con el Art. 19 del R.G.E.P.E.P, emite los siguientes votos aprobatorios mediante rubrica:

DR. JOEL HUMBERTO
CASTRO CHACÓN
DIRECTOR

DR. JORGE ALBERTO
VILLAVICENCIO AGUILAR
SINODAL

Dr. JOSÉ MANUEL
LÓPEZ RODRÍGUEZ
SINODAL

Dr. JESÚS RAMÓN
LERMA ARAGÓN
SINODAL

Dr. JUAN CRISOSTOMO
TAPIA MERCADO
SINODAL

“Por la Realización Plena del Ser”

C.c.p.- Archivo

C.c.p.- Minutario

Resumen de la tesis de Iridian Daniela Castrejón Hernández presentada como requisito parcial para la obtención de la Licenciatura en Física. Ensenada, Baja California, México, octubre del 2023.

RESULTADOS DE LA CAMPAÑA DE POLARIMETRÍA DE ASTEROIDES DESDE EL OAGH Y EL OAN-SPM (2017-2022)



Resumen aprobado: _____

Dr. Joel Humberto Castro Chacón

La polarimetría es una técnica que se basa en cuantificar la luz polarizada, en este trabajo se utilizó para determinar el grado de polarización de la luz reflejada de los asteroides en función del ángulo de fase, en el sistema Sol-Objeto-Tierra. Estas observaciones permiten evaluar propiedades superficiales de cuerpos menores, como el albedo, la granulometría y la mineralogía. La intención de este trabajo es obtener el ángulo de fase y la polarización reducida de cada asteroide para poblar los huecos en las curvas de polarización-fase del *Catalogue of asteroid polarization curves* R. Gil-Hutton (2017). Por esta razón, se realizaron campañas de observaciones polarimétricas, en el Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir (OAN-SPM) con anterioridad y en el Observatorio Astrofísico Guillermo Haro (OAGH) dentro del periodo de esta tesis. Los cuerpos menores observados pertenecen al Cinturón de Asteroides y las campañas comprendieron desde 2017 hasta 2022. El instrumento utilizado en ambos observatorios es el Polarizador óptico de doble haz, Polima 2. En esta tesis, se describe el procedimiento para la adquisición de imágenes de los asteroides con Polima 2, además se describe la generación de efemérides, la carta de identificación, las imágenes de calibración y el procesamiento de ellas. El procesamiento de las imágenes de ciencia utiliza los parámetros de Stokes para calcular el porcentaje de polarización reducida junto con su ángulo fase, además del error en la polarización. En esta tesis se muestran ejemplos de los valores conseguidos para cada asteroide en formato de tablas y

gráficas. Finalmente, se hace una comparación en el desempeño instrumental y científico del polarímetro para definir la conveniencia de tener el instrumento en alguno de los mencionados telescopios el mayor tiempo posible.

Palabras Claves: **Asteroides, Polarimetría, Polarización, Ángulo fase, Astronomía**

A mi mamita, mi mami y mi hermana

<<Aquello era imposible, por supuesto, pero...

*¿Cuándo en la vida eso ha detenido a un soñador en la búsqueda de su
sueño?>>*

Laini Taylor.

AGRADECIMIENTOS

Por mi formación en la licenciatura, agradezco a la Universidad Autónoma de Baja California. A mis maestras, maestros y todo el personal académico, gracias. Lo que hoy me enseñan se queda conmigo para siempre.

Dr. Joel, gracias por su infinita paciencia, por compartir conmigo sus conocimientos, por ser siempre amable, atento y por su infinita energía por hacer de todo a cualquier hora. Gracias por mostrarse siempre comprensivo conmigo, paciente, abierto y empático, es una gran persona profe. También agradezco el llevarme al Coloquio Nacional de Polarización en Astronomía y hacerme conocer Guadalajara, usted hizo que tuviera confianza en mí y lograra salir de mi zona de confort. De manera adicional, agradezco por llevarme a San Pedro Mártir, ¡Es precioso!

Maestro Jorge, gracias por su contribución con las temporadas de observación en OAN-SPM y OAGH y por las reducciones polarimétricas, han sido parte fundamental de este trabajo. También agradezco su conocimiento, por atender mis dudas, por enseñarme lo que es la vida, la humildad y el hacer todo lo que nos gusta a cualquier edad. ¡También por mostrarme sus fotos de las auroras y cruzando el Ártico!

Agradezco a todos los astrónomos que estuvieron presentes en las campañas de observación que implementaron Polima-2 en el OAN-SPM o en el OAGH, del 2017 hasta 2022.

Mami, papi, mamita, Mary y Cristian, gracias por ser mi familia, por tenerme paciencia y estar siempre conmigo; los amo, hasta a ustedes perritos apestosos, 'Leoni' y '5-7'.

Psicól. Patricia Luna, gracias por todos los consejos, por escucharme, por las pláticas, por seguir insistiendo conmigo, por ofrecerme tantos tips y por hacer que tuviera motivación y ganas en mi vida. Además, gracias por brindarme un espacio en su oficina y por hacer que probara esos ricos hot cakes.

Dayanne gracias por estar conmigo en todo el camino, por confiar en mí, alentarme, escuchar mis lamentos, colorear mis días, cocinarme crepas, pasteles y por darme café para tener energía; te quiero. Gracias por darme ese empujón para decidir hacer este trabajo. ¡Ya lo acabé! *Ahora vayamos por una nieve.*

A la familia de Dayanne por aceptarme en su casa, además por alimentarme y convertirme en *vegecarnívora*. Que deliciosa comida.

Ariana, Diana, Jessica, Kenia, Gerzayn, Jorge, Jair los adoro y atesoro los días que pasamos juntos en la uni, han sido parte esencial en mi formación académica y siempre están en mí corazón. Jorge G., Nataly y todos mis amigos de las *banquitas*, gracias por todos los momentos que me hicieron feliz.

Vanessa y Kevin, gracias por estar conmigo desde el principio de la tesis, agradezco su nobleza, su fe en mí. Vane gracias *por quedarte despierta en las observaciones*. También le agradezco a tu mamá Bella por prestarme su laptop.

Al Sistema Solar; Luna, Estrella y Sol, por darme preciosos momentos de alegría, resplandecer mí vida y compartirme sus chetos babeados, *ew*.

Maestro Carlos, gracias por presionarme y motivarme a seguir escribiendo. *Tus stickers son los mejores.*

Maestra Paty, estoy agradecida por atender mis dudas, explicarme conceptos, ir conmigo a comer sushi y ser una amiga.

Agradezco de manera especial al Dr. Vidal por su tiempo y sus prácticos comentarios.

Gracias al personal del OAGH, tanto por su asesoramiento en el telescopio como por las historias que me contaban.

También gracias al personal de la biblioteca del Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente a María Elena

González, nunca había conocido a una mujer tan culta que me compartía su conocimiento con humildad; igualmente gracias *por los raites*.

Agradezco a mis sinodales por su tiempo y sus críticas constructivas: Dr. Jorge A. Villavicencio, Dr. José Manuel López, Dr. Jesús R. Lerma y al Dr. Juan C. Tapia.

Gracias a CONACyT por la aceptación de este proyecto y el apoyo monetario a través del proyecto de CB 283800.

¡Gracias a ti, por leerme!

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN	18
1.1 Antecedentes.....	18
1.2 Polarimetría de asteroides	22
1.3 Observatorio	22
1.3.2 Instrumentación	24
1.3.3 Características de Polima- 2.....	26
1.4 Justificación	26
1.5 Planteamiento del problema	28
1.6 Objetivos	29
1.6.1 Objetivo general.....	29
1.6.2 Objetivos específicos	29
1.7 Hipótesis.....	30
1.8 Contenido	30
II. MARCO TEÓRICO	32
2.1 Asteroides.....	32
2.1.1 Población de asteroides del Sistema Solar	35
2.1.2 Troyanos.....	37
2.1.3 Clasificación de asteroides	38
2.1.4 Colisión de asteroides con la superficie de la Tierra.....	42
2.1.5 Meteoritos y la vida en la Tierra.....	44
2.1.6 Composición de asteroides.....	44
2.2 Ley de reflexión	46
2.3 Ley de refracción	47
2.4 Ecuaciones de Fresnel	47

2.5	Polarimetría	49
2.6	Parámetros de Stokes	50
2.7	Birrefringencia	54
2.8	Albedo	55
2.9	Albedo geométrico	57
2.10	Magnitudes.....	57
2.11	Estrellas estándar polarizadas y no polarizadas.....	60
2.12	Catálogo de Grupo de Ciencias Planetarias.....	61
II.	METODOLOGÍA.....	63
3.1	Observaciones	63
3.2	Observación remota	63
3.3	Procesamiento de datos.....	75
3.3.1	Reducción polarimétrica	75
3.3.2	Reducciones polarimétricas.....	75
III.	RESULTADOS.....	77
IV.	CONCLUSIONES	86
V.	REFERENCIAS	88

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Fotografía del cometa Halley (con periodo orbital de 75 años) acercándose al Sol en marzo de 1986 (<https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/images/history/March1986.html>) 20
- Figura 2. Observatorio Guillermo Haro. (Perea L. , 2021)..... 23
- Figura 3. Ubicación del Observatorio Astrofísico Guillermo Haro de Cananea, Sonora-México. De lado derecho se encuentra señalado el OAGH (N 31° 3' 11.559", O 110° 23' 1.624"). Se encuentra a 2480 m sobre el nivel del mar. 23
- Figura 4. Ubicación del Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir, Baja California, México. Con una longitud: 115° 27' 49" Oeste y latitud: 31° 02' 39" Norte. Se encuentra a 2830 m sobre el nivel del mar..... 24
- Figura 5. Telescopio con espejo primario de 2.12m del OAGH tomado de INAOE (Perea L. , 2021)..... 25
- Figura 6. Polima-2 en OAN-SPM (OAN-SPM, s.f.)..... 25
- Figura 7. Sistema óptico del telescopio de San Pedro Mártir de 0.84 cm con Polima-2 acoplado. Tomado de Elisa Íñiguez (2014) Tesis de maestría, Ensenada, México... 26
- Figura 8. Diagrama tomado de Jorge Acosta (2020) Tesis de maestría, Valencia, España..... 27
- Figura 9. Sistema binario de asteroides. "Imágenes de radar biestático del asteroide binario 2017 YE5 del Observatorio de Arecibo y el Observatorio de Green Bank el 25 de junio." (<https://www.jpl.nasa.gov/images/pia22559-bi-static-radar-images-of-the-binary-asteroid-2017-ye5>) 34

Figura 10.	Concepto artístico del asteroide interestelar 1I/2017 U1 ('Oumuamua) a su paso por el Sistema Solar después de su descubrimiento en octubre de 2017 (Cofield, 2018).	35
Figura 11.	Gráfico artístico del Cinturón de asteroides (https://solarsystem.nasa.gov/resources/2156/asteroid-belt/).....	36
Figura 12.	Proyección del objeto Arrokoth (2014 MU69) que se encuentra en el cinturón de Kuiper (Buie, 2020).	37
Figura 13.	Ubicación de los troyanos y los puntos lagrangianos del sistema Júpiter- Sol (Kutner, 2003).	38
Figura 14.	Perihelio y afelio de la órbita de un objeto en color verde.	39
Figura 15.	Órbitas de los NEAs: a) Órbita Amor, b) Órbita Apolo, c) Órbita Atena y d) Órbita Atira. (Ojeda Vera, 2019).	41
Figura 16.	Número acumulado de asteroides cercanos a la Tierra ordenado por tamaño y fecha de descubrimiento por CNEOS (https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/totals.html). ..	42
Figura 17.	Ilustración de las leyes de reflexión y refracción, modificada de <i>Introduction of Optics</i> , Pedrotti 1993.	47
Figura 18.	Diagrama del plano de incidencia donde se muestran los rayos: incidente, reflejado y transmitido, con sus respectivos campos electromagnéticos. El diagrama indica el caso del modo transversal eléctrico, se puede ver como su campo eléctrico oscila fuera del plano de incidencia.....	48
Figura 19.	Camino óptico de rayos Ordinario (o) y Extraordinario (e). En el primer diagrama el haz incidente se separa en el e y o al entrar en la pieza de calcita, al entrar en la segunda pieza de calcita el haz e se convierte en el o y el o en el e. El haz eo y oe (de la derecha) están	

	desplazados en direcciones ortogonales a la dirección del haz incidente (punto blanco). Editado de Tesis maestría 2014 de Iñiguez Elisa y Kolokolova 2015	55
Figura 20.	Ángulo de fase comprendido entre Sol-Objeto-Asteroide, adaptado de Ojeda Vera, 2019. (Ojeda Vera, 2019)...	57
Figura 21.	Escala de magnitud aparente con diversas estrellas vistas desde la Tierra (https://www.aavso.org/magnitude).....	59
Figura 22.	Ejemplo de curva de polarización del grupo A para el asteroide 7, se muestra el porcentaje de polarización (%) vs ángulo de fase (deg). Tomado del catálogo de Grupo de Ciencias Planetarias en 2023.	62
Figura 23.	Líneas del código ModQhorizons_Dic2021.py.	66
Figura 24.	Ejemplo del campo para el asteroide 357 Ninina mostrado en <i>Astfinder</i> , con la fecha del 4 febrero 2022.	68
Figura 25.	Carta de identificación del objeto 357 Ninina, en color verde se indica el asteroide (https://asteroid.lowell.edu/astfinder/).....	69
Figura 26.	Ejemplo de datos de la imagen fits en SAO Imagen ds9, para 357Ninina. La flecha señala la fecha exacta en que se capturó la imagen.	70
Figura 27.	Pantalla principal del OAGH.....	74
Figura 28.	Segunda pantalla del OAGH.	74
Figura 29.	En la izquierda se señala con flecha negra el asteroide 188 Celuta para la reducción. En la derecha, con la flecha blanca se señala 188, en <i>Astfinder</i>	76

Figura 30.	Curva de Polarización-Fase para 313 Chaldaea. Con observación en 2020 y 2022.....	83
Figura 31.	Curva de Polarización-Fase para 102 Miriam.	83
Figura 32.	Curva de Polarización-Fase para 67 Asia.	84
Figura 33.	Curva de Polarización-Fase para 86 Semele.....	84
Figura 34.	Curva de Polarización-Fase para 823 Sisigambi.....	85
Figura 35.	Curva de Polarización-Fase para 305 Gordonia.	85

LISTA DE TABLAS

Tabla I.	Componentes ópticos de Polima-2.....	26
Tabla II.	Comparación de las distancias medias de planetas al Sol obtenidas con Ley de Titius y su valor real, modificado de María Karima Curioca (2014). (Curioca Gálvez, 2014).	33
Tabla III.	Clasificación de asteroides. (https://cneos.jpl.nasa.gov/about/neo_groups.html).....	40
Tabla IV.	Tipos taxonómicos de asteroides, modificado de Pater & Jack, 2010. (de Pater & Jack, 2010)	45
Tabla V.	Estados de polarización con su respectivo vector de Stokes.	51
Tabla VI.	Albedo aproximado de diferentes cuerpos del Sistema Solar (Shirley & Fairbridge, Albedo, 2000).	56
Tabla VII.	Registro de los objetos disponibles el 3 de febrero 2022 en el grupo C del catálogo de Grupo de Ciencias Planetarias.....	66
Tabla VIII.	Objetos observados en la temporada de noviembre 2019 en OAN-SPM.....	77
Tabla IX.	Objetos observados en la temporada de febrero, marzo, mayo del 2022 en OAGH.	78
Tabla X.	Caracterización de los objetos de acuerdo con su ángulo de fase y grado de polarización del grupo A.....	79
Tabla XI.	Caracterización de los objetos de acuerdo con su ángulo de fase y grado de polarización del grupo B.....	80
Tabla XII.	Caracterización de los objetos de acuerdo con su ángulo de fase y grado de polarización del grupo C.	80

Tabla XIII.	Caracterización de los objetos de acuerdo con su ángulo de fase y grado de polarización del grupo D.	81
-------------	---	----

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La curiosidad por lo desconocido se sembró desde que miramos al cielo. La astronomía ha permitido descubrir lo que se esconde más allá de la Tierra. Es un campo de la física que facilitó la sobrevivencia a los primeros pobladores y que hoy por hoy, continúa presente en la sociedad.

La astronomía es una ciencia que se fue desarrollando a partir de la astrología y hasta nuestros días no deja de tener vigencia, debido en gran medida, a que siempre se están descubriendo nuevos fenómenos y objetos con características físicas sorprendentes.

Galileo Galilei (1520-1642) observó con su telescopio los cráteres de la Luna; esto atrajo curiosidad y con ello teorías que despertaban el interés por averiguar el cómo se habían generado (Marquina, 2009). Ahora se afirma que, fueron ocasionados por el bombardeo constante de asteroides, los cuáles, además, han dejado cicatrices en la Tierra. Cientos de ellos han impactado en nuestro planeta desde los primeros años de su formación.

En la actualidad, los asteroides siguen siendo fuentes de información para contribuir a responder diversas interrogantes. Al ser estos cuerpos remanentes de la formación de nuestro Sistema Solar, y por su cercanía a la Tierra, estos encabezan la lista en el número de objetos estudiados. Y por esta razón, es que hay diversos centros de estudio en todo el mundo que le dedican esfuerzo y tiempo en examinarlos (NASA, 2021).

La polarimetría es una técnica que se basa en cuantificar la luz polarizada, mediante lo cual es posible obtener información de fenómenos físicos que usualmente son difíciles de medir con otras técnicas, como es el caso de los campos magnéticos, tanto en estrellas como en núcleos activos de galaxias. Como ejemplo está el telescopio Atacama Large Millimeter/submillimeter

Array, mejor conocido por las siglas A.L.M.A, ubicado en Chile, donde se están realizando proyectos de polarimetría; en particular el estudio de emisiones concentradas de energía producidas por los agujeros negros supermasivos. Recientemente, la polarización se ha utilizado para tener conocimiento de los campos magnéticos en el borde del agujero negro de la galaxia M87, trabajo en el que participaron telescopios de todo el mundo: ALMA, APEX, el telescopio de 30 metros de IRAM, el Observatorio NOEMA de IRAM, el Telescopio James Clerk Maxwell (JCMT), el Gran Telescopio Milimétrico Alfonso Serrano (LMT), the Submillimeter Array (SMA), el Submillimeter Telescope (SMT), el Telescopio del Polo Sur (SPT), el Telescopio de Kitt Peak y el Telescopio de Groenlandia (GLT). El 9 de diciembre de 2021 fue lanzado el satélite Explorador de polarimetría de imágenes de rayos X (IXPE por las siglas en inglés) (Instituto Nacional de Astrofísica, 2021).

En el caso de los cuerpos menores, la polarimetría está siendo utilizada principalmente para determinar propiedades superficiales, en particular el albedo, la granulometría y la mineralogía. Estos estudios contribuyen a interpretar ramas taxonómicas en la clasificación de objetos sin atmósfera y son determinantes en la medición del tamaño de los mismos.

Por otro lado, en el telescopio 84 cm de OAN-SPM se utiliza el Polarizador óptico de imagen, POLIMA y el Polarizador óptico de doble haz, POLIMA 2. Uno de los proyectos que se realizaron con POLIMA 2 en OAN-SPM, el Dr. Joel Castro y el Dr. R. Gill-Hutton en 2019 realizaron observaciones del asteroide Psyche (16) para generar sus curvas polarimétricas rotacionales (Castro, 2022).

La importancia del estudio de los cuerpos menores no sólo radica en las propiedades físicas y superficiales mientras se encuentran orbitando el Sol. Es bien conocido que el estudio de meteoritos en laboratorio ha acotado la edad actual del Sistema Solar, mediante la determinación de elementos químicos con decaimiento radiactivo. En particular, con el decaimiento

radiactivo de Uranio 238 (^{238}U), se desarrolló la técnica para datar a las rocas (Flowers, Theopold, Langley, & Robinson, 2022).

No se debe confundir a los asteroides con los meteoritos. Los asteroides son cuerpos de tamaño menor a los planetas, pero lo suficientemente grande para generar daños si hay un impacto en la superficie terrestre. Por otro lado, el meteorioide es una fracción del asteroide o cometa. Los cometas (del griego kometes, que significa «astro con cabellera») son cuerpos menores, desde unos pocos metros hasta algunos kilómetros de diámetro, compuestos de hielo y silicatos ((SEA), s.f.). Su periodo orbital difiere de décadas a miles de años y son un espectáculo para todo aquél que lo observe, véase figura 1.



Figura 1. Fotografía del cometa Halley (con periodo orbital de 75 años) acercándose al Sol en marzo de 1986 (<https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/images/history/March1986.html>)

Los meteoroides surgen de la colisión entre objetos del Sistema Solar, generalmente asteroides. De este impacto se desprenden pedazos de rocas que los llevan lejos de su órbita de origen, por ejemplo, hasta otros planetas (Rodríguez, 2013).

Otro fenómeno extraordinario que acontece es de las lluvias de estrellas o las llamadas comúnmente “estrellas fugaces”, lo cual es incorrecto ya que, no son

estrellas. Lo que vemos es un meteoro, es decir, a un meteoroides ingresando a la atmosfera terrestre, que se evapora y genera luz, un evento espectacular. Al caer en la superficie de la Tierra u otro cuerpo, se convierte en un meteorito (de Vicente Abad, 2013).

El 8 de febrero de 1969 cayó un meteorito en Allende, Chihuahua, el cual fue llevado para su estudio al laboratorio Lunar de la NASA (por sus siglas en inglés National Aeronautics and Space Administration) que estaba preparado para recibir las rocas lunares del viaje de Apolo 11. Este meteorito despertó curiosidad en la comunidad científica, por ejemplo, su trayectoria, su composición, su edad, entre otras (Tormo Cifuentes, 2014).

De la información obtenida del meteorito de Allende se encuentra: que es un meteorito carbonoso condritico; es decir, contiene elementos pequeños, de entre 0.5 y 1 milímetro de diámetro conformados con minerales conocidos en la Tierra. Estudiando el meteorito determinaron que se formó antes de que el Sol comenzara a brillar (López, 2019).

Los asteroides brindan información en lo consecuente al origen de la vida, en resumen, obtener material de ellos permite el estudio de su química y con ello se recrea la *receta* de cómo era la Tierra primitiva, antes de tener vida. Por ello, hay misiones espaciales en curso y otras que se están planeando para ir directamente al asteroide y tomar muestras estériles, pues esa es la desventaja del meteorito. Pongamos por caso, la sonda japonesa Hayabusa 2 en 2015 fue lanzada al espacio para aterrizar en el asteroide Ryugu, que se encontraba entre la órbita de la Tierra y Marte. En 2020 las muestras del asteroide llegaron a la Tierra (Menor-Salván, 2022).

El estudio de un asteroide desde la Tierra por medio de observatorios proporciona información valiosa, concretamente ofrece su velocidad, composición, forma, características, albedo, órbita, entre otras. Estas características son de vital importancia para conocer sobre la formación del Sistema Solar y del origen de la vida. Además, la historia nos ha dicho que ocurrieron, ocurren y ocurrirán colisiones, pero conocer la órbita del objeto,

representa una ventaja para el impacto que pueda ocurrir entre la Tierra y uno de estos objetos, pues ahora se está trabajando para la prevención de estos eventos.

1.2 Polarimetría de asteroides

Como ya se mencionó, la polarimetría es una técnica que permite estudiar propiedades superficiales mediante la medición del estado y grado de la polarización de la luz que procede de los objetos celestes. Gracias a que la polarimetría provee información que no se puede obtener directamente con otras técnicas remotas, el número de estudios se ha incrementado y cada vez existen más instalaciones con telescopios e instrumentos especializados disponibles en el mundo. Sin embargo, tiene la desventaja de ser una técnica que consume mucho tiempo de telescopio, por eso se requiere mayor tiempo de trabajo, además de telescopios cada vez más grandes para emplearla con éxito.

1.3 Observatorio

Para este trabajo se obtuvieron datos polarimétricos de los telescopios de 2.1 m del Observatorio Astrofísico Guillermo Haro (OAGH) y del 84 cm del Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir (OAN-SPM), en ambos casos con el polarímetro de doble haz POLIMA2.



Figura 2. Observatorio Guillermo Haro. (Perea L. , 2021).

El OAGH está situado en la sierra de la Mariquita, en la región norte del estado de Sonora, 13 km al Norte de la ciudad de Cananea y 30 kilómetros al Sur de la frontera con Arizona (Perea L. , 2021) (figura 2 y 3). Dicho observatorio es operado por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). Cercano a este se encuentra el observatorio Kitt Peak en Arizona, Estados Unidos Americanos.



Figura 3. Ubicación del Observatorio Astrofísico Guillermo Haro de Cananea, Sonora-México. De lado derecho se encuentra señalado el OAGH (N 31° 3' 11.559", O 110° 23' 1.624"). Se encuentra a 2480 m sobre el nivel del mar.

El OAN-SPM, está ubicado en medio del Parque Nacional de San Pedro Mártir, en Baja California, México y es operado por la Universidad Nacional

Autónoma de México (UNAM). En la actualidad, cuenta con el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) en diferentes proyectos, como el de Laboratorio de Astrofísica en San Pedro Mártir (UNAM, 2023) (figura 4).

Los telescopios que se manejan en OAN-SPM son: telescopio de 2.1, 1.5 m, 0.84 m; los telescopios robóticos: Bootes, DDOTI, COATLI. Además de Search and Characterisation of Transiting Exoplanets (SAINT- EX), Transneptunian Automated Occultation Survey (TAOS II).

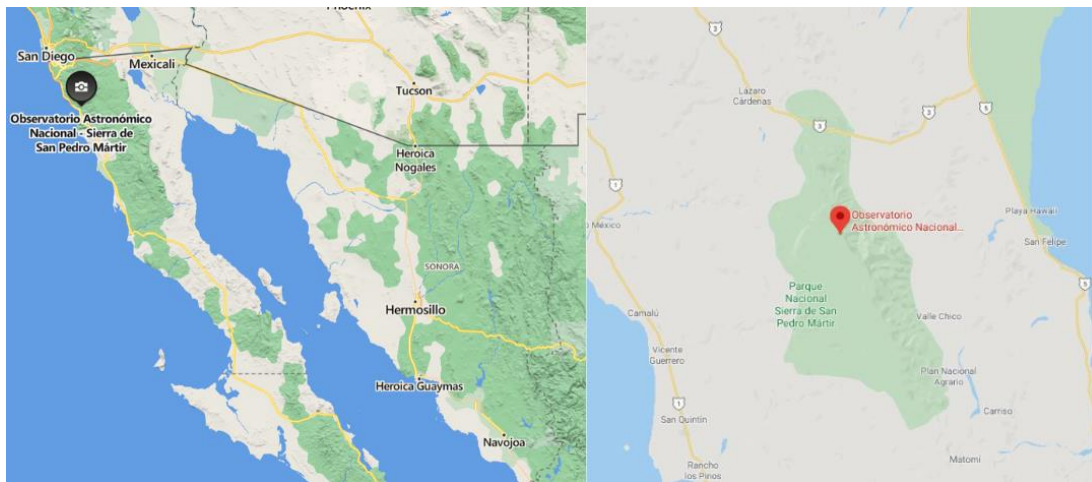


Figura 4. Ubicación del Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir, Baja California, México. Con una longitud: $115^{\circ} 27' 49''$ Oeste y latitud: $31^{\circ} 02' 39''$ Norte. Se encuentra a 2830 m sobre el nivel del mar.

1.3.2 Instrumentación

En OAGH se trabaja con un telescopio reflector, del sistema óptico: Ritchey-Chretien, derivado del Cassegrain, consta de dos espejos, el primario de 2.12 metros de diámetro y el secundario hiperbólico de 50 centímetros (Perea L. , 2021) (figura 5).



Figura 5. Telescopio con espejo primario de 2.12m del OAGH tomado de INAOE (Perea L. , 2021).

Polima-2 es un instrumento de polarización óptico de doble haz que se construyó en colaboración entre la Universidad Iberoamericana y la UNAM, véase en la figura 6; su predecesor es Polima con un haz (Íñiguez, 2014).

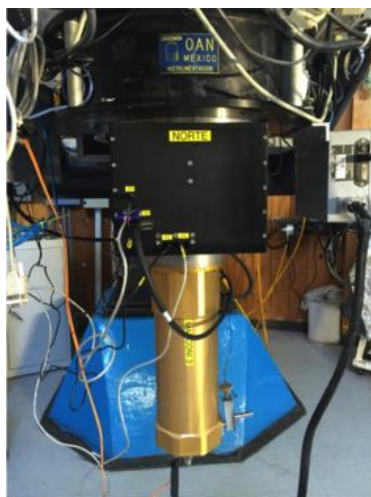


Figura 6. Polima-2 en OAN-SPM (OAN-SPM, s.f.).

Los componentes principales de Polima-2 son: Placa retardadora de media longitud de onda (HWP), Analizador de polarización lineal (SP). El instrumento tiene disponible los filtros en banda U, B, V, R, I, H_{α} (figura 7). Estos filtros

se encuentran localizados después del analizador lineal de polarización a lo largo del eje óptico para evitar introducir polarizaciones no deseadas (Íñiguez, 2014). Polima-2 cuenta con un campo de visión de 3.42'.

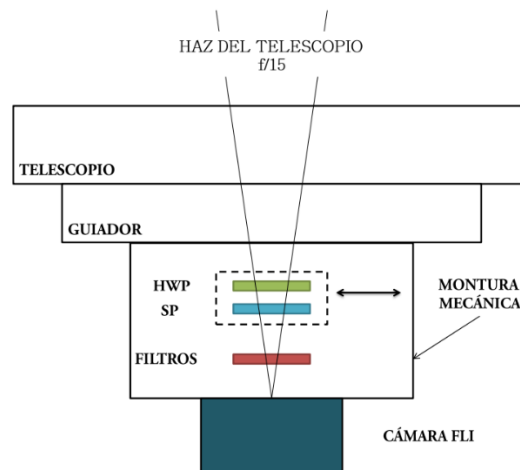


Figura 7. Sistema óptico del telescopio de San Pedro Mártir de 0.84 cm con Polima-2 acoplado. Tomado de Elisa Íñiguez (2014) Tesis de maestría, Ensenada, México.

1.3.3 Características de Polima- 2

El sistema óptico de Polima-2 (principalmente) es el siguiente:

Tabla I. Componentes ópticos de Polima-2.

Componente óptico	Función
Placa retardadora de media longitud de onda (HWP)	Generar un retraso de fase π radianes entre las componentes ortogonales del campo eléctrico de una onda.
Analizador de polarización lineal (SP)	Separar la luz polarizada en dos haces linealmente ortogonales: el paralelo (ordinario) y el perpendicular (extraordinario) al eje del polarizador.
Dispositivos de Carga Acoplada (CCD)	Registrar los fotones de los dos haces, ordinario y extraordinario, colectados simultáneamente.

1.4 Justificación

La siguiente tesis está enfocada en la determinación del grado de polarización de la luz reflejada de los asteroides en función del ángulo de fase (Sol-Objeto-Tierra), consúltese figura 8. Esto permite determinar diferentes características

físicas como lo son: el albedo, el tamaño de grano y el índice de refracción del mineral que compone la superficie de éste.

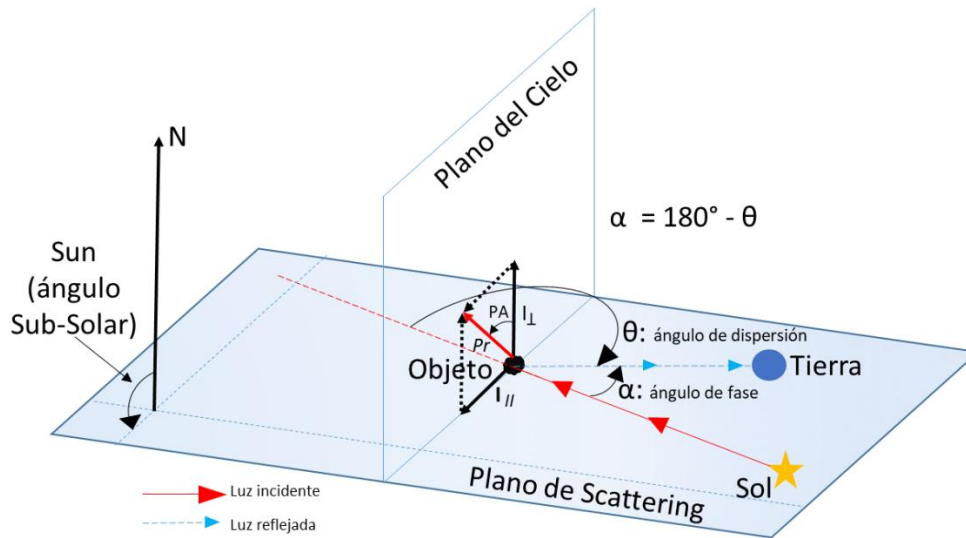


Figura 8. Diagrama tomado de Jorge Acosta (2020) Tesis de maestría, Valencia, España.

Las investigaciones sobre asteroides siguen vigentes ya que, por ser remanentes de la formación de nuestro Sistema Solar, su estudio permite descubrir indicios de la formación planetaria incluyendo la Tierra y los orígenes de la vida.

Diversos problemas en la correcta caracterización de asteroides se deben a las incertidumbres en la determinación del albedo geométrico. Por ejemplo, la medición del tamaño de un objeto depende inversamente de su albedo geométrico, que puede ser determinado con otras técnicas como la radiación térmica que proponen restricciones en el albedo con factores de 2 a 4, por basarse en un modelo, mientras la polarimetría permite medir un valor directo del albedo (Masiero J. , 2021).

Los impactos de asteroides con la Tierra han modificado el estado evolutivo del planeta y de la vida. Esta es otra razón para descubrir y caracterizar estos cuerpos ya que siguen siendo una amenaza para el planeta. La preocupación que genera una colisión de un asteroide hace que todo estudio sobre ellos

siga siendo prioridad. Como prueba de ello, en 2021 se lanzó la misión Double Asteroid Redirection Test (DART) que pretendía cambiar la trayectoria de un asteroide por medio de una colisión. En 2022 se completó y corroboró el cambio de trayectoria (Handal, 2021).

Es importante el estudio de asteroides desde la Tierra porque al ser objetos lejanos se complica visitarlos con misiones espaciales, además de que son cientos de ellos lo que implicaría muchas expediciones. Por esto, herramientas como la polarimetría hacen asequible la obtención de datos de estos objetos en forma general, para que las misiones espaciales se dediquen a objetos particulares.

Por otro lado, la minería espacial de los asteroides para obtener diversos recursos ha despertado tanto interés que ya se ha iniciado la legislación jurídica y ética al respecto. Lo anterior se puede consultar en los Tratados y principios de las Naciones Unidas sobre el espacio ultraterrestre que describe los principios que deben regir las actividades de los Estados en la exploración, utilización, investigación científica, apropiación, etc., (NACIONES UNIDAS, 2002).

1.5 Planteamiento del problema

Aunque POLIMA 2 es un instrumento que fue diseñado y fabricado para utilizarse en el telescopio de 84 cm del OAN-SPM, en verano de 2019, el instrumento se trasladó al OAGH con la idea de utilizarse en el telescopio de 2.1 m de Cananea Sonora. Esto permitió que el instrumento fuera utilizado en la campaña de polarimetría de asteroides que se reporta en este trabajo de tesis.

Debido a que el polarímetro POLIMA2 fue utilizado, tanto en el telescopio de 2.1 m del OAGH y en el 84 cm del OAN-SPM, es indispensable hacer una comparación en el desempeño instrumental y científico del polarímetro para definir la conveniencia de tener el instrumento en alguno de los mencionados telescopios el mayor tiempo posible. Para contar con argumentos de decisión

es indispensable comparar los resultados observacionales/científicos con las mismas metodologías de reducción y análisis.

Las muestras utilizadas en las observaciones fueron tomadas todas del catálogo del grupo de Ciencias Planetarias de la Universidad de San Juan en Argentina, en colaboración con Ricardo Gil-Hutton.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general

Comparar el desempeño del instrumento POLIMA 2 en el OAN-SPM y el OAGH a partir de la reducción y análisis de datos de polarimetría de asteroides adquiridos en campañas llevadas a cabo desde 2017 a 2022.

1.6.2 Objetivos específicos

- Llevar a cabo temporadas de observación en modo remoto en las fechas del tres al siete de febrero, del nueve al once de marzo y del tres al cinco de mayo del 2022 para capturar imágenes de asteroides.
- Procesar los datos de polarimetría de asteroides obtenidos en la campaña de observación 2022 en el OAGH para tener el porcentaje de error de polarización en cada cuerpo.
- Minimizar los errores de polarización de los objetos para tener calidad en los resultados.
- Obtener el ángulo de fase y la polarización de cada asteroide para poblar los huecos en las curvas de polarización-fase del *Catalogue of asteroid polarization curves* R. Gil-Hutton (2017).
- Comparar la eficiencia entre los datos obtenidos en OAGH y en campañas polarimétricas anteriores con POLIMA-2 en San Pedro Mártir para tener cómo parámetro el error en el grado de polarización para los siguientes trabajos que utilicen este instrumento.

1.7 Hipótesis

La mayoría de los datos del catálogo de Gil-Hutton fueron adquiridos con un instrumento similar a POLIMA 2 y un telescopio de clase 2 m pero en el hemisferio sur. Debido a esto esperamos que nuestros datos tengan una calidad comparable con los del catálogo. Además, entre los dos observatorios más importantes de México el OAN y el OAGH, con los telescopios de 84 cm y 2.1 m respectivamente, esperamos que la calidad de los datos sea superior en el OAGH debido al tamaño del telescopio y al seguimiento no sideral (que sigue al asteroide mientras que el de OAN sigue a la estrella), aunque la calidad de cielo sea sustancialmente menor.

1.8 Contenido

Se aborda en el capítulo 2 la descripción de un asteroide, así como el de otros cuerpos y fenómenos físicos relacionados. También se escribe sobre la historia de su descubrimiento, además se especifica en qué regiones se encuentran estos cuerpos y se expone su clasificación taxonomía. Con la intención de recordar el peligro que ocasionan los asteroides, se mencionan bombardeos de meteoritos que han provocado graves daños en los océanos y superficie terrestre. Por otro lado, se explica las razones por las que se considera a los meteoritos que han impactado la Tierra como las semillas de la vida. Otras definiciones mencionadas en este capítulo se refieren al albedo, albedo geométrico, la magnitud de las estrellas y de los asteroides.

La metodología presentada en el capítulo 3 describe la preparación para la noche de observación; se describe el proceso para tener al alcance los objetos disponibles en la fecha requerida, también se menciona el criterio para seleccionar los asteroides, se expone cómo fue el proceso en la observación remota y se explican los pasos para las reducciones polarimétricas.

En capítulo 4 se presentan los resultados por medio de tablas en las que se muestran los diferentes objetos observados, su ángulo de fase y su respectivo grado de polarización.

Por último, en capítulo 5 se mencionan las conclusiones.

II. MARCO TEÓRICO

Este capítulo se escribirá sobre la historia de los asteroides, su descubrimiento, la región donde se acumulan éstos objetos y se mencionará su clasificación ya sea, por su órbita o su composición. Lo siguiente, es mostrar un repaso de los desastres que han ocasionado los meteoritos en la Tierra. También se hablará de la propagación de la luz para entender del fenómeno de la polarización y se hará énfasis en los cristales birrefringentes que polarizan la luz. Por último, se describirá el catálogo de Grupo de Ciencias Planetarias donde los resultados de este trabajo contribuirán.

2.1 Asteroides

Johan Daniel Titius von Wittenburg, en 1766 desarrolló una ley que consiste en una sucesión matemática que enuncia la distancia media de un planeta al Sol basado en el orden del planeta. En la ley de Titius-Bode

$$Y = 0.4 + 0.3 (2^{n-1}) \quad (2.1)$$

Se indica que Y es la distancia media de cada planeta al Sol (en UA), $n=1,2,\dots,6$ es el orden del planeta. A Mercurio le corresponde $n=0$, $Y= 0.4$ (Curioca Gálvez, 2014).

Las predicciones de la ley se muestran en tabla II, donde aparecen los planetas con su respectiva distancia media al Sol, su valor real y el orden asignado. De la tabla, vemos que para los primeros 4 planetas la ley coincide, pero cuando avanzamos a Júpiter la ley no se ajusta con $n = 5$, pero si concuerda con $n=6$, por esto se creía que debía haber un planeta entre Marte y Júpiter.

Años después, en 1781, Willian Herschel descubre a Urano a 19.18 UA; por otro lado, la ley de Titius enuncia 18.6. Este suceso, le dio credibilidad a la sucesión y promovió la búsqueda del *planeta desconocido* (Curioca Gálvez, 2014).

Tabla II. Comparación de las distancias medias de planetas al Sol obtenidas con Ley de Titius y su valor real, modificado de María Karima Curioca (2014). (Curioca Gálvez, 2014).

Planeta	Distancia Media Planeta-Sol (UA)		n
	Ley de Titius-Bode	Valor real	
Mercurio	0.4	0.387	0
Venus	0.7	0.723	1
Tierra	1.0	1.000	2
Marte	1.6	1.524	3
¿?	2.8	-----	4
Júpiter	5.2	5.203	5
Saturno	10.0	9.539	6
Urano	19.6	19.18	7

En enero de 1801, Giuseppe Piazzi y su asistente Niccolò Cacciatore, en Palermo, Sicilia, observaron un objeto que a primera instancia creyeron era una *estrella*. Al observar que cambiaba de posición con el pasar de los días, concluyeron que habían descubierto un *planeta*. Pero, Franz Xaver von Zach en diciembre de 1802 recuperó el objeto y para 1802 se confirmó que se trataba del primer descubrimiento de un asteroide, Ceres (ahora considerado un planeta enano), ubicado en el Cinturón de asteroides (Cunningham C. J., 2021).

La ley de Titius indica que a 2.8 UA debe estar un cuerpo y Ceres está a 2.77 UA. Por esto, en un principio se creyó que era el *planeta escondido*, pero en 1802 Heinrich Olbers descubrió a Pallas, otro asteroide; posteriormente se encontraron cuerpos menores en la misma región y la idea del *planeta incógnito* se desvaneció. La ley no es válida para Neptuno, ya que está a 30.6 UA del Sol, pero la ley de Titius expresa, 38.8 UA (Curioca Gálvez, 2014).

El término asteroide (del griego “parecido a las estrellas”) fue acuñado por el astrónomo inglés, William Herschel (1738-1822) (Anders, 2001). De acuerdo, a la Resolución No. 5 de la Unión Astronómica Internacional los asteroides y

cometas con llamados “cuerpos menores del Sistema Solar” (American Astronomical Society., 2006).

Los asteroides son cuerpos rocosos o metálicos, sin atmósfera, de tamaño mucho menor a los planetas, que también tienen órbitas elípticas alrededor del Sol. Éstos varían en tamaño, desde Vesta (ubicado en el cinturón de asteroides) el más grande, con alrededor de 530 kilómetros de diámetro, hasta cuerpos que tienen menos de 10 metros de ancho. La masa total de todos los asteroides combinados es menor que la de nuestra Luna (NASA, 2021)

Ningún asteroide es igual, su forma varía, algunos de ellos son esféricos tienen cráteres, alrededor de 150 son acompañados por una pequeña luna y hay otros que se orbitan entre sí. Hay sistemas dobles de asteroides e inclusive triples. En concreto, el asteroide Dimorphos y Didymos orbitan mutuamente, aunque este último es más grande. Y en la figura 9 se muestra el sistema binario 2017 YE5.

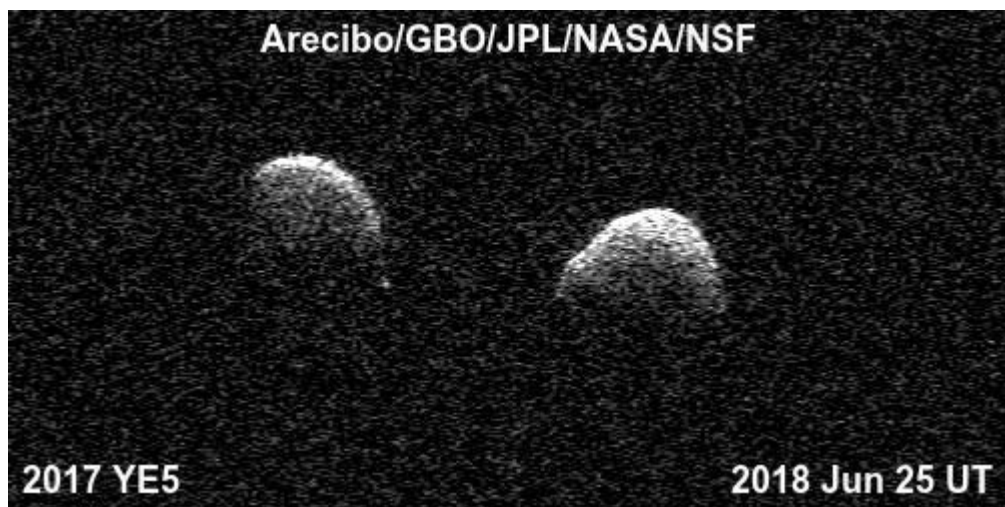


Figura 9. Sistema binario de asteroides. “Imágenes de radar biestático del asteroide binario 2017 YE5 del Observatorio de Arecibo y el Observatorio de Green Bank el 25 de junio.” (<https://www.jpl.nasa.gov/images/pia22559-bi-static-radar-images-of-the-binary-asteroid-2017-ye5>)

Del origen de los asteroides, muchos afirman que son cuerpos que no llegaron a formar un planeta, o bien que son producto de la fragmentación de objetos más grandes que se destruyeron entre sí por colisiones (Curioca Gálvez, 2014). Además, se teoriza que los asteroides son los restos que quedaron de

la formación temprana de nuestro Sistema Solar hace unos 4.600 millones de años (Planetary Science Communications, 2022).

2.1.1 Población de asteroides del Sistema Solar

El recuento actual [diciembre del 2022] de asteroides conocidos es:1,113,527 (Planetary Science Communications, 2022). En el Sistema Solar hay tres regiones espaciales donde se concentra la mayor cantidad de cuerpos menores: El Cinturón Principal de Asteroides, el Cinturón de Kuiper y la Nube de Oort. Pero también existen fuera de nuestro sistema; en 2017 fue descubierto el asteroide Oumuamua, que llamó la atención por su forma irregular semejante a un cigarro, mostrada en figura 10.

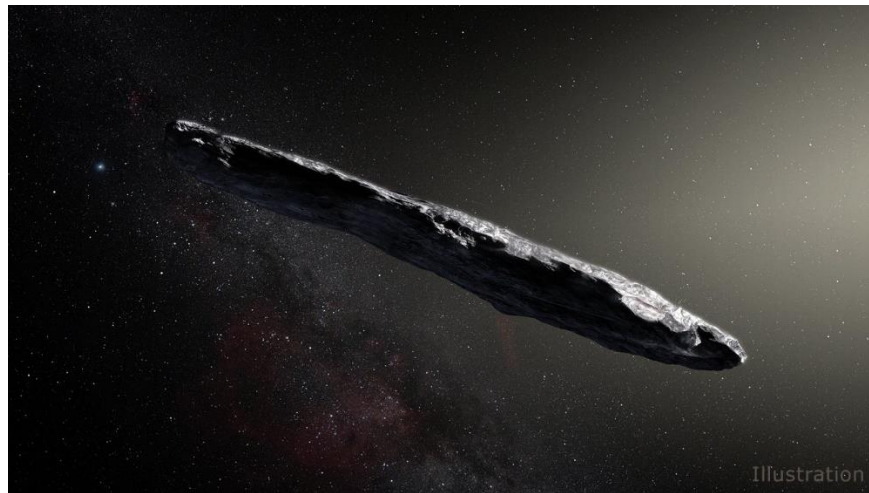


Figura 10. Concepto artístico del asteroide interestelar 1I/2017 U1 (Oumuamua) a su paso por el Sistema Solar después de su descubrimiento en octubre de 2017 (Cofield, 2018).

La gran mayoría de los asteroides se encuentran entre las órbitas de Marte y Júpiter en lo que se conoce como el Cinturón Principal de Asteroides, que contiene más de 200 asteroides de más de 100 kilómetros de diámetro; más de 1 millón de asteroides con diámetro mayor que 1 kilómetro de diámetro, y millones de pequeños asteroides que alcanzan el tamaño de una partícula de polvo. Sin embargo, el total de la masa de todos los asteroides en el Cinturón de Asteroides equivale sólo al 5 % de la masa de la Luna. La mitad de la masa

del cinturón está compuesta por cuatro cuerpos con diámetros de más de 400 km: Ceres, Vesta, Palas, e Higía (Curioca Gálvez, 2014).

Los asteroides estudiados en este trabajo pertenecen al Cinturón Principal de Asteroides, representado en figura 11.

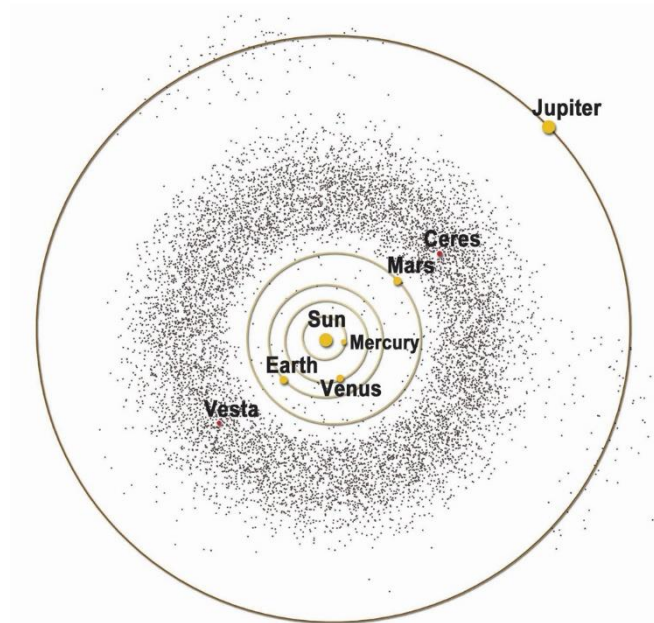


Figura 11. Gráfico artístico del Cinturón de asteroides (<https://solarsystem.nasa.gov/resources/2156/asteroid-belt/>).

Después de la órbita del planeta Neptuno se encuentra el Cinturón de Kuiper, un anillo que alberga objetos pequeños, antiguos y helados; se sospecha que conservan este estado desde la formación del Sistema. Su nombre es en homenaje al astrónomo Gerard Kuiper (1905 - 1973) por su predicción en cuanto que “podría haber existido un cinturón de cuerpos helados más allá de Neptuno cuando se formó el Sistema Solar” (NASA, 2020).

El más conocido de los cuerpos transneptunianos es Plutón, el planeta enano, anteriormente clasificado como planeta. En 2014, el astrónomo estadounidense, Marc Buie descubrió el planeta menor Arrokoth con el telescopio espacial Hubble. Su inusual forma de hombre de nieve llama la atención, véase en la figura 12.

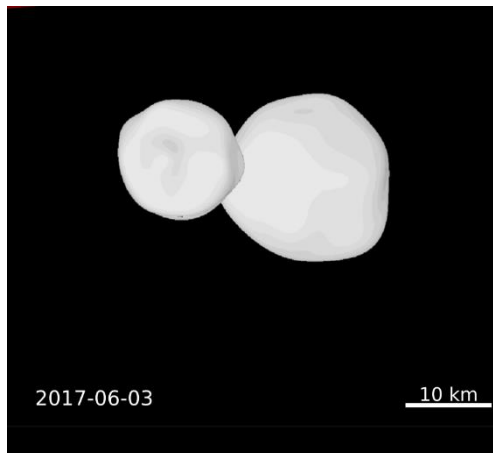


Figura 12. Proyección del objeto Arrokoth (2014 MU69) que se encuentra en el cinturón de Kuiper (Buie, 2020).

2.1.2 Troyanos

El nombre Troyano, se debe a los héroes de la guerra de Troya, descrita en la Iliada por Homero alrededor de 1400 A.C. Los Troyanos son un tipo de asteroide que ocupan las dos regiones del espacio conocidos como puntos Lagrangianos (en honor al matemático francés, Joseph-Louis Lagrange quien los descubrió en 1772) que se encuentran en las órbitas planetarias, denotados como: L_4 y L_5 . Cualquier objeto en estos puntos, 60 grados por detrás o por delante del planeta en su órbita, mantendrá su posición allí (aunque puede oscilar muchos grados desde el punto exacto) (Cunningham C. J., Where are the Asteroids?, 2021). Estos objetos son particularmente abundantes en la órbita de Júpiter, véase la figura 13.

El primer Troyano se descubrió en 1906, 588 Aquiles que mide 130 km, en el punto L_4 de la órbita joviana. Se estima que Júpiter tiene millones de troyanos orbitando. Mientras que, 2010TK₇ fue el primer Troyano conocido de la Tierra, mide alrededor de 150 a 500 m. Es hasta 2022 cuando se confirmó el segundo troyano del planeta, 2020XL₅. Hasta 2019, estas son las cantidades de troyanos encontrados en los demás planetas: Neptuno con 22, Urano con

2, Júpiter 7040, Marte 7 y Venus 1 (Cunningham C. J., Where are the Asteroids?, 2021).

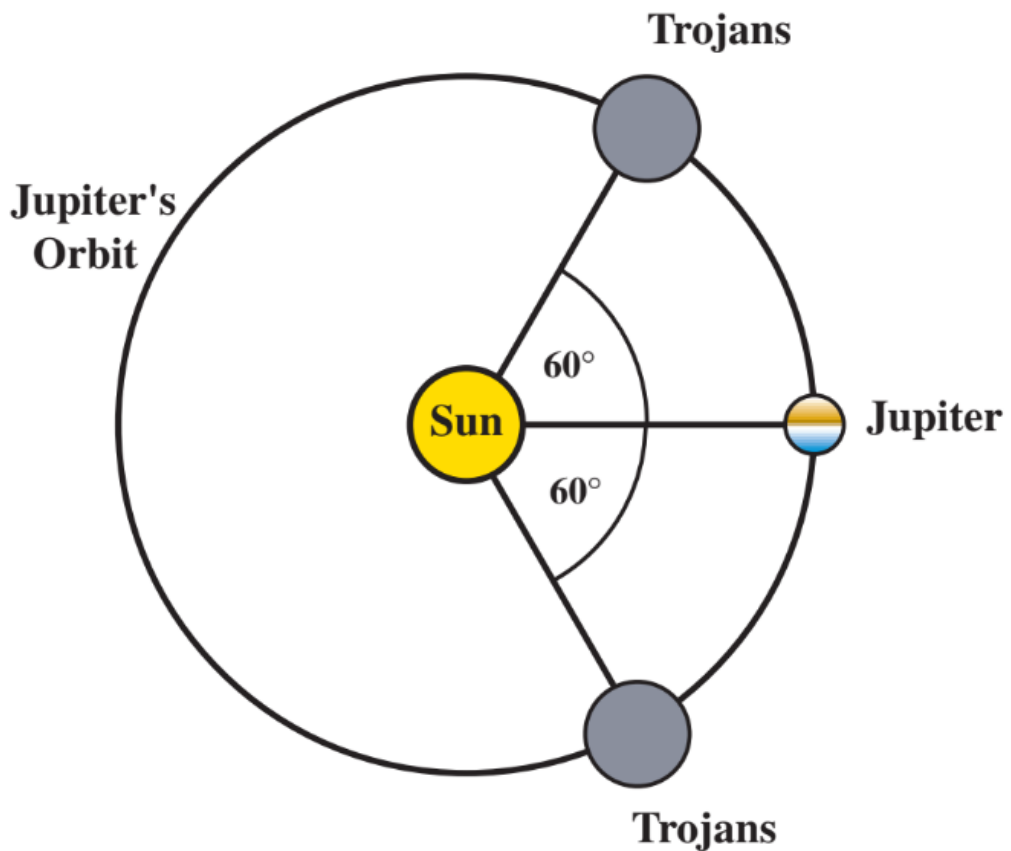


Figura 13. Ubicación de los troyanos y los puntos lagrangianos del sistema Júpiter- Sol (Kutner, 2003).

2.1.3 Clasificación de asteroides

Como ya se mencionó, en nuestro Sistema Solar la principal reserva de asteroides está en el Cinturón Principal, situado entre Marte y Júpiter. Existe también otra población de objetos cuyas órbitas cruzan el Sistema Solar interior, aproximándose a veces a la Tierra que se denominan Objetos Próximos a la Tierra, también conocidos como NEOs por el acrónimo anglosajón *Near Earth Objects*. Se conocen cerca de 6.000 NEOs, de los cuales 750 poseen un diámetro superior a un kilómetro (Rodríguez, 2013).

Los NEOs son asteroides y cometas con una distancia de perihelio, q , inferior a 1,3 AU. De este conjunto, los asteroides cercanos a la Tierra (*Near-Earth Asteroids*, NEAs) están clasificados de acuerdo con su órbita. Sus parámetros están basados en el perihelio y afelio que alcanza tal órbita con respecto al Sol (NASA, s.f.).

Definiendo el Perihelio, q , como la distancia en que la órbita del objeto está más cerca al Sol y de modo contrario, el Afelio, Q , es la distancia de la órbita en que el objeto está más alejado de nuestro astro, (consultar figura 14).

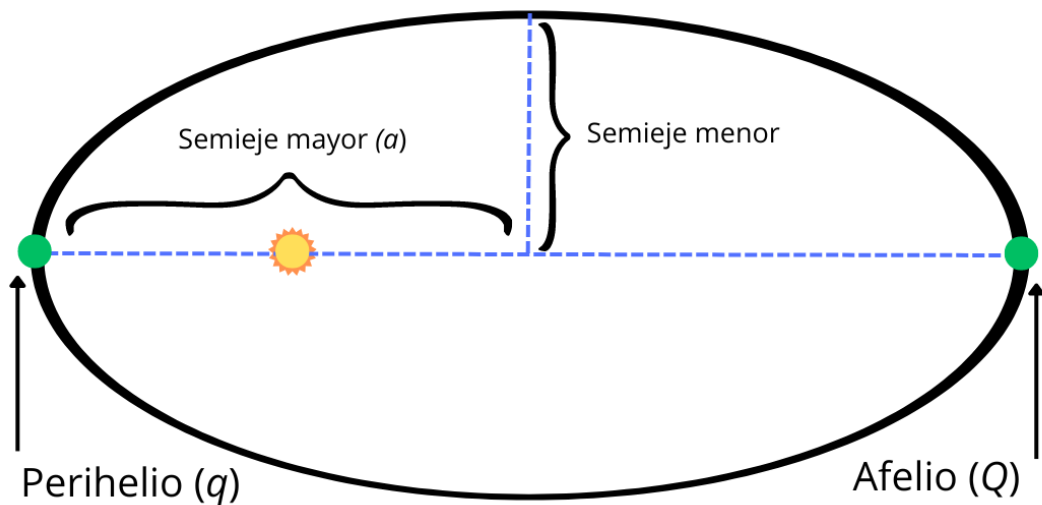


Figura 14. Perihelio y afelio de la órbita de un objeto en color verde.

Así mismo, el semieje mayor de la órbita también es una característica que define el grupo en que se clasifica el objeto. Éstos grupos son: Amor, Apolo, Atena, Atira y PHAs. A modo de ejemplo, los objetos del grupo Atena, son aquellos que tienen un semieje mayor, a , menor al existente entre la Tierra y el Sol, además de que su afelio es mayor al de la órbita terrestre.

Se aprecia en tabla III, las semejanzas compartidas por las órbitas, en particular el grupo de Amor y Apolo tienen semiejes mayores a 1AU, pero con el afelio mayor al terrestre. En cambio, las órbitas de Atena y Atira tienen el semieje mayor, menor a 1AU (1 AU= 149 597 870 700 metros), en otras

palabras, su semieje mayor es menor al semieje mayor de la Tierra y su perihelio es menor que el de nuestro planeta.

Tabla III. Clasificación de asteroides. (https://cneos.jpl.nasa.gov/about/neo_groups.html)

Grupo	Descripción	Definición
Amor	$a > 1.0 \text{ AU}$ $1.017 \text{ UA} < q < 1.3 \text{ AU}$	NEAs que se acercan a la Tierra con órbitas exteriores a la Tierra, pero interiores a Marte (llamado así por el asteroide 1221 Amor).
Apolo	$a > 1.0 \text{ AU}$ $q < 1.017 \text{ AU}$	NEAs que cruzan la órbita de la Tierra con ejes semi mayores más grandes que los de la Tierra (llamados así por el asteroide 1862 Apolo).
Atena	$a < 1.0 \text{ AU}$ $Q > 0.983 \text{ AU}$	NEAs que cruzan la órbita de la Tierra con semiejes mayores más pequeños que los de la Tierra (llamados así por el asteroide 2062 Atena).
Atira	$a < 1.0 \text{ AU}$ $Q < 0.983 \text{ AU}$	NEAs cuyas órbitas están contenidas enteramente con la órbita de la Tierra (llamada así por el asteroide 163693 Atira).
PHAs	$MOID \leq 0.05 \text{ AU}$ $H \leq 22.0$	Asteroides potencialmente peligrosos: NEAs cuya Distancia Mínima de Intersección de Órbita (MOID) con la Tierra es de 0.05 AU o menos y cuya magnitud absoluta (H) es 22.0 o más brillante.

En figura 15, están ilustradas las cuatro órbitas de los NEAs: la órbita de Amor, órbita de Apolo, órbita de Atena y la órbita de Atira. Dado que todas difieren, a continuación, se nombrará su peculiaridad:

- Órbita de Amor: su órbita es exterior a la órbita de la Tierra.
- Órbita de Apolo: su periodo orbital es mayor a un año.
- Órbita de Atena: su periodo orbital es menor a un año.
- Órbita de Atira: su órbita está dentro de la terrestre.

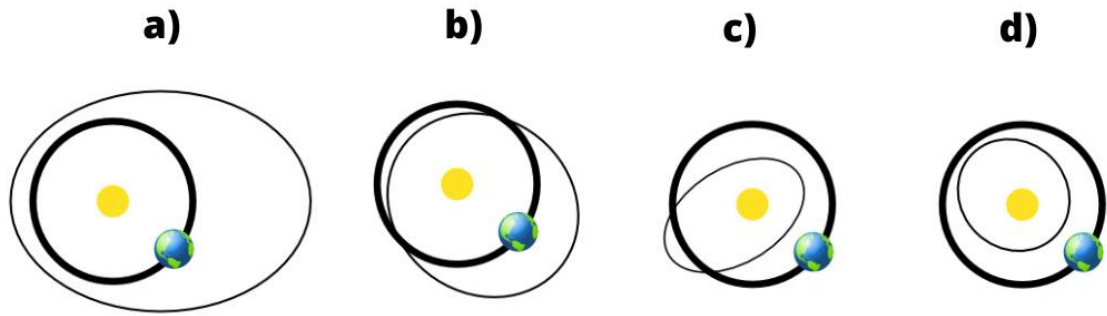


Figura 15. Órbitas de los NEAs: a) Órbita Amor, b) Órbita Apolo, c) Órbita Atena y d) Órbita Atira. (Ojeda Vera, 2019).

Los asteroides potencialmente peligrosos (PHAs, *Potentially Hazardous Asteroids*, en idioma inglés) son NEAs con tamaños considerables y que tienen órbitas cercanas a la de la Tierra, su distancia mínima de intersección de órbita (MOID) es 7.5 millones de kilómetros, mientras que la distancia mínima entre la Tierra y la Luna es 384 401 km (0.00257 AU) (International Astronomical Union, 2013). Una colisión en la Tierra generaría un daño grave. A modo de recordatorio, el 30 de junio se conmemora el día del asteroide.

La NASA clasifica a los NEOs como PHAs cuando son más grandes que 140 m y están a una distancia mínima de 7.4 millones de km (Cunningham C. J., *Explosions and impacts*, 2021).

En figura 16, se muestra que, hasta el 11 de marzo del 2023, han sido descubiertos asteroides: 30 del grupo Atira, 2461 pertenecen a Atena, 17 703 a Apolo, 11 210 a Amor. En total, son 31 404 NEAs de los cuales 10 402 son mayores a los 140 m; 2325 PHAs con 151 mayores de un km y 120 cometas cercanos a la Tierra (NECs Near-Earth comets).

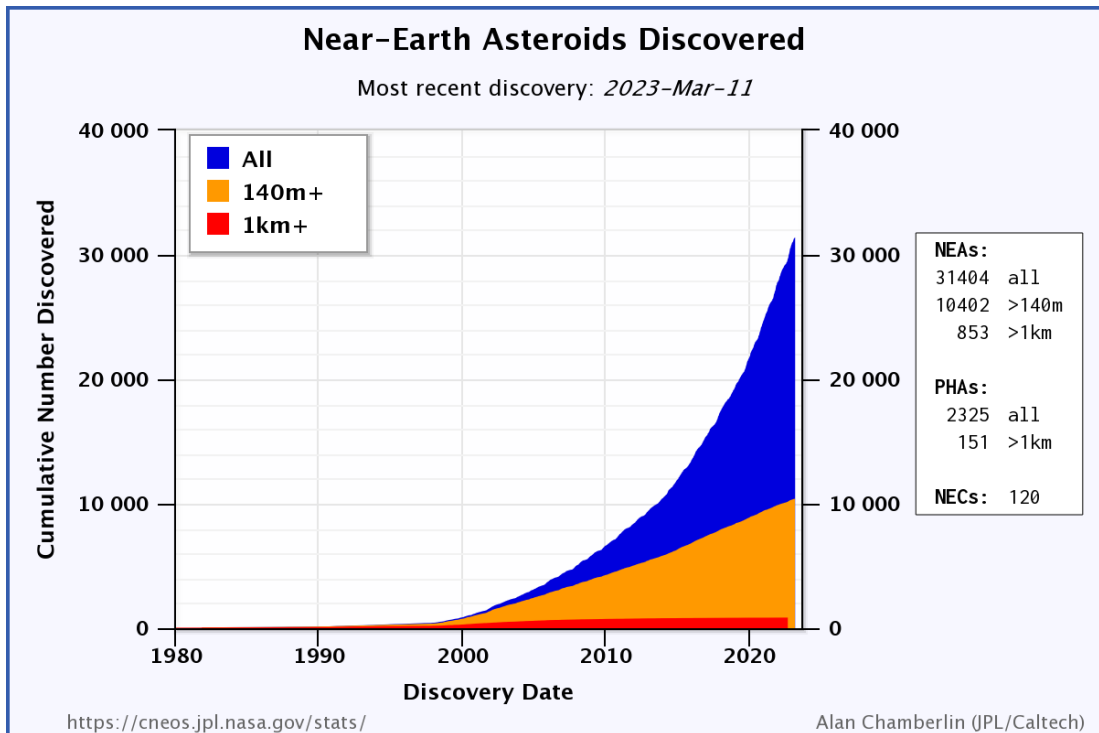


Figura 16. Número acumulado de asteroides cercanos a la Tierra ordenado por tamaño y fecha de descubrimiento por CNEOS (<https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/totals.html>).

2.1.4 Colisión de asteroides con la superficie de la Tierra

El 12 de octubre de 2017 un asteroide de 20 m pasó a 50 000 km de la Tierra, si bien en 2012 se descubrió, fue hasta el verano del 2017 que fue encontrado por el Very Large Telescope, en Atacama Chile, convirtiéndolo en el NEO más tenue detectado. El 25 de septiembre del 2017, un conjunto de telescopios que vigilan el cielo lo detectaron. Todo lo anterior demuestra, que la detección de un objeto dirigido a la Tierra proporciona pocas semanas para tomar medidas (Cunningham C. J., Explosions and impacts, 2021).

En una capa de sedimento que data de hace 12 800 años del hemisferio Norte, Venezuela, Chile y Antártica, científicos han encontrado esférulas que contienen platino, iridio, osmio y oro, que son metales raros en la Tierra, pero abundantes en los asteroides (Cunningham C. J., Explosions and impacts, 2021).

Cómo una medida preventiva hacia un asteroide que se acerca a la Tierra, se ha pensado en hacerlo explotar, pero tal acción tiene los siguientes inconvenientes: los fragmentos seguirían siendo una amenaza para nosotros, por ejemplo, una simulación en 2019 realizada por *Planetary Defense Conference* sobre un objeto con posibilidad del 100 % de golpear la Tierra, a modo de respuesta se enviaron 6 impactadores cinéticos, que dio como resultado el desvío del cuerpo, pero un pedazo se dirigió a la Tierra y destruyó New York; se conoce la densidad de pocos asteroides, pero no se tiene el conocimiento de su estructura interna, por ello la energía considerada para hacerlo explotar es una incógnita (Cunningham C. J., *Explosions and impacts*, 2021).

De los más de 20 000 NEOS conocidos, 2 100 son potencialmente peligrosos. De estos 150 son más grandes que 1 km. Es de conocimiento que el impacto de un asteroide en la superficie oceánica fue el responsable de la extinción de gran parte de la vida en la Tierra, en su mayoría de dinosaurios, dicho suceso ocurrió en la península de Yucatán, México. Si bien, el evento ocurrió hace 66 millones de años, en años recientes siguen ocurriendo. Por ejemplo, una colisión conocida como el impacto de Younger Dryas fue causada por el fragmento de un cometa o asteroide que golpeó la Tierra hace 12 800 años, fue tanto el desastre que se estima desencadenó la extinción de flora y fauna (Cunningham C. J., *Explosions and impacts*, 2021).

El 18 de diciembre de 2018, la Tierra recibió la alerta de que objetos peligrosos pueden colisionar con ella, sin previo aviso, en el mar de Bering explotó un meteorito a 25,6 km de altura con un equivalente a 10 veces la energía liberada en la bomba de Hiroshima. Por fortuna, el objeto cayó en el mar y no ocasionó daños, pero en 2013, en Rusia explotó un objeto de 20 m siendo una explosión más grande y dejando a más de 1 000 personas heridas. Objetos de esta magnitud se esperan 3 veces cada siglo, pero colisiones recientes muestran que la frecuencia de los impactos es mayor de lo que se creía.

2.1.5 Meteoritos y la vida en la Tierra

El estudio de las propiedades de los meteoritos y asteroides ha llevado a descubrimientos importantes. Uno de ellos, ha sido obtener una mejor estimación de la edad de la Tierra basado en técnicas geológicas; revelando una edad de 4.5 miles de millones de años (Cunningham C. J., Explosions and impacts, 2021).

El Nitrato (NO) es una forma de Nitrógeno (N), este elemento está directamente relacionado con la formación de vida; por esto fue una sorpresa cuando el Rover Curiosity en 2015, encontró grandes cantidades de Nitrato en el cráter Gale en Marte; la explicación de ello se dedujo por el Dr. Rafael Navarro González y su equipo en un experimento que consistió en simular la atmósfera primitiva de Marte integrando impactos de asteroides. En dicho experimento se recreó su atmósfera con hidrógeno y se simularon los impactos con láser, el resultado fue una mayor producción de nitratos (Cunningham C. J., Explosions and impacts, 2021).

Otro compuesto importante para el desarrollo de vida en la Tierra es el agua; al estudiar el meteorito Flensburg que cayó en Alemania en 2019, científicos se dieron cuenta que contiene minerales que sólo pueden formarse en presencia de agua líquida, debido a esto se piensa que los meteoritos fueron una posible fuente de agua en el pasado. Por todo lo anterior, se teoriza que los impactos de asteroides contribuyen en los procesos para la creación de las sustancias que dan origen a la vida (Cunningham C. J., Explosions and impacts, 2021).

2.1.6 Composición de asteroides

Los asteroides se clasifican en clases taxonómicas de acuerdo con el albedo junto con el espectro de reflectancia en las longitudes onda visible e infrarrojo cercano. Los principales medios para extraer información referente a su composición son vía remota por espectroscopia, para algunos objetos se

tienen sus espectros de reflexión en longitudes de onda visibles e infrarrojo cercano, otros espectros en infrarrojo y datos de radar (de Pater & Jack, 2010).

A continuación, en tabla IV, se muestran la clasificación de asteroides y se mencionan con mayor detalle los del tipo C, S y M debido a que son los grupos de mayor congregación de asteroides.

La clase C, son los asteroides carbonáceos también llamados ‘primitivos’ por ser de los más antiguos del Sistema Solar, se estima que alrededor del 40% de los asteroides conocidos son de este tipo. Son cuerpos oscuros que usualmente tienen albedos geométricos $A_o \sim 0.04 - 0.06$. Ceres es el más grande de este grupo y contiene agua (de Pater & Jack, 2010).

La clase S, son los asteroides rocosos que representan el 30-35% de los conocidos. Son cuerpos brillantes rojizos con albedo geométrico $A_o \sim 0.14-0.17$. El tipo S tiene bandas de absorción de $1-2 \mu m$ que sugiere hierro y silicatos portadores de magnesio. Además, estos asteroides contienen Níquel. De estos cuerpos, hay posibilidad de que estén cristalizados debido a un derretimiento (de Pater & Jack, 2010).

La clase M, son los asteroides que no presentan bandas de absorción de silicatos y están compuestos por Hierro-Níquel metálico. Su albedo geométrico es $A_o \approx 0.1 - 0.2$ (de Pater & Jack, 2010).

Tabla IV. Tipos taxonómicos de asteroides, modificado de Pater & Jack, 2010.

Clases con albedos bajos ($A_o < 0.1$)	
C	Asteroides carbonáceos dominantes en el cinturón exterior a más de 2.7 UA. Subclase B, F y G.
D	Troyanos que se encuentran en el extremo del cinturón exterior, posee un espectro rojizo sin características probablemente por material orgánico.
P	Troyanos y del cinturón exterior extremo. Son como los del tipo M, pero con un albedo más pequeño.
K	Coinciden con los meteoritos del tipo C, V y CO.
T	Raros y de composiciones desconocidas

Clases con albedos	moderados ($0.1 < A_o < 0.3$)
S	Asteroides rocosos. Son la mayor clase en el cinturón central interior.
M	Asteroides de hierro rocoso, con espectros rojizos planos sin características.
W	Asteroides como el tipo M, pero presentan una banda de absorción cerca de $3\mu m$ indicativa de hidratación.
Q	Corresponden a meteoritos de condritas ordinarios.
A	Espectro muy rojizo cercano a $0.7\mu m$. Característica de absorción fuerte cercano a $1\mu m$.
V	Característica de absorción fuerte $<0.7\mu m$ y cercano a $1\mu m$ como las acondritas basálticas.
R	Tiene un espectro intermedio entre las clases A y V. Similar a acondrita rica en olivino.
Clases de albedos	altos $A_o > 0.3$
E	Asteroides de enstatita. Concentrados en el borde interior del cinturón con un espectro plano y un poco rojizo sin características.
X	En el espectro visible como los tipos P, M y E, pero tiene bandas de absorción en 0.49 y $0.60 \mu m$.

Los TNOs, al estar alejados del Sol han sufrido un menor procesamiento térmico, éstos contienen 50% hielo y 50% roca. Por lo anterior, los asteroides son objetos pequeños compuestos de silicatos o metales (Cunningham C. J., 2021).

2.2 Ley de reflexión

Cuando un rayo de luz incide de un medio cuyo índice de refracción es n_i hacia otro medio con índice de refracción n_r y refleja totalmente su luz, se le conoce como ley de reflexión (Jenkins & White, 2001). Partiendo de la normal, cada que el ángulo incidente aumenta el ángulo reflejado incrementa en la misma cantidad, es decir, que el ángulo incidente θ_i es igual al ángulo reflejado θ_r .

$$\theta_i = \theta_r \quad (2.2)$$

2.3 Ley de refracción

Willebrord Snell (1591-1626) fue un astrónomo y matemático que en 1621 descubrió empíricamente la ley de refracción o también conocida como ley de Snell. Esta ley, proclama que, al incidir un rayo sobre una interfaz, a un ángulo diferente de cero, el rayo se refractará con un ángulo diferente al ángulo incidente. Es Descartes (1596-1650) el primero en representar la ley en términos de senos (Hecht E. , 2000). Sea

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = \frac{n_t}{n_i} \quad (2.3)$$

Se agrega que, el desvío del rayo transmitido depende del medio, es decir, del índice de refracción n_t ; a un mayor n_t el haz refractado se acerca más a la normal, ver figura 17.

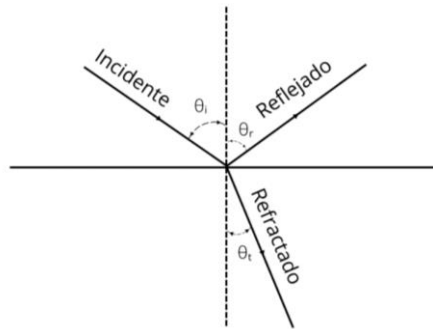


Figura 17. Ilustración de las leyes de reflexión y refracción, modificada de *Introduction of Optics*, Pedrotti 1993.

2.4 Ecuaciones de Fresnel

Las ecuaciones de Fresnel describen la porción de energía incidente que es reflejada y transmitida, cuando una onda electromagnética incide sobre una superficie que separa dos medios con diferentes índices de refracción. Éstas ecuaciones dependen del ángulo de incidencia, los índices de refracción de los materiales y de la polarización de la onda electromagnética.

Se presentan las ecuaciones para cada modo de polarización; el modo TE o transversal eléctrico es donde el campo eléctrico oscila de manera perpendicular al plano de incidencia (formando un ángulo de 90° con dicho plano), mientras que el campo magnético se encuentra confinado al plano.

Por otro lado, el modo TM o transversal magnético, se produce cuando el campo magnético se encuentra oscilando perpendicular al plano de incidencia y el campo eléctrico oscila dentro del mismo plano. Véase la figura 18 para el modo transversal eléctrico (Pedrotti & Pedrotti, 2019).

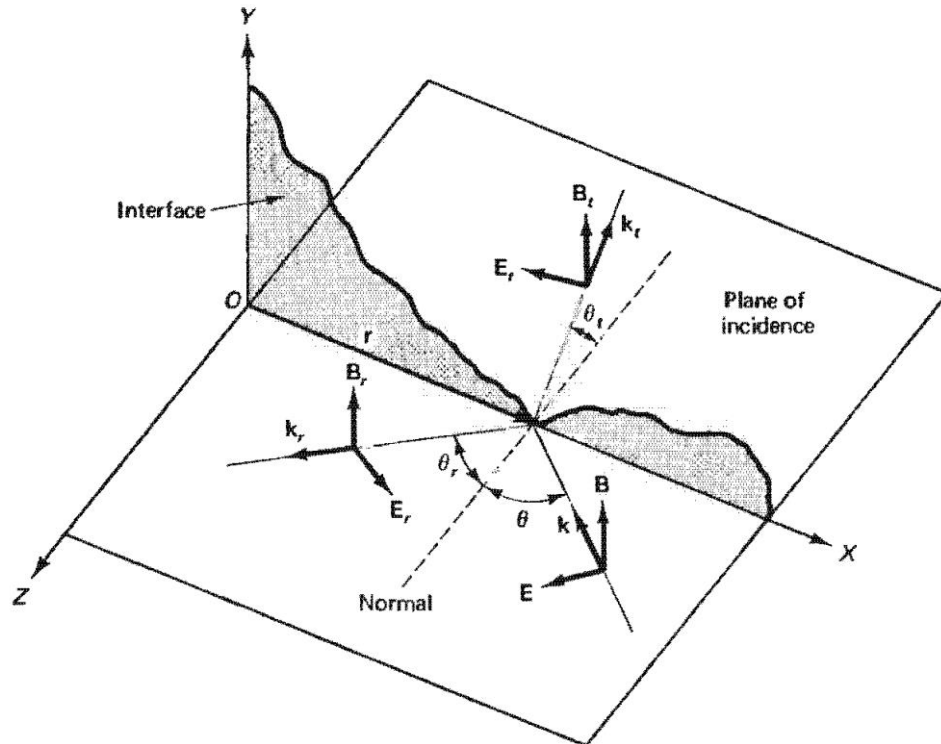


Figura 18. Diagrama del plano de incidencia donde se muestran los rayos: incidente, reflejado y transmitido, con sus respectivos campos electromagnéticos. El diagrama indica el caso del modo transversal eléctrico, se puede ver como su campo eléctrico oscila fuera del plano de incidencia.

A continuación, se presentan las ecuaciones de Fresnel para los diferentes modos de polarización.

Los coeficientes de reflexión:

$$r_{TE} = \frac{E_r}{E} = \frac{\cos\theta - \sqrt{n^2 - \text{sen}^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{n^2 - \text{sen}^2\theta}}; \quad (2.4)$$

$$r_{TM} = \frac{E_r}{E} = \frac{n^2 \cos\theta - \sqrt{n^2 - \text{sen}^2\theta}}{n^2 \cos\theta + \sqrt{n^2 - \text{sen}^2\theta}}; \quad (2.5)$$

donde $n = \frac{n_2}{n_1}$ es el índice de refracción relativo.

Los coeficientes de transmisión:

$$t_{TE} = \frac{E_t}{E} = \frac{2 \cos \theta}{\cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}; \quad (2.6)$$

$$t_{TM} = \frac{E_t}{E} = \frac{2n \cos \theta}{n^2 \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}. \quad (2.7)$$

Los coeficientes de transmisión y reflexión cumplen las siguientes relaciones:

$$t_{TE} = 1 + r_{TE}; \quad (2.8)$$

$$n t_{TM} = 1 + r_{TM}; \quad (2.9)$$

debido a que los coeficientes están normalizados respecto a la intensidad de la onda incidente.

2.5 Polarimetría

El vector que define al campo eléctrico de la luz polarizada “dibuja” una figura geométrica en el plano perpendicular al eje de propagación de la luz (en el vacío o en un medio dieléctrico), esta figura es el estado de polarización, por ejemplo: lineal, circular o elíptico.

Cuando la luz no polarizada es esparcida por una superficie áspera, por una nube de gas, partículas o cristales, se vuelve parcialmente polarizada. El plano de esparcimiento es el que contiene el haz incidente y el haz reflejado, por lo tanto, la polarización lineal puede ser paralela (I_{II}) o perpendicular (I_T) a este plano. Si la luz reflejada tiene intensidades I_T e I_{II} polarizadas en los planos normal y paralelo al plano de esparcimiento, cómo mostramos en figura 8, el grado de polarización se define como:

$$P = \frac{I_T - I_{II}}{I_T + I_{II}}. \quad (2.10)$$

Por lo general, se encuentra que P varía con el ángulo α entre los rayos incidente y de observación, generalmente conocido en astronomía como el ángulo de fase. Además P puede tener valores positivos o negativos (Shirley & Fairbridge, Polarimetry, 2000). A la metodología que se sigue para obtener

el grado de polarización (P) le llamamos polarimetría, y en el caso de que la onda electromagnética se encuentre en el rango visible se le puede nombrar *polarimetría óptica*.

Para objetos sin atmósferas como Mercurio, la Luna, asteroides, los satélites de Galileanos y los anillos de Saturno y pequeños satélites la polarimetría óptica permite la caracterización de la superficie sólida. Para planetas con atmósferas como Venus, Júpiter y Saturno la polarimetría permite caracterizar la turbidez de la atmósfera gaseosa, los aerosoles, las nubes y su comportamiento (Shirley & Fairbridge, Albedo, 2000).

Por otro lado, se obtiene la polarización (en %) y el ángulo de posición (en grados) referidos a la normal al plano de scattering (plano Sol-Objeto-Tierra mostrado en figura 8) de la siguiente manera:

$$\theta = obs - (sun - 90), \quad (2.11)$$

donde *obs* es ángulo de posición observado respecto al punto cardinal norte (en grados) y *sun* es ángulo de posición del plano de scattering respecto al punto cardinal norte (en grados).

$$p = pol * \cos\left(\frac{2\theta\pi}{180}\right), \quad (2.12)$$

Donde *pol* es modulo del vector de polarización observado (en %).

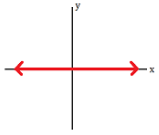
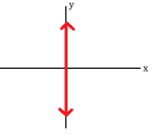
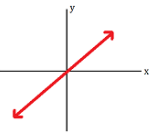
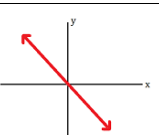
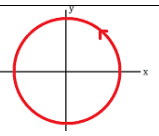
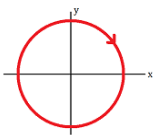
2.6 Parámetros de Stokes

El mérito por los parámetros de Stokes se le debe a G. G. Stokes quién en 1852 presentó las cuatro entidades que son funciones solamente de las observables de la onda electromagnética (Hecht E. , 2000). Los parámetros de Stokes describen el estado de polarización de un haz de luz, ya sea natural total o parcialmente polarizada; éstos son: I, Q, U y V. Cada uno de la serie de parámetros bajo la iluminación natural transmitirá la mitad de la luz incidente, descartando la otra mitad (Hecht E. , 2000).

De los parámetros podemos decir que: I es isótropo, pasando por todos los estados de igual manera; Q, U y V son polarizadores lineales cuyos ejes de

transmisión son horizontales y a 45°, además que el signo indica la orientación y el sentido de rotación; V es un polarizador circular. Si se desea describir en la serie de parámetros (I,Q,U,V) la luz natural en la representación normalizada sería (1,0,0,0) ya que todo el flujo de luz transita. A continuación, se muestra la tabla V con los vectores de Stokes y su respectivo estado de polarización (Hecht E. , 2000).

Tabla V. Estados de polarización con su respectivo vector de Stokes.

Estado de polarización	Vector de Stokes	
Luz natural	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	
Estado polarización lineal horizontal	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	
Estado polarización lineal vertical	$\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	
Estado polarización lineal a +45°	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	
Estado polarización lineal a -45°	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}$	
Estado circular	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	
Estado circular	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$	

En este trabajo, se utilizaron los parámetros de Stokes para medir la polarización de la luz y para hacerlo se requiere medir los parámetros Q y U. Los estados Q y U de la polarización fraccional se obtienen de la siguiente forma:

$$q = \frac{Q_1+Q_2}{I_1+I_2} = \frac{1}{2} \left(\frac{f_{Q1p} - f_{Q2p}}{f_{Q1p} + f_{Q2p}} - \frac{f_{Q1n} - f_{Q2n}}{f_{Q1n} + f_{Q2n}} \right), \quad (2.13)$$

Y

$$u = \frac{U_1+U_2}{I_1+I_2} = \frac{1}{2} \left(\frac{f_{U1p} - f_{U2p}}{f_{U1p} + f_{U2p}} - \frac{f_{U1n} - f_{U2n}}{f_{U1n} + f_{U2n}} \right), \quad (2.14)$$

Donde f es la señal en una imagen y los subíndices p y n se refieren a las imágenes positivas (norte) y negativa (sur), respectivamente. La fracción de polarización q y u son equivalente a Q/I e U/I , respectivamente, sin suponer que el "seeing" o la extinción son constantes entre las imágenes (Masiero J. , 2007).

A continuación, se mostrará el cálculo para conseguir: el grado de polarización junto con el ángulo de polarización, además la propagación de errores de la polarización y el ángulo de polarización; lo siguiente es sustraído de Íñiguez (2014).

El flujo de los objetos puede ser determinado a partir de dos estados ortogonales de polarización lineal:

$$f_1 = f_{Q1p} + f_{Q1n} \quad , \quad (2.15)$$

$$f_2 = f_{Q2p} + f_{Q2n} \quad , \quad (2.16)$$

$$f_3 = f_{U1p} + f_{U1n} \quad , \quad (2.17)$$

$$f_4 = f_{U2p} + f_{U2n} \quad , \quad (2.18)$$

Donde f_1 refiere a la imagen a un ángulo de 0° , f_2 a la imagen a 45° , f_3 a la imagen a 22.5° y f_4 para la imagen a 67.5° ; de modo que el flujo total de la estrella es la suma del flujo del objeto positiva y negativa.

El promedio del flujo de las imágenes es el flujo instrumental, f :

$$f = \frac{(f_1+f_2+f_3+f_4)}{4} \quad , \quad (2.19)$$

El ruido o la incertidumbre en la medición de cada flujo o número de cuentas de un objeto, N_{objeto} es

$$\sigma_f = \sqrt{N_{objeto} + 2N_{cielo}} \quad , \quad (2.20)$$

Donde N_{objeto} es el número de cuentas del objeto y N_{cielo} es el número de cuentas del cielo. El factor 2 surge del hecho que estamos obligados a observar el cielo dos veces: objetos+cielo en la primera apertura y el cielo por separado ($N_{objeto} = N_{objeto+cielo} - N_{cielo}$).

La propagación de los parámetros de Stokes normalizados está representada de manera general por:

$$\sigma_q^2 = \left[\frac{2f_{Q2p}}{(f_{Q1p}+f_{Q2p})^2} \sigma_{f_{Q1p}} \right]^2 + \left[\frac{2f_{Q1p}}{(f_{Q1p}+f_{Q2p})^2} \sigma_{f_{Q2p}} \right]^2 + \quad (2.21)$$

$$\left[\frac{2f_{Q1n}}{(f_{Q1n}+f_{Q2n})^2} \sigma_{f_{Q2n}} \right]^2 + \left[\frac{2f_{Q2n}}{(f_{Q1n}+f_{Q2n})^2} \sigma_{f_{Q1n}} \right]^2 \quad ,$$

y

$$\sigma_u^2 = \left[\frac{2f_{U2p}}{(f_{U1p}+f_{U2p})^2} \sigma_{f_{U1p}} \right]^2 + \left[\frac{2f_{U1p}}{(f_{U1p}+f_{U2p})^2} \sigma_{f_{U2p}} \right]^2 + \quad (2.22)$$

$$\left[\frac{2f_{U1n}}{(f_{U1n}+f_{U2n})^2} \sigma_{f_{U2n}} \right]^2 + \left[\frac{2f_{U2n}}{(f_{U1n}+f_{U2n})^2} \sigma_{f_{U1n}} \right]^2 \quad ,$$

Donde σ_{f_x} son los errores en los flujos f_x para cada imagen donde $x = U1p, U1n, Q1p, Q1n, etc.$

Finalmente, el grado de polarización lineal, p , se calcula con la normalización de los parámetros q y u :

$$p = \sqrt{q^2+u^2} \quad , \quad (2.23)$$

mientras que, el ángulo de polarización se muestra en función de los parámetros de Stokes q y u :

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{u}{q}\right) , \quad (2.24)$$

por otro lado, el error en la polarización, σ_p es

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma_q^2 + \sigma_u^2} , \quad (2.25)$$

y el error del ángulo de polarización es

$$\sigma_\theta = \sqrt{\left[\frac{q}{2(q^2+u^2)} \sigma_u\right]^2 + \left[\frac{u}{2(q^2+u^2)} \sigma_q\right]^2} , \quad (2.26)$$

es decir, que σ_q y σ_u , son la incertidumbre de q y u .

2.7 Birrefringencia

Las sustancias cristalinas son sólidos con átomos dispuestos de forma regular en series repetitivas, pero, en algunos sus propiedades ópticas no son las mismas en todas las direcciones, son anisótropas y éstos materiales son conocidos como cristales birrefringentes. Un material birrefringente exhibe dos índices de refracción, es decir, el cristal birrefringente separa el haz de incidencia en dos haces con polarizaciones ortogonales, uno de ellos se conoce como el haz ordinario (o) y el otro, como el haz extraordinario (e) (Hecht E. , 2000).

En 1669, el Dr. en medicina Erasmus Bartholinus descubrió un nuevo fenómeno óptico en la calcita, que llamó *doble refracción*. La calcita o carbonato de calcio ($CaCO_3$) es el cristal birrefringente más común encontrado en la naturaleza, por tal motivo, es históricamente el material predilecto para la construcción de polarizadores y actualmente es encontrado en instrumentos astronómicos. (Kolokolova, J., & A., 2015).

Polima-2 está basado en las propiedades de cristales birrefringentes, para ser exactos, la placa de Savart está formada por dos piezas de calcita. La primera

pieza separa el rayo incidente en el haz ordinario y el extraordinario; la segunda pieza de calcita se coloca a 90° de manera que, el haz ordinario se convierte en extraordinario y viceversa. Luego de salir del arreglo de calcita los rayos ordinario y extraordinario siguen un camino óptico paralelo entre ellos con una separación de aproximadamente 0.600 mm a 633 nm (Íñiguez, 2014). La figura 19 muestra el camino óptico de los rayos ordinario y extraordinario.

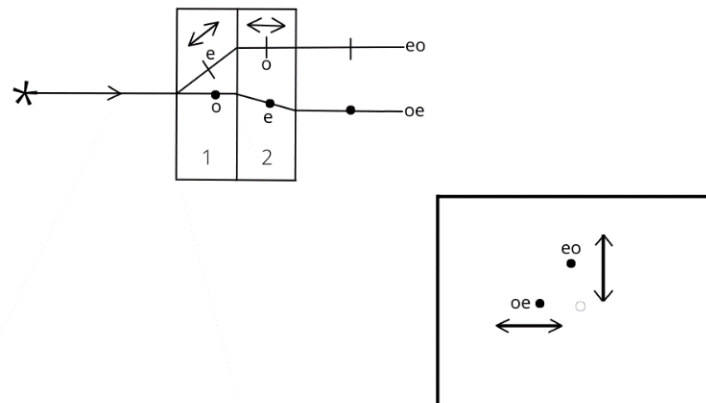


Figura 19. Camino óptico de rayos Ordinario (o) y Extraordinario (e). En el primer diagrama el haz incidente se separa en el e y o al entrar en la pieza de calcita, al entrar en la segunda pieza de calcita el haz e se convierte en el o y el o en el e. El haz eo y oe (de la derecha) están desplazados en direcciones ortogonales a la dirección del haz incidente (punto blanco). Editado de Tesis maestría 2014 de Iñiguez Elisa y Kolokolova 2015

2.8 Albedo

En astronomía y ciencias atmosféricas el albedo se refiere a *la proporción de la luz solar que incide sobre un elemento de la superficie de un objeto que se refleja de nuevo difusamente en él*. La luz solar no reflejada será absorbida y calentará la superficie en cuestión, ya sea un planeta, un asteroide o un satélite. Así, el albedo es la relación entre la radiación reflejada y la radiación electromagnética entrante. Si se refleja el 50% de esa radiación, el albedo principal se indica como 0.5. Una sustancia blanca está cerca de 1.0, mientras que una superficie negra no reflectante se acerca a cero (Shirley & Fairbridge, Albedo, 2000).

En la superficie del planeta Tierra se encuentran diferentes materiales que poseen una amplia gama de albedos. Por ejemplo, la nieve es de 0.4 a 0.85 y las nubes son similares, de 0.4 a 0.8. El albedo total de la Tierra promedia alrededor de 0.39, pero es una variable que cambia constantemente debido a factores tales como las nubes, la humedad del suelo, la vegetación, el océano (estado del mar), el hielo marino, la nieve, glaciares, por mencionar algunas (Shirley & Fairbridge, Albedo, 2000).

En la tabla VI, se muestra que los planetas rocosos o cubiertos de desierto absorben la mayor parte de la radiación entrante (0.06-0.15), mientras que los cubiertos de nubes o gas la reflejan en mayor proporción (0.15-0.76), de esto podemos agregar, que el albedo cambia con respecto a la composición del cuerpo. Artificialmente, se han logrado mezclar sustancias para conseguir albedos muy cercanos a cero; la pintura Musou Black absorbe hasta el 99.4% de la luz visible (Korogi, 2020). Además de ver el albedo de los planetas del Sistema Solar y la Luna en tabla VI, también se observa el de los asteroides más grandes: Ceres, Pallas, Juno (Shirley & Fairbridge, Albedo, 2000).

Tabla VI. Albedo aproximado de diferentes cuerpos del Sistema Solar (Shirley & Fairbridge, Albedo, 2000).

Cuerpo	Albedo
Mercurio	0.06
Venus	0.76
Tierra	0.39
Marte	0.15
Júpiter	0.51
Saturno	0.50
Urano	0.66
Neptuno	0.62
Luna	0.07
Ceres	0.06
Pallas	0.07
Juno	0.12

2.9 Albedo geométrico

Se le llama albedo geométrico a la razón de radiación reflejada por un objeto en ángulo fase cero y un radiador lambertiano plano también a cero grados de fase. Cuando el ángulo de fase es aproximado a cero, conocido como oposición, el objeto se vuelve más brillante (de Pater & Lissauer, Planetary Sciences, 2010).

En la figura 20, el esquema muestra que la radiación emitida por el Sol es reflejada por el objeto y observado desde la Tierra. También, se muestra el efecto de oposición.

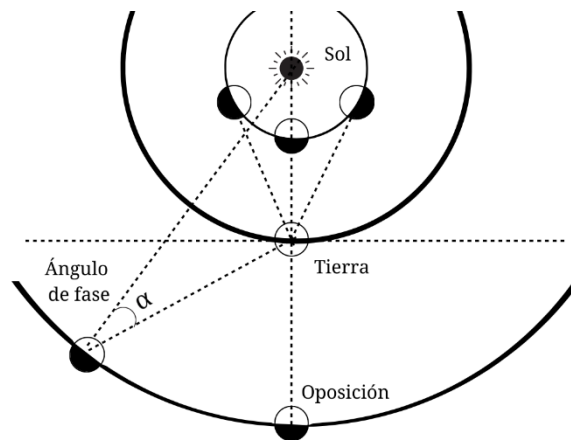


Figura 20. Ángulo de fase comprendido entre Sol-Objeto-Asteroide, adaptado de Ojeda Vera, 2019.

Para TNOs el albedo geométrico es determinado más directamente debido a que por sus distancias lejanas el ángulo de fase se aproxima a cero. En cambio, en los NEOs, su cercanía con la Tierra permite estudiar el albedo en un mayor rango de ángulos de fase (de Pater & Lissauer, Radius and Albedo).

2.10 Magnitudes

Hiparco de Nicea (190 a.c. a 120 a.c.) es un astrónomo, geógrafo y matemático griego, quien en el siglo II a.c. realizó la primera clasificación de estrellas de acuerdo con su brillo *aparente*. La clasificación se basa en el brillo percibido por el ojo humano al ver al cielo. Ésta alberga seis magnitudes: en la primera están las estrellas que brillaban más; de segunda magnitud las de

menor brillo comparadas a la primera y continua hasta llegar a magnitud seis, en ella se encuentran las estrellas más tenues. He de mencionar, que la estrella que más brilla en su constelación no necesariamente pertenece a la magnitud 1, ni la que le sigue a magnitud 2, etc.

La estrella más brillante del cielo, con una magnitud 1, es Sirio de la constelación Canis Maior, ubicada en el hemisferio celeste sur, que se encuentra a la Tierra es 8,611 años luz. Pero, el Sol, que se ve más brillante que Sirio tiene una magnitud de -26.7. Se agregaron negativos en las magnitudes porque en la escala la clasificación de Sirio cambió a -1.49 para incluir objetos vistos desde nuestro planeta más brillantes que las estrellas del firmamento, a modo de ejemplo, la Luna llena, Venus, Marte, esta escala se muestra en la figura 21. En años recientes, con la implementación de telescopios más potentes, se han logrado observar y con ello añadir objetos con magnitudes de hasta 20, “mientras que los telescopios más potentes, como el Hubble, el Keck o el James Webb pueden observar objetos tan poco brillantes como una magnitud visible de 30” (Oltra, 2022).

La magnitud en que se dispuso a los astros no contempla la distancia a la que se encuentran, es decir, una estrella cercana como el Sol tiene una clasificación de -26.7 en la escala, por estar a 150 millones de kilómetros de la Tierra, pero si su distancia fuera mucho más lejana (como la de Sirio) no sería una estrella de magnitud -1.49 como Sirio porque no es lo suficientemente brillante. Es decir, las estrellas cercanas a la Tierra aparentemente se ven más brillantes que las más lejanas. Por esta situación, el nombre impuesto a esta clasificación es **magnitud aparente** ya que, depende de la distancia y su brillo *aparente* visto desde la Tierra.

En cambio, la **magnitud absoluta** se refiere al brillo real que tiene el objeto visto a una distancia de 10 pársecs. Para conocer el

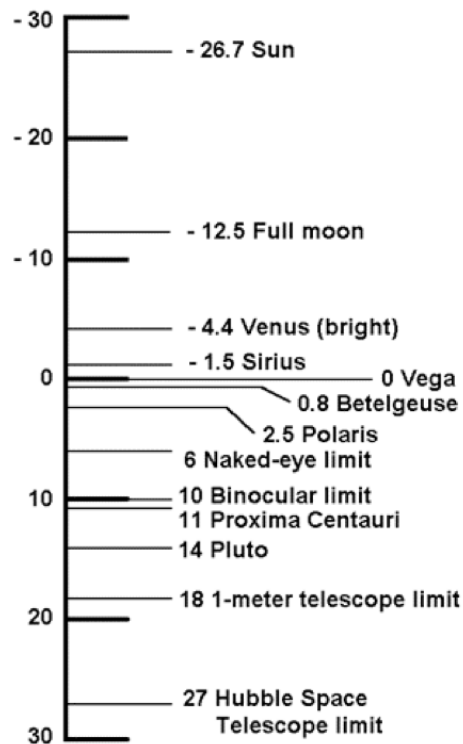


Figura 21. Escala de magnitud aparente con diversas estrellas vistas desde la Tierra (<https://www.aavso.org/magnitude>).

Pero la magnitud absoluta se define de forma distinta para cuerpos del Sistema Solar. En 1985 la IAU adoptó el sistema semiempírico HG, en el que la magnitud de un asteroide se describe mediante dos constantes H y G (Karttunen, Kröger, & H., 2007).

Sean

$$a_1 = (1 - G) \times 10^{-0.4H}; \quad (2.27)$$

$$a_2 = G \times 10^{-0.4H}. \quad (2.28)$$

La curva fase puede ser aproximada por

$$V(1, \alpha) = -2.5 \times \log \left[a_1 \exp(-3.33 (\tan \frac{\alpha}{2})^{0.63}) + a_2 \exp(-1.87 (\tan \frac{\alpha}{2})^{0.122}) \right] \quad (2.29)$$

La magnitud absoluta para un objeto del Sistema Solar, que refleja la luz del Sol, se determina como la magnitud aparente a una distancia de 1 UA en ángulo de fase cero, $\alpha=0$.

$$V(1,0) = -2.5 \log(a_1 + a_2)$$

$$= -2.5 \log 10^{-0.4H} = H. \quad (2.30)$$

De esta manera, H es la magnitud absoluta y G describe la forma de la curva de fase. Si G es grande, la curva de fase es más pronunciada y el brillo disminuye rápidamente con el ángulo de fase. Para pendientes muy suaves, G puede ser negativo. H y G pueden determinarse con un ajuste de mínimos cuadrados de las observaciones de fase (Karttunen, Kröger, & H., 2007).

2.11 Estrellas estándar polarizadas y no polarizadas

Las estrellas estándar polarizadas son aquellas donde su luz natural conforme viaja en el espacio brilla a través del polvo en los discos protoplanetarios y las atmósferas de los planetas se va dispersando y finalmente polarizando. Sin embargo, hay estrellas que intrínsecamente ya están polarizadas (European Southern Observatory, s.f.).

La observación de estrellas estándar no polarizadas ayuda a determinar la polarización lineal instrumental, que a su vez sirve para la corrección de los parámetros de Stokes, q y u, y así tener una buena estimación para la polarización lineal del objeto de estudio. Por otro lado, con la observación de las estrellas estándares polarizadas se determina el punto cero del ángulo de posición del instrumento.

Como ejemplo, los valores de las estrellas estándar polarizadas obtenidas de la literatura se presentan en tabla VI, mientras que en tabla VII se encuentran los valores para las estrellas estándar no-polarizadas.

Tabla VI. Valores de las estrellas estándar polarizadas reportados en literatura.

Designación	5 Caracteres	RA(2000) (HH:mm:ss)	Dec(2000) (°:mm:ss)	V-mag
BD+64d106	bdp64	00 : 57 : 36.7	+64 : 51 : 27	10,3
BD+59d389	Bdp59	02 : 02 : 42.1	+60 : 15 : 27	9,1
HD19820	h1982	03 : 14 : 05.4	+59 : 33 : 48	7,1

Para el procesamiento de datos, es necesario conocer el valor de polarización y el ángulo de polarización.

Tabla VII. Valores de las estrellas estándar no polarizadas reportados en literatura.

Designación	5 Caracteres	RA(2000) (HH:mm:ss)	Dec(2000) (°:mm:ss)	V-mag
HD 14069	h1406	02 : 16 : 45.2	+07 : 41 : 11	9,0
G191b2b	g191b	05 : 05 : 20.6	+52 : 49 : 54	11,8
HD 21447	h2144	03 : 30 : 00.2	+55 : 27 : 07	5,1

2.12 Catálogo de Grupo de Ciencias Planetarias

La Universidad Nacional de San Juan en Argentina tiene el proyecto Catálogo de Curvas de Polarización de Asteroides, que se basa en calcular las curvas de polarización-fase de asteroides. Los objetos estudiados se encuentran en el cinturón principal, entre la órbita de Marte y Júpiter. Para las observaciones han sido utilizados filtros de Johnson B, V, R. En febrero de 2023 cuenta con 295 asteroides con sus respectivas curvas de polarización.

El catálogo de Grupo de Ciencias Planetarias¹ ha agrupado los objetos en A, B, C, D y E:

- A están los objetos con mayor número de observaciones que ya casi han completado el ajuste de su curva de polarización, en total son 113 cuerpos (figura 22).
- Los de B tienen un menor número de observaciones que A, por ende, su curva fase polarización tiene menor información, consta de 90 asteroides.
- Los de C llegan a tener un ajuste a su curva, pero es evidente que faltan la mayor parte de sus puntos por tanto no es confiable tal curva. El número de objetos es de 92.
- En D no tienen el ajuste de la curva y cuentan con un número reducido de puntos, cuenta con 159 asteroides.
- Grupo E, son aquellos que tienen una observación, tiene 341 asteroides.

Mediante la siguiente ecuación empírica se realiza un ajuste a las curvas de polarización. Esta ecuación depende de tres constantes que se determinan mediante la observación ***Coe1, Coe2 y Coe3***:

¹ [Página del Grupo de Ciencias Planetarias - San Juan \(sdf-eu.org\)](http://sdf-eu.org)

$$Pr(\alpha) = Coe1 * (e^{-\frac{\alpha}{Coe2}} - 1) + Coe3 * \alpha, \quad (2.31)$$

En donde, α es el ángulo de fase.

Otra información que nos proporcionan las curvas de fase es:

Pmin, polarización mínima en la curva.

Phmin, el ángulo de fase cuando se alcanza Pmin.

Ph0, el ángulo de inversión en que el grado de polarización cambia de signo, generalmente el ángulo de inversión es aproximadamente en los 20°.

K, la pendiente de la curva de polarización en ph0.

Catalogue of Asteroid Polarization Curves

Gil-Hutton (2023)

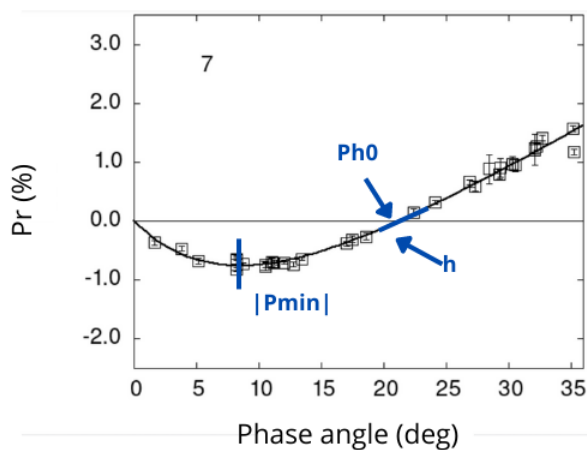


Figura 22. Ejemplo de curva de polarización del grupo A para el asteroide 7, se muestra el porcentaje de polarización (%) vs ángulo de fase (deg). Tomado del catálogo de Grupo de Ciencias Planetarias en 2023.

II. METODOLOGÍA

A continuación, se explica la planeación de las noches de observación, además de cómo se obtuvieron las imágenes, también se expone el proceso para la obtención de las imágenes y finaliza con la descripción de los scripts realizados en Python que permitió la reducción polarimétrica de los datos.

3.1 Observaciones

La temporada de observación tuvo por fecha del tres al siete de febrero; del nueve al once de marzo y del tres al cinco de mayo en 2022. Los datos se tomaron en Ensenada, B.C. de forma remota del Observatorio Astrofísico Guillermo Haro en Cananea, Sonora.

En este trabajo, se compararon los resultados con los datos obtenidos en el OAN-SPM.

3.2 Observación remota

Desde Ensenada, B.C. la conexión a OAGH fue por medio de *Anydesk*. Este es un software de control remoto que requiere la identificación ID y contraseña del observatorio. También se utilizó *discord*, un programa de comunicación con chat, audio y llamada, que en este caso se empleó para mantener correspondencia con los asistentes OAGH. Ellos se encontraban de manera presencial en el observatorio de Cananea, puesto que son los encargados de abrir la cúpula, redirigir el telescopio, etc.

En las campañas de febrero y marzo la conexión a *Anydesk* y *discord* era a las 6:30 pm de Ensenada y 7:30 pm de Cananea. En mayo, debido al cambio de horario que se produce en México, la conexión comenzó a las 7:30 pm de Ensenada y de Cananea.

Para el monitoreo del clima, se utilizó *Windy*² y se ubicó la Heroica Ciudad de Cananea (N 30° 59' 30", O 110° 16' 36").

3.2.1 Plan de observación

Se describirán los pasos para el plan de observación.

3.2.1.1 Generación de efemérides

Una efeméride permite consultar la posición de asteroides, planetas, de manera virtual en cualquier día, mes y año. Para este trabajo se empleó el software *ModQhorizons_Dic2021.py* el cual es un script que utiliza la librería ***astroquery*** de Python y la base de datos del Grupo de Ciencias Planetarias de la Universidad de San Juan, Argentina; fue desarrollado por el Dr. Joel Castro. Este programa crea una lista con los asteroides que se pueden ver en el cielo de Cananea con la hora y fecha indicada, de acuerdo con el grupo que se eligió, todos del catálogo.

En los datos de entrada se escriben:

- 1) Fecha: año, mes, día y rango de hora universal (*UTC Coordinated Universal Time*) en que se desea averiguar las coordenadas de los objetos en el cielo.
- 2) La fecha indicada se convierte a día Juliano.
- 3) Se crea la lista de los objetos, indicando:
 - a) El grupo del catálogo del Grupo de Ciencias Planetarias en el que se desee buscar.
 - b) El nombre que le asignaremos a la lista de los objetos disponibles en el formato *.csv*

² <https://www.windy.com>

- c) El nombre asignado a la lista de los objetos disponibles en formato .txt

Después comienzan a buscarse los objetos disponibles. En los archivos csv y txt se almacenan los asteroides aptos para observarse. La información que contiene es el número de asteroide, su nombre, ascensión recta, declinación, magnitud aparente, fase, entre otros.

Debido a que el catálogo de Grupo de Ciencias Planetarias está organizado por los asteroides con mayor observación y con el completamiento de curvas fase-polarización, en la generación de efemérides se le da prioridad al grupo C, luego la D, B y A.

Como ejemplo, se pide que indique los objetos a observar el tres de febrero del dos mil dos en la localización 695 (la del observatorio de Kitt Peak más cercana a Cananea, Sonora). En la figura 23 se muestra el script dividido en secciones y a continuación se muestran los pasos para la generación de la efeméride:

- 1) Para la sección A se eligió el año, dos mil dos; mes, febrero; día, tres; hora, 8UTC (tiempo universal) o 12am.
- 2) En sección B se calcula el día juliano.
- 3) En sección C, se crea la lista de efemérides con los asteroides; se escribió el día juliano, JD; en lista, XX; se indicó que en el catálogo de Ricardo Gil Hutton se buscaran los objetos en el grupo C RGHlst, grupo-C.lst; el nombre del archivo .csv es feb2022; el título del archivo .txt, feb2022_Cvi.
- 4) En sección D, se comienzan a buscar los objetos en el grupo C con la localización 695 en la fecha del tres de febrero del dos mil dos.

JD=Time('2022-02-02T08:00:00').jd

A

JD

B

list_efem(JD=JD,lista='XX',RGHlst='grupo-C.lst',ar_rep='feb2022_C.csv',ar_vis='feb2022.Cvi.txt')

C

Asking for object: 22, Loc=695, Date=2022-02-03 08:00:00.000

Asking for object: 31, Loc=695, Date=2022-02-03 08:00:00.000

D

Asking for object: 48, Loc=695, Date=2022-02-03 08:00:00.000

Asking for object: 52, Loc=695, Date=2022-02-03 08:00:00.000

Figura 23. Líneas del código ModQhorizons_Dic2021.py.

La lista resultante se muestra en Tabla VII, la cual indica en las columnas el número del asteroide, su nombre, la ascensión recta, la declinación, su magnitud aparente, fase, ángulo subSolar, elongación lunar, iluminación lunar, masa de aire.

Tabla VII. Registro de los objetos disponibles el 3 de febrero 2022 en el grupo C del catálogo de Grupo de Ciencias Planetarias.

NUM	NAME	RA	DEC	MagAp	Pha	Sun	NpRA	NpDEC	Elong	LunEl	LunIl	AirMass	#Medic	PHmin	PHmax	Cod
22	22 Kalliope (A852 WA)	06 10 07.15	+36 12 43.344	10.96	14.72	104.69			136.099	110.7	5.845	1.317	19	5.2	17.79	C
52	52 Europa (A858 CA)	13 35 37.98	-01 56 00.096	11.79	18.06	108.57			111.412	139.3	5.845	2.613	8	1.2	15.9	C
75	75 Eurydike (A862 SA)	11 46 08.26	+03 19 08.508	14.61	10.73	111.49			138.927	166	5.845	1.373	6	1.2	23.6	C
94	94 Aurora (A867 RA)	14 07 20.65	-15 20 32.172	13.65	16.85	110.16			99.5291	126.6	5.845	6.716	4	3	16.62	C
96	96 Aegle (A868 DA)	04 18 41.65	+37 44 54.168	12.89	17.84	87.15			113.889	89	5.845	2.107	4	7.4	17.21	C
130	130 Elektra (A873 DA)	11 56 39.86	+11 20 37.572	12.99	10.43	102.15			138.747	166.4	5.845	1.304	5	0.26	18.7	C
138	138 Tolosa (A874 KA)	06 39 48.10	+26 57 25.704	13.27	11.89	99.28			144.245	117.1	5.845	1.245	17	12.99	28.89	C
158	158 Koronis (A876 AA)	08 36 00.99	+17 47 10.644	13.07	2.697	98.49			172.325	144.4	5.845	1.053	19	0.45	16.45	C
246	246 Asporina (A885 EA)	10 25 15.69	+03 44 59.568	12.62	7.97	125.13			157.084	168	5.845	1.169	12	9.05	24.6	C
357	357 Ninina (A893 CB)	12 55 32.87	+06 42 48.672	14.49	14.24	105.37			123.527	151.4	5.845	1.718	6	3.5	16.7	C
444	444 Gypsis (A899 FA)	05 01 15.33	+09 44 09.924	12.84	17.82	76.48			119.826	92	5.845	2.356	8	3.7	17.42	C
487	487 Venetia (A902 NC)	05 41 50.95	+20 10 54.912	12.57	16.83	85.4			131.2	103.4	5.845	1.602	5	14	23	C
729	729 Watsonia (A912 CE)	09 38 30.90	+21 15 09.180	13	3.213	58.23			171.296	158.1	5.845	1.018	21	4.21	19.39	C
747	747 Winchester (A913 EK)	12 02 37.64	+14 48 25.704	12.95	12.13	98.37			137.934	164.8	5.845	1.289	3	7.8	19.29	C
753	753 Tiflis (A913 HH)	04 26 23.14	+27 19 02.604	15.25	18.37	83.43			114.652	87.8	5.845	2.29	4	9	23.96	C
773	773 Irmintraud (A913 YF)	13 50 13.65	-27 27 58.824	14.51	19.8	113.78			98.694	123.3	5.845	12.346	3	8.7	20.7	C
796	796 Sarita (A914 UF)	03 05 02.72	+35 14 57.696	13.45	25.88	76.05			98.9068	74.3	5.845	4.124	11	11.3	33.25	C
1025	1025 Riema (A923 PG)	05 20 15.77	-13 35 37.860	15.66	27.29	63.56			116.284	91.8	5.845	3.712	4	13.5	29.2	C
1036	1036 Ganymed (A924 UB)	10 20 43.43	-21 22 08.796	15.25	9.553	153.23			138.118	145.4	5.845	1.731	29	9.7	37.7	C
1284	1284 Latvia (1933 OP)	14 28 41.70	-26 46 33.096	15.91	19.24	109.06			90.9765	116.6	5.845	999	4	9.22	25.2	C
2448	2448 Sholokhov (1975 BU)	12 41 21.13	+11 45 03.240	15.1	17.96	101.85			128.121	155.5	5.845	1.515	3	8.1	20.27	C
2763	2763 Jeans (1982 OG)	12 46 46.80	-08 40 11.712	17.48	17.05	114.93			120.263	146.7	5.845	2.157	4	7.7	21	C

De la tabla VII de salida, los datos para seleccionar el objeto son aquellos que:

1. La ascensión recta del objeto está a ± 3 hrs con el OAGH.
2. Declinación del objeto está a ± 3 hrs con el OAGH.
3. Magnitud aparente de 13 a 15, aproximadamente.
4. No esté registrado el ángulo fase del asteroide en el catálogo, previamente, para así conseguir una nueva medición.

5. La distancia del objeto a la Luna debe ser mayor a 30°.

3.2.1.2 Carta de identificación

Como se ha señalado, se obtienen las coordenadas de cada asteroide que le compete al catálogo y pueda observarse en el cielo de Cananea. No obstante, se confirma que el campo de visión, FoV, (FoV por sus siglas en inglés, *Field of View*) mostrado en el telescopio corresponda al del objeto, por ello se hace uso de la herramienta *AstFinder*³.

AstFinder es un programa (público en una página web) que muestra la posición de asteroides a la vez que traza una trayectoria de este. Su interfaz permite modificar el campo de visión desde 1' a 52.29'. La carta de identificación que se utilizó fue de 4.5 x 4.5, ya que el telescopio de OAGH tiene aproximadamente ese FoV.

El modo en que lo utilizamos es que le indicamos a *AstFinder* el número del asteroide del que se tenga interés, también se proporciona la fecha e indicamos la localización del observatorio, debido a que el OAGH está cerca de Kitt Peak, se hace uso de su ubicación, el 695.

Pongamos por caso, el asteroide 357 y veamos la figura 24:

- A) Se indica el número del asteroide.
- B) La fecha exacta en que se ha tomado la imagen (con *SAOImage*).
- C) Se elige el observatorio 695 Kitt Peak ya que, es el cercano al OAGH.
- D) Se elige el tamaño del campo.
- E) Número de pasos futuros.
- F) Tiempo a futuro para ver al objeto.

³ <https://asteroid.lowell.edu/astfinder/>

Plot an asteroid track against the sky.

Asteroid

 ← **A**

UTC Date | [Set To Current UTC](#)

 ← **B**

Observatory

 ← **C**

Instrument FOV (arcmin)

 ← **D**

Number of Future Steps

 ← **E**

Step Time Spacing

 minutes ← **F**

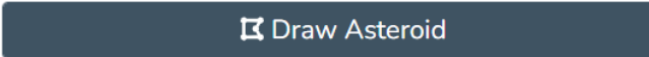
 Draw Asteroid

Figura 24. Ejemplo del campo para el asteroide 357 Ninina mostrado en *Astfinder*, con la fecha del 4 febrero 2022.

En la figura 25, la carta de identificación tiene un FoV de 4.5', además muestra un campo con estrellas de mayor magnitud aparente en relación con las que se observan opacas. El brillo percibido y el patrón de las estrellas ayuda a reconocer el campo en el telescopio. Así mismo el punto verde señala donde deberá estar el asteroide. Al hacer una comparación entre el FoV del telescopio y *AstFinder* se distingue al objeto.

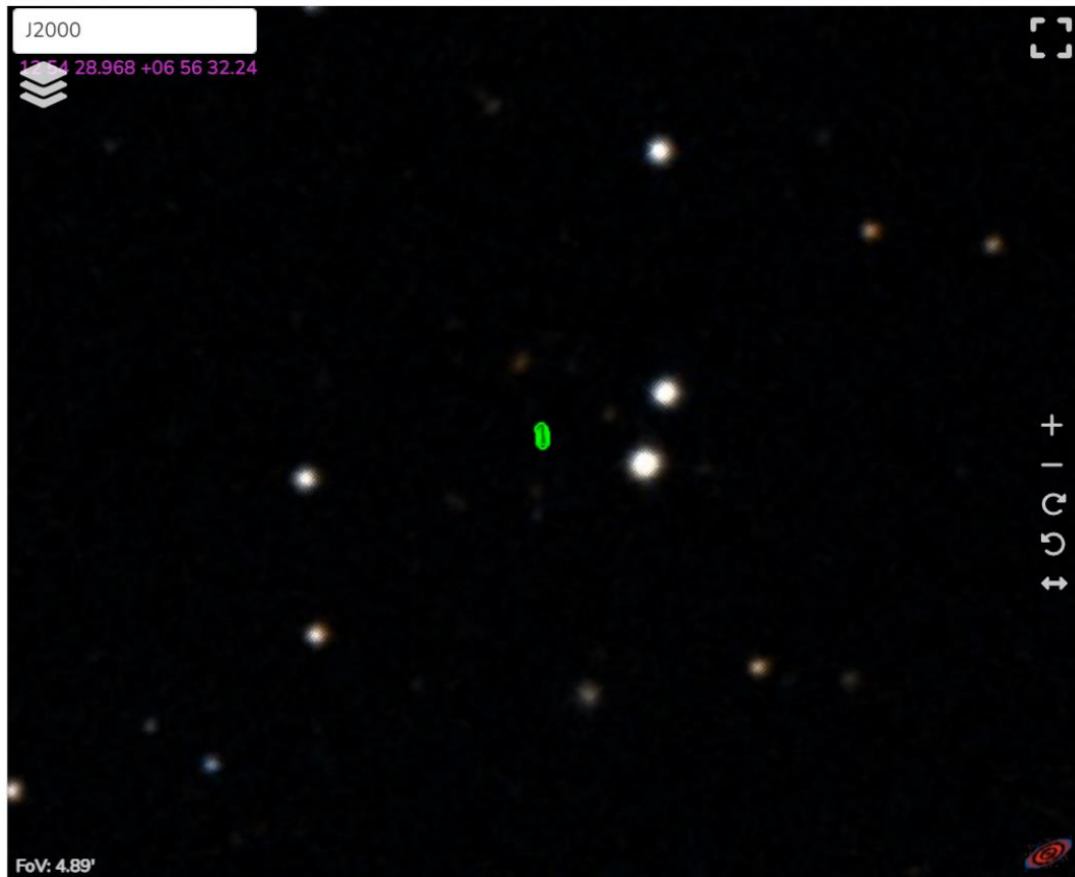


Figura 25. Carta de identificación del objeto 357 Ninina, en color verde se indica el asteroide (<https://asteroid.lowell.edu/astfinder/>).

AstFinder también facilitó la identificación de los asteroides cuando las imágenes llevaban años capturadas. Los pasos son los siguientes:


- 1) Se consulta la fecha y hora exacta en que se tomó la imagen, por medio de *SAO Image*.
- 2) Se escriben igual los datos en el apartado de *UTC Date* de *AstFinder*
- 3) Los demás apartados son rellenados.
- 4) Se consulta el FoV.

SAOImage es una aplicación utilizada por astrónomos que lee archivos de imágenes, tiene propiedades como *zoom*, escala y lectura de pixeles (Mink, 2005). Para acceder a la fecha exacta en que se capturó la imagen se debe:

- 1) Abrir la imagen en *SAOImage*.
- 2) Seleccionamos *header*.

3) Elegimos DATE-OBS.

En figura 26 se muestran el header del asteroide 357 Ninina y con flecha negra se indica la fecha en que se capturó la imagen.

 357ninina-R-0.0-01.fits

File Edit Font

```
SIMPLE = T / file does conform to FITS standard
BITPIX = 16 / number of bits per data pixel
NAXIS = 2 / number of data axes
NAXIS1 = 1100 / length of data axis 1
NAXIS2 = 1024 / length of data axis 2
EXTEND = T / FITS dataset may contain extensions
COMMENT FITS (Flexible Image Transport System) format is defined in 'Astronomy
COMMENT and Astrophysics', volume 376, page 359; bibcode: 2001A&A...376..359H
BZERO = 32768 / offset data range to that of unsigned short
BSCALE = 1 / default scaling factor
DATE-OBS = '2022-02-04T11:13:14.540' / Date and time of observation
IRAFNAME= '357ninina01.fits' / IRAF filename
OBSERVAT= 'oagh' / Observatory
SIDETIME = '12:50:06' / Local sidereal time
OBJEPOCH= 2000 / Epoch of object coordinates
AIRMASS = 1.096 / Airmass
EXPTIME = 10. / Exposure time
HA = '00:05:34,8' / Hour angle
TELESCOP= '2.11M' / Telescope
INSTRUME= 'Polima2' / Instrument
FILTER = 'R' / Filter
OBJECT = '357ninina' / Observation title
OBSERVER = 'Iridian'
CCD = 'E2V42-40'
GAIN = 1.92 / CCD Gain (e/EDU)
NOISE = 4.7 / Readout noise (e)
RESOL = 10.8 / Spectral resolution (A)
HIERARCH IMAGETYPE = 'object' / CCDTYPE
RA2000 = '12:54:36'
DEC2000 = '06:57:50,4'
JD = 2459614.96752315 / Dia Juliano
MLINEAL = 'IN' / Mesa lineal
POLANGLE= 0. / Angulo
HIERARCH TEMPERATURATEL = '-8.1 c'
FOCO = 29.94
XBINNING= 2 / X axis binning factor
YBINNING= 2 / Y axis binning factor
END
```

Figura 26. Ejemplo de datos de la imagen fits en SAO Imagen ds9, para 357Ninina. La flecha señala la fecha exacta en que se capturó la imagen.

3.2.1.3 Imágenes de calibración

Al inicio, a la mitad o al final de la noche se capturan imágenes de calibración. En la campaña de observación se tomaron mayormente al final, antes del amanecer. Los archivos *flat* (*campos planos*) y *bias* nos sirven para aplanar o uniformizar la respuesta del CCD, tiene la función de limpiar la imagen astronómica de aberraciones como motas de polvo que se impregnen en las lentes, por ello su toma es relevante y deben tenerse 20 tomas mínimamente. Además de capturarse con el mismo sistema óptico.

Los *flats* deben tomarse cuando la lente esté apuntando a una región del cielo. Alternativamente, se pueden hacer flats de domo, estos son: apuntando el telescopio a una pantalla dentro del domo iluminada de manera uniforme (López Manuel, 2023).

Las *bias* se capturan cuando la cámara esté cubierta por su obturador.

Al inicio de la noche, se capturaban (de preferencia) dos estrellas de baja polarización y dos de alta polarización. Se seleccionaban de acuerdo con sus coordenadas y se accedía a ellas por medio de un catálogo de la Universidad Nacional Autónoma de México⁴, donde también mostraban los filtros. Otro factor, para elegir a la estrella es que tuviera entre sus datos el filtro R.

3.2.2 La noche de observación

Para operar el telescopio de Cananea se hacía uso de dos pantallas principales. En la primera, se identificaba el objeto y se obtenían las imágenes para cada ángulo del polarímetro. En la segunda pantalla se elegía el foco para el objeto. A continuación, se describirán los pasos para la adquisición de la imagen y los elementos que fueron necesarios para conseguirla.

La primera acción de la noche es enfocar el telescopio, para ello se elige una estrella aleatoria de las que se muestran en el campo de observación del telescopio; cuando se selecciona se va aumentando o disminuyendo el valor

⁴ <http://haro.astrossp.unam.mx/blazars/target/target.html>

del foco, aproximadamente una centésima del valor inicial hasta la elección del foco ideal.

3.2.2.1 Captura de imágenes de calibración

Una vez que esté enfocado el telescopio, se da preferencia a las estrellas estándar polarizadas, dos estrellas estándares no polarizadas y dos estrellas estándares polarizadas, las cuales se buscan en el catálogo⁵ de estrellas y se eligen de acuerdo con su declinación y ascensión recta, para las estándares polarizadas se debe tener entre sus datos el filtro R.

Cuando la estrella es elegida, se dirige el telescopio en esa dirección. Ya que se ha ubicado en su campo se centra el objeto y se pasa a observar el foco para seleccionar el tiempo de exposición que este tendrá; cuando el objeto tiene una magnitud con valor menor a 6 por lo general su tiempo de exposición es de 0.5s o 1s, conforme aumenta la magnitud el tiempo de exposición también lo hace. Después de calibrar, se capturan las imágenes ejecutando el macro que ya, tiene las instrucciones para ir rotando a 16 ángulos diferentes. El proceso anterior para capturar imágenes es para las estrellas estándares y asteroides.

3.2.2.2 Adquisición de imágenes

Una vez que se adquiera y se seleccione el asteroide, se dirige el telescopio a esas coordenadas. El momento en que el objeto está enfocado, se sigue a identificarlo en el campo, con *AstFinder*, en caso de que la magnitud sea tenue, entonces se retira el módulo polarizador, compuesto de una placa retardadora de media onda super acromática y una placa de Savart.

Todas las imágenes se hicieron con las siguientes características:

- 1) El filtro óptico para las imágenes es el R.
- 2) La placa retardadora de media longitud de onda debe estar dentro.

⁵ <http://haro.astrossp.unam.mx/blazars/target/target.html>

- 3) Las imágenes van rotando a 16 ángulos diferentes, que son: 0° , 45° , 22.5° , 67.5° , 90° , 135° , 112.5° , 157.5° de modo que son dos sets, obteniendo 16 imágenes en total.
- 4) El nombre de los objetos es: número del objeto nombre de objeto_filtro_angulo_numero de imagen.

Recapitulando los pasos para la toma de imágenes, en figura 27, se observa la pantalla principal del OAGH. Cada rectángulo rojo está numerado y a continuación se mencionará el proceso:

- 1) Ventana donde se escribían los objetos seleccionados para ver en la noche.
- 2) Handset, muestra la ascensión recta del telescopio, así como su declinación recta. Además, muestra el tiempo sidereal e informa si el telescopio está en movimiento.
- 3) Se indica que el instrumento utilizado es POLIMA II, se escribe el nombre del astrónomo que está operando el telescopio, también se escribe el nombre del objeto y se indica el tipo de imagen. En esta sección, se expone la imagen y se selecciona el tiempo de exposición para el objeto, dependiendo de la magnitud.
- 4) En *SAOImagen* se ve el objeto duplicado e indica el número de píxeles que tiene la imagen. Esta parte es crucial porque es donde se identifican los objetos y se centran en el campo de observación.
- 5) Se elige el filtro R, con la mesa lineal esté dentro. Aquí también se selecciona el macro para que tome automáticamente las 16 imágenes con 8 ángulos diferentes.

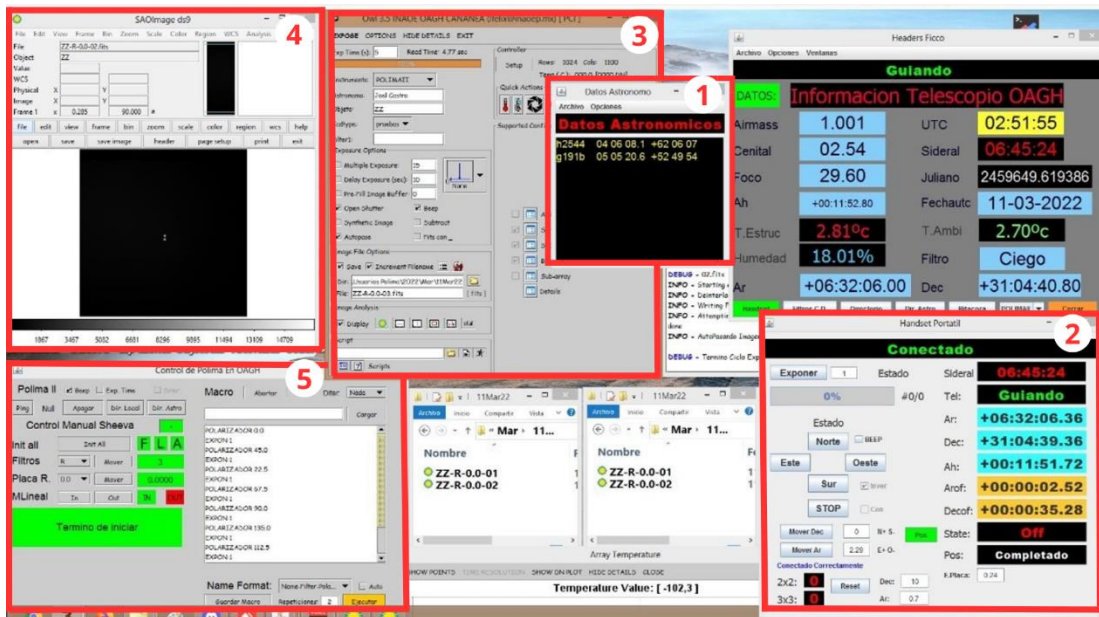


Figura 27. Pantalla principal del OAGH.

Las demás aplicaciones del OAGH se muestran en la figura 28. En 1) se aprecia el objeto duplicado, en positivo y negativo; de lado derecho en 2) está el perfil radial del objeto, “Numero de cuentas vs radio, en pixeles”;

entre menos dispersión presente el perfil radial, mejor es el foco del telescopio. Una de las ventajas del OAGH es que cuenta con sistema de seguimiento de los asteroides y por ello, los mantiene en una sola posición del CCD.

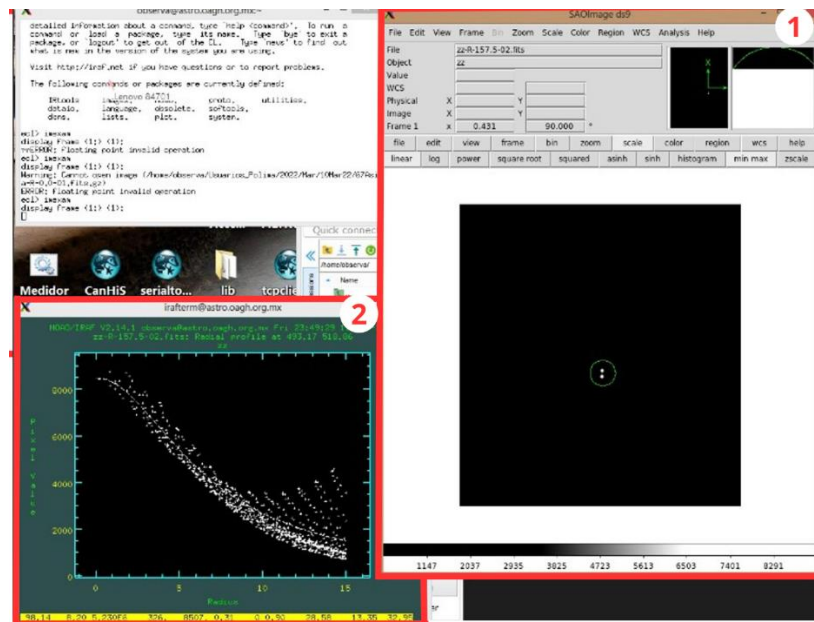


Figura 28. Segunda pantalla del OAGH.

3.3 Procesamiento de datos

En esta sección se mostrará cómo se han hecho las reducciones polarimétricas en las imágenes conseguidas con POLIMA-2

3.3.1 Reducción polarimétrica

AsteroidPOL_Ver0.py es un código semiautomático desarrollado en Python por el Dr. Joel Castro y cuenta con dos funciones creadas por Ricardo Gill-Hutton. Éste código está basado y automatizado en los algoritmos desarrollados por Ricardo Gill-Hutton en su trabajo en *Polarimetric rotational curve of M-type asteroid (16) Psyche*⁶. Los resultados presentados en este trabajo se procesaron con el mismo código, que funciona en cualquier plataforma que soporte el interpretador de Python.

3.3.2 Reducciones polarimétricas

Los pasos que se realizan para conseguir el error de polarización junto con el ángulo fase del asteroide son los siguientes:

- 1) Ejecutar Python.
- 2) Correr AsteroidPOL_Ver1.
- 3) Indicar la ubicación de las imágenes.
- 4) Escribir el prefijo de las imágenes bias, dado que se guardan como Bias o bias.
- 5) Escribir el prefijo de las imágenes flat, dado que se guardan como Flat o flat.
- 6) Escribir el prefijo del archivo del objeto.
- 7) Muestra la foto en ángulo 0, tomada en OAGH donde se veía el campo y se seleccionaba el asteroide, ya que muestra al objeto doble, se pide que seleccione la imagen ordinaria (figura 29).
- 8) Se pide seleccionar la imagen extraordinaria.

⁶ Castro-Chacón, J. H., Gil-Hutton, R., Vélez, J. R., & Reyes-Ruiz, M. (2022). Polarimetric rotational curve of M-type asteroid (16) Psyche. *Planetary and Space Science*, 213, 105428.

- 9) En los ángulos $0^{\circ}, 45^{\circ}, 22.5^{\circ}, 67.5^{\circ}, 90^{\circ}, 135^{\circ}, 112.5^{\circ}, 157.5^{\circ}$ se pide seleccionar para la imagen ordinaria.
- 10) Comienza el procesamiento de datos.
- 11) Pide confirmar el número del asteroide.
- 12) Pide identificar el observatorio con 695 para el OAGH.
- 13) Se crea el archivo polarim donde se guarda la apertura, el porcentaje del grado de polarización, el error del porcentaje del grado de polarización, señal de ruido y otros datos.
- 14) Se crea el archivo polobs.out, donde vienen las coordenadas del centro de la imagen.

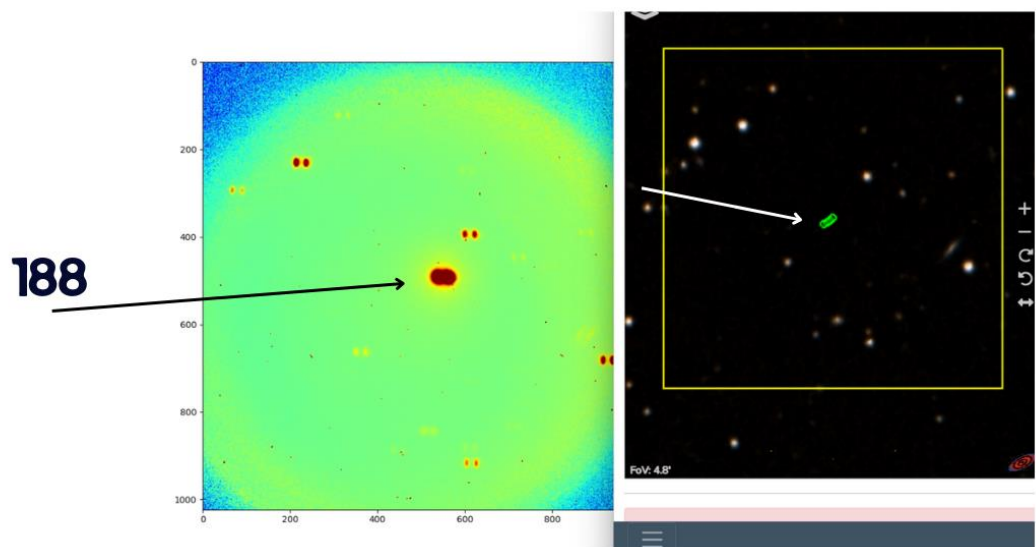


Figura 29. En la izquierda se señala con flecha negra el asteroide 188 Celuta para la reducción. En la derecha, con la flecha blanca se señala 188, en *Astfinder*.

III. RESULTADOS

Del 2017 a 2022 se han hecho temporadas de observación con el instrumento POLIMA- 2; del 2017 al 2019 se realizaron en el OAN-SPM, mientras que en el OAGH fueron del 2020 al 2022. Diferentes astrónomos llevaron a cabo la toma de imágenes, de las cuales he realizado las reducciones polarimétricas y el análisis de todos los objetos, como muestra se presentan las tablas VII y VIII con los resultados.

La tabla VIII, muestra el número del objeto, la fecha de observación, el filtro utilizado, el ángulo de fase, su grado de polarización, el error en el frado de polarización y el grupo que le corresponde en el catálogo. En noviembre del 2019 se observaron 15 asteroides en el OAN-SPM, éstos resultados se ven en tabla VIII. De estas reducciones polarimétricas, el error más grande en el grado de polarización es del objeto 501 con 0.22% y la categoría NE son los objetos que no se encuentran en el catálogo.

Tabla VIII. Objetos observados en la temporada de noviembre 2019 en OAN-SPM.

Objeto	Fecha	Filtro	MagAp	Ángulo de fase (°)	Pol. (%)	ePol. (%)	Grupo
70	5-nov	R	12.9	14.6511	-0.557964052	0.041	C
198	"	R	12.9	23.5471	0.400199687	0.044	E
459	"	R		14.9816	-1.447700803	0.099	E
209	6-nov	R		4.7519	-1.100999933	0.062	NE
675	"	R	10.5	5.4088	-0.585850814	0.129	D
797	"	R		4.2414	0.325883034	0.129	E
116	7-nov	R	11.7	1.2492	0.636350827	0.029	C
137	"	R	12.4	3.0312	-0.539970186	0.047	D
294	"	R	14.1	4.9459	-0.331521536	0.073	NE
445	"	R	13.7	13.8159	0.369056709	0.031	NE
811	"	R	14.8	1.6158	0.225929117	0.073	NE
327	9-nov	R	14.2	5.855	-0.068299156	0.084	NE
501	"	R	13.8	6.74	-0.52	0.22	NE
436	10-nov	R	14.8	10.8179	0.622943532	0.083	NE

881	“”	R	15.4	8.0355	0.730326894	0.099	NE
-----	----	---	------	--------	-------------	-------	----

La tabla IX expone el número y nombre de los asteroides, su respectiva fecha de observación, el filtro utilizado para las imágenes, la magnitud del objeto, su ángulo de fase, grado de polarización correspondiente y su error de polarización. La temporada de observación que comprendió febrero, marzo y mayo del 2022 tuvo en total 38 objetos menores observados.

Tabla IX. Objetos observados en la temporada de febrero, marzo, mayo del 2022 en OAGH.

Objeto	Fecha	Filtro	MagAp	Ángulo de fase (°)	Pol. (%)	ePol. (%)
75Euridyke	4/feb	R	14.507	10.4702	-1.1352911719876200	0.114
158Koronis	“”	R	13.06	3.1722	-0.215131316682989	0.085
246Asporina	“”	R	12.53	7.5122	-0.5809863737585922	0.1
357Ninina	“”	R	14.42	14.04910	-1.4014716	0.292
45Eugenia	5/feb	R	11.54	4.6217	0.43944818548658626	0.126
135Herta	“”	R	13.13	20.0218	-0.142325406	0.086
152Atala	“”	R	13.016	10.7411	0.246126544	0.190
305Gordonia	“”	R	13.60	17.6745	-0.2812676087010459	0.114
1025Riema	“”	R	15.723	27.5821	-1.275	0.75
76Freia	6/feb	R	14.03	16.2495	0.5813397204756404	0.245
161Athor	“”	R	13.08	7.695	0.17636162660559063	0.167
292Ludovica	“”	R	13.81	9.0906	0.05052065903496918	0.163
431Nephele	“”	R	14.9	14.7205	-0.6707118431243005	0.181
578Happelia	“”	R	14.48	18.8727	-0.03873819008615337	0.165
729Watsonia	“”	R	12.93	2.7172	-0.5435185322662325	0.174
1166Sakuntala	“”	R	14.819	4.7068	-0.813145776	0.169
62Erato	7/feb	R	13.25	8.380100	-1.3508950317488100	0.088
75Eurydike	“”	R	14.45	9.6883	-0.19268084936258184	0.192
246Asporina	“”	R	12.45	6.3621	0.06634731603278467	0.171
487Venetia	“”	R	12.64	17.8372	-0.11759787639461665	0.093
550Senta	“”	R	14.308	3.9991	-0.4570146961	0.249
578Happelia	“”	R	14.42	18.7448	0.10568777428514928	0.201
620Drakonia	“”	R	14.97	0.178	-0.127788596	0.365
702Alauda	“”	R	12.19	2.8403	-0.876581821	1.212
823Sisigambis	“”	R	14.96	25.3061	0.5155134803644392	0.879
67Asia	9/mar	R	13.016	14.3778	-0.48867160687013786	0.033
102Miriam	“”	R	14.326	10.342	-1.51290800753311	0.054
369Aeria	“”	R	13.774	19.0109	-0.522990036	0.174
41Daphe	11/mar	R	11.33	29.3792	0.25856603190024213	0.079
51Nemausa	“”	R	11.24	20.3701	-0.006476240142214758	0.075
91Aegina	“”	R	12.5	12.9404	-1.3722410355447000	0.064
130Elektra	“”	R	12.484	3.6998	-0.26859259104128697	0.068
135Hertha	“”	R	12.34	12.6914	-0.926688336650003	0.068
578Happelia	“”	R	13.668	11.0211	-1	0.07

747Winchester	""	R	12.643	5.227	-0.2818481993792176	0.068
914Palisana	""	R	13.674	13	3.59977733608584000	3.137
86Semele	4/may	R	14.084	1.5255	-0.22078671679675064	0.384
313Chaldaea	5/may	R	13.493	18.5109	-0.11231004423506800	0.168

El objeto 1025 del 4 de febrero, tiene la mayor magnitud aparente de la temporada 2022, con 15.723; mientras que el error en su grado de polarización (ePol) es 0.75 Por otro lado, el objeto 51 del 11 de marzo comprende el menor valor en la magnitud de 11.24; al igual que el objeto 1025 su ePol es 0.75

En las siguientes tablas X, XI, XII y XIII los objetos (de la tabla IX) se han ordenado de acuerdo con el grupo que pertenecen en el catálogo. Estos objetos muestran su fecha, el número del objeto, su grupo, el filtro, el ángulo fase, su grado de polarización, el error en el grado de polarización y el estado. El segmento estado representa la validez del ángulo fase y el grado de polarización; aceptable son los objetos que concuerdan a la curva fase-polarización modelada con observaciones previas; regular infiere al objeto donde su ángulo fase concuerda, pero no hay suficientes observaciones precedentes para modelar una curva; no aceptable son aquellos objetos que no son coherentes y presentan un error en el grado de polarización alto.

En la tabla X, se han organizado los objetos observados que pertenecen al grupo A. De estos objetos, el error en el grado de polarización (ePr) es menor al 0.2%. También notamos que son cinco objetos, pero el 135 fue observado dos veces, una en febrero y la otra en marzo, con ángulos de fase diferentes.

Tabla X. Caracterización de los objetos de acuerdo con su ángulo de fase y grado de polarización del grupo A.

Fecha	Objeto	Grupo	Filtro	Ángulo de fase (°)	Pr (%)	ePr (%)	Estado
5/feb	45	A	R	4.6217	0.43944818548658626	0.126	Regular
5/feb	135	A	R	20.0218	-0.142325406	0.086	Aceptable
11/mar	41	A	R	29.3792	0.25856603190024213	0.079	No aceptable

11/mar	51	A	R	20.3701	-0.006476240142214758	0.075	Aceptable
11/mar	135	A	R	12.6914	-0.926688336650003	0.068	Aceptable
5/may	313	A	R	18.5109	-0.11231004423506800	0.168	Aceptable

En la tabla XI, se han organizado los objetos observados que pertenecen al grupo B. Han sido ocho objetos con errores en el grado de polarización menor al 0.3%

Tabla XI. Caracterización de los objetos de acuerdo con su ángulo de fase y grado de polarización del grupo B.

Fecha	Objeto	Grupo	Filtro	Ángulo de fase (°)	Pr (%)	ePr (%)	Estado
6/feb	76	B	R	16.2495	0.5813397204756404	0.245	Aceptable
6/feb	431	B	R	14.7205	-0.6707118431243005	0.181	No aceptable
6/feb	729	B	R	2.7172	-0.5435185322662325	0.174	Aceptable
7/feb	62	B	R	8.380100	-1.3508950317488100	0.088	Aceptable
9/mar	67	B	R	14.3778	-0.48867160687013786	0.033	Regular
9/mar	369	B	R	19.0109	-0.522990036	0.174	Aceptable
11/mar	91	B	R	12.9404	-1.3722410355447000	0.064	Regular
11/mar	747	B	R	5.227	-0.2818481993792176	0.068	Regular

En la tabla XII, se han organizado los objetos observados que pertenecen al grupo C. Son doce objetos donde 11 muestran errores en el grado de polarización menor a 0.2%, pero sin duda, el error en el grado de polarización más elevado lo tiene el objeto 914 con 3.137%

Tabla XII. Caracterización de los objetos de acuerdo con su ángulo de fase y grado de polarización del grupo C.

Fecha	Objeto	Grupo	Filtro	Ángulo de fase (°)	Pr (%)	ePr (%)	Estado
4/feb	75	C	R	10.4702	-1.1352911719876200	0.114	Aceptable
4/feb	158	C	R	3.1722	-0.215131316682989	0.085	No aceptable

4/feb	357	C	R	14.04910	-1.4014716	0.292	Aceptable
5/feb	1025	C	R	27.5821	-1.275	0.75	No acceptable
6/feb	161	C	R	7.695	0.17636162660559063	0.167	No acceptable
6/feb	292	C	R	9.0906	0.05052065903496918	0.163	Regular
6/feb	1166	C	R	4.7068	-0.813145776	0.169	Regular
7/feb	75	C	R	9.6883	-0.19268084936258184	0.192	No acceptable
7/feb	702	C	R	2.8403	-0.876581821	1.212	Aceptable
9/mar	102	C	R	10.342	-1.51290800753311	0.054	Regular
11/mar	130	C	R	3.6998	-0.26859259104128697	0.068	No acceptable
11/mar	914	C	R	13	3.59977733608584000	3.137	Regular

En la tabla XIII, se han organizado los objetos observados que pertenecen al grupo D. Se vieron 12 objetos con errores en el grado de polarización menores al 0.9% El objeto 246 fue observado en dos ocasiones, el 4 y 7 de febrero, por ello el ángulo fase es similar, lo mismo ocurre con el objeto 578.

Tabla XIII. Caracterización de los objetos de acuerdo con su ángulo de fase y grado de polarización del grupo D.

Fecha	Objeto	Grupo	Filtro	Ángulo de fase (°)	Pr (%)	ePr (%)	Estado
4/feb	246	D	R	7.5122	-0.5809863737585922	0.1	No acceptable
5/feb	152	D	R	10.7411	0.246126544	0.190	No acceptable
5/feb	305	D	R	17.6745	-0.2812676087010459	0.114	Aceptable
6/feb	578	D	R	18.8727	-0.03873819008615337	0.165	Aceptable
7/feb	246	D	R	6.3621	0.06634731603278467	0.171	No acceptable
7/feb	487	D	R	17.8372	-0.11759787639461665	0.093	Aceptable
7/feb	550	D	R	3.9991	-0.4570146961	0.249	Aceptable
7/feb	578	D	R	18.7448	0.10568777428514928	0.201	Aceptable

7/feb	620	D	R	0.178	-0.127788596	0.365	Aceptable
7/feb	823	D	R	25.3061	0.5155134803644392	0.879	Aceptable
11/mar	578	D	R	11.0211	-1	0.07	Aceptable
4/may	86	D	R	1.5255	-0.22078671679675064	0.384	Aceptable

A continuación, se mostrará de manera gráfica el ángulo fase en la curva de polarización ya expuesta en el catálogo. Las figuras 30, 31, 32, 33, 34 y 35 exponen la curva de polarización-fase; la línea azul a trazos representa el ajuste por mínimos cuadrados. El icono de estrella azul simboliza los puntos ya registrados en el catálogo. Sin embargo, la estrella dentro del círculo rojo es el que se obtuvo con la reducción polarimétrica.

Dentro de las gráficas, se observan los casos clasificados como: bueno, típico y malo. El criterio para esta clase depende del error en el grado de polarización (ePr) y de la contribución que se hará en su curva fase-polarización.

El caso bueno, se refiere a aquellos objetos que muestran un ángulo fase acorde al modelo propuesto en su curva fase-polarización. Además, que su error en el grado de polarización es menor al 0.2% en la figura 30 y 31 se ven los objetos 313 y 102 como ejemplo.

En típico, se encuentran los objetos cuyo modelo de curva tienen un error en el grado de polarización menor a 0.4% y sean compatible con su respectiva curva de fase-polarización del catálogo. La figura 32 y 33, muestran a los objetos 67 y 86 para puntualizar este caso. Se agrega, que en el objeto 67 su curva aun no cuenta con suficientes datos, por lo que esta observación es una gran contribución.

Pongamos, por ejemplo, el caso malo del objeto 823, el cual se ve reflejado en la figura 34 y muestra las contribuciones anteriores, pero debido a la escasez de datos, su ajuste no muestra una curva. Si bien el ángulo de fase de 25.31° es una enorme contribución el error en el grado de polarización es

elevado con 0.879 por tanto, se considera malo. La figura 35 también esclarece esta categoría.

Caso acertado:

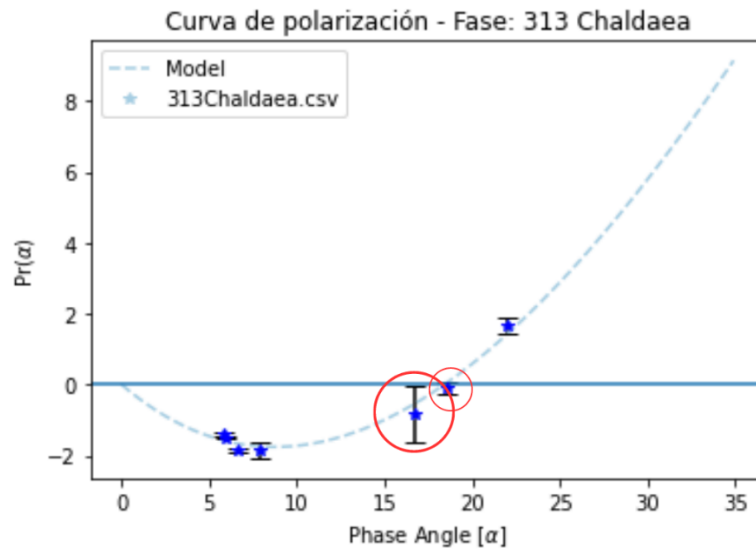


Figura 30. Curva de Polarización-Fase para 313 Chaldaea. Con observación en 2020 y 2022.

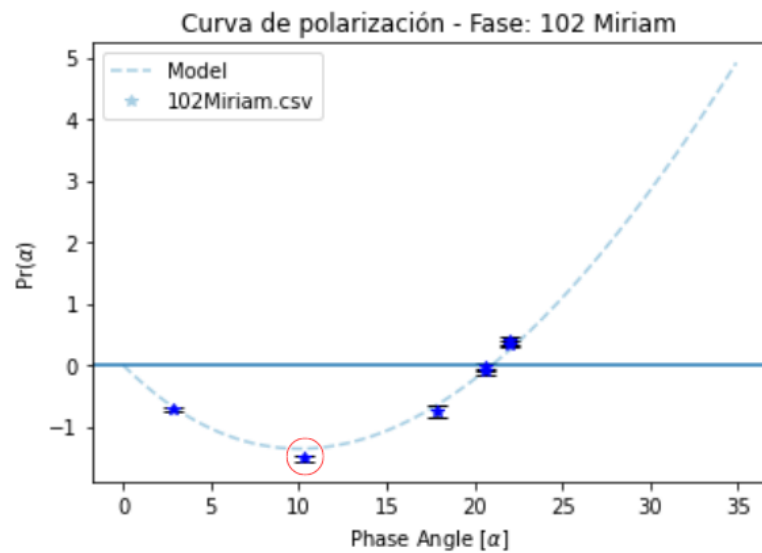


Figura 31. Curva de Polarización-Fase para 102 Miriam.

Caso típico:

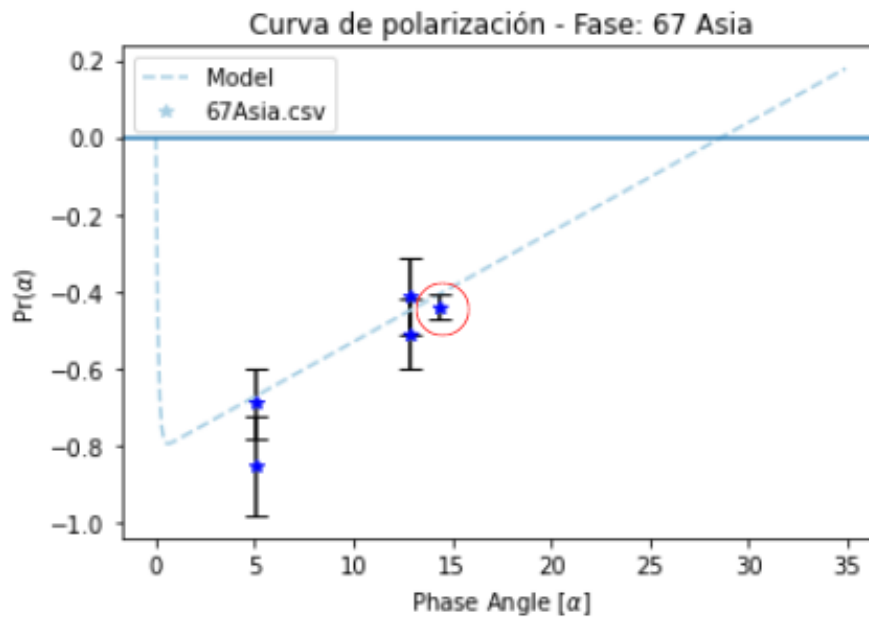


Figura 32. Curva de Polarización-Fase para 67 Asia.

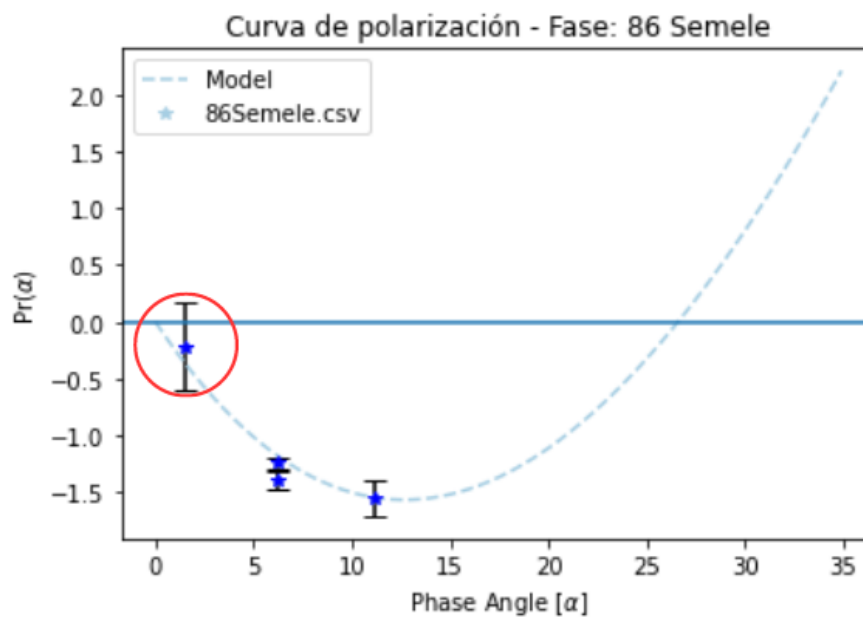


Figura 33. Curva de Polarización-Fase para 86 Semele.

Caso desatinado:

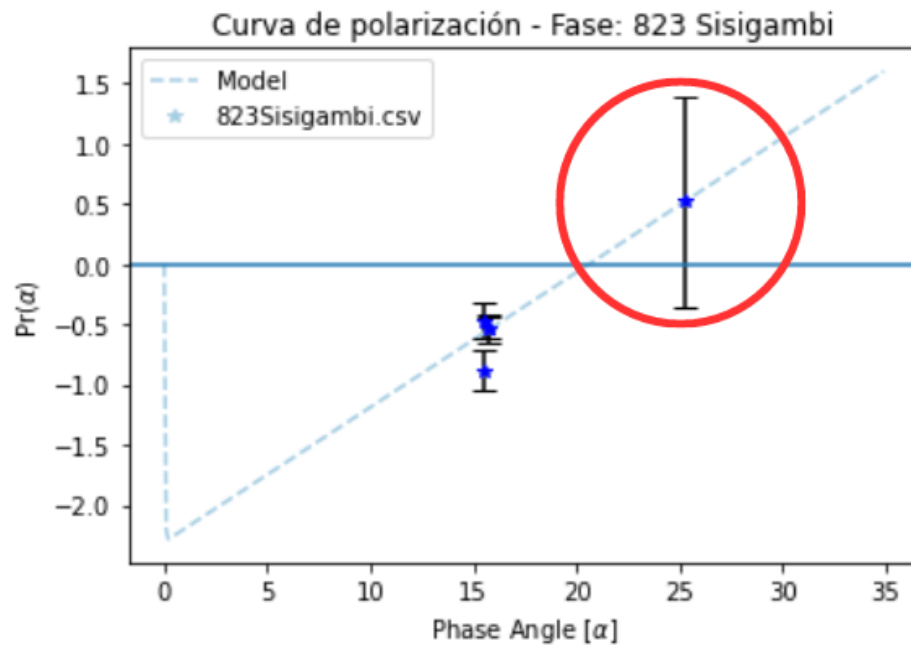


Figura 34. Curva de Polarización-Fase para 823 Sisigambi.

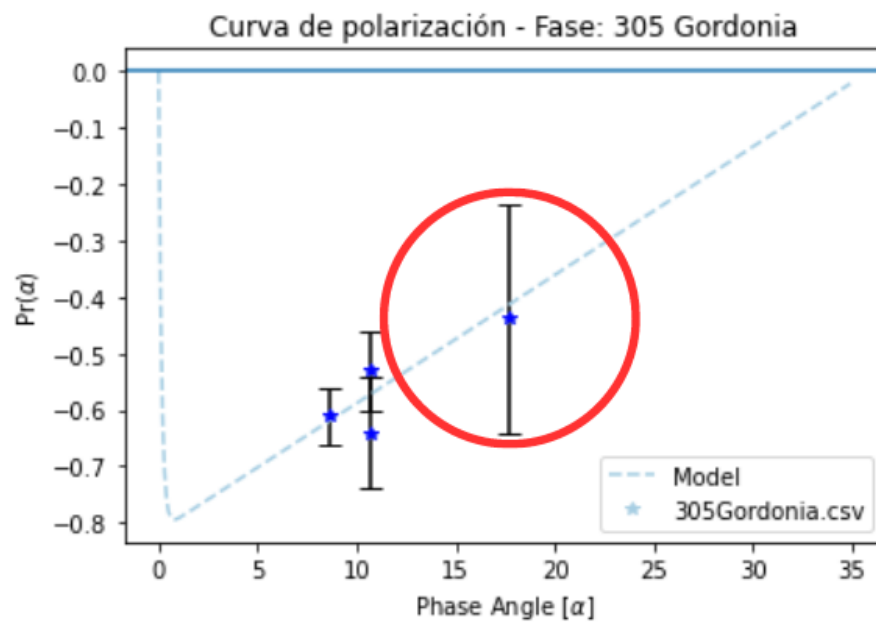


Figura 35. Curva de Polarización-Fase para 305 Gordonia.

IV. CONCLUSIONES

Se llevaron a cabo observaciones en el telescopio de 2.1 m del OAGH, lográndose observar polarimétricamente 37 objetos en tres temporadas del 2022. Adicionalmente, en este trabajo se presentan las reducciones de datos obtenidos anteriormente en el telescopio de 84 cm del OAN-SPM logrando procesar 75 objetos más. En ambos casos las imágenes se obtuvieron utilizando el instrumento POLIMA II. En la temporada de febrero, marzo, mayo 2022 fueron observados 37 objetos, de los cuales: 6 pertenecen al grupo A (tabla X), 8 pertenece al grupo B (tabla XI), 11 del grupo C (tabla XII), y 10 del grupo D (tabla XIII). Aun cuando la prioridad son los del grupo C los resultados muestran que el D es el que tuvo mayores asteroides observados y esto se debe a que la posición de los objetos en las fechas de observación era disponible para los de este grupo, que la magnitud era la preferible y que convenia el ángulo fase que podía verse.

Se realizó una comparación entre la calidad de los datos polarimétricos obtenidos en ambos observatorios, resultando que en el OAGH los datos útiles representan un porcentaje mayor. Esto es de esperarse debido al tamaño del telescopio y al seguimiento no sideral del mismo implementado en la consola. Sin embargo, existía la posibilidad de que la calidad del cielo, superior en el OAN-SPM, lograra prevalecer a pesar de la apertura menor del telescopio utilizado.

La categorización de *Aceptables* corresponde a los valores de ángulo y polarización que coinciden con los expuestos en el catálogo y que contenga un porcentaje de error aceptable, los *No aceptables* son aquellos donde no concuerdan con la curva de polarización ya casi completada en el catálogo y los regulares son los que no tienen suficientes datos para inferir si son aceptables o no aceptables. Total, de la campaña del 2022, de objetos observados *Aceptables* son 20, total de objetos observados *No aceptables* son 10, total de objetos *Regulares* con 8.

Estos resultados los presenté en el Coloquio Nacional de Polarización en Astronomía en Guadalajara del 2022, recibiendo muy buenas críticas y dándome la oportunidad de impartir un taller de reducción de datos polarimétricos basado en el código de Python que utilicé.

Los resultados obtenidos en este trabajo son de suficiente calidad como para ser publicados en una revista científica.

Como trabajo futuro en primer lugar se encuentra la publicación de los resultados de esta tesis y la continuación de observaciones polarimétricas para nutrir el catálogo del Grupo de Ciencias Planetarias con el cual colaboramos.

V. REFERENCIAS

(SEA), S. E. (s.f.). *COMETA*. Obtenido de sea: <https://www.sea-astronomia.es/glosario/cometa>

AGENCIA IBEROAMERICANA PARA LA DIFUSIÓN DE LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA. (21 de Julio de 2017). *ALMA alcanza la máxima sensibilidad polarimétrica*. Obtenido de dtyt: <https://www.dicyt.com/noticias/alma-alcanza-la-maxima-sensibilidad-polarimetrica>

Alferes Martínez, V. P. (2022). *ESTUDIOS PREPARATORIOS PARA EL SEGUIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE ASTEROIDES DESDE EL OAU*.

American Astronomical Society. (2006). *What is a Planet?* Obtenido de Division for Planetary Sciences. American Astronomical Society: https://dps.aas.org/education/what_is_a_planet

Amos, J. (2018 de 02 de 11). *Cómo es Oumuamua, el "violento asteroide cigarro" al que le espera un caótico futuro*. Obtenido de BBC NEWS MUNDO: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-43023193>

Anders, V. (18 de 1 de 2001). *Etimología de ASTEROIDE*. Obtenido de deChile: <http://etimologias.dechile.net/?asteroide#:~:text=El%20t%C3%A9rmino%20asteroide%20fue%20acu%C3%B1ado,que%20significa%20apariciencia%20o%20imagen>.

Buie, M. W. (2020). Size and Shape Constraints of (486958) Arrokoth from Stellar Occultations. *The Astronomical Journal*, 24.

Castro, J. (2022). Polarimetric rotational curve of M-type asteroid (16) Psyche. *Planetary and Space Science*.

Cofield, C. (14 de 11 de 2018). *NASA Learns More About Interstellar Visitor 'Oumuamua*. Obtenido de NASA: <https://www.jpl.nasa.gov/news/nasa-learns-more-about-interstellar-visitor-oumuamua>

- CONACYT. (24 de 03 de 2021). *Se observan los campos magnéticos en el borde del agujero negro de la galaxia M87*. Obtenido de CONACYT: <https://conacyt.mx/se-observan-los-campos-magneticos-en-el-borde-del-agujero-negro-de-la-galaxia-m87/>
- Cunningham, C. J. (2021). Explosions and impacts. En C. J. Cunningham, *Asteroids* (págs. 89-90). Londres: Reaktion Books Ltd.
- Cunningham, C. J. (2021). Explosions and impacts. En C. J. Cunningham, *Asteroids* (págs. 92-93). Londres: Reaktion Books Ltd.
- Cunningham, C. J. (2021). Explosions and impacts. En C. J. Cunningham, *Asteroids* (págs. 86-87). Londres: Reaktion Books Ltd.
- Cunningham, C. J. (2021). Explosions and impacts. En C. J. Cunningham, *Asteroids* (pág. 103). Londres: Reaktion Books Ltd.
- Cunningham, C. J. (2021). Explosions and impacts. En C. J. Cunningham, *Asteroids* (págs. 105-106). Londres: Reaktion Books Ltd.
- Cunningham, C. J. (2021). The stranger Ceres. En C. J. Cunningham, *Asteroids* (págs. 9-10). London: Reaktion Books Ltd.
- Cunningham, C. J. (2021). Where are the Asteroids? En C. J. Cunningham, *Asteroids* (págs. 44-45). Londres: Reaktion Books Ltd.
- Curioca Gálvez, M. K. (04 de 2014). *Frecuencia de Colisiones de Asteroides con la Tierra*. Obtenido de UNAM: <http://132.248.9.195/ptd2014/abril/0711155/0711155.pdf>
- de Pater, I., & Jack, L. (2010). Bulk composition and taxonomy. En I. de Pater, & J. J. Lissauer, *Planetary Sciences* (págs. 378-381). New York: Cambridge University Press.
- de Pater, I., & Lissauer, J. L. (2010). *Planetary Sciences*. New York: Cambridge University Press.

de Pater, I., & Lissauer, J. L. (s.f.). Radius and Albedo. En I. de Pater, & J. L. Lissauer, *Planetary Sciences* (págs. 374-375).

de Vicente Abad, P. (2013). IMPACTOS SOBRE LA TIERRA. En G. d. España, *ANUARIO DEL OBSERVATORIO ASTRONÓMICO 2013* (págs. 403-432). Madrid: MINISTERIO DE FOMENTO. Obtenido de <https://www.ign.es/web/resources/acercaDe/libDigPub/Anuario2013.pdf>

Domínguez, R. F. (2018). Minería espacial: el nuevo reto de la inteligencia económica. *bie3:Boletín IEEE*, 15.

European Southern Observatory . (s.f.). *Polarimetría*. Obtenido de <https://www.eso.org/public/spain/teles-instr/technology/polarimetry/>

FENÓMENOS ASTRONÓMICOS. (2013). En G. d. España, *Anuario del Observatorio Astronómico* (págs. 14-15). Madrid: Ministerio de fomento. Obtenido de <https://www.ign.es/web/resources/acercaDe/libDigPub/Anuario2013.pdf>

Flowers, P., Theopold, K., Langley, R., & Robinson, W. (2022). Química nuclear. En P. Flowers, K. Theopold, R. Langley, & W. Robinson, *Química 2ed* (págs. 1054-1056). Houston: openstax.

Gebert, G. (2 de 2003). *METEORITOS Impacto posible, incertidumbre profunda*. Obtenido de https://www.comoves.unam.mx/assets/revista/51/guiadelmaestro_51.pdf

Handal, J. (11 de Octubre de 2021). *El impacto de DART cambió el movimiento de un asteroide en el espacio*. Obtenido de NASA: <https://www.nasa.gov/press-release/el-impacto-de-dart-cambi-el-movimiento-de-un-asteroide-en-el-espacio>

Hecht, E. (2000). Birrefringencia. En E. Hecht, *Óptica* (pág. 336). Madrid: Addison Wesley Iberoamericana.

- Hecht, E. (2000). Los parámetros de Stokes. En E. HECHT, *ÓPTICA* (págs. 372-376). Madrid: ADDISON WESLEY IBEROAMERICANA.
- Hecht, E. (2000). Una breve historia. En E. Hecht, *ÓPTICA* (pág. 11). Madrid: ADDISON WESLEY IBEROAMERICANA.
- Hiriart, D. (2015). *Manual de usuario de Polima 2*. Obtenido de Instituto de astronomía, UNAM: https://www.astrossp.unam.mx/instrumentos/imagen/polima2/Manual_Usuario_Polima2.pdf
- Instituto Nacional de Astrofísica, Ó. y. (24 de Marzo de 2021). *Se observan los campos magnéticos en el borde del agujero negro de la galaxia M87*. Obtenido de CONACyT: <https://conahcyt.mx/se-observan-los-campos-magneticos-en-el-borde-del-agujero-negro-de-la-galaxia-m87/>
- International Astronomical Union. (8 de Julio de 2013). *NEAR EARTH ASTEROIDS (NEAs)*. Obtenido de IAU: <https://www.iau.org/static/public/nea/nea.pdf>
- Íñiguez, E. (Marzo de 2014). *POLIMA-2: POLARÍMETRO ÓPTICO DE DOBLE HAZ PARA EL OAN-SPM*. Obtenido de https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/DGB_UNAM/TES01000712545/3/0712545.pdf
- Jenkins, F. A., & White, H. H. (2001). Properties of light. En F. A. Jenkins, & H. H. White, *Fundamentals of optics* (pág. 11). New York: The McGraw-Hill Companies.
- Karttunen, H., Kröger, P., & H., O. (2007). Photometry, Polarimetry and Spectroscopy. En H. Karttunen, P. Kröger, & O. H., *Fundamental Astronomy* (págs. 161-162). New York: Springer.
- Kolokolova, L., J., H., & A., L.-R. (2015). Instrumentation. En L. Kolokolova, H. J., & L.-R. A., *Polarimetry of Star and Planetary Systems* (págs. 36-37). Cambridge University Press.

- Korogi, S. K. (2020). Janus Screen: A Screen with Switchable Projection Surfaces Using Polarizers. *In Adjunct Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* , 123-125.
- Kutner, M. L. (2003). Minor bodies in the Solar system. En M. L. Kutner, *Astronomy a physical perspective* (pág. 533). New York: Cambridge University Press.
- López, R. (8 de Febrero de 2019). *Meteorito Allende: medio siglo de gran significado para el estudio del cosmos*. Obtenido de GACETA UNAM: <https://www.gaceta.unam.mx/meteorito-allende-medio-siglo-de-gran-significado-para-el-estudio-del-cosmos/>
- Marquina, J. E. (2009). GALILEO GALILEI. *ciencia*.
- Masiero, J. (2007). Commissioning of the Dual-Beam Imaging Polarimeter for the UH 88-inch telescope. *Proceedings of the Astronomical Society of the*, 20.
- Masiero, J. (Febrero de 2021). Uncertainties on Asteroid Albedos Determined by Thermal Modeling. *The Planetary Science Journal*, 32. Obtenido de <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/PSJ/abda4d/pdf>
- Menor-Salván, C. (1 de 04 de 2022). *El asteroide Ryugu y el origen de la vida*. Obtenido de https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/asteroide-ryugu-y-origen-vida_18078
- Mink, D. (18 de Febrero de 2005). *Utilidad de visualización de imágenes SAOimage 1.35.1*. Obtenido de SMITHSONIAN ASTROPHYSICAL OBSERVATORY: <http://tdc-www.harvard.edu/saoimage/>
- NACIONES UNIDAS. (2002). *TRATADOS Y PRINCIPIOS DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL ESPACIO EXTRATERRESTRE*. Obtenido de <https://www.unoosa.org/pdf/publications/STSPACE11S.pdf>

- NASA. (3 de Junio de 2020). *What Is the Kuiper Belt?* Obtenido de spaceplace.nasa.gov: <https://spaceplace.nasa.gov/kuiper-belt/sp/>
- NASA. (30 de Junio de 2021). *¿Qué es un asteroide?* Obtenido de ciencia.nasa.gov: <https://ciencia.nasa.gov/que-es-un-asteroide>
- NASA. (19 de Julio de 2021). *Asteroids*. Obtenido de Solar system exploration: https://solarsystem.nasa.gov/asteroids-comets-and-meteors/asteroids/in-depth/#otp_introduction
- NASA. (s.f.). *NEO basics*. Obtenido de NASA: https://cneos.jpl.nasa.gov/about/neo_groups.html
- Navarro, S. (2018). Near IR and visual polarimetry of the Planetary Nebula M2-9. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 480-482.
- OAN-SPM, w. (s.f.). *POLIMA (Polarizador óptico de imagen)*. Obtenido de UNAM: <https://www.astrossp.unam.mx/es/usuarios/instrumentos/imagendirecta/polima2>
- Ojeda Vera, A. V. (Agosto de 2019). *Clasificación taxonómica de asteroides cercanos a la tierra*. Obtenido de <https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1009/1973/1/OjedaVAV.pdf>
- Oltra, J. L. (16 de Noviembre de 2022). *¿Qué es la magnitud de una estrella?* Obtenido de muyinteresante.es: <https://www.muyinteresante.es/ciencia/articulo/que-es-la-magnitud-de-una-estrella-381668598526>
- Pedrotti, F. L., & Pedrotti, L. S. (2019). *Introduction to Optics (3a ed.)*. Cambridge University Press (Virtual Publishing).
- Perea, L. (6 de Octubre de 2021). *INAOE*. Obtenido de <https://astro.inaoep.mx/observatorios/oagh/telescopios>

- Perea, L. (22 de 9 de 2021). *INAOE*. Obtenido de GOBIERNO DE MÉXICO: <https://astro.inaoep.mx/observatorios/oagh/el-observatorio/localizacion>
- Planetary Science Communications. (19 de 04 de 2022). *Asteroids*. Obtenido de https://solarsystem.nasa.gov/asteroids-comets-and-meteors/asteroids/overview/?page=0&per_page=40&order=name+asc&search=&condition_1=101%3Aparent_id&condition_2=asteroid%3Abody_type%3Alike
- Rodríguez, J. M.-C. (2013). La Geología_El peligro de impacto de asteroides contra la Tierra: El Superbólide de Cheliábinsk. . *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 95-95.
- Salcedo, C. (Agosto de 2006). *Galia González Hernández*. Obtenido de Cómo ves: <https://www.comoves.unam.mx/numeros/quienes/93>
- Shirley, J. H., & Fairbridge, R. W. (2000). Albedo. En J. H. Shirley, & R. W. Fairbridge, *ENCYCLOPEDIA of PLANETARY SCIENCES* (págs. 11-12). Dordrecht: Klumer academic publishers.
- Shirley, J. H., & Fairbridge, R. W. (2000). Polarimetry. En J. H. Shirley, & R. W. Fairbridge, *Enciclopedia of Planetary Sciences* (págs. 650-651). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Tormo Cifuentes, L. (2014). *Estudio de meteoritos singulares por técnicas espectroscópicas y de luminiscencia no destructivas*. Obtenido de https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/660409/tormo_cifuentes_laura.pdf?sequence=1
- UNAM. (2023). *Observatorio Astronomico Nacional San Pedro Mártir*. Obtenido de UNAM: <https://www.astrossp.unam.mx/es/>