

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



OBSERVACIÓN Y ESTUDIO DE (2104) TORONTO

ASTEROIDE DEL CINTURÓN PRINCIPAL

**Trabajo de investigación para obtener el grado académico de
BACHILLER EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN FÍSICA**

AUTOR

José Umberto Mujica Cueva

ASESOR

Dra. Myriam Virginia Pajuelo Cubillas

Lima, enero de 2021

RESUMEN

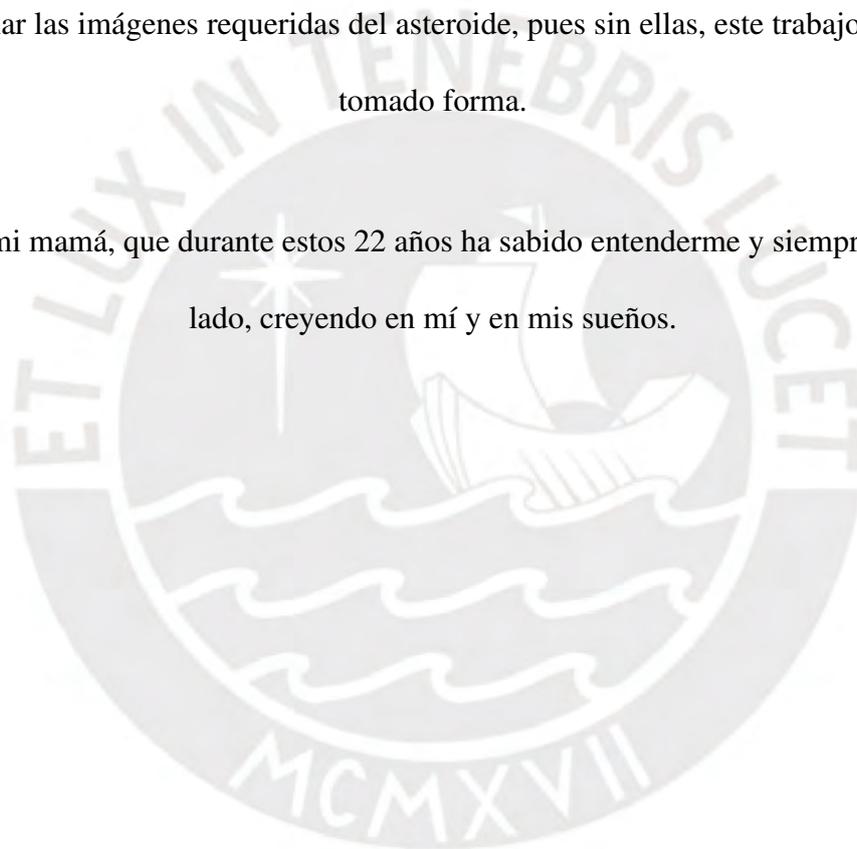
El Sistema Solar, dentro de las muchas partes que lo componen, alberga en su mayoría asteroides de pequeño tamaño y poco estudio a profundidad, que dentro de su composición u órbitas, pueden revelar pistas sobre cómo es que nuestro entorno planetario se formó, o incluso la existencia de la vida en la Tierra. Basado en ello, el presente trabajo centra su mira en analizar alguno de los cuerpos independientes del cinturón de asteroides, con el fin de observarlo desde un centro astronómico, para luego recolectar imágenes y procesarlas. Debido a la coyuntura sanitaria actual, la toma de datos tuvo que realizarse por parte del equipo del Instituto Astronómico de la Academia Rumana, en su observatorio Berthelot. Es así, que haciendo uso de fotometría diferencial y el programa de uso libre *AstroImageJ*, se buscará obtener curvas de luz del objeto y entender sus características más importantes, relacionadas a la magnitud, periodo, etc. El trabajo a continuación intenta a su vez contribuir con el incipiente estudio de objetos planetarios en el Perú, trazando como objetivo el poder a futuro realizar las observaciones por cuenta propia y en territorio nacional. Finalmente, tras realizar las gráficas deseadas, se concluye que las imágenes proporcionadas del asteroide (2104) Toronto corresponden a sus características conocidas y el trabajo fue llevado a cabo de manera óptima, demostrando las posibilidades de realizar estudios de este tipo en el país.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mi asesora, la Dra. Myriam Pajuelo, por todo lo enseñado durante el 2020, y que pese a todas las limitaciones del año, pudo apoyarme y conducirme a elaborar un trabajo relacionado al área que desde niño me apasiona, así como también agradecer al Dr. Adrián

Sonka y al Dr. Alin Nedelcu, del Instituto Astronómico de la Academia Rumana, por proporcionar las imágenes requeridas del asteroide, pues sin ellas, este trabajo no hubiera tomado forma.

Gracias a mi mamá, que durante estos 22 años ha sabido entenderme y siempre estar a mi lado, creyendo en mí y en mis sueños.



Índice general

Resumen	I
Agradecimientos	II
Índice general	III
Índice de figuras	V
Índice de cuadros	VII
1. Introducción	1
2. Marco Teórico	3
2.1. Observación y estudio de asteroides: contexto	3
2.2. (2104) Toronto y cuerpos afines	8
3. Procedimiento y tratamiento de imágenes	18
3.1. Preámbulo: corrección de imágenes	18
3.2. Procesamiento de imágenes	19
3.3. Fotometría diferencial	21
4. Resultados	26
5. Conclusiones y recomendaciones	33
5.1. Conclusiones	33
5.2. Recomendaciones y sugerencias	34

Bibliografía	35
Anexos	39
A. Código en <i>Python</i>	39
B. Imágenes adicionales	42



Índice de figuras

2.1. Tipos de NEA	7
2.2. Espectro de (2104) Toronto	12
2.3. Espectro para la muestra Migei 4bcg	13
2.4. Espectro para la muestra Mundrabilla	13
2.5. ViSiON de (2104)	16
2.6. Órbita de (2104)	17
3.1. <i>Bias frame</i>	20
3.2. <i>Dark frame</i>	20
3.3. <i>Flat frame</i>	20
3.4. <i>Master bias</i>	20
3.5. <i>Master dark</i>	20
3.6. <i>Master flat</i>	20
3.7. Imagen sin corregir	21
3.8. Imagen corregida	21
3.9. Ventana del <i>SkyBot</i>	22
3.10. Pantalla del <i>Aladin</i>	23
3.11. Pantalla del <i>AstroImageJ</i>	24
3.12. Asteroide y estrellas de referencia	24
4.1. Magnitud vs. Tiempo (<i>AstroImageJ</i>)	27
4.2. Magnitud vs. Tiempo	28

4.3. Magnitud vs. Tiempo (referencia)	29
4.4. Altitud vs. Tiempo	30
4.5. <i>Signal-To-Noise Ratio</i> vs. Tiempo	31
A1. Órbita de (1036), (1467) y (2104)	42
A2. ViSiON de (1467)	43
A3. ViSiON de (1036)	43



Índice de cuadros

2.1. Características de los cuerpos	11
2.2. Elementos orbitales de los cuerpos	14
4.1. Fechas de observación de (2104)	26



1. *Introducción*

Dentro del continuo y largo proceso de estudio de todas las partes que componen al universo, la astronomía intenta revelar el funcionamiento de todos aquellos cuerpos celestes y leyes que los rigen. En el marco de esta inacabable investigación, en la vecindad más cercana a la Tierra, dejando de lado a los planetas y a nuestra estrella, son en su mayoría asteroides aquellos objetos que orbitan al Sol (ubicándose principalmente en el Cinturón de Asteroides y de Kuiper). No obstante, muchas veces estos cuerpos rocosos pasan desapercibidos a pesar de su inmensa cantidad, ya sea por su diminuto tamaño comparado con la mayoría de planetas o la dificultad que recae en su análisis conjunto por su diversidad de órbitas, entre otros motivos.

Pese a todo esto, la importancia y el papel que cumplen los asteroides es fundamental, puesto que su estudio hoy en día puede dar pistas clave para responder interrogantes que le ha surgido a la humanidad. Ejemplo de esto es un mejor entendimiento de la formación del Sistema Solar, así como también - y con una mayor trascendencia - la explicación del origen de la vida en la Tierra. Por otro lado, el estudio de los asteroides se ve asociado a una posible catástrofe a nivel global, puesto que existen posibilidades, tal como sucedió en el pasado, de una colisión con el planeta. Analizar las órbitas, composición y tamaño de los asteroides potencialmente peligrosos (*Potentially Hazardous Asteroids* - PHA) o en su defecto, que se encuentren cerca de la Tierra (*Near Earth Asteroids* - NEA) se vuelve entonces una tarea imperativa.

Es preciso explicar que, en nuestro país, son contados los estudios realizados a asteroides, por lo que una investigación a fondo sobre algún cuerpo cercano tal como la que se presenta, intenta poder contribuir al desarrollo de una actividad astronómica en el Perú, con miras de aportar en el largo camino por recorrer para conducir al país a la vanguardia, en cuanto a ciencia se refiere.

Seguido de esta introducción, el siguiente capítulo brindará un panorama general del estudio de los asteroides, mostrando sus características principales y presentando el objeto de estudio de la investigación, el asteroide (2104) Toronto, miembro del cinturón principal de asteroides. Prosiguiendo con ello, se mostrará a detalle la observación remota del mismo, para finalizar con un completo análisis de las curvas de luz obtenidas, presentando así los resultados y conclusiones generales.



2. Marco Teórico

2.1. Observación y estudio de asteroides: contexto

El estudio de los asteroides, es una rama joven de la astronomía. Para una ciencia milenaria, el avance de la tecnología y la invención previa del telescopio fue necesaria para que se empezara a forjar el concepto de asteroide, distanciándolo del término “planeta pequeño” o “planetoide”. A inicios del siglo XIX, cuando esta palabra tomó forma, su uso era poco común, pues fue recién en 2006, luego de que la IAU (*International Astronomical Union*) definiera qué es un planeta [13], que su definición también pudo ser esclarecida.

En 1801, a Giuseppe Piazzi se le adjudica el descubrimiento de Ceres, cuerpo prominente del *Cinturón de Asteroides* (el más grande de toda esta región) luego de que este astrónomo encontrara una ‘estrella’ anómala en la constelación de Tauro [25]. Desde ese momento, las observaciones a cuerpos similares no han disminuido, de manera que únicamente ya no se estudia al objeto viendo su posición o movimiento, sino que se ahonda en su propia naturaleza, analizando su espectro y composición. En la actualidad, el estudio de los asteroides ha progresado enormemente comparado con las pasadas décadas (y siglos). La base de datos del *Minor Planet Center* indica que la cantidad conocida de asteroides, entre 2005 y 2020, aumentó su tamaño en un factor de 10, alcanzando el casi millón de cuerpos identificados [26].

Este cambio significativo no solo revela el avance tecnológico en materia de métodos e instrumentos para observar objetos pequeños, lejanos y sin brillo propio, sino a su vez, áreas de estudio relacionadas a los asteroides que tiempo atrás resultaban ser poco posibles, tal como tomar fotografías desde muy cerca, o recolectar muestras del objeto. Dos ejemplos que mues-

tran la importancia (y progreso) del estudio de asteroides son, en primer lugar el reciente TAG (*Touch and Go*) de OSIRIS-REx en el asteroide (101955) Bennu. Este suceso, llevado a cabo el 20 de octubre de 2020 implicó el breve aterrizaje de 6 segundos de la sonda espacial en el objeto, con el fin de obtener muestras de polvo para un futuro análisis de su composición [21]. Y el segundo caso, la llegada el 5 de diciembre de 2020 de las muestras del asteroide (162173) Ryugu, recogidas por la misión japonesa Hayabusa 2 en 2018 [31], que servirán a su vez para futuros estudios geológicos y del proceso de formación de cuerpos. Es así que, si bien ya se ha cumplido casi 20 años de la famosa expedición del *NEAR-Shoemaker* orbitando a (433) Eros, eventos como los ocurridos el pasado año resultan precedentes importantes para futuras expediciones que puedan revelar mayores secretos sobre los asteroides.

Como ya se ha mencionado hasta ahora en demasía la palabra asteroide, es pertinente definirla, tal que se les conoce a estos objetos en la actualidad por ser cuerpos rocosos de tamaño pequeño (desde los pocos metros hasta los cientos de kilómetros) ubicados en distintas regiones del Sistema Solar, siendo sus características principales el ser más pequeños que los planetas, agruparse en su mayoría entre las órbitas de Marte y Júpiter – en lo que se conoce como el *Cinturón de Asteroides* – además de no tener una forma característica común entre ellos. Los asteroides suelen clasificarse según la familia dinámica a la que pertenezcan, o según sus emisiones espectrales, composición, albedo o incluso color. Todos estos últimos elementos se ven íntimamente relacionados con el concepto de clase/tipo espectral, que si bien varía según distintos autores (las clasificaciones más importantes son las de Bus-DeMeo [10] [7], Tholen o SMASS), todos ellos agrupan a los asteroides por propiedades similares.

Muchas de estas características, por ejemplo, es usual encontrarlas en bases de datos extensas, que para este trabajo, se usaron las del *Jet Propulsion Laboratory - Small Body Database Browser* [15] y *NASA - Small Bodies Data Ferret* [20]. Sin embargo, al momento de consultar

los *LCBD* (Base de datos de curvas de luz de asteroides, por sus siglas en inglés) o necesitar información como el de la presente investigación, no todas las características suelen hallarse fácilmente. Es por eso, que en ciertas ocasiones, cuando no se cuenta con la información, se puede asociar otras cantidades para estimarla (aunque siempre es mejor contar con la observación, tal como cuando se quiere hallar el radio, por ejemplo). En el caso del albedo, que es conocido por ser el ratio de la radiación reflejada sobre la incidida, puede darse la mencionada situación, que tras conocer ciertos valores como el diámetro del cuerpo (D) y la magnitud absoluta (H), se puede usar la relación 2.1 para obtener el albedo p_v [30].

$$\log(D) = 3,1235 - 0,2H - 0,5 \log(p_v) \quad (2.1)$$

Tras haber mencionado *grosso modo* la definición y agrupación de asteroides en clases, o cómo es posible conocer o derivar algunas de sus características, es importante explicar qué implica la observación de un objeto, y cómo es que este proceso se lleva a cabo. Dado que la mayoría de asteroides supera con creces la magnitud absoluta 8, siempre es necesario un telescopio, con el cual, dependiendo de su apertura, se podrá observar cuerpos de magnitudes superiores. Es debido recalcar que estrellas como Sirius, Canopus, Rigel o Vega, o los planetas conocidos en la antigüedad se acercan al 0 en magnitud (por lo que mientras menor sea el valor, más brillante aparenta ser el objeto en el cielo). Teniendo todo esto en cuenta, tras haber confirmado que el cuerpo en cuestión es visible desde la locación en donde se plantea observar, lo único que hace falta es conseguir el equipo suficiente y emprender la toma de datos.

Si bien la inclemencia del clima puede afectar los planes de observación, también se debe tomar en consideración la posición en que este objeto se presenta en el cielo, así como también el tiempo en el que el mismo es visible en la oscuridad. Posterior a la observación de los cuerpos, se contempla la utilización de programas computacionales para la corrección y análisis de datos. Esto, con la finalidad de hacer fotometría diferencial y de poder obtener curvas de luz

de distintos tipos. Todas estas, posteriormente podrán ayudar a futuro a construir un modelo 3D del objeto, esclarecer sus elementos orbitales o características en su composición.

La potencia del telescopio, los datos recolectados y el grado de sofisticación de los programas permitirán obtener resultados y conclusiones distintas, que, para el caso del Perú, como se mencionó en la introducción, no es una actividad frecuente. Ejemplos de estudios de asteroides en el país están relacionados al área de impactos de meteoritos en suelo peruano tal como es el caso de *Analysis of a crater-forming meteorite impact in Peru* [5] en el 2008, o más recientemente, del 2020, *Astrometric observations of the Potentially Hazardous Asteroid (52768) 1998 OR2 near its maximum approach to Earth* [28]. La falta de artículos científicos a profundidad en el país también motivó a que se pueda estudiar a profundidad uno o más objetos que serán presentados más adelante. Sin embargo, el trasfondo de este trabajo yace en la importancia de la investigación de los cuerpos.

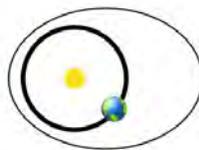
Análogamente a lo presentado páginas atrás, el estudio cumple un papel importante en la preservación de la vida en la Tierra, sin embargo, la progresiva evolución de los asteroides resulta fundamental en el entendimiento del proceso de formación de planetas, siendo estos restos directos de los bloques de construcción estelar, y en cuya composición se halla un registro prístino de las condiciones existentes en el Sistema Solar en sus orígenes [4]. Es en esa línea de pensamiento que, caracterizar objetos poco estudiados previamente, cobra más sentido aun, y es lo que este trabajo intenta lograr.

El presente estudio en su fase inicial intentó únicamente centrarse en analizar cuerpos del Sistema Solar interno. Específicamente, aquellos ubicados en el cinturón de asteroides – y más próximos al planeta – los NEA. En el caso de estos últimos, si bien su nombre indica precisamente que son cuerpos cercanos a la Tierra, sus propiedades y órbitas implican mucho más que ello. En primer lugar, se les puede definir como objetos empujados por la acción de la

gravidad de los planetas vecinos hacia órbitas que permiten que se acerquen a las proximidades de la Tierra [9], sin embargo, al ser remanentes en su mayoría del proceso de formación del Sistema Solar, brindan pistas dinámicas y químicas sobre cómo este ocurrió. Dentro de los NEA, hay 4 categorías, que son los asteroides Amor, Apolo, Atón y Atira. Cada uno de estos objetos sirve como guía para determinar otros cuerpos con características orbitales similares (y agruparlos entre sí), que, por ejemplo, comparten tamaños como el semieje mayor o la distancia del perihelio y afelio. La imagen 2.1 muestra con detalle estas diferencias, en donde destaca la cercanía a la Tierra de los 2 últimos grupos, que para ciertos objetos, puede simbolizar un cruce con la órbita planetaria y a su vez un peligro potencial.

Amors

NEAs próximos a la Tierra con órbitas exteriores a esta, pero interior a la de Marte (llamado por el asteroide (1221) Amor)



$$a > 1.0 \text{ AU}$$

$$1.017 \text{ AU} < q < 1.3 \text{ AU}$$

Apollos

NEAs que **cruzan la órbita** de la Tierra con semieje mayor más grande que el de esta (llamado por el asteroide (1862) Apollo)

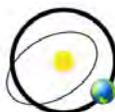


$$a > 1.0 \text{ AU}$$

$$q < 1.017 \text{ AU}$$

Atens

NEAs que **cruzan la órbita** de la Tierra con semieje mayor más pequeño que el de esta (llamado por el asteroide (2062) Atón)

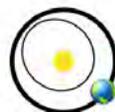


$$a < 1.0 \text{ AU}$$

$$Q > 0.983 \text{ AU}$$

Atiras

NEAs cuyas órbitas están contenidas enteramente dentro de la órbita de la Tierra (llamado por el asteroide (163693) Atira)



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

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

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

Figura 2.1: Tipos de NEA. Imagen adaptada de: cneos.jpl.nasa.gov/about/neo_groups.html

Por otro lado, con respecto al otro gran grupo de asteroides cuyo miembro se investigará en el presente trabajo, se tiene al ya muchas veces mencionado, *Cinturón de Asteroides*. Este in-

menso grupo de cuerpos permanece ubicado a una distancia de 2 veces y media de la Tierra del Sol, conteniendo casi un millón de cuerpos, y variando su tamaño desde relativamente pequeñas rocas, hasta otros cuerpos con miles de metros de diámetro, o incluso mayores tamaños [24]. Entre estos objetos masivos, a quienes con certeza podemos llamar planetoides, destaca Ceres, que a inicios del siglo XIX fue el primer objeto de este tipo en ser descubierto. No obstante, si bien el cinturón concentra la mayoría de objetos en el sector interno del sistema planetario, es preciso mencionar la presencia de los Troyanos y Centauros, que también se hallan cerca al Sol. Habiendo explicado brevemente sobre los NEA y los cuerpos del cinturón de asteroides, el siguiente subcapítulo ahondará en la selección de objetos de estos grupos para los cuales se hicieron observaciones.

2.2. (2104) Toronto y cuerpos afines

Para poder determinar, en primer lugar, un objeto de investigación, fue debido conocer cuáles serían las condiciones en la que éste podría verse. De esta manera, tras confirmar el apoyo del Instituto Astronómico de la Academia Rumana y la toma de datos desde su Observatorio Berthelot, en Hunedoara (código *IAU*: L54), se procedió a investigar, comprendiendo entre los meses de octubre y diciembre de 2020, qué objetos con características llamativas eran visibles en el cielo europeo oriental.

Haciendo uso de la base de datos del *IAU Minor Planet Center* [26], se buscó particularmente 3 elementos en común para que un cuerpo pueda calzar en las condiciones deseadas: magnitud (aparente y absoluta), órbita y posición en el cielo. La primera de estas características va muy emparentada con las propias posibilidades del telescopio del observatorio, que, según los mismos encargados del lugar, era capaz de observar con nitidez cuanto mucho a un cuerpo de magnitud aparente de 17.3. De esta manera, aquellos asteroides muy pequeños y

lejanos quedaron descartados casi de inmediato (hablando del cinturón de asteroides), mientras que los Troyanos, Centauros u otros cuerpos del cinturón de Kuiper, tampoco cumplían dicho requerimiento. Es así que se enfocó la búsqueda principalmente en los asteroides Amor, Apolo, Atón y Atira (todos estos, tipos de NEA), y el primer candidato fue (1036) Ganymed.

Este objeto, pese a no ser de los más conocidos, fungió un papel importante en siglo XX en el estudio de objetos peligrosos por su cercanía con la Tierra, puesto que está clasificado como el NEA de mayor tamaño, aunque este nunca cruza la órbita terrestre. De esta manera, pese a acercarse casi la misma distancia que separa a la Tierra de Venus, no representa un peligro potencial de momento (y por ende no está clasificado como PHA). Por otro lado, independientemente de su tamaño (diámetro aproximado de 38 kilómetros), la posición en la que se encuentra en la actualidad dista únicamente un 10 % de su punto más cercano con la Tierra (0.37 unidades astronómicas), factor que favorece en una mejor condición de observación, añadiendo también una magnitud aparente de 13, que lo convertiría técnicamente en el objeto más brillante de los estudiados para el presente trabajo.

Entre otras características del asteroide, este mismo, al ser clasificado como un NEA, no pertenece propiamente al cinturón de asteroides, sino que está en el subgrupo que define el cuerpo (1221) Amor, que lleva su propio nombre. Los asteroides Amor, tal como se mostró en el subcapítulo anterior, se distinguen por residir en los bordes de la órbita terrestres (semieje mayor de 1 unidad astronómica), mientras que su distancia de perihelio oscila entre 1.017 y 1.3 u.a. [3]. Posteriormente se podrá ver en gráficas a detalle la órbita de este cuerpo.

Habiendo seleccionado a (1036) Ganymed, se prosiguió con la búsqueda de otros cuerpos de interés. No obstante, la mayoría de NEA visibles desde el observatorio L54 superaba la magnitud aparente máxima, por lo que, tras haber hecho simulaciones para el centenar de cuerpos más prominentes de este grupo y no obtener resultados satisfactorios, se enfocó la investiga-

ción en cuerpos inusuales del cinturón exterior de asteroides. La razón de ello fue meramente estratégica, puesto que la mayoría de cuerpos internos ya han sido estudiados a profundidad, y se decidió centrar el estudio en objetos poco conocidos. Teniendo aún en cuenta las características buscadas, se pudo encontrar dos coincidencias, las cuales fueron (1467) Mashona y (2104) Toronto.

El primero de estos, resalta por ser un asteroide con un diámetro relativamente grande para su ubicación (aproximadamente 90 km), lo que lo sitúa entre los 200 cuerpos más grandes existentes (en la actualidad). No obstante, es la magnitud absoluta su característica más importante, puesto que es con creces el objeto con un menor valor para esta característica a ser observado en este estudio. Todos los datos de este tipo están mostrados a detalle en la Tabla 2.1. Dentro de dicha tabla, es preciso distinguir las diferencias entre *magnitud aparente* y *magnitud absoluta*. El primero de estos conceptos comprende a la magnitud vista en las proximidades de la superficie del planeta o el cielo, siendo un valor variable y dependiente respecto a su posición en el horizonte [29]. Algo importante de recalcar es la escala de Pogson, pues en ella se define que la diferencia en 5 puntos de magnitud representa a una relación en términos del brillo de 100 para los cuerpos. Esta misma expresión es representada en 2.2, en donde las variables 'm' y 'F' representan la magnitud y flujo, respectivamente, mientras que los subíndices, el número del objeto al que caracterizan [29].

$$m_1 - m_2 = -2,5 * \log_{10} (F_1/F_2) \quad (2.2)$$

Por otro lado, la *magnitud absoluta* (H) será el valor de la magnitud aparente suponiendo que el objeto se encontrase en un vacío interestelar a una distancia de 1 unidad astronómica, tanto del Sol como del asteroide a observar [14]. Además, un factor relacionado a este valor es que, en conjunto con el albedo, son capaces de brindar un aproximado del tamaño del cuerpo, lo que favorece en poder establecer una relación directa entre la tasa de rotación y el propio tamaño;

por lo que tener a H definido se vuelve una tarea fundamental [29]. Asimismo, resalta también de la tabla los distintos periodos de rotación, que al ser relativamente pequeños (como máximo, de 10 horas), se esperaría poder observar a los objetos durante toda una vuelta completa en su propio eje.

Asteroide			
Característica	(1036) Ganymed	(1467) Mashona	(2104) Toronto
Magnitud Aparente	13.31	14.07	15.28
Magnitud Absoluta	9.45	8.57	10.30
Diámetro	37.675 km	89.160 km	35.874 km
Perihelio / Afelio	1.244 / 4.085 ua	2.950 / 3.817 ua	2.796 / 3.571 ua
Clase Espectral	S	Ch	X
Periodo de Rotación	10.31 h	9.74 h	8.97 h

Cuadro 2.1: Características de los 3 cuerpos en estudio ^a

Hablando de (1467) Mashona nuevamente, al ubicarse en la sección más alejada del cinturón, se encuentra dinámicamente relacionado con el grupo de las *Cibeles*, conocidas por estar regularmente en resonancia con Júpiter. Precisamente, esta familia de cuerpos, nombrada en torno a (65) Cybele, se caracteriza por encontrarse entre 2 a 3 unidades astronómicas de distancia, mientras que su famosa resonancia produce una inestabilidad dinámica en la mayoría de sus miembros, así como también el grupo vecino de las *Hildas* [8].

En cuanto a (2104) Toronto, pese a tener menos de la mitad del tamaño de (1467) Mashona (diámetro aproximado de 36 kilómetros), o tener una magnitud absoluta que lo presenta en el rango visible para el telescopio, son sus características físicas aquellas que lo hacen resaltar.

^aLa información recolectada de la tabla proviene de [15]

Su lejanía (que oscila entre los 2.8 y 3.6 unidades astronómicas) no han permitido un estudio a profundidad sobre su composición. Por otro lado, haciendo énfasis en su clasificación espectral, se tenían dudas respecto a la grupo al que pertenecía, sin embargo, estudios de su espectro en *surveys* lo situán en la clase X [18]. En ese sentido, dicha clase está caracterizada, según Bus-DeMeo, por espectros poco uniformes y sin elementos distintivos (en general), además de un centro de banda de absorción alrededor de los 0.49 micrómetros [7]. Es así que es posible ver una gráfica del propio espectro de (2104) Toronto en la figura 2.2, en donde las longitudes de onda del cuerpo estarán comprendidas entre las 0.49 (tal como lo estipula la clase taxonómica X) y 0.92 micras.

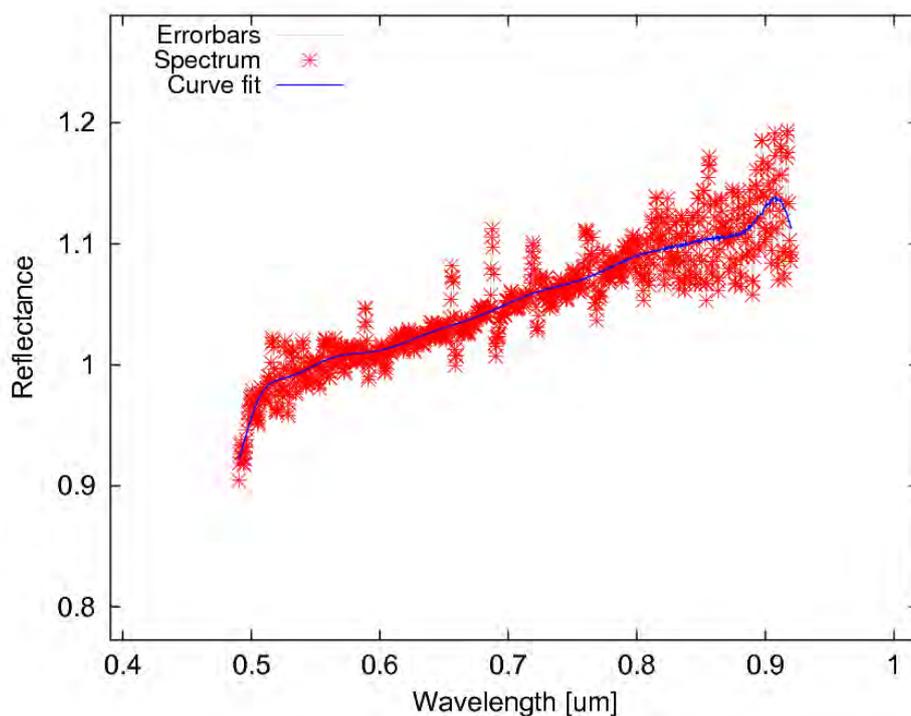


Figura 2.2: Gráfica del espectro de (2104) Toronto ^b

Por otro lado, emisiones espectrales de los asteroides brindan más información de la que se aparenta. Por ejemplo, si es que existiese alguna conexión con meteoritos, un análisis comparativo de ambas curvas podría dar indicios en que el asteroide pueda ser considerado como

^bLa gráfica fue obtenida del estudio *S³OS² : the visible spectroscopic survey of 820 asteroids* [18]

el cuerpo padre de aquel objeto que cayó en la Tierra. De esta manera, haciendo uso del portal M4AST (*Modelling for Asteroids*) y su extensa base de datos [23], es que se pudo encontrar algunos ejemplares que cumplan con ser relativamente similares al espectro de (2104) Toronto. Los mismos, visibles en las figuras 2.3 y 2.4 (provenientes de las muestras 'Migei 4bcg' y 'Mundrabilla', respectivamente) denotan (líneas de color rojo), en comparación con la gráfica 2.2 (líneas de color azul), altas semejanzas, especialmente en el intervalo de longitudes de onda comprendidas de los espectros [19].

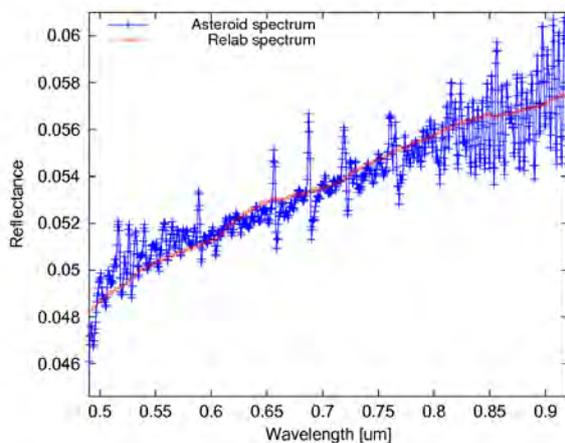


Figura 2.3: Espectro para la muestra Migei 4bcg ^c

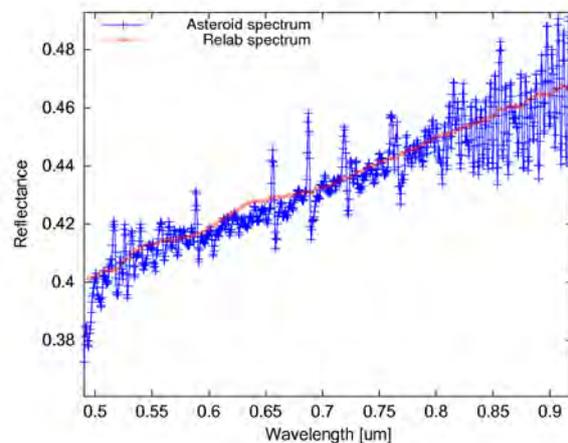


Figura 2.4: Espectro para la muestra Mundrabilla ^d

La clase taxonómica, como se ha mencionado, está relacionada con la composición del cuerpo, es decir, con sus características físicas. Sin embargo, históricamente, previo a la invención de la espectroscopía, fueron los elementos orbitales aquellos únicos valores que se podían conocer. Compuesto por un conjunto de 6 números fijos, estos elementos son capaces de presentar al objeto tal como se ubica en el espacio [6]. Para determinarlos, solo se necesita registrar puntos de la trayectoria del cuerpo, siendo un ejemplo claro de su utilidad las gráficas de las órbitas, pues no podrían haber realizado sin la ayuda de estos elementos. Es así, que en la tabla 2.2, se presentan dichos valores para todos los objetos planificados a observar.

^cLa gráfica fue obtenida de [19]

^dLa gráfica fue obtenida de [19]

Elemento Orbital	Asteroide		
	(1036) Ganymed	(1467) Mashona	(2104) Toronto
Excentricidad	0.533	0.129	0.121
Semieje mayor	2.664 ua	3.383 ua	3.184 ua
Longitud nodo ascendente	215.546°	326.325°	252.449°
Inclinación	26.677°	21.906°	18.397°
Argumento del periastro	136.364°	350.037°	290.729°
Anomalía media	4.817°	53.148°	173.681°

Cuadro 2.2: Elementos orbitales para los 3 cuerpos en estudio ^e

El primero de los valores es la *excentricidad* (e), la cual describirá matemáticamente a la órbita, siendo un número real positivo, el cual caracteriza únicamente a la cónica que traza. En términos prácticos, las distintas excentricidades oscilarán entre 0 a 1, siendo 0 una circunferencia perfecta, y una elipse para todos los valores mayores a este, pero inferiores a 1. Esto, debido a que si superase la unidad, se volvería una parábola o una hipérbola, generando así una curva no cerrada. En cuanto al *semieje mayor* (a), dado que todas las trayectorias serán elipses, se puede tomar el valor propio matemático de ellas, de manera que se representará como la mitad del diámetro más largo. No obstante, en la práctica se toma como semieje mayor al valor promedio de la distancia entre el objeto en órbita y el orbitado (asteroide y Sol, respectivamente).

La *longitud del nodo ascendente* (Ω) será el ángulo, en el plano de referencia, entre el *Punto Aries* y el nodo, de manera que se mide dicho ángulo en sentido anti-horario. Cabe recordar que el Punto Aries es aquella posición para la que corresponde el momento del equinoccio de otoño (en el hemisferio sur), mientras que el nodo, es el punto en donde ambos planos de órbitas

^eLa información recolectada de la tabla proviene de [15]

intersecan. Por su parte, la *inclinación* (i) representará el ángulo que forman ambos planos de órbita, el del Sol, y el del asteroide en estudio.

Para hallar el *argumento del periastro* (ω), o en este caso, que también corresponde llamarlo argumento del perihelio, es el ángulo que definen el plano de órbita y el periastro, siendo este aquel punto en donde el Sol y el asteroide tienen una distancia mínima. Finalmente, para la *anomalía media* (M_o) es necesario definir una trayectoria circular hipotética partiendo del pericentro, de manera que el valor quedará determinado por el ángulo que dista desde este punto, en el periodo de tiempo en el que el objeto también se trasladó en su órbita real.

De la tabla 2.2 también, es posible destacar la similitud de órbitas entre (1467) Mashona y (2104) Toronto, al ser relativamente circulares, mientras que (1036) Ganymed se presentaba con una trayectoria un tanto más excéntrica. Dichas similitudes entre los cuerpos externos no disminuyeron, puesto que en términos del semieje mayor, también se acercaban mucho. Una mejor visión de las 3 órbitas en simultáneo se presenta en los anexos, en la figura A1.

Habiendo explicado todas las características esenciales de los cuerpos, en cuanto se envió la información de los mismos hasta Rumania, tras pasar los meses, solo se pudo realizar observaciones para uno de los cuerpos. En la segunda mitad del mes de octubre, a nuestros colegas solo les fue posible tomar imágenes a (2104) Toronto, pues las condiciones atmosféricas no fueron las más favorables en cuanto se deseó hacer lo mismo con los otros asteroides. El clima siempre fue y será un factor decisivo en cuanto a observaciones astronómicas se refiere, puesto que en una ventana de tiempo de casi 3 meses, nunca se llegó a tener un cielo despejado para observar los objetos restantes, pese a que teóricamente se encontraban en la región visible. Para visualizar esto mejor, se realizaron previamente gráficas ViSiON [22] para la posición en el cielo, intentando simular las condiciones de observación desde el observatorio y el paso del objeto a lo largo de distintas noches. En la figura 2.5 se presenta dicho gráfico para uno de

los días de observación de (2104) Toronto, mientras que en los anexos, también es posible ver dichas figuras planificadas para los otros dos cuerpos (imágenes A2 y A3).

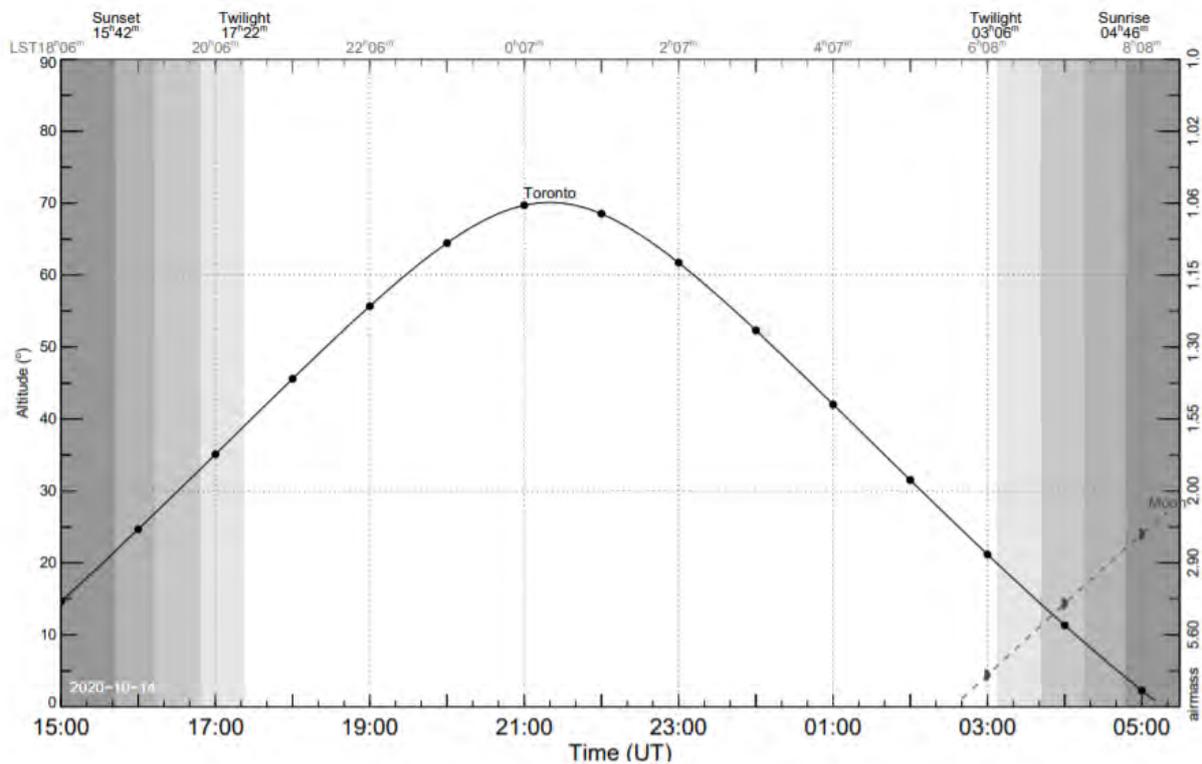


Figura 2.5: Gráfico ViSiON de (2104) Toronto para el día 14 de octubre de 2020^f

Según lo visto en dicha gráfica, se presenta en el cielo, en su punto máximo, a un altitud considerable, factor que es beneficioso dado que, en materia de observación, cuanto menor sea la altitud del objeto a observar (o más alejado esté del cenit), será mayor la masa de aire que deberá atravesar la luz para llegar hasta el telescopio, lo que se traduce en distorsiones para la imagen, además de que el brillo del asteroide se atenuará progresivamente por extinción, mientras que existirá un enrojecimiento causado por la dispersión de las longitudes de ondas más cortas de la luz [29]. En el propio gráfico a su vez, se puede apreciar la hora en donde el objeto fue visible (en tiempo universal UTC), que según las observaciones que se llevaron a cabo, (2104) Toronto llega a elevarse mucho del horizonte, hecho que se evidenciará al momento de

^fSe hizo la simulación que produjo este gráfico con el generador de efemérides Miriade [22]

tomar imágenes de él y captar su brillo, pese a que en el momento de la toma de datos en sí no estuviese en su punto máximo de elevación en el cielo.

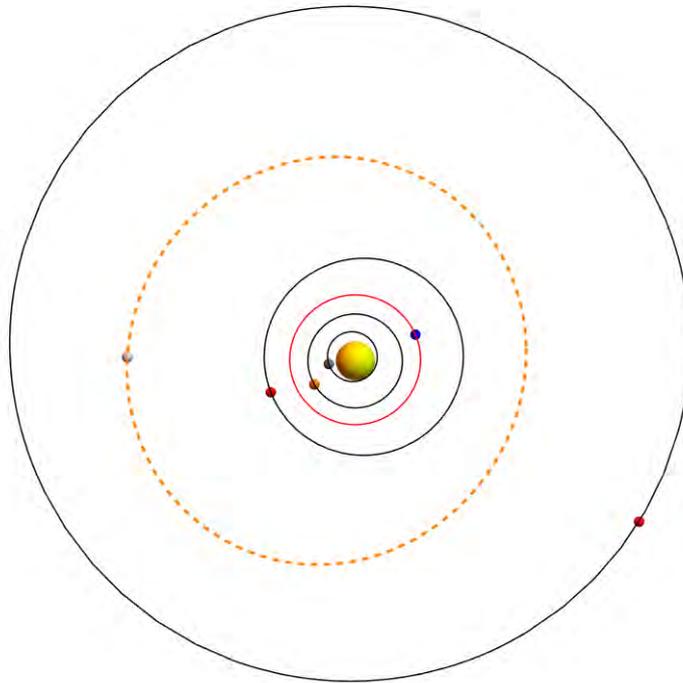


Figura 2.6: En naranja, la trayectoria de (2104) Toronto. En rojo, la órbita de la Tierra ⁸

Por otro lado, en términos orbitales, (2104) Toronto, al ser un cuerpo relativamente lejano del cinturón, englobará dentro de sí a las trayectorias de los 4 primeros planetas e incluso al mencionado (1036) Ganymed, aunque esto no le alcanzará como para, en algún punto, encontrarse sobre la órbita de Júpiter. Dado que es un cuerpo no relacionado a otras familias dinámicas, no es posible hacer una comparación, sino clasificarlo solo como un objeto externo del cinturón de asteroides. La órbita en cuestión se ve plasmada en la figura 2.6, en donde se observa claramente su trayectoria cuasi-circular.

De esta manera, tras haber obtenido información relacionada a (2104) Toronto y conocer el movimiento del cuerpo a largo de los días de observación, se recibió las imágenes provenientes de Rumania para empezar con el proceso de corrección, procesamiento y análisis, que es justamente lo que el siguiente capítulo planteará.

⁸Se elaboró este gráfico haciendo uso del programa *Wolfram Mathematica*

3. *Procedimiento y tratamiento de imágenes*

3.1. **Preámbulo: corrección de imágenes**

El panorama general luego de elegir un objeto a observar, en este punto, parece sencillo. Se ha escogido una fecha y hora para la toma de datos, se tiene un telescopio y otro tipo de instrumentos, sin embargo, luego de adquirir la información recaudada, el camino a seguir aún es largo. A diferencia de lo que el pensamiento colectivo pueda imaginar, las imágenes tomadas no son de por sí solas lo que luego se va a analizar. Previo a ello, hay una secuencia de pasos, entre ellas, una serie de correcciones que se van a llevar a cabo.

La imagen que uno obtiene, por más perfecta a simple vista que puede presentarse, acarrea una larga lista de imperfecciones que deben eliminarse. En un proceso de "masterización", se intentará modificar en su totalidad e individualmente, a cada uno de los píxeles que conforman la fotografía. Entre los pasos a llevarse a cabo, se incluye inicialmente, la toma de lo conocido comúnmente como *bias frame*. Este campo (tomando esa traducción literal) se caracteriza por ser una cantidad positiva de electrones que se aplica desde las cámaras CCD hacia los propios píxeles. En términos prácticos pero la manera más efectiva de observar la contribución es realizando exposiciones repetidas de tiempo cero con el obturador cerrado, de manera que se eliminen rayos cósmicos, ruido externo y aleatoriedad en los píxeles al momento de la lectura [29].

Por otro lado, también existe el conocido *dark frame*. Haciendo un símil con el *bias*, el mismo es utilizado para remover el ruido térmico que se ha generado debido a corrientes de oscuridad dentro del detector CCD [29]. Esta corriente en sí puede ser disminuida con el enfriamiento

del material, sin embargo, el proceso general de remoción y disminución de la temperatura, en la medida de lo posible, deberá ser a la misma temperatura y de la misma duración que la toma de datos inicial. Es así, que restando este campo a la imagen original se elimina los remanentes del *dark current*. Y, al igual que el *bias frame*, este se suele tomar con el obturador cerrado para evitar pasos de luz arribando al chip del *CCD*.

Existe un tercer campo conocido como *flat field*, que usualmente oscila entre los intervalos de 0 y 1, y resulta ser un valor que se multiplica o divide para normalizar a todos los píxeles del campo actual (o científico) para corregir la sensibilidad que estos tienen como reacción a distintos efectos, entre los cuales se encuentran el efecto obturador, viñeteo o incluso el mismo polvo del ambiente. En términos prácticos, el proceso a llevar a cabo para obtener un campo como este, consiste realizar capturas de imagen del cielo antes del amanecer o en pleno crepúsculo, de modo que se reciba la luz del objeto a observar de manera uniforme [29]. Es así, que se divide la fotografía original entre esta toma esperando corregir los defectos previamente mencionados.

En la práctica, cada uno de los *frames* se toma independientemente, aunque seguir el orden en el que fueron mencionados es comúnmente, la manera más frecuente de hacerlo. De esta manera, tras tener los archivos en el formato *.fit*^a de las fotografías, y cada uno de estos campos, el paso siguiente es el procesamiento de las imágenes, y en este caso se utilizó el *software* libre *AstroImageJ*.

3.2. Procesamiento de imágenes

Habiendo conseguido toda la data del observatorio Berthelot, lo primero a hacer sería corregir la imagen, tal como se mencionó en la sección anterior. Estas, presentaban muchos errores,

^aPerteneciente al formato *FITS* (Sistema de transporte de imágenes flexible, por sus siglas en inglés)

por lo que era imperativo llevar a cabo el proceso. Empezando por el *bias*, dado que en total se obtuvieron un gran número de imágenes para cada día, para cada objeto, lo recomendable fue crear un "master *bias*", en donde se agrupaban y procesaban en un solo archivo, el total de *bias* conseguido para cada toma. Análogamente, se procedió a hacer lo mismo con el *flat* y *dark*, para tener un master *frame* de ambos. Es así que se puede presentar, en los gráficos 3.1, 3.2 y 3.3 un caso específico de *bias*, *dark* y *flat* respectivamente, mientras que en las gráficas 3.4, 3.5 y 3.6 sus correspondientes "masterizaciones". Estos ejemplos fueron elegidos de la toma de datos realizada el 14 de octubre de 2020 para el asteroide (2104) Toronto.

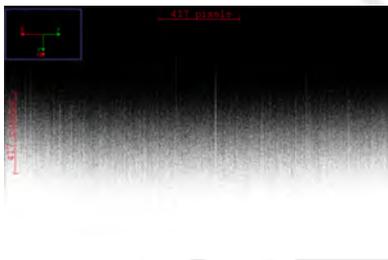


Figura 3.1: *Bias frame*

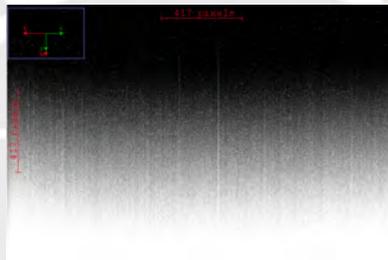


Figura 3.2: *Dark frame*

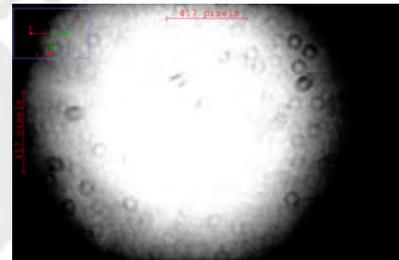


Figura 3.3: *Flat frame*

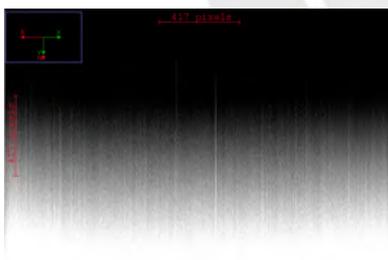


Figura 3.4: Master *bias*



Figura 3.5: Master *dark*



Figura 3.6: Master *flat*

Culminado el proceso de masterización, únicamente quedaba sustraer el master *dark* y dividir por el master *flat* de la data original, también conocido como *science*. La ausencia del master *bias* puede sorprender, sin embargo, este mismo fue sustraído inicialmente a la hora de construir el master *flat*, por lo que sería innecesario volver a repetir dicho paso, tanto con el *dark*, y menos con el *science frame*. Es así que todas las imágenes fueron procesadas, y en los

gráficos 3.7 y 3.8 se puede ver la diferencia *post*-corrección, nuevamente, para la toma de datos realizada el 14 de octubre de 2020. Asimismo, fue llevado a cabo un proceso de estabilización de la imagen, para que cada cuando se generen gráficos de distinto tipo, el programa sepa identificar adecuadamente qué objeto es representado en cada una de las fotografías, ya que como estas son tomadas a distintos tiempo, las estrellas y asteroides de fondo tienden a cambiar su posición.

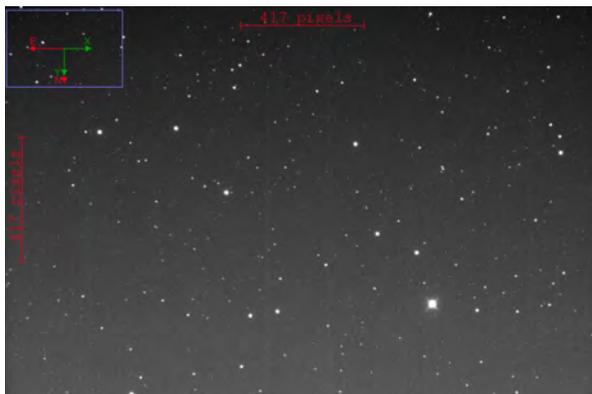


Figura 3.7: Imagen sin corregir

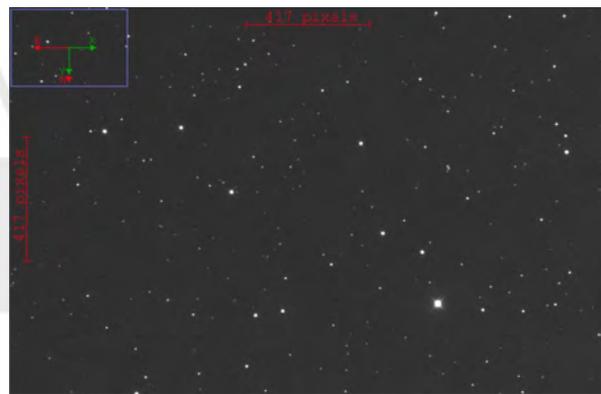


Figura 3.8: Imagen corregida

Por otro lado, en este par de imágenes, resaltan las diferencias tras llevar a cabo el proceso de corrección, puesto que claramente se puede observar una línea vertical en la imagen original, tanto como un brillo poco uniforme de fondo, hecho que se arregla sin mayor problema luego de sustraer el *master dark frame* y dividir la data entre el *master flat frame*.

3.3. Fotometría diferencial

El paso final en el tratamiento de las imágenes, conlleva precisamente a los resultados que se quieren obtener y analizar. Tras tener todas las fotografías corregidas, cargadas y ordenadas en el programa *AstroImageJ*, lo más importante es identificar cuál de todos los pequeños puntos, más o menos brillantes, es el asteroide a estudiar. Para ello y como ayuda, se hará uso de *Aladin* [11], *software* especializado en imágenes del cielo nocturno, que funge como atlas y librería

para muchos objetos de distinta índole (estrellas, galaxias, asteroides, etc). El propio programa es capaz de ubicar al cuerpo deseado utilizando del código *IAU* del lugar, el nombre del objeto y la época, y haciendo uso del catálogo *SkyBoT* [2] (observatorio virtual para rastrear objetos), puede localizar, en lo que resulta ser una imagen similar a la capturada, al asteroide deseado. Tras ingresar los datos mencionados anteriormente y dejar el resto por defecto en la ventanilla mostrada en la figura 3.9, *Aladin* se encargará de buscar y ubicar al objeto.

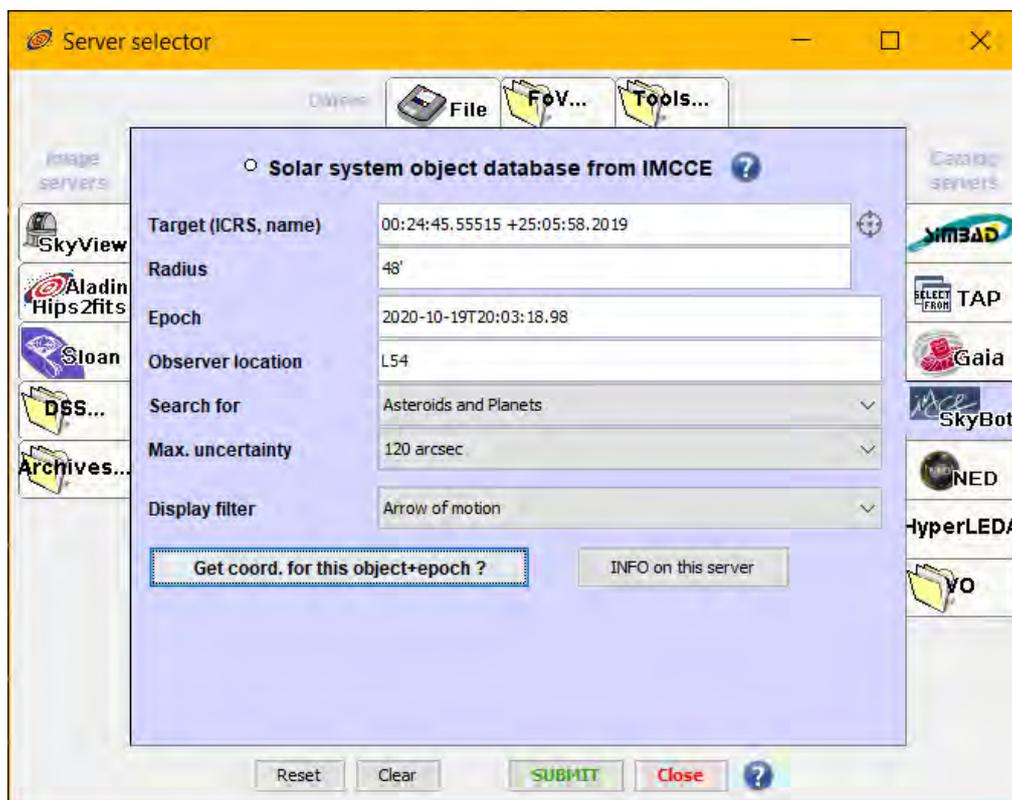


Figura 3.9: Ventana para ingresar los parámetros correspondientes del asteroide

De esta manera, el asteroide se presentará en el origen de la saeta que aparece automáticamente, siendo dicha flecha la dirección en la que el mismo se moverá, la cual se puede ver con detalle en la imagen 3.10. El paso siguiente será ubicar, comparando las imágenes, al asteroide, en el programa *AstroImageJ*. Una vez aperturado el mismo, se deberá verificar que la orientación de la imagen corresponde a la utilizada en *Aladin*, dado que muchas veces se invierten

los ejes en la toma de datos por la posición del telescopio / cámara. Sin embargo, el paso más esencial es empezar a reconocer patrones de estrellas en común para ambas pantallas de carga.

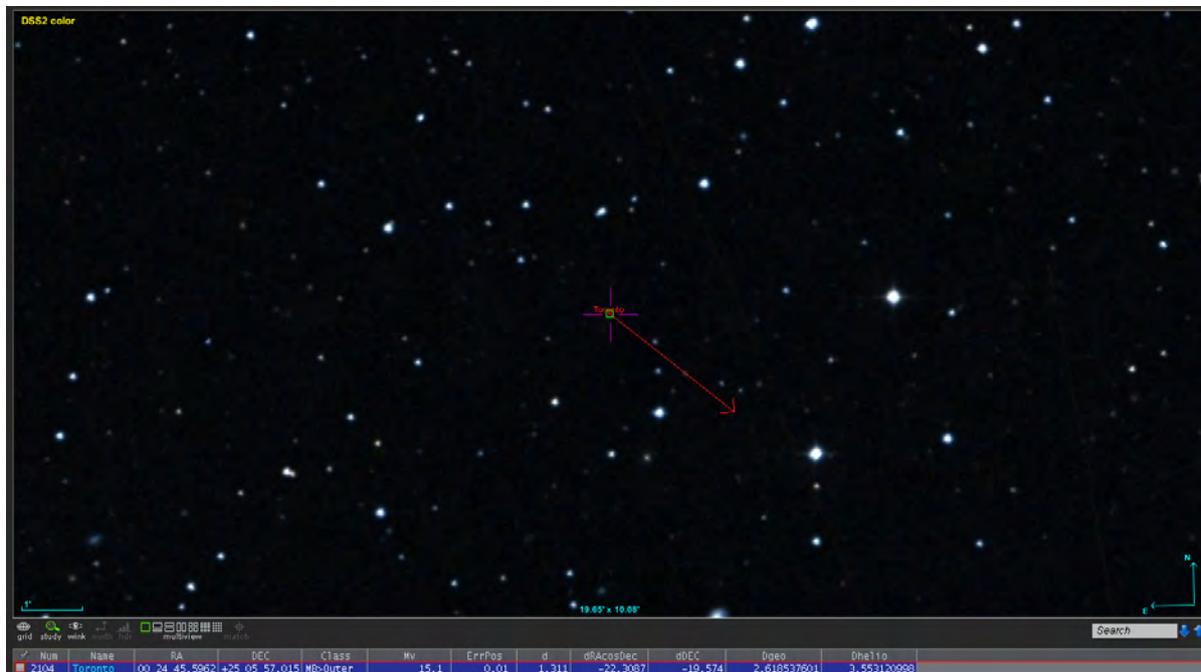


Figura 3.10: Pantalla del *Aladin* mostrando al asteroide (2104) Toronto

Luego, tras tener ubicados a estos, tal como se muestra en la figura 3.11, el proceso de elaboración de gráficos puede empezar. Cabe resaltar que en dicha imagen, se ha encerrado en rojo al asteroide para facilitar su visión, mas esto es una edición posterior, pues el programa no realiza esta función.

Para realizar estos gráficos de distintos tipos, lo primero que se hizo, para las distintas tomas de datos, fue seleccionar al objetivo a la par que se señalaban ciertas estrellas de referencia a su alrededor, de manera que, de antemano, se conocieran las magnitudes de dichas estrellas. Para identificarlas, se hizo nuevamente uso de *Aladin*, dado que al poseer un catálogo capaz de reconocer una inmenso número de elementos en el cielo, únicamente seleccionando el punto deseado, y dejando fijo el cursor allí, se podrá ver su nombre, magnitud e incluso podrá redirigirse con un hipervínculo hacia una web con información más detallada. Luego, para introducir las todas estas magnitudes de las estrellas en *AstroImageJ*, se utilizó la herramienta de



Figura 3.11: Pantalla del *AstroImageJ* mostrando al asteroide (2104) Toronto



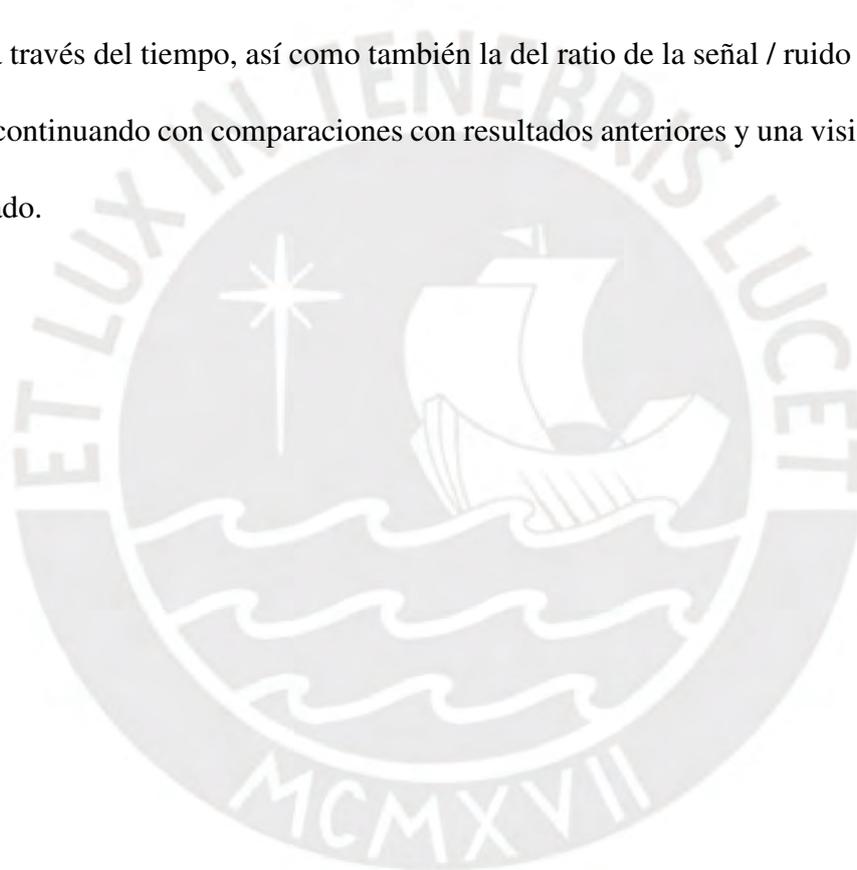
Figura 3.12: Asteroide y estrellas de referencia

"fotometría de múltiples aperturas", mientras que poco a poco se fueron eligiendo estrellas conocidas, tal como se puede observar en la figura 3.12. En ella, en el centro, con letras en verde

se encuentra el asteroide, mientras que todos los puntos rojos a su alrededor son estrellas de referencia previamente identificadas.

De esta manera, según sea el día de observación, se utilizaron entre 10 a 12 objetos conocidos con una magnitud máxima de 13, evitando estrellas variables, otros asteroides, e incluso galaxias, puesto que se buscó tener cuerpos con brillos constantes, con el fin de comparar el mismo con el que el asteroide reflejaba y analizar qué significan las variaciones en él.

Prosiguiendo con el análisis, en el siguiente capítulo se mostrarán a detalle las gráficas de la magnitud a través del tiempo, así como también la del ratio de la señal / ruido versus el paso de las horas, continuando con comparaciones con resultados anteriores y una visión crítica para con lo trabajado.



4. Resultados

Previo a la presentación de las distintas gráficas que se pudieron preparar, se hizo un resumen de todas aquellas observaciones realizadas desde el observatorio Berthelot. Las siguientes, se detallan en la tabla 4.1.

(2104) Toronto

Toma	Fecha	Intervalo (UTC)	# de imágenes
Día 1	14-10-2020	17:27:47.12 - 19:14:42.08	89
Día 2	19-10-2020	20:04:30.45 - 21:37:01.54	76
Día 3	20-10-2020	19:15:40.97 - 21:00:11.36	89
Día 4	22-10-2020	21:09:16.42 - 23:29:28.72	119

Cuadro 4.1: Fechas de observación para (2104) Toronto

Pese a tener originalmente una mayor cantidad de imágenes por día, muchas de ellas fueron suprimidas por contener errores, tales como enfocar mal el telescopio, presentarse borrosa la fotografía, o incluso encontrar otros objetos opacando el brillo del asteroide (este proceso fue llevado a cabo también previo a la corrección, en donde se discriminó imágenes con estrellas movidas o con trazas). Finalmente, para el caso de (2104) Toronto, únicamente se eligieron para analizar 373 de los 449 archivos *.fit* proporcionados por el observatorio.

Por otro lado, si bien el programa *AstroImageJ* es capaz de realizar gráficas de la magnitud a través del tiempo (como la que se puede observar en la figura 4.1) para cada toma de datos, se intentó realizar una gráfica común en donde se pudieran ver estas variaciones puestas una a

continuación de la otra. En dicha imagen a su vez se ve presente el error, factor muy importante a tener en consideración, como también la magnitud en una escala normalizada, que en contraposición al posterior análisis, no se presentará los datos de esta manera, pues se intentará ver las variaciones de este valor, tal como se presentan en la realidad.

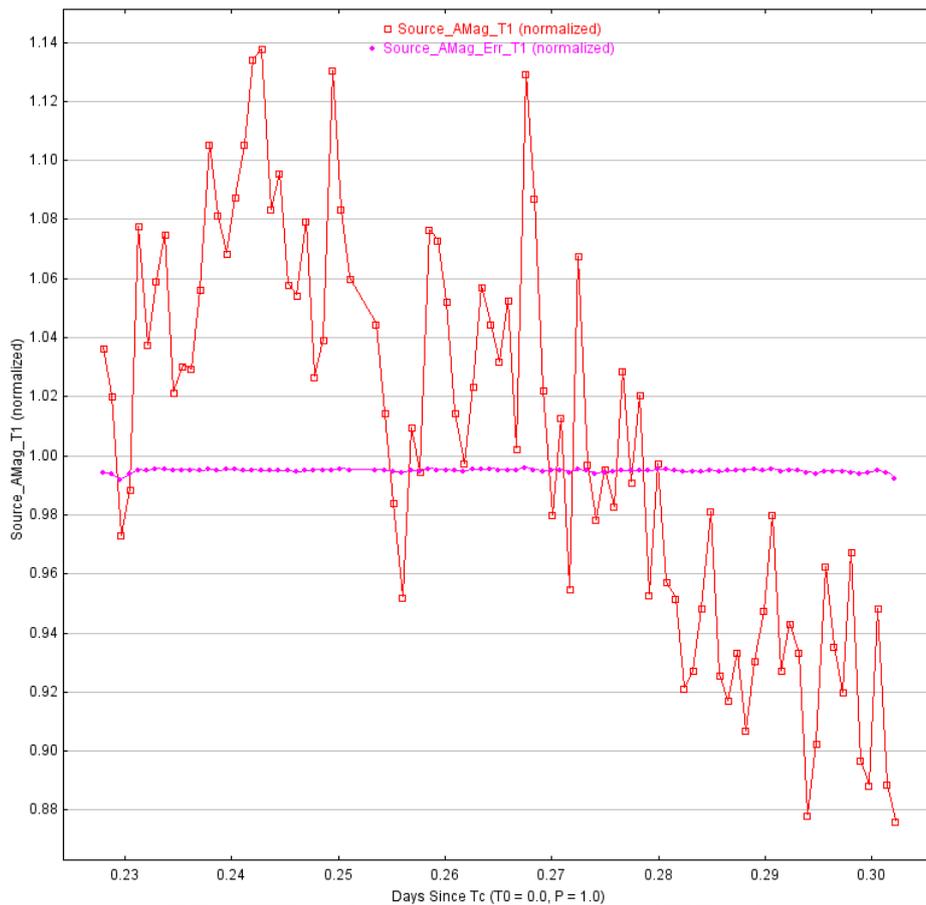


Figura 4.1: Magnitud vs. Tiempo (*AstroImageJ*) para el 14 de octubre de 2020

A continuación, se extrajo toda la información obtenida en archivos `.csv`, de manera que se pueda trabajar con ella usando algún lenguaje de programación, que para el caso de este estudio, fue *Python* (ver código en el anexo A). Haciendo algunos arreglos para poder presentar continuamente cada una de las variaciones de la magnitud, y a su vez convertir los intervalos de tiempo Juliano a horas, se pudo obtener, en primer lugar la gráfica 4.2, que presenta la magnitud versus el tiempo, para las 373 imágenes utilizadas. Es así que en cada color es posible

diferenciar el día al que corresponden las imágenes, como también que la magnitud promedio es de 15.39, teniendo un pico máximo en el valor de 15.87, mientras que un mínimo en 14.89.

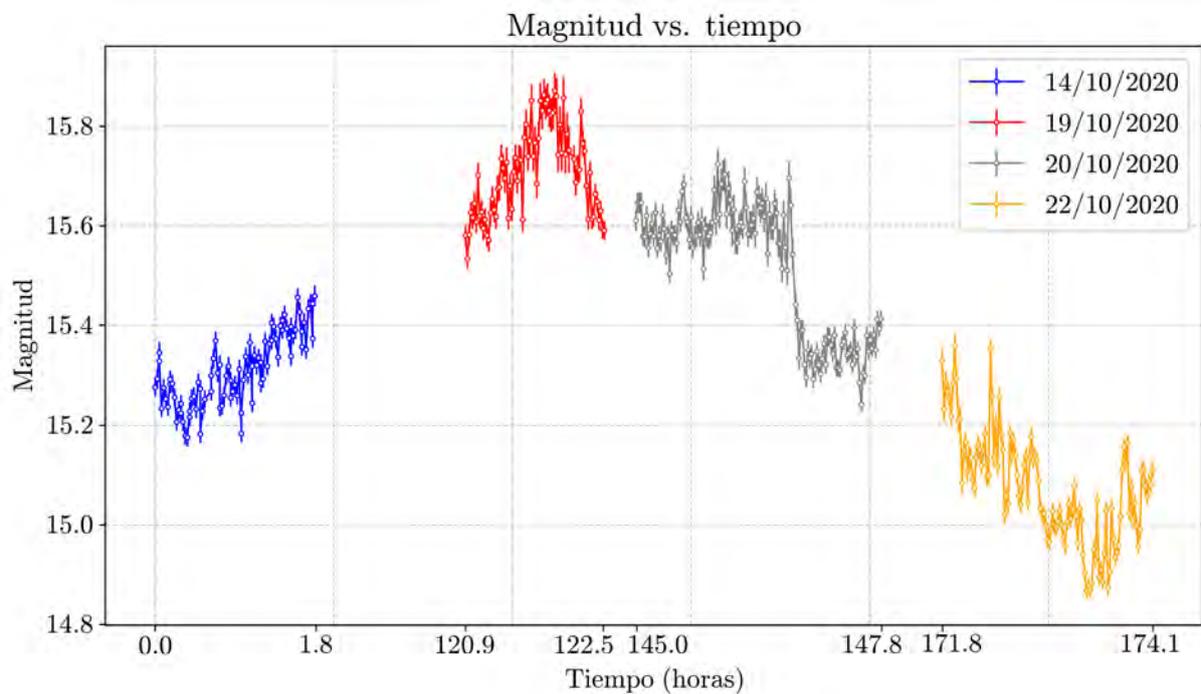


Figura 4.2: Magnitud vs. Tiempo

Sin embargo, el proceso de elaboración del mismo fue más complicado de lo que aparentaba. Para empezar, al no tener data continua en el tiempo (es decir, tal que todos las tomas hubiesen sido la misma noche), se tuvo que lidiar con los intervalos de tiempo entre día y día para plasmar así una gráfica, a escala, que presente la diferencia de tiempos entre tomas. En ese sentido, con el fin de evitar tener una figura casi ilegible, que se optó por permanecer la escala (en horas) para el tiempo de observación, mientras que los días que transcurrieron sin observaciones, se presentarían en una escala muy minimizada. Es por eso que, en la imagen 4.2 (y en las posteriores) se notan saltos en el tiempo entre las 1.8 hasta casi las 120.9 horas, recalando que dichos espacios en blanco representan el tiempo no observado, de manera que entre la primera y segunda toma, en donde hubo 5 días de diferencia, se presentará un vacío mayor que en entre el de la segunda y tercera, en donde únicamente distaron cerca de 24 horas.

La gráfica resalta a su vez por mostrar las distintas caras que el asteroide presenta. Esta característica se ve relacionada con el periodo, puesto que es posible notar cómo es que ha completado casi en su totalidad 1 vuelta en su propio eje. Si bien, el tiempo transcurrido entre el 14 y 22 de octubre indica que el objeto rotó poco más de 19 veces, teniendo en consideración únicamente a las observaciones en solitario, estas suman aproximadamente 8 horas y media, y dado que periodo del objeto obtenido previamente en [15] se acerca a las 9 horas, es que la relación cobra más sentido. Por otra parte, se puede hacer alguna comparación con ciertos trabajos realizados en el pasado por otros autores, tal como el planteado por David Augustin y Raoul Behrend [1], visible en la figura 4.3. En esta, se puede evidenciar la similitudes entre la primera sección de dicha curva, en contraposición con la hallada en este trabajo (figura 4.2), hecho que brinda un mayor grado de credibilidad en cuanto a los resultados se refiere.

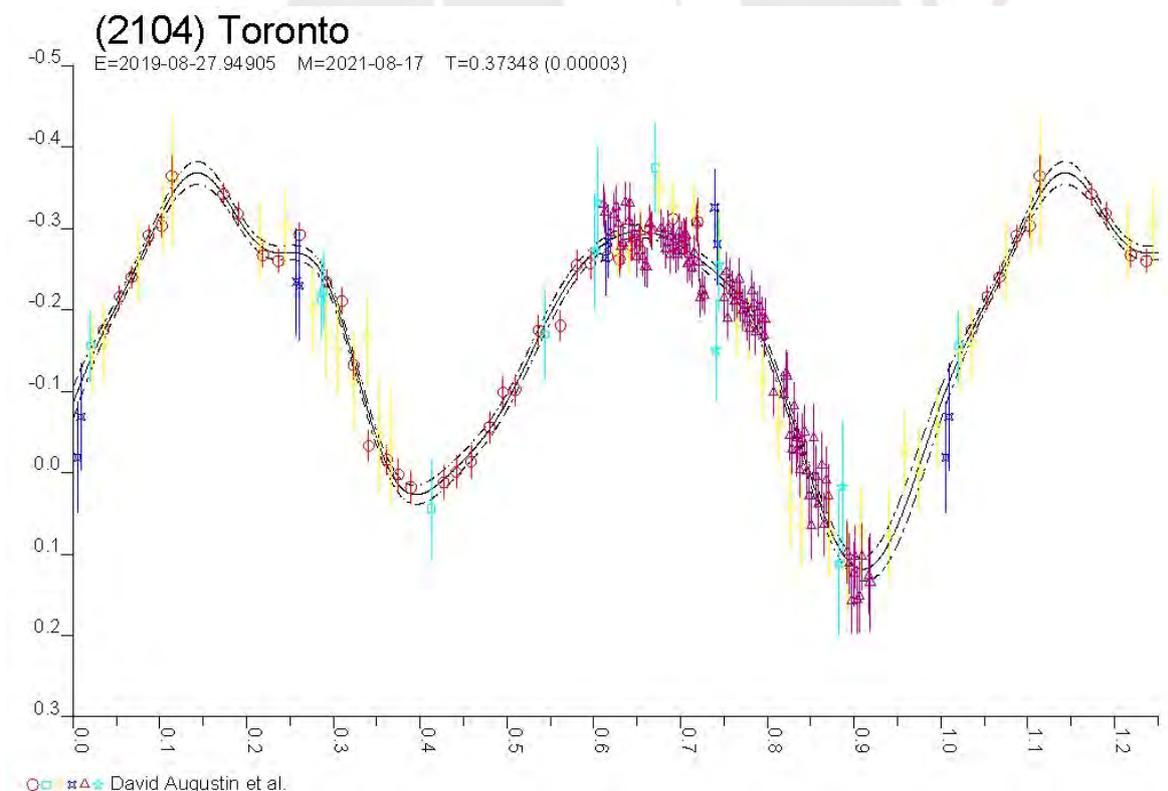


Figura 4.3: Magnitud vs. Tiempo (referencia) ^a

^aLa información recolectada proviene de [1], mientras que el tiempo transcurrido en la misma es de 30.4 horas.

Otro factor importante en la toma de datos estuvo relacionado con el hecho de las mismas limitaciones del observatorio astronómico. El telescopio utilizado, sujeto a un domo giratorio incapaz de seguir al objeto continuamente una vez haya llegado al cenit y esté próximo a descender, deberá reubicarse para monitorizar nuevamente al asteroide. Este suceso fue posible de notar debido a que cada vez que ocurría dicho fenómeno, las imágenes se encontraban giradas 180°, además de que en el encabezado (conocido también como *header*) de la imagen *fit*, se veía que la altitud llegaba a un pico y proseguía declinando su altura. En el proceso en sí, supuso una dificultad, pues, al tener la imagen invertida, se debían repetir los pasos explicados en el capítulo anterior, ingresando nuevamente las estrellas de referencia, y cuidando que sean las mismas que se eligieron hasta llegar al pico, viendo que también se haya mantenido el campo constante. Estas variaciones en la altitud se ven representadas en la gráfica 4.4, en donde resaltan los últimos dos días de toma de datos, pues fueron precisamente aquellos en donde ocurrió los mencionados cambios de dirección del telescopio.

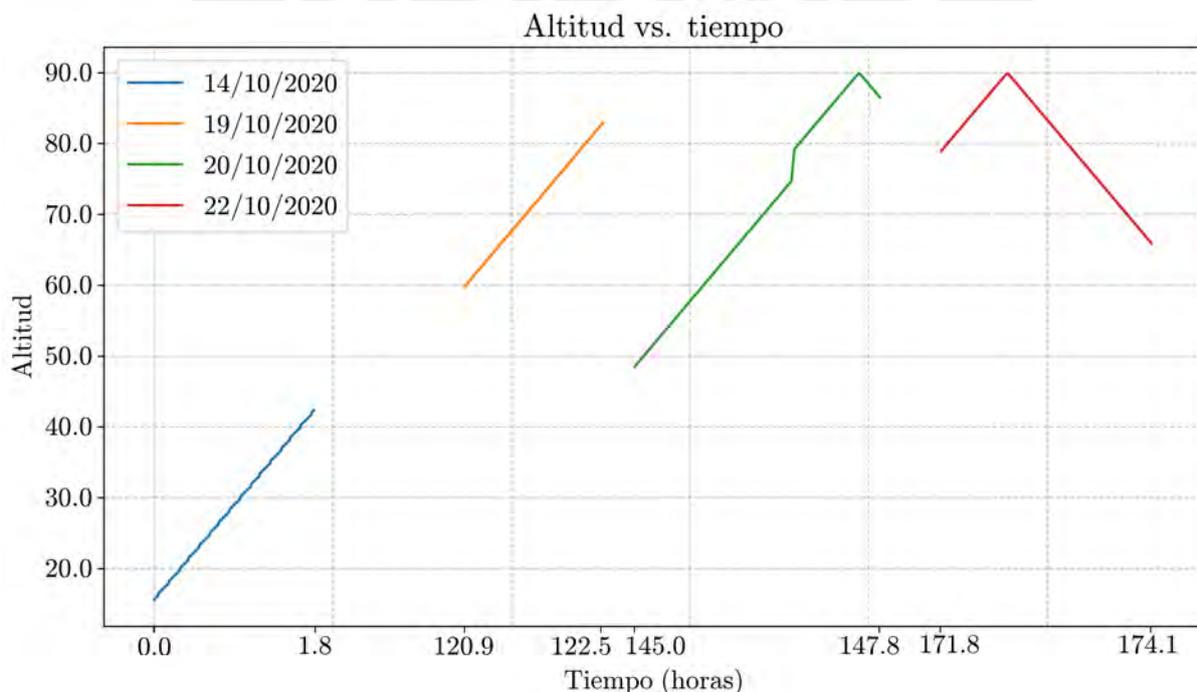


Figura 4.4: Altitud vs. Tiempo

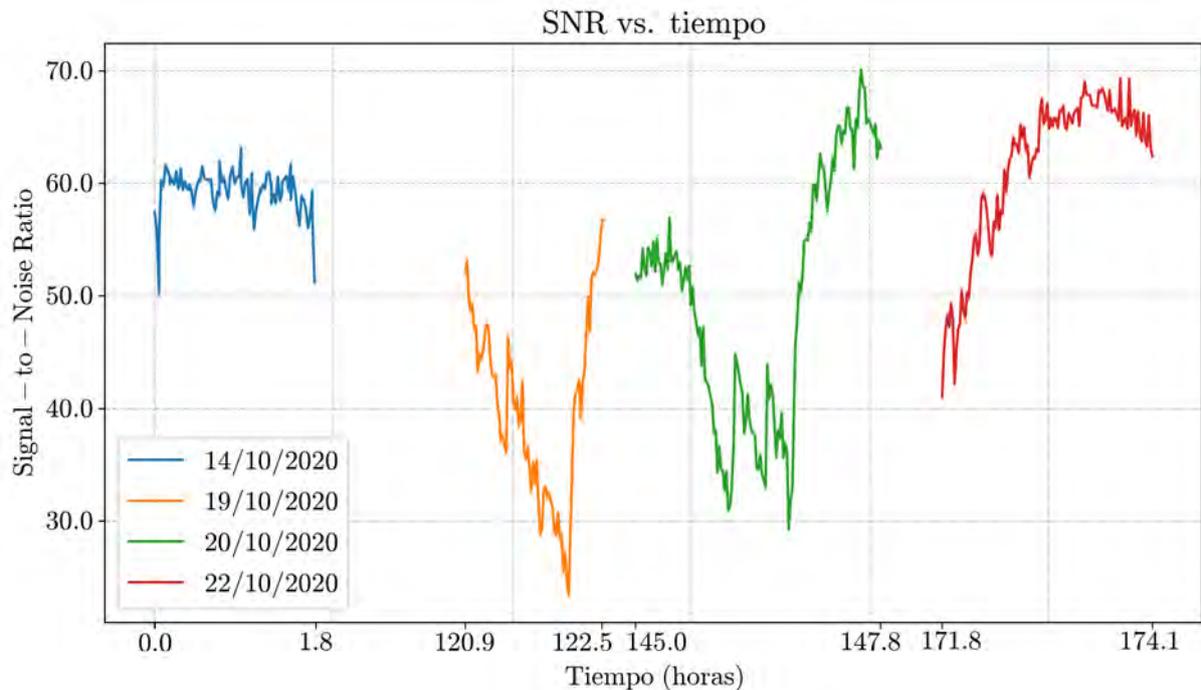


Figura 4.5: *Signal-To-Noise Ratio* vs. Tiempo

Por otro lado, fue importante también analizar como es que el ratio de la señal / ruido (SNR) se comportaba durante la toma de datos. Cabe resaltar que la información es procesada por el mismo programa *AstroImageJ*, pero nuevamente fue graficada aparte, usando una escala temporal análoga a la planteada en los figuras previas; teniendo como resultado a la figura 4.5, de donde se pueden observar ciertos factores críticos. Teniendo en cuenta que lo visto en dicha gráfica es la medida señal deseada versus todos aquellos electrones provenientes del fondo del cielo, ruido en los chips, etc [29], es que se buscará tener un ratio óptimo, de manera que represente menos del 1 % de la señal (o en otras palabras, un *SNR* cercano a 100). Para cada toma de datos, es visible que en ninguno de los casos se alcanza este valor, es más, que para el 19 de octubre se logra obtener incluso un resultado bastante lejano. Sin embargo, incertidumbres alrededor de 0.03 para la magnitud no siempre pueden significar un mal desempeño, pese a esto, es recomendable incrementar el número de eventos (u observaciones) para lograr promediar el ruido y hallar valores más certeros del periodo o amplitud [29], aunque estas sugerencias no

son absolutas, pues se debe considerar siempre todas las condiciones externas y que según la toma de datos, los resultados suelen variar. No obstante, el resto de días se obtiene un mejor comportamiento, con picos cercanos al valor 70 (lo que representa una precisión del 1.5 %), acercándose mucho más a lo deseado y generando igualmente respuestas beneficiosas.

En resumen, se ha podido presentar los distintos gráficos realizados a lo largo del trabajo, evidenciando, por lo visto en la figura 4.2, que la magnitud es un valor variable, puesto que la forma irregular del asteroide refleja la luz de distintas maneras, haciendo la magnitud oscile entre ciertos límites, y denotando un carácter periódico por la misma rotación del cuerpo. A su vez, se pudo observar cómo es que la relación señal / ruido fue variando, de manera que se obtuvieron resultados positivos a través del tiempo en la mayoría de las situaciones. Finalmente, el último capítulo hará una revisión de todo el trabajo, mostrando las distintas conclusiones que se pudieron hallar con respecto a lo investigado, además de plantear una serie de recomendaciones y sugerencias para mejorar a futuro el proyecto.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

- Se hizo un análisis teórico de 3 cuerpos de interés, siendo los objetos del cinturón de asteroides, (1467) Mashona y (2104) Toronto, y el NEA (1036) Ganymed, para los cuales se recopiló información de publicaciones y bases de datos. Para todos ellos, se presentaron sus elementos orbitales, gráficas de trayectorias y posición en el cielo para el observatorio L54, aunque debido a factores climáticos, solo fue visible el segundo cuerpo en mención.
- Se pudo, con ayuda del Instituto Astronómico de la Academia Rumana, observar al cuerpo (2104) Toronto a lo largo de 4 noches distintas a mediados de octubre de 2020, obteniendo así más de 400 imágenes del cielo en un periodo total de casi 9 horas, de las cuales únicamente se utilizaron 373 de ellas.
- A lo largo de la investigación, se aprendió los distintos procesos que conllevan la corrección de fotografías, empezando con la 'masterización' de los distintos campos (*bias*, *dark*, *flat*), hasta llegar al uso eficiente de los programas *AstroImageJ* y *Aladin*, para procesar las imágenes y realizar fotometría diferencial, planteando gráficas útiles para plasmar relaciones importantes. Por otro lado, también se aprendió a manejar herramientas de observación virtual como *Miriade* y *SkyBoT*, que fueron de gran utilidad al momento de planificar búsquedas y comparar los distintos cielos de las fotografías obtenidas.
- Haciendo uso del programa *AstroImageJ*, fue posible analizar el carácter periódico y variable de la magnitud del asteroide a través del tiempo, notando que la misma oscila entre los valores de 14.89 y 15.87, graficando la relación para los 4 días de observación.

- En términos de cómo es que el *Signal-to-Noise ratio* de las imágenes se comportó, se pudo reproducir gráficas de las mismas a lo largo del tiempo, observando un buen desempeño en la mayoría de puntos pese a tener algunos valores bajos. Igualmente para estos casos, podía ser recomendable aumentar el número de tomas para obtener mejores respuestas, aunque esto varía mucho de las condiciones existentes y resultados.

5.2. Recomendaciones y sugerencias

Una parte fundamental del trabajo fue la toma de imágenes, que al ser encargada a terceros, no contó con mucho control en las condiciones de observación. Las mismas, fueron arbitrariamente decididas en términos de fecha por ellos, sujeto evidentemente, a las condiciones climáticas (que de igual forma afectaron al trabajo). De esta manera, lo más óptimo hubiera sido observar al asteroide de manera continua durante todo el tiempo visible, para así poder reproducir gráficos escalados a la realidad, y lo más importante, durante un mayor intervalo, hecho que hubiera podido favorecer en detectar más de una vez el giro del cuerpo. Por otro lado, si bien el clima fue un factor determinante y no permitió ver a dos de los objetos previstos, se podría esperar que en un tiempo más prologando, al menos en algunas noches los mismos sí se presentaran en el cielo, por lo que no tener un periodo tan limitado (menor a dos meses - de octubre a diciembre de 2020) sería un hecho que sin duda beneficiaría al estudio.

Finalmente, si bien el trabajo fue realizado haciendo uso de *AstroImageJ*, inicialmente se contempló utilizar el programa *AudeLA*, sin embargo, al ser un *software* optimizado para trabajar en *Linux* y no en *Windows*, se optó por el primero. No obstante, sería recomendable a futuro intentar trabajar en otro sistema operativo para así poder obtener las ventajas que *AudeLA* podía ofrecer, e incluso comparar su funcionamiento y desempeño con *AstroImageJ*.

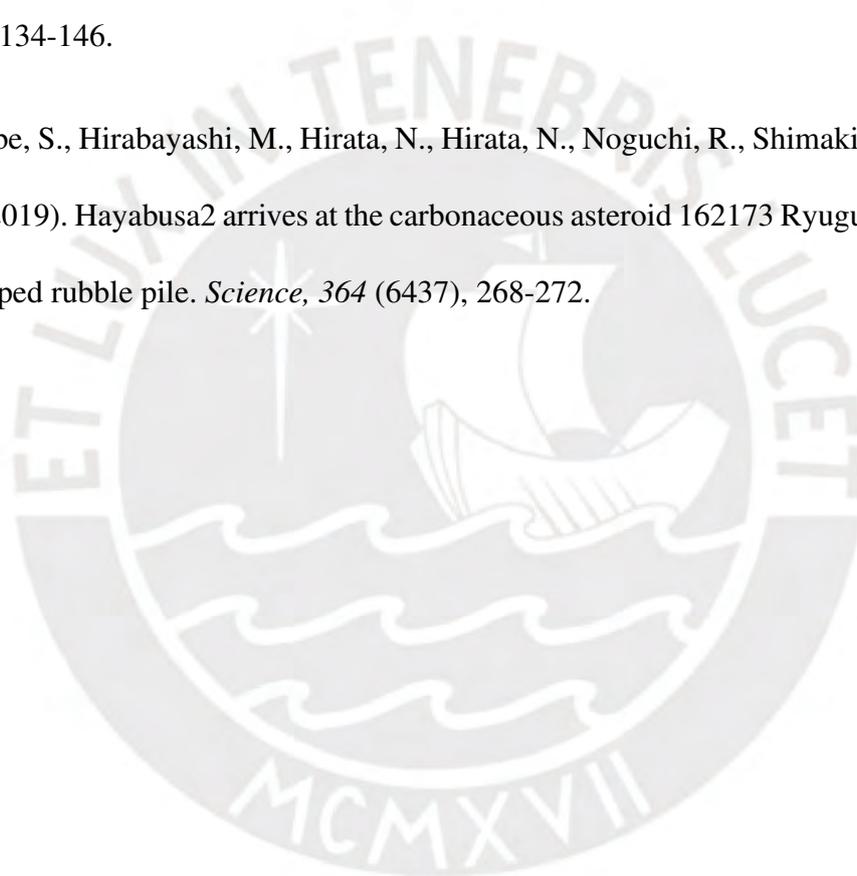
Bibliografía

- [1] Augustin, David y Behrend, Raoul. *2104 Toronto*. Consulta: 28 de diciembre de 2020
<http://obswww.unige.ch/behrend/r002104a.png>
- [2] Berthier, J., Vachier, F., Thuillot, W., Fernique, P., Ochsenein, F., Genova, F., Lainey, V., & Arlot, J.-E. (2006). *Astronomical Data Analysis Software and Systems XV*, 351, 367
- [3] Binzel, R. P., Lupishko, D. F., Di Martino, M., Whiteley, R. J., y Hahn, G. J. (2002). Physical properties of near-earth objects. *Asteroids III*, 255 (271).
- [4] Bottke Jr, W. F., Cellino, A., Paolicchi, P., y Binzel, R. P. (2002). An overview of the asteroids:the asteroids iii perspective. *Asteroids III*, 1, 3–15.
- [5] Brown, P., ReVelle, D., Silber, E., Edwards, W., Arrowsmith, S., Jackson Jr, L., . . . Eaton, D. (2008). Analysis of a crater-forming meteorite impact in peru. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 113 (E9).
- [6] Burns, J. A. (1976). Elementary derivation of the perturbation equations of celestial mechanics. *American Journal of Physics*, 44 (10), 944-949.
- [7] Bus, S. J., & Binzel, R. P. (2002). Phase II of the small main-belt asteroid spectroscopic survey: A feature-based taxonomy. *Icarus*, 158(1), 146-177.
- [8] Carruba, V., Nesvorn'y, D., y Espinoza, M. (2015). Dynamical evolution of the cybele asteroids. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 451 (1), 244–256.
- [9] Chodas, P. (s.f.). *Neo basics*. NASA. Consulta: 14 de noviembre de 2020
<https://cneos.jpl.nasa.gov/about/basics.html>

- [10] DeMeo, F. E., Binzel, R. P., Slivan, S. M., & Bus, S. J. (2009). An extension of the Bus asteroid taxonomy into the near-infrared. *Icarus*, 202(1), 160-180.
- [11] Fernique, P., Boch, T., Oberto, A. (1999). Aladin Sky Atlas. *Centre de Données astronomiques de Strasbourg*.
- [12] Hilton, J. L. (2002). Asteroid masses and densities. *Asteroids III*, 1, 103-112.
- [13] International Astronomical Union (2006). Resolutions 5A, 5B, 6A and 6B for GA-XXVI. Conferencia presentada en *IAU Planet Definition Committee Chair*. International Astronomical Union. Praga, 24 de agosto.
- [14] Jet Propulsion Laboratory (s.f.). *H (absolute magnitude)*. NASA Consulta: 8 de diciembre de 2020 <https://cneos.jpl.nasa.gov/glossary/h.html>
- [15] Jet Propulsion Laboratory (2003). *JPL Small-Body Database Browser* [catálogo]. Consulta: 17 de diciembre de 2020 <https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi#top>
- [16] Kaasalainen, M., Pravec, P., Krugly, Y. N., Šarounová, L., Torppa, J., Virtanen, J., ... & Wolf, M. (2004). Photometry and models of eight near-Earth asteroids. *Icarus*, 167(1), 178-196.
- [17] Knezevic, Z., Lematre, A., & Milani, A. (2002). The determination of asteroid proper elements. *Asteroids III*, 603.
- [18] Lazzaro, D., Angeli, C. A., Carvano, J. M., Mothé-Diniz, T., Duffard, R., & Florczak, M. (2004). S3OS2: The visible spectroscopic survey of 820 asteroids. *Icarus*, 172(1), 179-220.

- [19] NASA REFLECTANCE EXPERIMENT LABORATORY (2014). *RELAB Spectral Database*. Brown University. Consulta: 12 de enero de 2021. <http://www.planetary.brown.edu/relabdata/>
- [20] NASA Planetary Data System (2020). *Ferret Search*. Small Bodies Data Ferret. Consulta: 30 de diciembre de 2020. <https://sbnapps.psi.edu/ferret/SimpleSearch/form.action>
- [21] National Aeronautics and Space Administration. *OSIRIS-REx*. Consulta: 07 de noviembre de 2020 <https://www.nasa.gov/osiris-rex>
- [22] Observatorio de Paris (2018, Enero). *Miriade ephemeris generator*. THE IMCCE VIRTUAL OBSERVATORY SOLAR SYSTEM PORTAL. Consulta: 21 de setiembre de 2020 <http://vo.imcce.fr/webservices/miriade/?forms>
- [23] Popescu, M., Birlan, M., & Nedelcu, D. A. (2012). Modeling of asteroid spectra—M4AST. *Astronomy & Astrophysics*, 544, A130.
- [24] Redd, N. T. (2017, May). *Asteroid belt: Facts & formation*. Space. Consulta: 8 de diciembre de 2020 <https://www.space.com/16105-asteroid-belt.html>
- [25] Serio, G. F., Manara, A., Sicoli, P., & Bottke, W. F. (2002). *Giuseppe Piazzi and the discovery of Ceres*. University of Arizona Press.
- [26] The International Astronomical Union Minor Planet Center (2020). *Orbits* [catálogo]. Consulta: 21 de setiembre de 2020 <https://minorplanetcenter.net/data>
- [27] Vilas, F., Bus, S., & Barucci, M. (2002). Visible-wavelength spectroscopy of asteroids. *Asteroids III*, 169.

- [28] Villanueva, R., Ricra, J., Zegarra-Valles, M., Baella, N. O., & Santivanez, J. (2020). Astrometric observations of the Potentially Hazardous Asteroid (52768) 1998 OR2 near its maximum approach to Earth. *ATel*, 13733, 1.
- [29] Warner, B. D., y cols. (2006). *A practical guide to lightcurve photometry and analysis* (Vol. 300). Springer.
- [30] Warner, B. D., Harris, A. W., & Pravec, P. (2009). The asteroid lightcurve database. *Icarus*, 202(1), 134-146.
- [31] Watanabe, S., Hirabayashi, M., Hirata, N., Hirata, N., Noguchi, R., Shimaki, Y., ... & Tsuda, Y. (2019). Hayabusa2 arrives at the carbonaceous asteroid 162173 Ryugu—A spinning top-shaped rubble pile. *Science*, 364 (6437), 268-272.



ANEXOS

A. Código en Python

```
import matplotlib.pyplot as plt

import pandas as pd

from matplotlib import rcParams

import matplotlib.ticker

rcParams['mathtext.fontset'] = 'cm'

rcParams['font.family'] = 'cmtt10'

rcParams['font.size'] = 15

majorFormatter = matplotlib.ticker.FormatStrFormatter(r'$

data1410=pd.read_csv("data-14-10.csv", sep=';', comment='#')

data1910=pd.read_csv("data-19-10.csv", sep=';', comment='#')

data2010=pd.read_csv("data-20-10.csv", sep=';', comment='#')

data2210=pd.read_csv("data-22-10.csv", sep=';', comment='#')

f, ax = plt.subplots(figsize=(11,6),dpi=640)

ax.xaxis.set_major_formatter(majorFormatter)

ax.yaxis.set_major_formatter(majorFormatter)

plt.errorbar(data1410.Horas, data1410.Source_AMag_T1,

data1410.Source_AMag_Err_T1,linestyle='solid',

linewidth=1,color='blue',markerfacecolor='white',markeredgewidth="blue",

ecolor="blue",marker='.',markersize=5,markeredgewidth=0.75, label=r'$14/10/2020$')

plt.errorbar(data1910.Horas, data1910.Source_AMag_T1,

data1910.Source_AMag_Err_T1,linestyle='solid',
```

```

linewidth=1,color='red',markerfacecolor='white',markeredgecolor=red",
ecolor=red",marker='.',markersize=5,markeredgewidth=0.75, label=r'$19/10/2020$')
plt.errorbar(data2010.Horas, data2010.Source_AMag_T1,
data2010.Source_AMag_Err_T1,linestyle='solid',
linewidth=1,color='gray',markerfacecolor='white',markeredgecolor="gray",
ecolor="gray",marker='.',markersize=5,markeredgewidth=0.75, label=r'$20/10/2020$')
plt.errorbar(data2210.Horas, data2210.Source_AMag_T1,
data2210.Source_AMag_Err_T1,linestyle='solid',
linewidth=1,color='orange',markerfacecolor='white',markeredgecolor='.orange",
ecolor='.orange",marker='.',markersize=5,markeredgewidth=0.75, label=r'$22/10/2020$')
plt.title(r'$Magnitud vs. tiempo$')
plt.xlabel(r'$Tiempo (horas)$')
plt.ylabel(r'$Magnitud$')
leg = ax.legend()
ax.grid(which='major', axis='x', linewidth=0.75, linestyle='-', color='0.75')
ax.grid(which='minor', axis='x', linewidth=0.25, linestyle='-', color='0.75')
ax.grid(which='major', axis='y', linewidth=0.75, linestyle='-', color='0.75')
ax.grid(which='minor', axis='y', linewidth=0.25, linestyle='-', color='0.75')
plt.show()
f, ax = plt.subplots(figsize=(11,6),dpi=640)
ax.xaxis.set_major_formatter(majorFormatter)
ax.yaxis.set_major_formatter(majorFormatter)
plt.plot(data1410.Horas,data1410.ALT_OBJ,label=r'$14/10/2020$')
plt.plot(data1910.Horas,data1910.ALT_OBJ,label=r'$19/10/2020$')

```

```

plt.plot(data2010.Horas,data2010.ALT_OBJ,label=r'$20/10/2020$')
plt.plot(data2210.Horas,data2210.ALT_OBJ,label=r'$22/10/2020$')

plt.title(r'$Altitud vs. tiempo$')

plt.xlabel(r'$Tiempo (horas)$')

plt.ylabel(r'$Altitud$')

leg = ax.legend()

ax.grid(which='major', axis='x', linewidth=0.75, linestyle='-', color='0.75')
ax.grid(which='minor', axis='x', linewidth=0.25, linestyle='-', color='0.75')
ax.grid(which='major', axis='y', linewidth=0.75, linestyle='-', color='0.75')
ax.grid(which='minor', axis='y', linewidth=0.25, linestyle='-', color='0.75')

plt.show()

f, ax = plt.subplots(figsize=(11,6),dpi=640)
ax.xaxis.set_major_formatter(majorFormatter)
ax.yaxis.set_major_formatter(majorFormatter)

plt.plot(data1410.Horas,data1410.SNR,label=r'14/10/2020')
plt.plot(data1910.Horas,data1910.SNR,label=r'19/10/2020')
plt.plot(data2010.Horas,data2010.SNR,label=r'20/10/2020')
plt.plot(data2210.Horas,data2210.SNR,label=r'22/10/2020')

plt.title(r'$SNR vs. tiempo$')

plt.xlabel(r'$Tiempo (horas)$')

plt.ylabel(r'$Signal-to-Noise Ratio$')

leg = ax.legend()

ax.grid(which='major', axis='x', linewidth=0.75, linestyle='-', color='0.75')
ax.grid(which='minor', axis='x', linewidth=0.25, linestyle='-', color='0.75')

```

```
ax.grid(which='major', axis='y', linewidth=0.75, linestyle='-', color='0.75')  
ax.grid(which='minor', axis='y', linewidth=0.25, linestyle='-', color='0.75')  
plt.show()
```

B. Imágenes adicionales

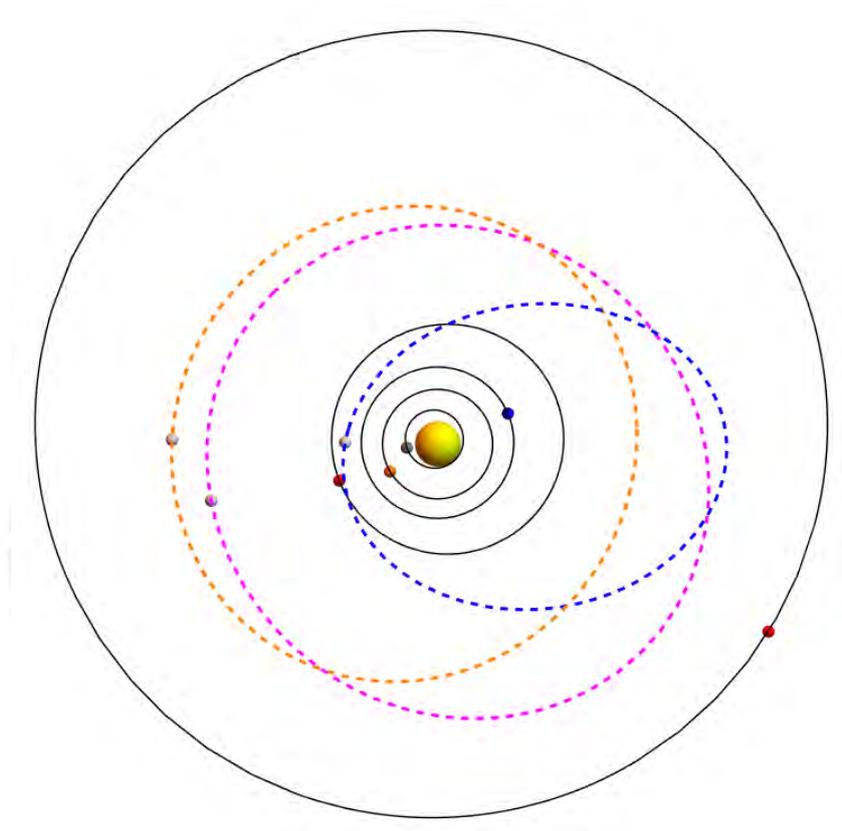


Figura A1: Gráfica de los 3 asteroides y sus órbitas juntas. En azul, (1036) Ganymed, en fucsia, (1467) Mashona y en naranja, (2104) Toronto ^a

^aSe elaboró este gráfico haciendo uso del programa *Wolfram Mathematica*

^bSe hizo la simulación que produjo este gráfico con el generador de efemérides Miriade [22]

^cSe hizo la simulación que produjo este gráfico con el generador de efemérides Miriade [22]

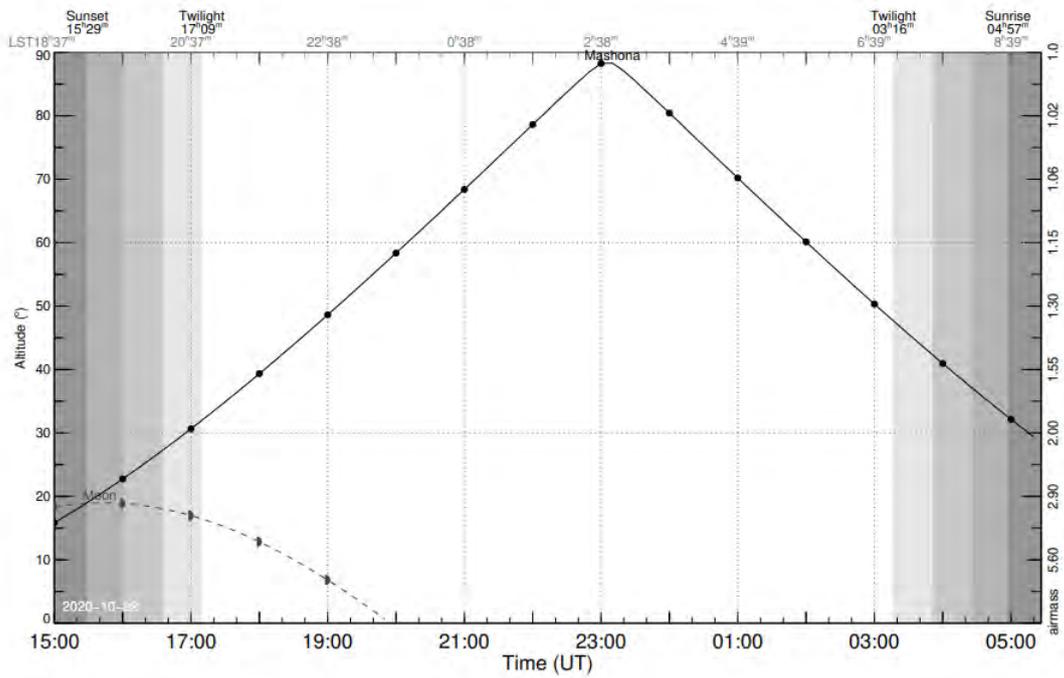


Figura A2: Gráfico ViSiON de (1467) para el día 14 de octubre de 2020 ^b

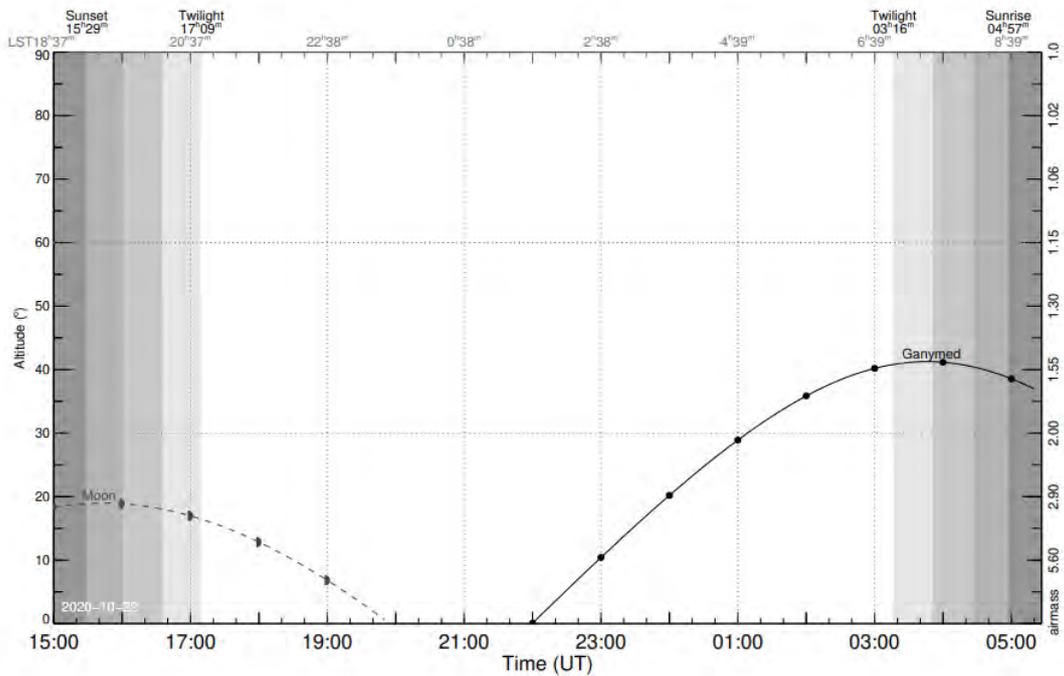


Figura A3: Gráfico ViSiON de (1036) para el día 14 de octubre de 2020 ^c