

Generación del conocimiento y defensa terrestre ante NEOs: Asteroide 2024 YR4

Knowledge generation and Earth's defense against NEOs: Asteroid 2024 YR4

Giuliat Navas  ¹

Centro de Investigaciones de Astronomía Francisco J. Duarte, Mérida, Venezuela¹
giuliatnavas@gmail.com¹

Fecha de recepción: 28/04/2025

Fecha de aceptación: 25/08/2025

Pág: 13 – 37

DOI: [10.5281/zenodo.17466391](https://doi.org/10.5281/zenodo.17466391)

Resumen

El estudio de asteroides cercanos a la Tierra (NEOs) ha cobrado una relevancia crucial en la defensa planetaria. Este artículo examina los avances en la identificación y monitoreo de estos cuerpos, destacando la evolución de los sistemas globales de detección y las iniciativas futuras. En particular, se analiza el descubrimiento del asteroide 2024 YR4, cuya detección inicial generó debate sobre su posible impacto en 2032. Sin embargo, cálculos precisos descartaron cualquier riesgo de colisión, aunque su trayectoria sigue bajo observación. Los asteroides representan una oportunidad única para expandir nuestro conocimiento sobre el Sistema Solar, pues contienen información sobre la formación planetaria y materiales exóticos que pueden estar vinculados al origen de la vida. Nuevas herramientas como el Observatorio Rubí en Chile y el Flyeye en Italia, junto con misiones espaciales NEO Surveyor y NEOMIR, que prometen revolucionar la capacidad de detección de NEOs son discutidas aquí. Además, en este artículo se presenta la posición de Venezuela, a través del CIDA y cómo aporta en la defensa planetaria, resaltando la necesidad de fortalecer la vigilancia astronómica global y reafirmando la importancia del monitoreo constante de asteroides como 2024 YR4, no solo para garantizar la seguridad planetaria, sino también para avanzar en nuestra comprensión del universo y la historia evolutiva del Sistema Solar.

Palabras Clave: asteroides, creación del conocimiento, defensa planetaria, NEOs, 2024-YR4.



Esta obra está bajo licencia CC BY-NC-SA 4.0.

Abstract

The study of near-Earth asteroids (NEOs) has become critically important for planetary defense. This article examines advances in the identification and monitoring of these bodies, highlighting the evolution of global detection systems and future initiatives. In particular, it analyzes the discovery of the asteroid 2024 YR4, whose initial detection sparked debate over its potential impact in 2032. However, precise calculations ruled out any collision risk, although its trajectory remains under observation. Asteroids present a unique opportunity to expand our understanding of the Solar System, as they contain information about planetary formation and exotic materials that may be linked to the origin of life. New tools such as the Rubi Observatory in Chile and the Flyeye Telescope in Italy, along with space missions NEO Surveyor and NEOMIR, which promise to revolutionize NEO detection capabilities, are discussed here. Additionally, this article presents Venezuela's position, through CIDA, and how it contributes to planetary defense, emphasizing the need to strengthen global astronomical monitoring. It also reaffirms the importance of continuously tracking asteroids like 2024 YR4, not only to ensure planetary security but also to advance our understanding of the universe and the evolutionary history of the Solar System.

Key words: asteroids, knowledge creation, planetary defense, NEOs, 2024-YR4.

Introducción

Los asteroides son cuerpos rocosos o metálicos que, en algunos casos, pueden contener hielo y materiales orgánicos. La mayoría tiene formas irregulares, similares a la de una papa. Estos objetos orbitan el Sol, principalmente en el Cinturón de Asteroides, a una distancia de aproximadamente 2.8 unidades astronómicas (UA). Son mucho más pequeños que los planetas enanos del Sistema Solar, con diámetros inferiores a los 940 km, que es el tamaño aproximado de Ceres (Motz y Duveen, 1996), el asteroide más grande descubierto hasta la fecha.

Para el 11 de abril de 2025, el Centro de Planetas Menores de la Unión Astronómica Internacional (*International Astronomical Union*, IAU) había registrado un total de 1,441,856 cuerpos menores en el Sistema Solar. De este registro, 3,728 cuerpos fueron descubiertos durante el año en curso, de los cuales 36 de ellos se han identificado únicamente en el mes de abril. Dentro de esta población, 38,285 son objetos cercanos a la Tierra (Near-Earth Objects, NEOs), definidos como cuerpos cuya órbita los acerca de manera significativa a nuestro planeta (Minor Planet Center, 2025). Los NEOs comprenden tanto asteroides cercanos a la Tierra (Near-Earth Asteroids, NEAs) como cometas cercanos a la Tierra (Near-Earth Comets, NECs). Estos objetos tienen una distancia de perihelio (q) menor o igual a 1,3 UA ($q \leq 1.3\text{UA}$) lo que significa que sus órbitas se aproximan o cruzan la órbita terrestre.

Se han catalogado aproximadamente 4,582 cometas, cuerpos helados compuestos de polvo, roca y gases congelados. Cuando se acercan al Sol, liberan gas y polvo, formando sus características colas brillantes que los hacen tan fascinantes para la observación astronómica. El estudio de estos cuerpos menores es crucial para comprender la formación y evolución del Sistema Solar, así como para evaluar posibles riesgos de impacto con la Tierra. Los NEOs, son objetos de monitoreo constante debido a su proximidad y potencial amenaza de impacto a la Tierra, lo que los convierte en un tema de gran interés para la comunidad científica y para la seguridad planetaria.

Marsden (1997) descubrió que las órbitas de los asteroides cercanos a la Tierra pueden experimentar variaciones de hasta 0.05 UA en el transcurso de un siglo. Este cambio orbital puede aumentar el riesgo de impacto, sobre todo con los NEAs más grandes, que son una mayor amenaza para la Tierra debido a su tamaño y energía cinética. Por esta razón, ciertos NEAs se clasifican como asteroides potencialmente peligrosos (*Potentially Hazardous Asteroids, PHAs*). Según Perna et al. (2013), un asteroide se considera PHA si cumple dos criterios: Su distancia mínima de intersección orbital (*Minimum Orbital Intersection Distance, MOID*) con la órbita terrestre es menor a 0.05 UA, y su magnitud absoluta $H \leq 22\text{mag}$, lo que equivale a un diámetro aproximado de 140 metros o más. Los asteroides PHAs son monitoreados constantemente por su capacidad de causar daños significativos en caso de impacto. Sin embargo, no todos los PHAs son realmente un peligro. La cercanía orbital no siempre significa que se acerquen físicamente a la Tierra. Un ejemplo son los asteroides troyanos de la Tierra, que comparten nuestra órbita, pero nunca se aproximan al planeta. Por lo tanto, los PHAs con una distancia mínima real de aproximación $r_{min} < 0.05\text{UA}$ son los que se consideran prioritarios para su estudio y seguimiento.

Los NEAs son objetos celestes que merecen atención no solo por razones de seguridad, sino también por su relevancia científica. Desde el punto de vista de la seguridad, los posibles eventos de impacto representan una amenaza significativa para la Tierra. Ejemplos históricos de estas amenazas incluyen: El evento K-T, que ocurrió hace aproximadamente 65 millones de años y condujo a la extinción masiva del Cretácico/Terciario (Bottke et al., 2007; Kyte, 1998), la explosión de Tunguska en 1908 (Ben-Menahem, 1975), y el impacto del meteorito de Chelíabinsk en 2013 (Brown et al., 2013).

Desde una perspectiva científica, los NEAs podrían haber desempeñado un papel crucial en el transporte de agua y materiales ricos en compuestos orgánicos a la Tierra primitiva. Este proceso es fundamental para comprender el origen de la vida y la evolución temprana del Sistema Solar. Estudios recientes sugieren que estos cuerpos menores pudieron haber contribuido con elementos esenciales para la formación de moléculas orgánicas complejas, como se detalla en la investigación de Rubin et al. (2015).

Las principales fuentes de los NEAs son regiones dinámicamente inestables dentro del cinturón principal de asteroides. Estas regiones, conocidas como “brechas”, se manifiestan en la distribución orbital y son causadas por resonancias con Júpiter, como la resonancia secular v6 y la resonancia de movimiento medio 3:1 (Figura 1).

Además de la gravedad, el efecto Yarkovsky es clave para mover asteroides hacia estas brechas y, eventualmente, hacia el Sistema Solar interno. Este efecto, descrito por Burns et al. (1979) y posteriormente estudiado por Rubincam (1995) y Farinella et al. (1998), es una fuerza no gravitacional que actúa sobre cuerpos pequeños, como asteroides y meteoroides.

Este efecto ocurre debido a la re-radiación térmica asimétrica en la superficie de un asteroide. Su rotación, órbita e inercia térmica hacen que las temperaturas se distribuyan de forma desigual. Durante el día, el asteroide absorbe calor del Sol. Al rotar, esa superficie caliente pasa a la cara nocturna, donde libera el calor de forma asimétrica. Esta emisión genera un pequeño empuje que, con el tiempo, puede alterar la órbita del asteroide, empujándolo hacia o lejos del Sol (Burns et al., 1979; Farinella et al., 1998; Rubincam, 1995).

Esta asimetría genera una fuerza de retroceso neta que, con el tiempo, puede alterar significativamente sus órbitas (Farinella y Vokrouhlicky, 1999; Farinella et al., 1998; Peterson, 1976). El efecto Yarkovsky es particularmente importante para los asteroides de menor tamaño, ya que puede empujarlos hacia las regiones de resonancia, donde las perturbaciones gravitacionales los desestabilizan y los expulsan del cinturón principal (Yufan et al., 2025). Este proceso contribuye al suministro continuo de NEAs hacia el Sistema Solar interno, convirtiéndolos en objetos de interés tanto para la investigación científica como para la evaluación de riesgos de impacto.

El descubrimiento de asteroides antes de su impacto con la Tierra no solo resulta esencial para la defensa planetaria, sino que también ofrece una valiosa oportunidad para profundizar en el estudio de su origen y avanzar en el conocimiento científico de estos cuerpos celestes (Devillepoix et al., 2019; Simó y Peña, 2022). El monitoreo temprano de NEAs permite tomar medidas preventivas en caso de identificar una posible amenaza significativa. En situaciones donde el descubrimiento ocurre días o incluso horas antes del impacto, se abre una ventana crítica para alertar a las comunidades en riesgo, coordinar evacuaciones y, en algunos casos, implementar medidas de mitigación. Un ejemplo destacado es el caso del asteroide 2008 TC3, un meteorito de aproximadamente 4 metros de diámetro que ingresó a la atmósfera terrestre el 7 de octubre de 2008. Este evento marcó un hito en la historia de la astronomía, ya que fue el primer asteroide detectado y seguido antes de su impacto con la Tierra. El seguimiento preciso del asteroide 2008 TC3 permitió realizar predicciones exactas sobre el lugar y el momento del impacto, lo que facilitó la recuperación de más de 600 fragmentos del meteorito en el desierto de Nubia, en Sudán. Los análisis de laboratorio revelaron que estos fragmentos pertenecían a una clase rara de meteoritos conocida como ureilitas, caracterizadas por su composición única

y su relevancia para el estudio de los procesos de formación del Sistema Solar.

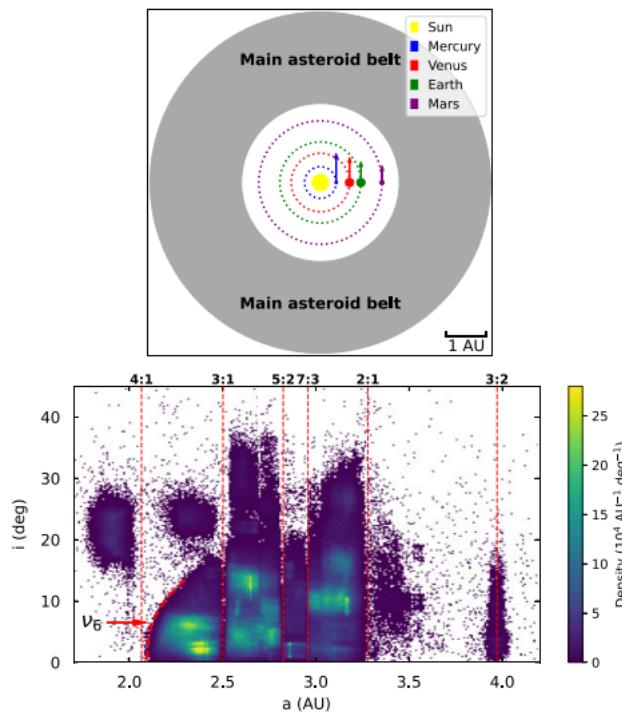


Figura 1: Panel superior: representación esquemática del Sol, los cuatro planetas terrestres y el cinturón principal de asteroides. Panel inferior: gráfico de dispersión de la inclinación i , versus el semieje mayor a del cinturón principal a partir de datos del SBDB (Small-Body Database, SBDB) del JPL (Jet Propulsion Laboratory, 2025). La resonancia secular v_6 y varias resonancias de movimiento medio están marcadas en rojo con líneas discontinuas.

Fuente: Yufan et al. (2025).

Los pequeños asteroides cercanos a la Tierra, con diámetros de apenas unos pocos metros, suelen generar un bólido brillante al ingresar a la atmósfera terrestre. Durante este proceso, experimentan ablación y, en muchos casos, fragmentaciones múltiples. Algunos de estos fragmentos pueden sobrevivir a la explosión en el aire y entrar en la fase de vuelo oscuro, alcanzando finalmente el suelo y dando lugar a una caída de meteoritos. El área en el suelo donde se depositan los meteoritos se conoce como campo de dispersión, el cual puede ser explorado para recuperar fragmentos del meteoroide. La recuperación de estos meteoritos permite realizar análisis de laboratorio detallados, proporcionando información valiosa sobre la composición y las características del cuerpo progenitor. Los eventos de impacto de asteroides cercanos a la Tierra han proporcionado valiosas oportunidades para el estudio de estos cuerpos celestes. Ejemplos destacados incluyen los impactadores 2008 TC3 (Bischoff et al., 2022; Jenniskens et al., 2009), 2018 LA (Jenniskens et al., 2021), 2023 CX1 (Bischoff et al., 2023) y 2024 BX1 (Cantillo et al., 2024). En estos casos, se logró recuperar fragmentos de meteoritos,

lo que permitió realizar análisis detallados en laboratorio y obtener información sobre su composición y origen. Por otro lado, aunque se han calculado posibles campos de dispersión para el impactador 2022 WJ1 (Kareta et al., 2024), hasta la fecha no se ha recuperado ningún meteorito asociado a este evento.

El conocimiento preciso de la órbita heliocéntrica de un cuerpo progenitor NEA, junto con las propiedades físicas del meteorito asociado, permite reconstruir la historia dinámica del NEA. Esto puede facilitar la identificación de sus progenitores o de las regiones fuente de las que proviene. En la actualidad, los sensores satelitales se han convertido en herramientas valiosas para detectar explosiones atmosféricas causadas por pequeños asteroides que no habían sido descubiertos previamente. Sin embargo, estas detecciones presentan limitaciones significativas en comparación con el descubrimiento anticipado de asteroides. Los sensores satelitales son capaces de registrar bólidos en el momento de su entrada a la atmósfera terrestre, pero no proporcionan información sobre la órbita heliocéntrica del objeto, lo que dificulta determinar su origen en el Sistema Solar. Además, estos sensores no pueden predecir con precisión el lugar aproximado de impacto, lo que complica la recuperación de meteoritos. La falta de exactitud en la localización del campo de dispersión limita la posibilidad de realizar estudios detallados de los fragmentos recuperados, reduciendo así el potencial científico de estas detecciones.

La detección de un asteroide antes de su impacto ofrece la oportunidad de estudiar en detalle su órbita, tamaño, forma, rotación y composición espectroscópica, utilizando tanto telescopios terrestres como espaciales. Esta información resulta fundamental para comprender la naturaleza y el origen del asteroide, contribuyendo significativamente al avance del conocimiento sobre nuestro universo.

Además, conocer con precisión la órbita heliocéntrica del asteroide antes de su impacto permite rastrear posibles progenitores o identificar familias de asteroides en el Sistema Solar (Brož, 2024). Este análisis no solo enriquece nuestra comprensión científica, sino que también tiene aplicaciones prácticas en la defensa planetaria. Por otro lado, el seguimiento previo a un impacto permite refinar las predicciones orbitales y calcular con exactitud la trayectoria del objeto. Esto minimiza las falsas alarmas y optimiza las respuestas humanitarias, garantizando una mejor preparación ante posibles eventos de impacto.

Este artículo analiza los instrumentos globales actuales y los proyectos futuros dedicados a la defensa planetaria frente a posibles impactadores NEOs. Además, aborda el descubrimiento del asteroide cercano a la Tierra 2024 YR4, incluyendo sus primeras observaciones realizadas por los telescopios del sistema ATLAS (*Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System*, ATLAS). También, discute la controversia inicial sobre el riesgo de impacto en el año 2032, así como su posterior desestimación. Asimismo, se presenta un análisis actualizado sobre el riesgo de impacto a la fecha del 3 de abril de 2025 y se examina la posición actual de Venezuela en cuanto a su contribución a la defensa planetaria.

Avances tecnológicos en la detección y monitoreo de asteroides y NEOs: Hacia una defensa planetaria integral

La experiencia en la detección y seguimiento de asteroides inminentes ayuda a mejorar los sistemas como el SCOUT (*Solid Controlled Orbital Utility Test*, SCOUT) de la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*, NASA), el Flyeye Telescope de la ESA (*European Space Agency*, ESA) y otras tecnologías diseñadas para proteger la Tierra de impactos mayores.

El SCOUT es un software desarrollado por el JPL de la NASA, diseñado para analizar rápidamente los datos de asteroides recién descubiertos que podrían representar una amenaza (Johnson et al., 2017). Cuando los telescopios detectan un asteroide, SCOUT actúa como una “primera línea de defensa”, usa la posición astrométrica del asteroide (ascensión recta y declinación) para calcular rápidamente órbitas preliminares y evalua si existe algún riesgo de impacto. El sistema prioriza los objetos con mayor riesgo de impacto según su probabilidad y tamaño para un seguimiento adicional. SCOUT integra datos de observatorios como el Catalina Sky Survey (CSS), un programa de vigilancia financiado por la NASA (Christensen et al., 2012), dedicado a la búsqueda y monitoreo de NEOs, PHAs y cometas, el Pan-STARRS (*Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System*, Pan-STARRS), un sistema de telescopios terrestres ubicados en Hawái que se dedica a identificar asteroides, cometas y otros objetos cuyas órbitas los acerquen a la Tierra, con el fin de evaluar posibles riesgos de impacto que representen una amenaza inminente (Nicholas et al., 2002), y el ATLAS, un sistema de telescopios terrestre distribuido en diferentes continentes para cubrir tanto el hemisferio norte como el sur, lo que permite monitorear todo el cielo visible desde la Tierra, diseñado específicamente para detectar NEOs con suficiente antelación para proporcionar advertencias sobre posibles impactos inminentes (Jedicke et al., 2012). Estos telescopios terrestres proporcionan mediciones de la posición astrométrica de los NEOs, lo que le permite a SCOUT calcular sus órbitas preliminares.

Actualmente, existen diversos telescopios y proyectos futuros dedicados a la detección y monitoreo de asteroides que podrían representar una amenaza para la Tierra. Entre ellos se destacan:

La misión NEO Surveyor de la NASA, programada para su lanzamiento en 2027. Este será el primer telescopio espacial diseñado específicamente para rastrear asteroides y cometas cercanos a la Tierra que puedan representar peligros potenciales. El NEO Surveyor utiliza detectores infrarrojos avanzados para identificar objetos difíciles de observar con luz visible, como asteroides y cometas oscuros que no reflejan mucha luz, pero emiten radiación infrarroja al calentarse con la luz solar. Su importancia radica en la capacidad de detectar grandes rocas espaciales que se aproximan a la Tierra desde direcciones difíciles de observar, como la región cercana al Sol, así como aquellas que se encuentran delante o detrás de la órbita terrestre, donde suelen quedar ocultas por el resplandor solar. Estas amenazas podrían pasar

desapercibidas incluso para los observatorios terrestres más avanzados (Hoffman et al., 2024).

El telescopio espacial NEOMIR (*Near-Earth Object Mission for InfraRed detection*, NEOMIR) es una misión propuesta por la Agencia Espacial Europea como parte de sus esfuerzos para proteger la Tierra de impactos de asteroides y otros NEOs. A diferencia de los sistemas terrestres, NEOMIR está diseñado específicamente para operar en el espacio utilizando tecnología infrarroja, lo que le permite detectar objetos oscuros y difíciles de observar desde la superficie terrestre. El objetivo principal de NEOMIR es detectar NEOs antes de que puedan acercarse peligrosamente a nuestro planeta. Su diseño se centra en identificar asteroides y cometas que son difíciles de observar desde telescopios terrestres debido a su baja reflectividad o ubicación en regiones inaccesibles del cielo (Conversi et al., 2024).

El telescopio terrestre Flyeye, desarrollado por la ESA, forma parte de su estrategia para proteger la Tierra de impactos de asteroides y otros NEOs. Este proyecto está diseñado específicamente para detectar objetos pequeños y de impacto inminente con poco tiempo de advertencia, convirtiéndose en una herramienta esencial para la defensa planetaria (Cibin et al., 2019).

El Observatorio Rubin, antes conocido como LSST (*Large Synoptic Survey Telescope*, LSST), es un proyecto revolucionario diseñado para transformar la astronomía. Su objetivo es realizar un estudio exhaustivo y sistemático del cielo nocturno durante 10 años, generando un catálogo masivo de objetos y fenómenos celestes (Thomas et al., 2020). Entre sus metas principales está la identificación de asteroides, cometas y otros NEOs que puedan representar una amenaza. El observatorio también está optimizado para detectar cuerpos pequeños y oscuros difíciles de observar con las tecnologías actuales. El 23 de junio de 2025, el Observatorio Rubin tuvo un éxito notable en sus primeras pruebas de funcionamiento, descubriendo más de 2,100 asteroides nuevos en pocos días. Gracias a su capacidad para escanear todo el hemisferio sur cada tres noches, se espera que el observatorio descubra millones de asteroides desconocidos, revolucionando así nuestra comprensión del Sistema Solar.

La Tabla 1 resume las características principales de los telescopios terrestres y espaciales dedicados a la observación de NEOs, tanto los ya instalados como los que están en desarrollo, en el marco de la defensa planetaria.

Tabla 1: Resumen de las características de los telescopios terrestres y espaciales dedicados a la defensa planetaria.

Instrumento/ proyecto	Campo de Visión	Enfoque principal	Ubicación
Telescopio Flyeye (ESA)	6.7° x 6.7°	Detección temprana de NEOS, especialmente asteroides pequeños e inminentes, para proporcionar alertas cruciales que permitan tomar medidas preventivas en caso de riesgo de impacto.	Monte Mufara, en Sicilia, Italia
ATLAS (NASA)	ATLAS Hawaii 5.4° x 5.4°	Monitoreo global de NEOs que podrían impactar contra nuestro planeta con poca antelación. Se enfoca en proporcionar alertas tempranas sobre asteroides potencialmente peligrosos que podrían acercarse a la Tierra en días o semanas.	Haleakalā, Hawái (ATLAS-Hawaii)
	ATLAS Chile 5.4° x 5.4°		Observatorio El Sauce, Chile (ATLAS-Chile)
	ATLAS Sur África 5.4° x 5.4°		Observatorio Sutherland, Sudáfrica (ATLAS-South África)
Pan-STARRS	7° x 7° PS1 7° x 7° PS2	Monitoreo exhaustivo del cielo para detectar, rastrear y caracterizar NEOs, centrándose en la defensa planetaria	Ambos ubicados en el observatorio Haleakalā, Maui, Hawái
Catalina Sky Survey (CSS)	1° x 1° en MLS 4.5° x 4.5° en CO 8° x 8° en SSO	Búsqueda y monitoreo de NEOs para proteger a nuestro planeta de posibles impactos.	Observatorio Mount Lemmon, Arizona, EE. UU Observatorio Catalina, Arizona, EE.UU. Observatorio Siding Spring, Australia
Observatorio Rubin	9.6° x 9.6°	Detección de NEOs con mayor eficiencia que los sistemas actuales, para identificar objetos pequeños y oscuros proporcionará alertas tempranas sobre posibles impactos, mejorando los esfuerzos de defensa planetaria	El Observatorio Vera C. Rubin, un telescopio terrestre de última generación, está ubicado en la cima del Cerro Pachón en Chile. Aunque sus primeras pruebas de funcionamiento se realizaron con éxito el 23 de junio de 2025, se espera que sus operaciones completas comiencen más adelante en el mismo año.
NEOMIR (ESA)	Infrarrojo (Aún están en desarrollo). Se espera que sea comparable o superior a los sistemas terrestres dedicados a la búsqueda de NEOs.	Identifica asteroides oscuros que no reflejan mucha luz visible, pero que emiten radiación térmica en el infrarrojo. Estos objetos pueden pasar desapercibidos para los telescopios ópticos terrestres.	Observatorio espacial (en desarrollo) diseñado para trabajar en el infrarrojo, lo que le permite detectar objetos oscuros y difíciles de observar desde la Tierra
NEO Surveyor, (NASA)	Están diseñando un campo de visión amplio y optimizado para cubrir grandes áreas del cielo en el infrarrojo.	Observación de Asteroides oscuros. Identificar aquellos NEOs que podrían representar una amenaza para nuestro planeta.	Observatorio Espacial (en desarrollo). Se ubicará en la órbita alrededor del punto L1 de Lagrange del sistema Tierra-Sol

Fuente: Elaboración propia (2025).

Por otra parte, el telescopio espacial James Webb (*James Webb Space Telescope, JWST*) es un telescopio de la NASA súper potente que puede observar galaxias que se formaron después del Big Bang, examinar planetas lejanos y acercarse a los mundos y lunas de nuestro propio Sistema Solar. Aunque su propósito principal es estudiar el cosmos, ha demostrado ser eficaz en la detección de asteroides pequeños, incluso de solo unos pocos metros de diámetro. Gracias a su capacidad para observar en el espectro infrarrojo, el JWST ha descubierto algunos de los asteroides más pequeños jamás detectados en el cinturón principal. Por ejemplo, en marzo fue utilizado para monitorear el asteroide 2024 YR4, debido a la predicción de un posible impacto con la Tierra el 22 de diciembre de 2032.

El desarrollo de nuevas tecnologías, como el Observatorio Rubin en Chile, el Flyeye Telescope en Italia y las misiones espaciales NEO surveyor y NEOMIR, prometen aumentar significativamente la detección de asteroides pequeños e inminentes. Estas herramientas no solo fortalecen los sistemas de alerta temprana, sino que también brindan una oportunidad única para estudiar en detalle las características de los asteroides antes de un posible impacto, aumentando así nuestra capacidad de defensa planetaria.

Detectar asteroides con antelación es esencial para la protección de la Tierra, ya que permite implementar medidas de defensa planetaria. Además, este proceso representa una oportunidad invaluable para avanzar en nuestra comprensión del Sistema Solar y su historia evolutiva, proporcionando información clave sobre la dinámica y composición de estos cuerpos celestes.

Descubrimiento y caracterización inicial del asteroide 2024 YR4: Trayectoria, distancia y dinámica orbital

El asteroide 2024 YR4 fue descubierto el 27 de diciembre de 2024 por el sistema de alerta temprana de impacto terrestre de asteroides ATLAS (Tonry et al., 2018). Este hallazgo se realizó utilizando el telescopio ubicado en Río Hurtado, Chile, identificado con el código de observación W68 asignado por el Centro de Planetas Menores (*Minor Planet Center, MPC*). Las primeras observaciones del asteroide se llevaron a cabo a las 05 h 42 min 49 seg en UTC (*Universal Time Coordinate, UTC*), como se ilustra en la Figura 2. El asteroide fue descubierto con una ascensión recta (RA) de 08° 56 min 40.97 seg y una declinación (DEC) de -0° 16' 11.93". En el momento de su detección, se encontraba a una distancia de 0.996 UA del Sol y 0.017 UA de la Tierra, con un ángulo de fase de 43.2°. Su magnitud aparente era de 16.7 mag en el filtro V (Denneau et al., 2024), y presentaba una velocidad angular de 23.78" /min (segundos de arco por minuto). En el panel (a) se muestra el campo donde se localizó el asteroide 2024 YR4 a las 05:42:49 UTC. Durante este tiempo, el asteroide se desplazaba a una velocidad de 22,8 segundos de arco por minuto (equivalente a 9,12 grados por día) en dirección noroeste. En las exposiciones de 30 segundos realizadas por el sistema ATLAS, el asteroide dejó un rastro de aproximadamente 6 píxeles ($\sim 11''$ de longitud), claramente identificado por un círculo rojo en la imagen. En el panel b, se muestra el mismo campo que en el panel a, pero

con las fuentes estáticas eliminadas. A pesar de la presencia de estrellas cercanas, el asteroide se detecta claramente en las imágenes procesadas, destacándose en el campo visual. El panel c muestra el mismo campo que el panel a, pero registrado a las 05:46:04 UTC. Por su parte, el panel d presenta el mismo campo que el panel c, pero con las fuentes estáticas eliminadas. En estas observaciones, el asteroide fue detectado con una magnitud aparente de $\text{o} = 16,54$ en el panel a y $\text{o} = 15,80$ en el panel c. Las grandes áreas negras visibles en las imágenes restadas corresponden a regiones de píxeles saturados, generadas por la presencia de estrellas brillantes. Tanto la dirección del asteroide como las direcciones cardinales están claramente señaladas en cada figura (Bolin et al., 2025).

La cámara ATLAS tiene una escala de $1,86''/\text{pix}$ (segundos por píxel), un filtro personalizado en la banda “naranja” (o-band) que proporciona cobertura de longitud de onda entre 560 nm y 820 nm, y una longitud de onda efectiva de 663 nm (Tonry et al., 2018). El asteroide fue detectado en las cuatro imágenes de la banda o, tomadas en un intervalo de 3,160 segundos, es decir, cada 52.666 minutos de tiempo aproximadamente desde el 27 de diciembre de 2024 a las 05:42:49 UTC hasta el 27 de diciembre de 2024 a las 06:35:30 UTC.

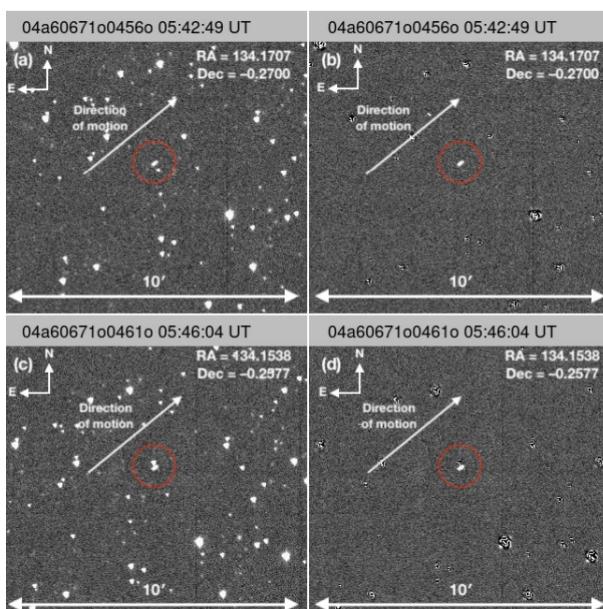


Figura 2: Primeras imágenes del asteroide 2024 YR4 tomadas el 27 de diciembre de 2024 con el telescopio ATLAS-Chile en la banda o.

Fuente: Bolin et al. (2025).

El nombre de este asteroide sigue el sistema de nomenclatura de la IAU, en el cual los asteroides recién descubiertos reciben un número seguido de una combinación de letras y el año de su descubrimiento tal como se explica en Navas (2022). En este caso, 2024 indica el año de descubrimiento, YR es una abreviatura que se utiliza para identificar el observatorio

o el equipo que hizo el descubrimiento, en este caso ATLAS. El 4 representa el número de descubrimientos realizados por ese equipo en ese año específico.

La Tabla 2 muestra la distancia del asteroide 2024 YR4 desde el 20 de diciembre hasta el 03 de enero 2025 de forma diaria, y posteriormente de forma mensual desde el 27 de enero hasta el 27 de junio 2025. Se puede destacar que dos días antes de su primer avistamiento, el asteroide 2024 YR4 estaba llegando a su posición más próxima a la Tierra, alcanzando una distancia de 866,171.67 km ($5.79e^{-3}$ UA), considerándose hasta la fecha su mayor acercamiento a nuestro planeta. Luego, el asteroide comenzó a alejarse alcanzando una distancia de 0.015 UA el día de su descubrimiento, continuando su alejamiento de la Tierra al paso de los días y de los meses, donde se destaca ya que, para el mes de junio 2025, este asteroide se encuentre a 2.865 UA de la Tierra siguiendo su recorrido en su órbita elíptica. Estos valores fueron obtenidos de la base de datos de cuerpos menores del JPL de la NASA, y las magnitudes de la base de datos del MPC, todos para un UTC=0:0:0 del día que corresponde en la tabla.

Tabla 2: Distancia a la Tierra del NEO 2024 YR4 desde su descubrimiento al mes de junio 2025.

Fecha: día-mes-año	Distancia a la Tierra en UA	Magnitud filtro V
20-12-2024	0.042	26.2
21-12-2024	0.034	26.6
22-12-2024	0.026	27.4
23-12-2024	0.018	-
24-12-2024	0.011	-
25-12-2024	5.79 E-3	18.7
26-12-2024	8.52 E-3	15.9
27-12-2024	0.015	16.6
28-12-2024	0.023	17.3
29-12-2024	0.031	17.8
30-12-2024	0.039	18.2
31-12-2024	0.046	18.6
01-01-2025	0.054	18.9
02-01-2025	0.062	19.1
03-01-2025	0.07	19.3
27-01-2025	0.282	22.3
27-02-2025	0.652	25.0
27-03-2025	1.092	26.7
27-04-2025	1.666	27.9
27-05-2025	2.261	28.7
27-06-2025	2.865	29.3

Fuente: Elaboración propia (2025). Datos obtenidos del MPC.

Adicionalmente en la Tabla 2 se puede destacar la magnitud aparente del asteroide. Debido a su débil luminosidad, su observación desde grandes telescopios terrestres era factible durante el mes de enero y los primeros días de febrero, puesto que en febrero ya estaba alcanzando magnitudes superiores a 24 dificultando su monitoreo. Vale la pena remarcar que, desde el OAN (Observatorio Astronómico Nacional Llano del Hato) en Mérida-Venezuela, contamos con dos telescopios grandes telescopios terrestres con los que se pueden observar y monitorear a este tipo de asteroides siempre y cuando no superen magnitudes de 21 y su declinación no sea superior a $\pm 65^\circ$.

La Figura 3 ilustra los diagramas orbitales del asteroide 2024 YR4, cubriendo el periodo comprendido entre su descubrimiento y marzo. En estos diagramas se evidencia su trayectoria elíptica alrededor del Sol, en la cual acelera al acercarse al perihelio, conforme a la segunda ley de Kepler, y disminuye su velocidad al acercarse al afelio. Además, se observa cómo el asteroide se ha ido alejando progresivamente tanto de la Tierra como de su propia órbita inicial, lo que refleja su dinámica característica dentro del Sistema Solar. La proximidad del 2024 YR4 con la Tierra y otros cuerpos masivos, como Venus y Marte, introduce pequeñas perturbaciones gravitacionales que pueden modificar levemente su trayectoria a lo largo del tiempo. Estas interacciones destacan la complejidad y la evolución continua de las órbitas en el Sistema Solar. El asteroide 2024 YR4, que se estima tiene entre 40 y 90 metros de ancho, llamó la atención de los astrónomos cuando apareció en la lista de riesgos de impacto de la NASA el 31 de diciembre de 2024.

Evolución del riesgo de impacto del asteroide 2024 YR4: De la alerta global a su descarte como amenaza

El asteroide recién descubierto, 2024 YR4, generó una considerable atención durante los meses de enero, febrero y marzo debido a su posición como el principal objeto en la tabla de riesgo de impacto con la Tierra. En enero de 2025, los análisis de la NASA del NEA 2024YR4 indicaron la existencia de 1 % de probabilidad de impacto con la Tierra para el 22 de diciembre de 2032, el cual también indica la existencia de alrededor de 99 % de no impactar. Aunque sigue siendo una posibilidad extremadamente baja, observaciones y análisis adicionales al 7 de febrero 2025 del asteroide 2024 YR4 indicaron que su probabilidad de impacto con la Tierra había aumentado a un 2.3 % para el 22 de diciembre de 2032. Las observaciones se han mantenido a través de telescopios terrestres involucrados en la Red Internacional de Alerta de Asteroides, y se mantendrán hasta que el asteroide siga siendo visible (mes de abril del año 2025). Después de esa fecha, será demasiado tenue para observarlo, y tocará esperar hasta aproximadamente junio de 2028 que será su próximo acercamiento a la Tierra.

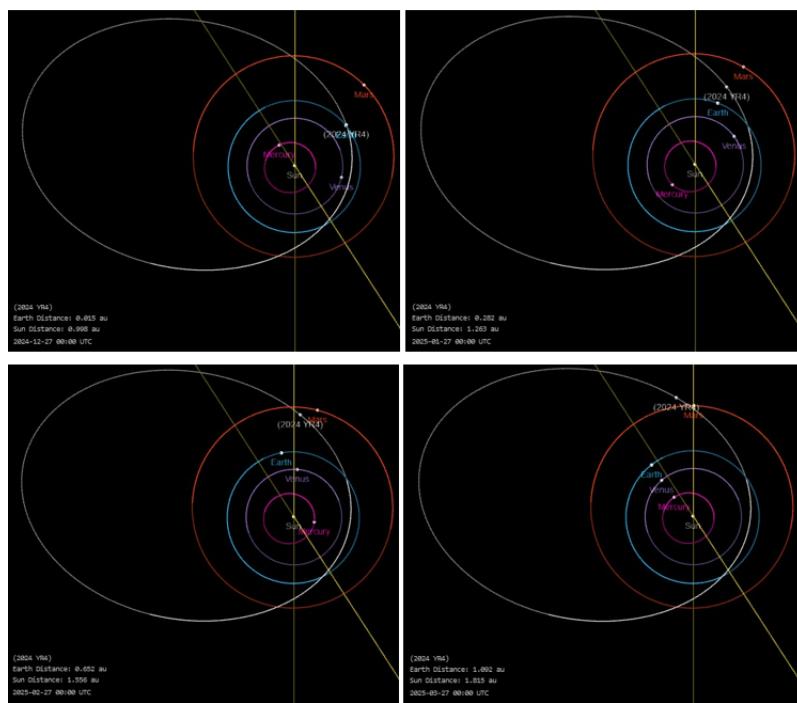


Figura 3: Diagramas orbitales del asteroide 2024 YR4. Los diagramas muestran la evolución orbital del asteroide 2024 YR4 a lo largo de varios meses. Los paneles superiores representan las posiciones orbitales correspondientes a diciembre de 2024 y enero de 2025, mientras que los paneles inferiores abarcan febrero y marzo de 2025. Estos cálculos fueron realizados específicamente el día 27 de cada mes, utilizando como referencia la hora universal coordinada (UTC=0h0m0s).

Fuente: Bolin et al. (2025). Datos obtenidos del JPL de la NASA.

El Centro de Estudios de NEOs de la NASA, ubicado en el JPL de la agencia en el sur de California, incorporó nuevas observaciones reportadas al Centro de Planetas Menores y, el 18 de febrero, actualizó la probabilidad de impacto del asteroide 2024 YR4 en 2032 al 3.1 %, siendo esta la mayor probabilidad de impacto que la NASA haya registrado para un objeto de este tamaño o mayor, por lo que fue catalogado como un asteroide de nivel 3 en la escala de Torino. Esto lo convirtió en el único objeto rastreado con tal nivel de riesgo, ya que todos los demás astros mantenían un nivel de 0 en la misma escala. Un nivel 3 en la escala de Torino indica que el asteroide se encuentra en una trayectoria de aproximación cercana a la Tierra, lo que suscitó gran interés por parte de la comunidad astronómica a nivel mundial. Este hecho destacó la importancia de seguir monitoreando su movimiento y evaluando los posibles escenarios de impacto.

Para ofrecer una perspectiva, el asteroide que detonó sobre Chelyabinsk, Rusia, en 2013, tenía aproximadamente la mitad del tamaño de 2024 YR4. A pesar de su menor tamaño, el evento de Chelyabinsk generó una onda expansiva lo suficientemente poderosa como para

romper ventanas y dañar edificios en seis ciudades, causando heridas a aproximadamente 1,500 personas. Estas cifras subrayan el considerable riesgo asociado con un objeto de mayor tamaño como 2024 YR4, resaltando la importancia de su monitoreo continuo.

Si el asteroide 2024 YR4 llegara a impactar la Tierra, se estima que podría generar una explosión de magnitud comparable a la de una bomba atómica. Las proyecciones realizadas en enero y febrero de 2025 indicaban que el asteroide seguiría una trayectoria ecuatorial, atravesando áreas densamente pobladas cercanas al ecuador terrestre, como Mumbai en India, partes de la península arábiga y diversos países africanos, incluidos Nigeria y Ghana. Asimismo, se predijo que sobrevolaría el Atlántico y parte de Sudamérica, con un posible impacto en regiones como Venezuela y Colombia. Este tipo de información generó gran polémica tanto a nivel mundial como dentro de nuestro país. No obstante, debido a la baja luminosidad del asteroide, su observación mediante telescopios pequeños se vio dificultada.

Sin embargo, el miércoles 19 de febrero de 2025, nuevos datos recopilados durante la noche redujeron la probabilidad de impacto al 1.5 %. Cada noche adicional de observaciones mejoraba nuestra comprensión sobre la posible ubicación del asteroide el 22 de diciembre de 2032 y subraya la importancia de recopilar suficiente información para que los expertos en defensa planetaria puedan determinar el riesgo futuro para la Tierra. La NASA para esa fecha esperaba que la probabilidad de impacto siguiera evolucionando a medida que se realizaran nuevas observaciones del asteroide 2024 YR4 en los próximos días y semanas.

Las observaciones realizadas durante la noche del 19 al 20 de febrero de 2025 sobre el asteroide 2024 YR4 redujeron aún más su probabilidad de impacto con la Tierra al 0.28 %. Los equipos de defensa planetaria de la NASA continuaron monitoreando el asteroide para mejorar las predicciones sobre su trayectoria. Con estos nuevos datos, la probabilidad de impacto con la Luna aumentó ligeramente al 1 %.

El asteroide 2024 YR4 luego de su descubrimiento tenía una posibilidad muy pequeña, pero notable, de impactar la Tierra el 22 de diciembre del año 2032. A medida que se continuaron enviando observaciones al MPC, los expertos del centro de estudios de NEOs del Laboratorio JPL de la NASA pudieron calcular modelos más precisos de su trayectoria y actualizaron la probabilidad de impacto para el 22 de diciembre de 2032 a solo 0.004 %, concluyendo que no existe un riesgo significativo de impacto con nuestro planeta durante el próximo siglo (National Aeronautics and Space Administration, 2025). Gracias a las nuevas astrometrías calculadas en marzo de 2025, se logró ajustar la trayectoria del asteroide, descartando la posibilidad de un impacto con la Tierra. Como resultado, el asteroide fue clasificado con un nivel de 0 en la escala de Torino, eliminando así cualquier alarma de riesgo. Las observaciones realizadas por el telescopio espacial James Webb sobre el asteroide 2024 YR4, el 26 de marzo de 2025, fueron fundamentales para obtener información detallada sobre sus características físicas. Utilizando su tecnología de vanguardia en el espectro infrarrojo, el JWST logró analizar aspectos como

su tamaño, su rotación y la composición de su superficie, especialmente su capacidad de reflectividad.

Caracterización orbital y evaluación de riesgo del asteroide 2024 YR4: Análisis de datos y escenarios futuros

Con aproximadamente 476 mediciones del asteroide 2024 YR4 realizadas entre el 25 de diciembre de 2024 UTC al 26 de marzo de 2025 UTC, (96 días) el JPL HORIZONS calculó la solución de los elementos orbitales, y estos se muestran en la Tabla 3 (solución realizada el 03 de abril de 2025, 06:19:30 UTC).

Estos elementos orbitales nos permiten caracterizar al asteroide en la categoría Apolo, un grupo de NEOs que tienen órbitas elípticas que los acercan al sistema terrestre. La órbita de 2024 YR4 tiene un semieje mayor $a > 1$ UA, lo que significa que su distancia promedio al Sol es ligeramente mayor que la distancia promedio entre la Tierra y el Sol. El punto más cercano de su órbita al Sol (q) está dentro de la órbita de la Tierra, es decir, $q < 1$ UA. Esto implica que el asteroide pasa relativamente cerca del Sol durante su recorrido orbital. El punto más lejano de su órbita respecto al Sol está más allá de la órbita terrestre, lo que confirma su naturaleza elíptica y su capacidad para cruzar la órbita de la Tierra. Según JPL HORIZONS, la MOID (distancia mínima de intersección de órbita con la Tierra) de 2024 YR4 con respecto a la Tierra es de aproximadamente 2.82×10^{-3} UA, o unos 421,000 km. Esto indica que, aunque su órbita cruza la de la Tierra, su probabilidad de impacto es extremadamente baja debido a la separación espacial entre ambas trayectorias.

Tabla 3: Elementos orbitales del NEO 2024 YR4.

Elementos	Valores	Incertidumbre (1-sigma)	unidades
Tiempo de perihelio (Tp)	2,460,636.917565526356	1.724 E-5	TDB (día juliano)
Semi-eje mayor (a)	2.5158703711741	1.0147 E-5	UA
Excentricidad (e)	0.6615485920479125	3.35 E-6	e
Perihelio (q)	0.8514998693488151	2.078 E-7	UA
Afelia (Q)	4.180240872999385	1.686 E-5	UA
Inclinación (i)	3.408175346063558	5.2904 E-6	grados
Nodo ascendente (Ω)	271.3656150605426	8.2828 E-6	grados
Argumento del perihelio (ω)	134.3613646637905	9.7798 E-6	grados
Anomalia promedio (M)	40.40251035304198	0.00024862	grados
Periodo	3.990622006048849	2.4143 E-5	años
Magnitud absoluta	23.96	0.27787	mag

Fuente: Elaboración propia (2025). Datos obtenidos del JPL al 03 de abril 2025.

La Tabla 4 resume la información básica sobre el peligro que representa este asteroide en la actualidad para nuestro planeta. Se enumeran los valores máximos de las escalas de Torino y Palermo, así como el número de impactos potenciales tabulados y sus correspondientes valores

en la escala de Palermo y la probabilidad de impacto. Algunos valores de parámetros dependen del evento de impacto específico en cuestión, pero cambian poco entre las distintas tablas. Por lo tanto, solo se tabularon los valores promedios. Análisis basado en 476 observaciones que abarcan 91.112 días (25-12-2024 al 26-03-2025).

Tabla 4: Eventos de posibles futuros impactos del NEO 2024 YR4 a la Tierra.

Fecha (año-m-d.d)	Sigma VI	Probabilidad de impacto	Energía de Impacto (Mt)	Escala de Palermo	Escala de Torino
2047-12-22.05	2.6743	1.1e-6	7.376e+00	-5.09	0
2047-12-22.05	0.1943	6.7e-6	7.373e+00	-4.32	0

Fuente: Elaboración propia (2025). Datos obtenidos del JPL al 03 de abril 2025.

Estos datos presentan solo dos escenarios posibles de impacto del asteroide contra la Tierra en el año 2047. En ambos casos, se analizan los valores de sigma VI, que representa el número de desviaciones estándar entre la predicción orbital actual y el punto de impacto más probable. Este parámetro mide la incertidumbre en la trayectoria del asteroide: un valor más alto de sigma VI indica mayor incertidumbre en la predicción. En este caso, los valores de sigma son 2.6743 y 0.1943, respectivamente. El segundo escenario (0.1943) presenta una incertidumbre significativamente menor, lo que sugiere una predicción más precisa.

En cuanto a las probabilidades de impacto, en el primer escenario es de $1.1e^{-6}$, equivalente a 0.0000011 (aproximadamente 1 en 909,090). En el segundo escenario, la probabilidad asciende a $6.7e^{-6}$, o 0.0000067 (aproximadamente 1 en 149,254). Ambas cifras son extremadamente bajas, lo que indica que el riesgo de impacto es prácticamente insignificante.

Por otro lado, las energías estimadas para estos posibles impactos son de $7.376e^{+00}$ Mt y $7.373e^{+00}$ Mt, equivalentes a aproximadamente 7.38 megatones (Mt). Esta unidad mide la energía liberada en explosiones y, en este caso, es comparable a la de una gran explosión nuclear. Para contexto, la bomba atómica lanzada sobre Hiroshima liberó alrededor de 0.015 Mt. Un impacto con una energía de 7.38 Mt podría causar daños significativos a nivel regional, afectando infraestructuras, el entorno y generando posibles desastres locales. Sin embargo, no tendría consecuencias catastróficas a nivel global. A pesar de la magnitud potencial de los efectos, las probabilidades extremadamente bajas de ocurrencia minimizan aún más el riesgo percibido, reforzando la conclusión de que el asteroide no representa una amenaza significativa para la Tierra en el futuro cercano.

La escala de Palermo es una herramienta que mide el riesgo relativo de impacto de un asteroide en comparación con el “riesgo de fondo”, es decir, la probabilidad promedio de que asteroides de tamaño similar impacten contra la Tierra. Los valores negativos en esta escala indican que el riesgo es menor que el riesgo de fondo. En este caso, los valores obtenidos son -5.09 y -4.32, ambos considerablemente bajos. Esto significa que el riesgo de impacto del

asteroide es mucho menor que el promedio esperado para objetos de características similares. Además, la escala de Torino ofrece una evaluación más simplificada del riesgo, clasificándolo en una escala de 0 a 10. Un valor de 0 indica que no hay motivo de preocupación, ya que el evento no representa una amenaza significativa. Por su parte, los valores entre 1 y 10 reflejan niveles crecientes de alerta, desde eventos que requieren atención hasta colisiones globales devastadoras. En este análisis, todos los escenarios evaluados recibieron una calificación de 0 en la escala de Torino, lo que confirma que no existe un riesgo significativo de impacto y que no es necesario tomar medidas especiales en este momento.

Aunque 2024 YR4 no representa actualmente un riesgo inmediato para la Tierra, su clasificación como un objeto tipo Apolo lo convierte en un candidato para futuros estudios de defensa planetaria, dado que su órbita podría evolucionar hacia configuraciones más cercanas a la Tierra en el futuro debido a efectos gravitacionales o no gravitacionales (como el efecto Yarkovsky). Su órbita y características dinámicas ofrecen oportunidades únicas para investigar cómo los asteroides interactúan con los planetas interiores y cómo estas interacciones afectan su evolución orbital.

El Observatorio Astronómico Nacional de Venezuela: Un bastión para el monitoreo de asteroides, NEOs y la defensa planetaria

El Observatorio Astronómico Nacional de Venezuela está ubicado en Llano del Hato, estado Mérida. Se sitúa a una altitud de 3,600 metros sobre el nivel del mar, en la cordillera andina ($8^{\circ}47'11''N$, $70^{\circ}52'18,8''O$). Su ubicación geográfica cercana al ecuador lo convierte en un punto estratégico. Desde allí se pueden observar objetos en ambos hemisferios celestes, tanto al norte como al sur (con declinaciones $\leq \pm 65^{\circ}$). Además, su localización en el páramo andino, con poca contaminación lumínica y una atmósfera estable, lo hace uno de los centros de observación más importantes del norte de Sudamérica. La infraestructura del OAN incluye cuatro telescopios principales ubicados en cúpulas independientes: una cámara Schmidt, un telescopio Reflector, un Gran Refractor y el telescopio doble Astrógrafo. La cámara Schmidt puede detectar objetos de hasta magnitud 21, y el telescopio Reflector alcanza la magnitud 18. Ambos son ideales para observar cuerpos celestes de poca luz, como asteroides débiles.

Los proyectos que desarrolla en el OAN se centran en el monitoreo de NEOs y NEAs. Usando tanto la Cámara Schmidt como el Reflector, se calculan las posiciones astrométricas (ra, dec) de los cuerpos celestes observados. Esta información es vital para refinar sus órbitas y trayectorias, una tarea en la que el observatorio ha colaborado en los últimos años en el marco de los proyectos que he venido desarrollando (Deen et al., 2024; Husar et al., 2024; Robinson et al., 2024; Siverd et al., 2024). Estas capacidades tecnológicas posicionan al observatorio como un recurso clave para el monitoreo y análisis de cuerpos celestes en la región contribuyendo a la defensa planetaria.

El CIDA y el OAN pueden dar un paso adelante en la seguridad planetaria. Esto se lograría a través de una propuesta integral que aproveche sus recursos existentes. Para empezar, la dedicación exclusiva de uno de los telescopios, como la cámara Schmidt, a la observación de NEAs optimizaría los esfuerzos de monitoreo. Además, el fortalecimiento del equipo de investigación con más profesionales permitiría desarrollar software y algoritmos más avanzados. Estos programas no solo perfeccionarían el cálculo de las posiciones astrométricas ya existentes en el CIDA, sino que también automatizarían la detección de nuevos asteroides y calcularían sus órbitas preliminares.

Actualmente, el asteroide 2024 YR4 se encuentra ya muy alejado de la Tierra, lo que hace imposible su observación con telescopios terrestres. Con un período orbital de aproximadamente 3.99 años (Tabla 3), lo que significa que completa una órbita alrededor del Sol en ese tiempo, se espera que vuelva a estar cerca de la Tierra en junio de 2028. Su mayor aproximación será el 22 de diciembre de ese mismo año, cuando pasará a una distancia de 266,857 kilómetros (aproximadamente 0.001784 UA). Durante este período (junio-diciembre), su declinación cambiará de -17° a $+03^{\circ}$, moviéndose del hemisferio celeste sur al norte. Esta trayectoria es ideal para ser monitoreada desde Venezuela, ya que la ubicación del Observatorio de Llano del Hato cerca del ecuador permite una observación óptima del asteroide en ambos hemisferios.

Para la observación, se utilizaría la Cámara Schmidt debido a la baja luminosidad del asteroide. El protocolo de observación incluiría observaciones continuas tres horas antes y tres horas después de que el objeto alcance su céntit. Para capturar con éxito el asteroide, se usarían tiempos de exposición de 240 segundos y un ISO de 6,600. Luego, las imágenes se procesarían con un binning de 2x2 para mejorar la señal y reducir el ruido. El cálculo de las posiciones astrométricas (ascensión recta y declinación) se harían con los programas ya desarrollados en Fortran y Python.

Desde Venezuela, existe una oportunidad significativa para contribuir a su observación y al cálculo de sus posiciones astrométricas, las cuales serían reportadas al MPC tal como se viene haciendo actualmente con otros NEOs. Este organismo recopila mediciones astrométricas de objetos cercanos a la Tierra obtenidas por astrónomos de todo el mundo. Gracias a estos datos, es posible calcular sus elementos orbitales y refinar las predicciones de trayectoria, utilizando nuevas posiciones proporcionadas por telescopios terrestres distribuidos globalmente.

El Centro de Investigaciones de Astronomía y Tecnologías Aplicadas (CIDA) desempeña un papel fundamental en la observación y análisis de cuerpos celestes. A través de sus telescopios, contribuye de manera significativa al seguimiento y cálculo de posiciones astrométricas de asteroides y cometas cercanos a la Tierra. Estas labores no solo optimizan la precisión de las predicciones orbitales de objetos como el 2024 YR4, sino que también refuerzan la integración de Venezuela en redes globales de monitoreo de cuerpos potencialmente peligrosos, promoviendo el avance científico y la seguridad planetaria.

La proximidad relativa del NEA 2024 YR4 no implica necesariamente un riesgo de impacto, ya que las simulaciones orbitales actuales sugieren que seguirá siendo un encuentro seguro. Sin embargo, es importante continuar monitoreando su trayectoria en los próximos años para refinar las predicciones y asegurar que no existan cambios significativos en su órbita debido a interacciones gravitacionales con otros cuerpos celestes o efectos no gravitacionales, como el efecto Yarkovsky. Este seguimiento será crucial para garantizar la precisión de las estimaciones futuras y para planificar posibles campañas de observación científica cuando el asteroide vuelva a acercarse a nuestro planeta.

Conclusiones

El descubrimiento anticipado de asteroides no solo es fundamental para la protección de la Tierra, sino que también abre nuevas oportunidades para abordar preguntas fundamentales sobre el origen y evolución del Sistema Solar. Los asteroides, como reliquias primordiales de la formación temprana del Sistema Solar, contienen información invaluable sobre los procesos que moldearon los planetas y otros cuerpos celestes. El análisis de laboratorio de meteoritos recuperados en la Tierra ha permitido identificar materiales exóticos, como minerales únicos y compuestos orgánicos, que podrían estar relacionados con el origen de la vida. Además, combinar datos orbitales con observaciones físicas mejora nuestra comprensión de las fuerzas que afectan a los asteroides, incluidos efectos gravitacionales y no gravitacionales, como la presión de radiación solar y el efecto Yarkovsky.

Casos destacados, como el asteroide 2008 TC3, el primer objeto detectado antes de su impacto, ilustran la importancia de la detección temprana. Su estudio exhaustivo durante sus últimas horas permitió recolectar fragmentos en Sudán y confirmar su clasificación como ureilita. Eventos recientes, como los asteroides 2018 LA, 2023 CX1 y 2024 BX1, demuestran la creciente capacidad de los sistemas actuales para identificar impactadores inminentes, incluso con poco tiempo de anticipación. Estos casos subrayan la necesidad de fortalecer las redes globales de monitoreo para proteger nuestro planeta.

La atmósfera terrestre actúa como un escudo protector, desintegrande muchos cuerpos celestes antes de que alcancen la superficie. Sin embargo, los fragmentos que logran sobrevivir ofrecen pistas cruciales sobre la composición de los asteroides y cometas. Con el desarrollo de nuevas tecnologías, como el Observatorio Rubí en Chile, el Flyeye Telescope en Italia y las misiones espaciales NEO Surveyor y NEOMIR, se espera un incremento significativo en la tasa de detección de NEOs. Estas herramientas no solo mejorarán las capacidades de advertencia temprana, sino que también proporcionarán oportunidades únicas para estudiar las características físicas y dinámicas de estos objetos antes de su impacto.

Un ejemplo reciente es el caso del asteroide 2024 YR4, cuya trayectoria fue ajustada

gracias a posiciones astrométricas precisas reportadas hasta marzo de 2025. Este seguimiento permitió descartar cualquier riesgo de impacto con la Tierra para el 22 de diciembre del año 2032, llevando su nivel de riesgo a 0 en la escala de Torino. Aunque este asteroide ya no representa una amenaza, su monitoreo continuo, especialmente durante su aproximación a la Tierra en junio del año 2028, será crucial para evaluar cualquier cambio futuro en su órbita. Desde Venezuela, el CIDA juega un papel clave al utilizar telescopios como el Reflector y la Cámara Schmidt para calcular y reportar posiciones astrométricas al MPC, contribuyendo así al refinamiento de los elementos orbitales y asegurando la evaluación continua de su trayectoria.

En resumen, el estudio de asteroides como el 2024 YR4 no solo es relevante para la ciencia y la seguridad planetaria, sino que también profundiza nuestro conocimiento sobre la dinámica y composición de estos cuerpos celestes. Aunque su órbita elíptica característica de los asteroides tipo Apolo indica un riesgo mínimo de colisión, su monitoreo constante sigue siendo esencial. Detectar asteroides con antelación pudiera permitir en el futuro la implementación de medidas de defensa planetaria ofreciendo una oportunidad invaluable para avanzar en la comprensión de nuestro Sistema Solar y de la Vía Láctea.

Glosario de Términos

2008 TC3: Meteorito de aproximadamente 4 m de diámetro que ingresó a la atmósfera terrestre.

2024 YR4: Nombre de un asteroide que generó discusión por la presunción de un impacto terrestre.

ATLAS: *Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System*.

CIDA: Fundación Centro de Investigaciones de Astronomía.

CSS: Catalina Sky Survey.

DEC: Declinación.

ESA: *European Space Agency*.

IAU: *International Astronomical Union*.

JPL: Jet Propulsion Laboratory.

JWST: James Webb Space Telescope.

MPC: *Minor Planet Center*.

MOID: Minimum Orbital Intersection Distance.

Mt: Megatones.

NASA: *National Aeronautics and Space Administration*.

NEAs: Near-Earth Asteroids.

NECs: Near-Earth Comets.

NEO Surveyor: Near-Earth Object Surveyor.

NEOMIR: *Near-Earth Object Mission for InfraRed detection*.

NEOs: Near Earth asteroids.

OAN: Observatorio Astronómico Nacional Llano del Hato.

Pan-STARRS: *Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System.*

PHAs: Potentially Hazardous Asteroids.

RA: Ascensión Recta.

SBDB: Small Body Database.

SCOUT: *Solid Controlled Orbital Utility Test.*

UA: Unidades Astronómicas.

UTC: *Universal Time Coordinate.*

Referencias

- Ben-Menahem, A. (1975). Source parameters of the Siberian explosion of June 30, 1908, from analysis and synthesis of seismic signals at four stations. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 11(1), 1-35. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(75\)90072-2](https://doi.org/10.1016/0031-9201(75)90072-2)
- Bischoff, A., Bannemann, L., Decker, S., Ebert., S., Haberer, S., Heitmann, U., Horstmann, M., Klemm, K., Kraemer, A., Lentfort, S., Patzek, M., Storz, J., y Weyrauch, M. (2022). Asteroid 2008 TC3, not a polymict ureilitic but a polymict C1 chondrite parent body? Survey of 249 Almahata Sitta fragments. *Meteoritics & Planetary Science*, 57(7), 1339-1364. <https://doi.org/10.1111/maps.13821>
- Bischoff, A., Patzek, M., Di Rocco, T., Pack, A., Stojic, A., Berndt, J., y Peters, S. (2023). Saint-Pierre-le-Viger (L5-6) from asteroid 2023 CX1 recovered in the Normandy, France—220 years after the historic fall of L'Aigle (L6 breccia) in the neighborhood. *Meteoritics & Planetary Science*, 58(10), 1385-1398. <https://doi.org/10.1111/maps.14074>
- Bolin, B., Hanuš, J., Denneau, L., Bonamico, R., Abron, L., Delbo, M., Ďurech, J., Jedicke, R., Alcorn, L., Cikota, A., Panda, S., y Reggiani, H. (2025). The discovery and characterization of Earth-crossing asteroid 2024 YR4. *The Astrophysical Journal Letters*, 984(1). <https://doi.org/10.3847/2041-8213/adc910>
- Bottke, W., Vokrouhlický, D., y Nesvorný, D. (2007). An asteroid breakup 160 My ago as the probable source of the K-T impactor. *Nature*, 449, 48-53. <https://doi.org/10.1038/nature06070>
- Brown, P., Assink, J., Astiz, L., Blaauw, R., Boslough, M., Borovička, J., Brachet, N., Brown, D., Campbell, M., Ceranna, L., Cooke, W., De Groot, C., Drob, D., Edwards, W., Evers, L., Garces, M., Gill, J., Hedlin, M., Kingery, A., ... Krzeminski, Z. (2013). A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors. *Nature*, 503(7475), 238-241. <https://doi.org/10.1038/nature12741>
- Brož, V. (2024). The impact of announcements of regulatory and law enforcement penalties on stock market valuation of US banks from 2000 to 2022. *Journal of Financial Regulation and Compliance*, 32(4), 479-500. <https://doi.org/10.1108/JFRC-01-2024-0007>

- Burns, J., Lamy, P., y Soter, S. (1979). Radiation forces on small particles in the solar system. *Icarus*, 40(1), 1-48. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(79\)90050-2](https://doi.org/10.1016/0019-1035(79)90050-2)
- Cantillo, D., Ridenhour, K., Battle, A., Joyce, T., Nunez, J., Pearson, N., y Reddy, V. (2024). Is Near-Earth Asteroid 2024 BX1 Ribbeck a fragment of E-type Main-belt Asteroid (434) Hungaria? *Bulletin of the American Astronomical Society*, 56(8), e-id 2024n8i207p02. <https://doi.org/10.3847/PSJ/ad8b22>
- Christensen, E., Larson, S., Boattini, A., Gibbs, A., Grauer, A., Hill, R., Johnson, J., Kowalski, R., y McNaught, R. (2012). The Catalina Sky Survey: Current and future work. *Bulletin of the American Astronomical Society*, 44, 210.13.
- Cibin, L., Chiarini, M., Gregori, P., Bernardi, F., Ragazzoni, R., Sessler, G., y Kugel, U. (2019). The Fly-Eye Telescope: Development and first factory test results. *Proceedings of the 1st NEO and Debris Detection Conference, ESA2019, Darmstadt, Germany, 22-24 January*. <https://conference.sdo.esoc.esa.int/proceedings/packages>
- Conversi, L., Licandro, J., Delbo, M., Fitzsimmons, A., Muinonen, K., Müller, T., Popescu, M., Tanga, P., y Moissl, R. (2024). NEOMIR: ESA's space-based infrared mission for NEO detection and early warning. *Proceedings of SPIE, 13092, Space Telescopes and Instrumentation 2024: Optical, Infrared, and Millimeter Wave, 130922H*. <https://doi.org/10.1117/12.3018505>
- Deen, S., Tully, B., Micheli, M., Cuillandre, J., Kleyna, J., Meech, K., Rest, A., Drlica, A., y Navas, G. (2024). MPEC 2024-G193 : Observations and Orbits of Comets and a/ Objects. *Minor Planet Electronic Circulars*, 2024-G193. <https://doi.org/10.48377/MPEC/2024-G193>
- Denneau, L., Siverd, R., Tonry, J., Weiland, H., Erasmus, N., Fitzsimmons, A., y Robinson, J. (2024). Minor Planet Electronic Circulars. 2024-Y140. <https://www.minorplanetcenter.net/mpec/K24/K24YE0.html>
- Devillepoix, H., Bland, P., Sansom, E., Towner, M., Cupák, M., Howie, R., Hartig, B., Jansen, T., y Cox, M. (2019). Observation of metre-scale impactors by the Desert Fireball Network. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 483(4), 5166-5178. <https://doi.org/10.1093/mnras/sty3442>
- Farinella, P., y Vokrouhlický, D. (1999). Semimajor axis mobility of asteroidal fragments. *Science*, 283(5407), 1507. <https://doi.org/10.1126/science.283.5407.1507>
- Farinella, P., Vokrouhlický, D., y Hartmann, W. (1998). Meteorite delivery via Yarkovsky orbital drift. *Icarus*, 132(2), 378-387. <https://doi.org/10.1006/icar.1997.5872>
- Hoffman, T., Citron, J., Dube, B., Dubovitsky, S., Erlig, H., Haag, C., Lawler, C., Lay, O., Lysek, M., Murray, A., Peddada, P., Rokey, M., Spanos, J., Swenka, E., Vaquero, M., Mainzer, A., Wong, A., Andersen, J., Sayer, T., y Veto, M. (2024). Near-Earth Object Surveyor Project Overview. *2024 IEEE Aerospace Conference*, 1-20. <https://doi.org/10.1109/AERO58975.2024.10521050>
- Husar, D., Pasche, W., Jahn, J., Varey, J., Blythe, M., Festler, P., Spitz, G., Banks, L., Lue, A., y Navas, G. (2024). MPEC 2024-K130 : Observations and Orbits of Comets and a/

- Objects. *Minor Planet Electronic Circulars*, 2024-K130. May. <https://doi.org/10.48377/MPEC/2024-K130>
- Jedicke, R., Tonry, J., Veres, P., Farnocchia, D., Spoto, F., Rest, A., Wainscoat, R., y Lee, E. (2012). ATLAS: Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System. *Bulletin of the American Astronomical Society*, 44, 210.12.
- Jenniskens, P., Gabadirwe, M., Yin, Q., Proyer, A., Moses, O., Kohout, T., Franchi, F., y Gibson, R. (2021). The impact and recovery of asteroid 2018 LA. *Proceedings of the 7th IAA Planetary Defense Conference, Vienna, Austria. 26-30 April, 98, 142*. <https://doi.org/10.22323/1.236.0142>
- Jenniskens, P., Shaddad, M., Numan, D., Elsir, S., Kudoda, A., Zolensky, M., Le, L., Robinson, G., Friedrich, J., Rumble, D., Steele, A., Chesley, S., Fitzsimmons, A., Duddy, S., Hsieh, H., Ramsay, G., Brown, P., Edwards, W., Tagliaferri, E., ... Worden, S. (2009). The impact and recovery of asteroid 2008 TC3. *Nature*, 458(7237), 485-488.
- Jet Propulsion Laboratory. (2025). *NASA Jet Propulsion Laboratory*. <https://www.jpl.nasa.gov/>
- Johnson, L., Castillo, J., y Dervan, J. (2017). Near Earth Asteroid Scout: NASA's solar sail mission to a NEA. *Proceedings of the International Astronautical Congress (IAC)*. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20170009096/downloads/20170009096.pdf>
- Kareta, T., Vida, D., Micheli, M., Moskovitz, N., Wiegert, P., Brown, P., McCausland, P., Devillepoix, H., Malečić, B., Prtenjak, M., Šegon, D., Shafransky, B., y Farnocchia, D. (2024). Telescope-to-fireball characterization of Earth impactor 2022 WJ1. *The Planetary Science Journal*, 5(11), 253. <https://doi.org/10.3847/PSJ/ad8b22>
- Kyte, F. (1998). A meteorite from the Cretaceous/Tertiary boundary. *Nature*, 396(6708), 237-239. <https://doi.org/10.1038/24322>
- Marsden, B. (1997). Overview of Orbits. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 822(1), 52-66. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1997.tb48334.x>
- Minor Planet Center. (2025). *Minor Planet Center*. <https://www.minorplanetcenter.net/>
- Motz, L., y Duveen, A. (1996). *Essentials of Astronomy* (2^a ed.) Columbia University Press. ISBN 0-231-04009-1.
- National Aeronautics and Space Administration. (2025). *NASA Discovers Interstellar Comet Moving Through Solar System*. NASA Blog. <https://blogs.nasa.gov/planetarydefense/N>
- Navas, G. (2022). Implicaciones de la propiedad intelectual en la investigación astronómica venezolana, la ética y el reconocimiento de los derechos morales en los descubrimientos. *Propiedad Intelectual*, 23(3). <http://dx.doi.org/10.53766/PI/2022.23.03>
- Nicholas, K., Herve, A., Burke, B., Hans, B., Ken, C., Mark, R., Heasley, J., Hodapp, K., Hunt, B., Jedicke, R., Jewitt, D., Kudritzki, R., Luppino, G., Maberry, M., Magnier, E., Monet, D., Onaka, P., Pickles, A., Rhoads, P., ... Wick, J. (2002). Pan-STARRS: A large synoptic survey telescope array. *Proceedings of SPIE, 4836, Survey and Other Telescope Technologies and Discoveries*, 24 December. <https://doi.org/10.1117/12.457365>

- Perna, D., Barucci, M., y Fulchignoni, M. (2013). The near-Earth objects and their potential threat to our planet. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 21(65), 52-66. <https://doi.org/10.1007/s00159-013-0065-4>
- Peterson, C. (1976). A source mechanism for meteorites controlled by the Yarkovsky effect. *Icarus*, 29(1), 91-111. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(76\)90105-6](https://doi.org/10.1016/0019-1035(76)90105-6)
- Robinson, J., Denneau, L., Erasmus, N., Weiland, H., Tonry, J., Siverd, R., y Fitzsimmons, A. (2024). MPEC 2024-N80 : Observations and orbits of comets and a/ objects. *Minor Planet Electronic Circulars*, 2024-N80. <https://doi.org/10.48377/MPEC/2024-N80>
- Rubin, M., Altwegg, K., Van Dishoeck, E., y Schwemh, G. (2015). Molecular oxygen in Oort Cloud comet 1P/Halley. *The Astrophysical Journal Letters*, 815(1), L11. <https://doi.org/10.1088/2041-8205/815/1/L11>
- Rubincam, D. (1995). Asteroid orbit evolution due to thermal drag. *Journal of Geophysical Research*, 100((E1)), 1585-1594. <https://doi.org/10.1029/94JE02411>
- Simó, E., y Peña, E. (2022). Planetary defense is not only about science. *Advancing IDEA in Planetary Science, held virtually 25-29 April. LPI Contribution*, 2679.
- Siverd, R., Denneau, L., Erasmus, N., Weiland, H., Tonry, J., Fitzsimmons, A., y Robinson, J. (2024). Observations and orbits of comets and a/ objects. *Minor Planet Electronic Circulars*, 2024-N80. <https://doi.org/10.48377/MPEC/2024-N80>
- Thomas, S., Barr, J., Callahan, S., Clements, A., Daruich, F., Fabrega, J., Ingraham, P., Gressler, W., Munoz, F., Neill, D., Ribeiro, T., Sebag, J., Serrano, E., Stalder, B., Tighe, R., Vucina, T., y Xin, B. (2020). Vera C. Rubin Observatory: Telescope and site status. *Proceedings of SPIE*, 11445, *Ground-based and Airborne Telescopes VIII*, 114450I. <https://doi.org/10.1117/12.2561581>
- Tonry, J., Denneau, L., y Heinze, A. (2018). Publications of the Astronomical Society of the Pacific. *IOPScience*, 130(988), 064505. <https://doi.org/10.1088/1538-3873/aabadf>
- Yufan, Z., Zhiyuan, L., Hailiang, L., y Liyong, Z. (2025). Prediction for close approaches with terrestrial planets of asteroids from the main belt. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 538, 258-265. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(76\)90105-6](https://doi.org/10.1016/0019-1035(76)90105-6)