

## AMENAZA POR IMPACTO DIRECTO DE METEOROIDES EN EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS LUNARES

Benavides, Isabella<sup>a</sup>; Gómez, Daniel<sup>b</sup>; Ortiz, Albert R.<sup>c</sup>.  
<sup>a</sup>Ingeniera civil, estudiante de maestría, <sup>bc</sup>Ingeniero civil, PhD.  
Universidad del Valle  
benavides.isabella@correounivalle.edu.co

### RESUMEN

Los impactos de micrometeoroides son un tema de investigación esencial, dadas sus diversas características, que incluyen tamaño, velocidad y comportamiento. Más de doscientos registros de impactos en la Luna del programa NELIOTA fueron analizados para estimar la conexión entre cada evento y las corrientes de meteoroides, asignando velocidades de impacto y evaluando sus propiedades físicas. Se determinó el flujo de meteoroides y se desarrollaron mapas de amenaza por energía y densidad de impacto para obtener microzonas y realizar un análisis probabilístico de amenaza. Los resultados muestran que las propiedades físicas dependen en gran medida del valor asignado a la eficiencia luminosa. Debido a la elevada incertidumbre y al limitado número de impactos validados, es necesario ampliar la metodología propuesta a una base de datos más robusta. Reconocer la importancia de los impactos de meteoroides es crucial para el diseño resistente de estructuras lunares. Esta comprensión sienta unas bases sólidas para futuras investigaciones con el objetivo de formular metodologías de diseño que tengan en cuenta los impactos de meteoroides junto con la evaluación de otras amenazas lunares como sismos, radiación y variaciones extremas de temperatura.

### ABSTRACT

*Micrometeoroid impacts emerge as an essential research subject, given their diverse characteristics, which include size, velocity, and behavior. More than two hundred impacts on the Moon recorded by the Neliota program were analyzed to estimate the connection between each event and the meteoroid stream, assigning impact velocities and evaluating physical properties. The meteoroid flux was determined, and hazard maps by energy and impact density were developed to obtain microzones and perform a probabilistic hazard analysis. The results show that the physical properties strongly depend on the value assigned to the luminous efficiency. Due to the high uncertainty and the limited number of validated impacts, it is necessary to expand the proposed methodology to a more robust database. Recognizing the significance of meteoroid impacts is crucial for the resilient design of lunar structures. This understanding lays a robust groundwork for future research, aiming to formulate design methodologies that account for meteoroid impacts alongside evaluating other lunar hazards like moonquakes, radiation, and extreme temperature variations.*

Organiza:

## 1. INTRODUCCIÓN

La idea de construir un hábitat humano permanente en otro cuerpo planetario se propuso por primera vez hace décadas, y cobró nueva importancia después de que los primeros humanos aterrizaran en la Luna durante las misiones Apolo. Los rápidos avances tecnológicos y los ambiciosos programas actuales, como la misión Insight a Marte y el programa Artemis a la Luna, hacen que el sueño de la colonización espacial sea más realista que nunca<sup>1</sup>. El mayor reto para establecer una presencia humana a largo plazo en la Luna es el duro entorno lunar, que incluye la actividad sísmica, exposición a radiaciones de alta energía procedentes de múltiples fuentes y el frecuente bombardeo de meteoritos. Por lo tanto, es esencial diseñar los futuros asentamientos lunares para proporcionar un hábitat a los astronautas en misiones de larga duración<sup>2</sup>.

Un hábitat lunar debe ser capaz de soportar su peso, la diferencia de presión entre el interior del hábitat y el vacío del espacio, los impactos de meteoroides, los terremotos lunares y las tensiones de construcción. Estas cargas deben tenerse en cuenta a la hora de diseñar el hábitat para garantizar su integridad estructural<sup>3</sup>. El diseño de un hábitat lunar capaz de resistir la amenaza de impactos de meteoritos en el entorno lunar plantea un reto formidable para la ingeniería estructural. Este reto es especialmente pronunciado en comparación con la Tierra, que se beneficia de una atmósfera capaz de desintegrar la mayoría de los meteoritos antes de alcanzar la superficie. En cambio, a pesar de compartir con la Tierra un entorno meteorítico similar, la Luna carece de atmósfera. Por consiguiente, los impactos en la Luna se producen sin la protección de un medio atmosférico<sup>4</sup>.

El diseño estructural de los hábitats lunares está intrínsecamente relacionado con el ritmo y la distribución geográfica de los impactos de meteoritos, así como con sus tamaños y rangos de velocidad. Estas variables son probabilísticas y, desafortunadamente, la disponibilidad de datos al respecto es relativamente escasa<sup>5</sup>. El impacto de meteoroides genera efectos primarios, que son el foco de esta investigación, asociados con el impacto directo y los daños resultantes. Además, produce efectos secundarios que incluyen la eyección de partículas y la actividad sísmica<sup>6</sup>.

Numerosas investigaciones han abordado la distribución de la frecuencia, masa y velocidad de los meteoritos en el entorno lunar, principalmente para aplicaciones científicas planetarias fundamentales<sup>7-12</sup>. También se ha cuantificado la amenaza de impactos de meteoritos en naves espaciales<sup>13</sup>. Sin embargo, las aplicaciones específicas para el diseño de estructuras en la superficie lunar son limitadas.

En estudios previos<sup>6</sup> se ha evaluado preliminarmente la amenaza generada por el impacto de meteoritos en el diseño de hábitats lunares utilizando la base de datos de Suggs<sup>7</sup>. Otros enfoques han empleado métodos probabilísticos de ingeniería para cuantificar el riesgo sísmico y guiar el diseño estructural basado en el desempeño<sup>14</sup>. Los diseños existentes en la literatura incluyen estructuras con materiales in situ, hábitats subterráneos, estructuras híbridas inflables y hábitats superficiales cubiertos

Organiza:

con regolito lunar como mecanismo de blindaje<sup>15-17</sup>. No obstante, estos modelos no consideran la vida útil de la estructura ni la ubicación del hábitat, careciendo de un análisis de amenaza. Este estudio propone una metodología para cuantificar la amenaza por impactos directos de meteoritos en la Luna, basada en métodos probabilísticos utilizados para evaluar la amenaza sísmica. Se emplearon los registros de impacto detectados por el proyecto NELIOTA entre 2017 y 2022. Los resultados incluyen mapas de amenaza de energía y densidad de impacto. Se sugiere que los mapas de amenaza se mejoren con datos obtenidos a lo largo de períodos más prolongados y de múltiples observatorios, lo cual aumentaría la fiabilidad y permitiría tomar decisiones más informadas sobre el diseño de estructuras resistentes a los impactos de meteoritos.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Registros de impacto

Comprender el entorno de los meteoroides ha sido un tema crítico desde las primeras etapas de los vuelos espaciales y de interés científico durante mucho tiempo<sup>5</sup>. En ausencia de atmósfera, el proyectil impacta directamente en la superficie y una parte de su energía cinética se convierte en energía luminosa<sup>18</sup>. Esta transición genera un destello de corta duración que se puede detectar desde la Tierra. Por lo tanto, la Luna puede usarse como un detector gigante que proporciona información sobre los meteoroides que impactan en la superficie.

Las primeras observaciones sistemáticas de destellos de impacto lunar se realizaron con dispositivos de carga acoplada (CCD)<sup>19</sup>. Desde entonces, estos eventos han sido detectados por telescopios equipados con cámaras de alta sensibilidad apuntando a la cara oculta de la Luna<sup>20</sup>. La observación de los destellos generados en el impacto es una técnica eficaz para estimar el flujo de materia interplanetaria que impacta en la superficie lunar. Esta técnica tiene la ventaja de que un solo detector puede cubrir un área considerable, normalmente diez millones de kilómetros cuadrados<sup>21</sup>. Sin embargo, no proporciona información sobre la velocidad del proyectil<sup>22</sup>. En consecuencia, esto impide obtener los elementos orbitales del meteoroides y establecer sin ambigüedades la corriente del meteoroides de origen<sup>23</sup>.

El programa NEO Lunar Impacts and Optical Transients (NELIOTA), financiado por la ESA, ha monitorizado la Luna en busca de destellos de impacto desde 2017. El programa NELIOTA utiliza el telescopio Kryoneri de 1,2 metros, equipado con dos cámaras de alta velocidad de fotogramas que graban simultáneamente en dos bandas ópticas. El observatorio Kryoneri se actualizará con nuevos instrumentos para los programas S2P/ESA y EU-SST<sup>24</sup>. En <https://kryoneri.astro.noa.gr/> se ofrece una descripción detallada del telescopio Kryoneri y una evaluación de sus prestaciones.

NELIOTA proporciona una base de datos de destellos de impacto lunar detectados, disponible para la comunidad científica en la siguiente URL: <https://neliota.astro.noa.gr/DataAccess>. Esta investigación analizó los registros de impacto suministrados por el programa Neliota entre el 1 de febrero de 2017 y el 4 de

Organiza:

junio de 2022. Como se muestra en la Figura 1, en este periodo se registraron 201 impactos de meteoritos, de los cuales ciento cuarenta y cuatro fueron calificados como validados y cuarenta como sospechosos.

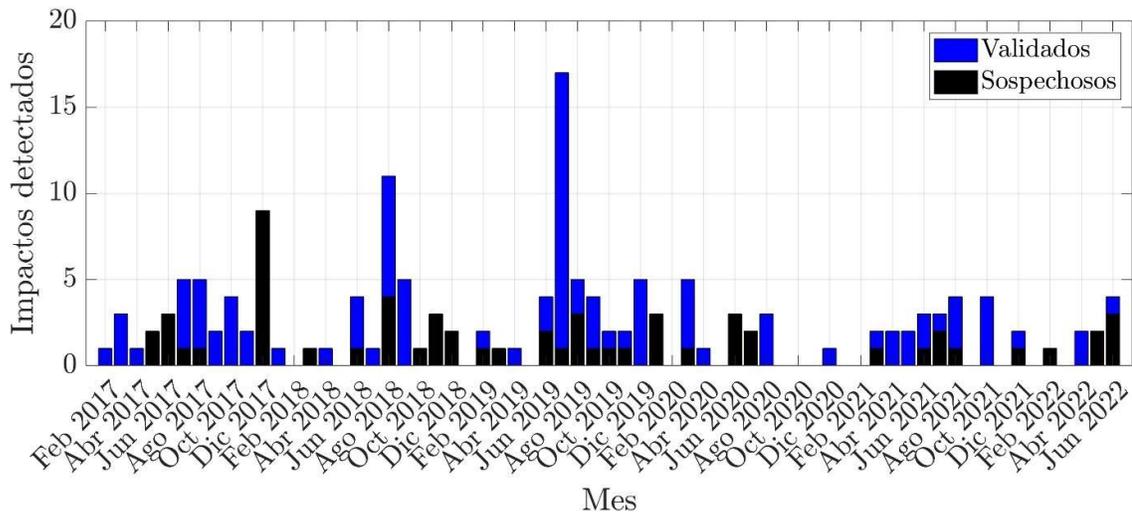


Figura 1. Destellos de impacto registrados por el programa Neliota entre el 1 de febrero de 2017 y el 4 de junio de 2022.

## 2.2. Parámetros físicos

### 2.2.1. Energía de impacto y eficiencia luminosa

La energía cinética ( $E_{kin}$ ) asociada a un impactador puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$E_{kin} = \frac{E_{lum}}{\eta} \quad (1)$$

donde  $E_{lum}$  es la energía luminosa y  $\eta$  es la eficiencia luminosa.

El valor de la eficiencia luminosa, definida como la fracción de la energía cinética del meteorito convertida en luz visible, es un parámetro crucial en el análisis de los destellos de impacto lunar. Este valor afecta los resultados relacionados con la masa del impactador, su diámetro y el flujo de impacto<sup>25</sup>. No existe un valor único para  $\eta$  en la literatura; el rango de este factor varía entre  $\eta = 5 \times 10^{-4}$  y  $\eta = 5 \times 10^{-3}$ <sup>25-28</sup>. En este estudio, se han considerado estos valores extremos, así como el valor obtenido de la correlación realizada por Swift<sup>29</sup>, definido como:

Organiza:

$$\eta = 1.5 \cdot 10^{-3} \exp\left(-\left(\frac{9.3}{V}\right)^2\right) \quad (2)$$

### 2.2.2. Ángulo de impacto

Investigaciones previas han utilizado habitualmente un ángulo de impacto ( $\theta$ ) de  $45^\circ$  en sus estudios<sup>30</sup>. Esta investigación mantiene este valor, basándose en la réplica del estudio de Hughes<sup>31</sup>. El análisis simplifica los ángulos de impacto al suponer que los meteoroides se mueven en línea recta, dado que su velocidad supera la atracción gravitatoria lunar.

Se considera que la distribución de meteoroides es teóricamente infinita y uniforme, asumiendo que una fracción de esta intercepta la Luna. Los ángulos de impacto se limitan a un rango de  $0$  a  $90^\circ$ , y el porcentaje de meteoroides que impactan con un ángulo dentro de un rango  $\theta_1$  a  $\theta_2$  se determina mediante la siguiente relación:

$$P = 100(\sin^2 \theta_2 - \sin^2 \theta_1) \quad (3)$$

### 2.2.3. Longitud solar

La longitud solar ( $\lambda$ ) representa angularmente la posición del Sol en la eclíptica en el momento de un impacto de meteorito en la superficie lunar. Este parámetro proporciona información crucial sobre la posición angular del Sol en relación con el lugar del impacto lunar. Siguiendo el procedimiento de Meeus<sup>32</sup>, la determinación de la longitud solar en el momento del impacto del meteorito implica convertir la fecha y la hora del evento a días julianos, calcular la longitud solar y aplicar las correcciones necesarias.

### 2.2.4. Parámetros de las corrientes de meteoroides

Para los meteoroides investigados se considera una lista de trabajo con los datos de las diez principales corrientes anuales de meteoroides, determinadas por la mayor tasa horaria cenital (ZHR). En ese sentido, Los meteoroides pueden proceder tanto de fuentes esporádicas como de las corrientes de la lista.

La evaluación de la compatibilidad de vincular un meteorito a una corriente específica es crucial antes de explorar cualquier asociación. Los parámetros relevantes para las corrientes de meteoroides en esta investigación se obtuvieron de la literatura<sup>7,33-36</sup> y de páginas web actualizadas como la Sociedad Americana de meteoros (AMS) y la Organización Meteorológica Internacional (IMO).

En relación con meteoroides de origen esporádico, los estudios apoyados en una extensa base de datos desarrollada por Steel<sup>37</sup>, han adoptado una velocidad de  $17 \text{ km/s}$ <sup>19,30,38</sup>.

Antes de asociar un meteoroides a una corriente específica, es esencial verificar las corrientes activas en el momento del impacto. Si se produce un destello cuando ninguna de las corrientes de la lista de trabajo está activa, se clasifica

Organiza:

automáticamente como de origen esporádico. Además, Suggs<sup>7</sup> introdujo el parámetro Figura de Mérito (FOM) para cuantificar la posibilidad de vincular los destellos de impacto con una corriente específica de meteoroides basada en la geometría del impacto. Sin embargo, a diferencia de la probabilidad convencional, este parámetro carece de un límite superior. Es decir, no proporciona una estimación de la probabilidad, lo que significa que no ofrece una medida cuantitativa de la calidad de dicha asociación.

### 2.2.5. Fuente de origen de los meteoroides

El origen probable de los impactadores puede determinarse correlacionando los resultados del seguimiento de los impactos lunares con los datos obtenidos del seguimiento de la actividad de los meteoritos en la Tierra. Para ello, según varios investigadores, la probabilidad de que un destello de impacto lunar esté asociado a una determinada corriente de meteoroides se define como:

$$p = \frac{N^{ST}}{N^{ST} + N^{OTHER}} \quad (4)$$

donde  $N^{ST}$  es el número de impactos por unidad de tiempo que pueden ser producidos por esa corriente, y  $N^{OTHER}$  es el número de impactos por unidad de tiempo que pueden ser producidos por el resto de las fuentes disponibles (otras corrientes y el fondo esporádico) en el lugar exacto de la superficie lunar. Siguiendo los supuestos de Madiedo<sup>21,25</sup>, el parámetro de probabilidad de que una corriente sea la fuente de un impactador se define como:

$$p = \frac{v^{ST} \gamma^{ST} \cos(\theta) \sigma ZHR_E^{ST}(\max) 10^{-B|\lambda - \lambda_{\max}|}}{v^{SPO} \gamma^{SPO} HR_E^{SPO} + v^{ST} \gamma^{ST} \cos(\theta) \sigma ZHR_E^{ST}(\max) 10^{-B|\lambda - \lambda_{\max}|} + k} \quad (5)$$

con

$$k = \sum_{i=1}^n v_i^{ST} \gamma_i^{ST} \cos(\theta_i) \sigma_i ZHR_{i,E}^{ST}(\max) 10^{-B_i|\lambda - \lambda_{i,\max}|} + k \quad (6)$$

y

$$v = \left( \frac{m_0 V^2}{2} \right)^{s-1} \cdot \frac{1-s}{E_{kin, \min}} \quad (7)$$

donde  $s$  es el índice de masa de la lluvia (que está conectado con el índice de población respectivo),  $m_0$  es la masa de la corriente de meteoroides que produce un meteoro de magnitud +6,5 en la Tierra,  $V$  es la velocidad de impacto,  $E_{kin, \min} =$

Organiza:

$\eta \cdot E_{lum,min}$  es la energía cinética mínima detectable desde la Tierra con  $\eta$  la eficiencia luminosa y  $E_{lum,min}$  la energía luminosa mínima detectable desde la Tierra.

Adicionalmente,

$\sigma = \frac{d_{Earth}}{d_{Moon}}$ ;  $d$  es la distancia al radiante de la corriente.

$\gamma = \frac{\phi_{Moon}}{\phi_{Earth}}$ , con  $\phi = 1 + \left(\frac{v_{esc}}{V}\right)^2$  como el factor de enfoque gravitatorio y  $v_{esc}$  como la velocidad de escape del cuerpo central.  $B$  es la pendiente que rige el comportamiento de ZHR,  $\theta$  es el ángulo de impacto;  $ZHR_E^{ST}(max)$  es la tasa horaria cenital de la corriente en la Tierra en su momento de máxima actividad con  $\lambda_{max}$  como la longitud solar en dicho pico de actividad,  $\lambda$  es la longitud solar en el momento del impacto y  $HR_E^{SPO}$  es la tasa horaria media de los impactos esporádicos.

## 2.3. Análisis de amenaza

Al desarrollar un modelo para cuantificar el riesgo de impacto de meteoroides en la Luna, es esencial basarse en evaluaciones de riesgos en entornos familiares, como la Tierra. Otra opción es considerar amenazas análogas asociados al diseño de naves espaciales y plataformas lunares.

### 2.3.1. Análisis probabilístico de amenaza sísmica en la Tierra

Examinando los modelos de cuantificación de amenaza existentes, resulta factible adaptar una metodología que facilite la evaluación práctica, la cuantificación y zonificación del riesgo de impacto directo de meteoroides para el diseño de hábitats lunares. En el caso de la Tierra, la evaluación de la amenaza a la que está expuesta una estructura debido a movimientos del suelo implica determinar la tasa anual (o probabilidad) de que se supere un determinado nivel sísmico en un lugar determinado a lo largo de una gama de niveles de intensidad<sup>39</sup>. La curva resultante se conoce como curva de amenaza, y se prevé que los niveles de intensidad más bajos se superen con gran frecuencia.

Para calcular la amenaza sísmica, se requiere información sobre la sismicidad y geometría de las fuentes, así como el modelo de recurrencia y los patrones de atenuación de las ondas sísmicas. La amenaza se determina sumando los efectos de todas las fuentes sísmicas y la distancia entre cada fuente y el sitio en cuestión. Este proceso se realiza mediante la ecuación de amenaza descrita como:

$$\lambda(IM > x) = \sum_{i=1}^{n_S} v_i \sum_{j=1}^{n_M} \sum_{k=1}^{n_R} P(IM > x | m_j r_k) P(M = m_j) P(R = r_k) \quad (8)$$

Organiza:

donde  $\lambda(IM > x)$  representa la frecuencia anual de eventos en los que  $IM > x$ .  $P(M = m_j)$  y  $P(R = r_k)$  son las distribuciones de probabilidad de la magnitud  $m$  y de la distancia  $r$ , respectivamente, expresadas en forma discreta. Los límites de las sumatorias  $n_M$  y  $n_R$  se definen según los intervalos de magnitud y distancia, mientras que el límite  $n_S$  es el número de fuentes sísmicas consideradas. Las curvas de amenaza se obtienen al graficar  $\lambda(IM > x)$  en función de  $x$ .

### 2.3.1. Análisis probabilístico de amenaza para impacto directo de meteoritos

Para el entorno lunar, la representación de la amenaza de impacto de meteoroides se ha abordado mediante diagramas de flujo de impacto basados en la masa<sup>40-42</sup>. Estos diagramas cuantifican el número esperado de impactos en función de la masa de meteoroides en un área específica durante un periodo determinado. Basándose en estos modelos y en el análisis de amenaza sísmica para la Tierra, se construye un análisis probabilístico preliminar de la amenaza de impacto directo de meteoroides.

La primera etapa consiste en la cuantificación del flujo de impacto de meteoritos en la zona de estudio, evaluando el flujo de impacto para una energía y masa umbral, y cualquier masa como flujo uniforme en el área de estudio, siguiendo metodologías utilizadas para el diseño de naves espaciales y plataformas lunares. La segunda etapa incluye la creación de mapas de amenaza y zonificación, similar al modelo de sismicidad en la evaluación probabilística de la amenaza sísmica, pero considerando sólo las corrientes de meteoritos como fuentes implícitas. La tercera etapa se enfoca en el modelo de recurrencia, utilizando distribuciones de Gutenberg- Richter<sup>43</sup> y Cornell-Vanmarcke<sup>44</sup> para predecir las energías de impacto futuras y el parámetro umbral condicionado por los instrumentos de observación. Finalmente, en la cuarta etapa se analiza cada zona de amenaza previamente definida. Es importante señalar que el modelo de atenuación no es aplicable al estudio de los impactos directos de meteoritos. Sólo interesa el impacto del meteorito en un lugar concreto, no cómo puede afectar a los puntos vecinos; esto ya forma parte del análisis de los impactos secundarios. En consecuencia, el parámetro asociado en la ecuación de amenaza también desaparece. Utilizando el ajuste obtenido en el gráfico de recurrencia y para diferentes periodos de retorno  $T_r$  (43, 50, 75, 75, 200, 475, 970 y 2475 años), se estima la energía esperada para cada uno de ellos y se calcula la curva de amenaza resultante a partir de la ecuación de amenaza simplificada:

$$\lambda(IM > x) = \sum_{j=1}^{N_M} P(M = m_j) \quad (9)$$

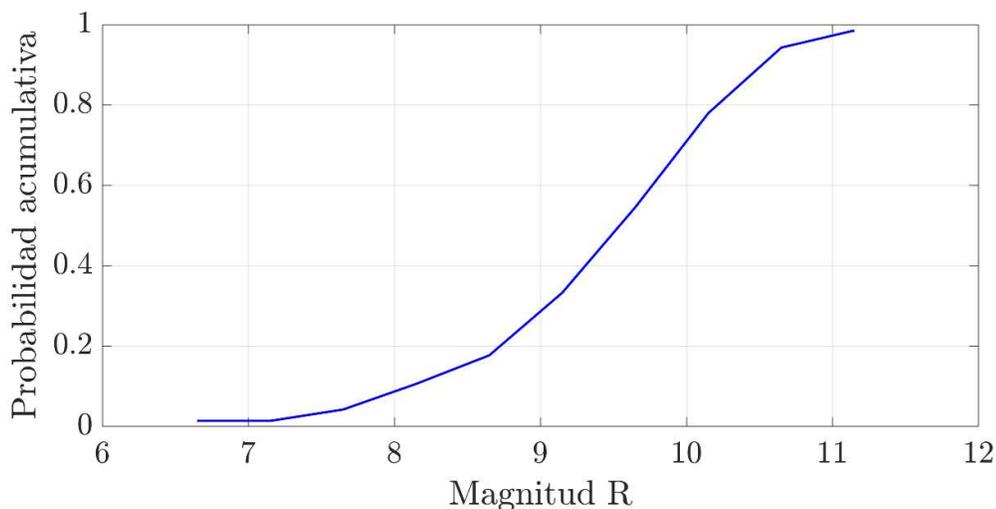
donde  $\lambda(IM > x)$  es la tasa anual de ocurrencia de  $IM > x$ ,  $P(M = m_j)$  es la distribución de probabilidad de la magnitud  $m$ , expresada en forma discreta, y el límite  $N_M$  se determina en función del intervalo  $m$ .

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Organiza:

### 3.1. Magnitudes de los destellos

El programa NELIOTA registra magnitudes en las bandas R e I; sin embargo, para los análisis posteriores se elige la banda R. Esta decisión se fundamenta en que la banda R está asociada principalmente con las longitudes de onda rojas del espectro electromagnético, lo cual contribuye a obtener mediciones más estables en comparación con otras bandas espectrales. Además, la banda R proporciona un mayor contraste en determinadas condiciones de iluminación lunar, lo que facilita la identificación de eventos y los hace más perceptibles y distinguibles. Así mismo, basar los resultados en las magnitudes de la banda R permite una comparación directa con los resultados de Suggs<sup>7</sup>, que constituían la base de datos más grande hasta su fecha de publicación.



*Figura 2. Distribución acumulativa de las magnitudes R de los destellos validados en el periodo de estudio.*

Debido a la variabilidad de las magnitudes reportadas de los presuntos impactos y considerando la naturaleza altamente delicada del análisis, crucial para el diseño de estructuras lunares capaces de albergar vida, se utilizarán únicamente los datos de destellos validados, es decir, aquellos para los que existe certeza. La Figura 2. muestra la distribución acumulativa de las magnitudes R para los 141 destellos observados. Se evidencia un cambio en la concavidad alrededor de la magnitud 10, lo que sugiere la presencia de un límite de completitud en las observaciones. En astronomía, este límite representa el valor crítico detectable de forma fiable con los instrumentos y técnicas empleados en las observaciones.

### 3.2. Fuente de los meteoroides

La verificación de la correlación entre las características del impactador y el impacto, utilizando el parámetro de probabilidad  $p$ , permitió vincular exitosamente 94 eventos a corrientes activas de meteoroides. En contraste, los 107 eventos restantes se organiza:

asociaron a un origen esporádico. Estos resultados se resumen en la Tabla 1.

	Clasificación	Código	Número de impactos	Velocidad asociada [km/s]
Fuente de meteoroides	Origen esporádico	SPO	107	17
	Corriente	QUA	0	41,7
		LYR	2	49
		ETA	7	66
		ARI	7	38
		SDA	1	41
		PER	58	61
		ORI	6	67
		LEO	2	71
		GEM	11	36
URS	0	35		

Tabla 1. Resumen de las asociaciones de los destellos con corrientes de meteoroides.

### 3.3. Propiedades físicas

Las eficiencias luminosas calculadas para cada destello, utilizando la ecuación 2, arrojaron valores que oscilan entre  $1.1120 \times 10^{-3}$  y  $1.4745 \times 10^{-3}$ , situándose dentro de los límites definidos para este parámetro. El uso de tres valores de eficiencia luminosa permitió derivar tres conjuntos de propiedades físicas, cada uno correlacionado con el porcentaje o la cantidad de energía dedicada a generar el destello detectable.

La elección de un único grupo de propiedades físicas es esencial para consolidar los datos de trabajo. Optar por un enfoque conservador, utilizando el límite inferior de eficiencia luminosa, implica una precaución robusta, pero con una inversión significativa en estructuras lunares. Considerar la eficiencia luminosa máxima y las energías más bajas es arriesgado. Por lo tanto, se seleccionaron datos de energía luminosa calculada y se posicionaron en un punto intermedio entre los límites, pero más cercano al límite conservador.

Es necesario estar cerca del extremo conservador debido a la limitación en la detección de eventos y a la incertidumbre inherente en la evaluación de la amenaza para impacto de meteoritos. Un enfoque casi conservador equilibra seguridad y eficiencia, asegurando la resiliencia del hábitat lunar contra posibles impactos, preservando la durabilidad de la infraestructura y garantizando la integridad de los habitantes.

La distribución de las propiedades físicas de los meteoroides (Energía cinética, masa

Organiza:

y diámetro) obtenidas mediante la eficiencia luminosa calculada, se muestran en la Figura 3. Como se esperaba, la cantidad de meteoritos con bajas energías asociadas es mucho mayor.

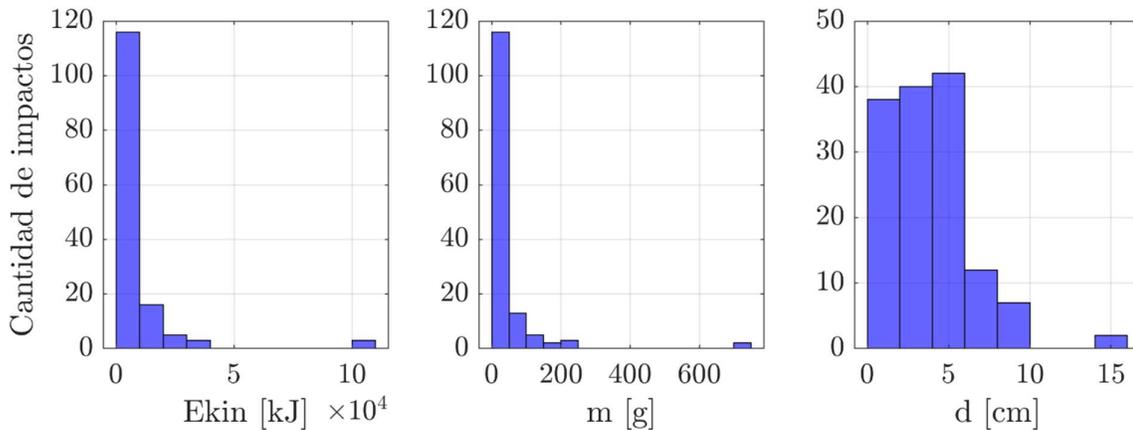


Figura 3. Distribución de las propiedades físicas definidas con los valores de eficiencia luminosa calculados.

### 3.3. Flujo de meteoroides

Es posible expresar el flujo de meteoroides en función de una energía o masa límite. En el caso de la energía límite, dada la relación directa entre las magnitudes registradas de los destellos y la energía luminosa, la magnitud límite determina el la energía límite. Al examinar los 141 destellos en el conjunto de datos, se encuentran 104 destellos con magnitudes iguales o superiores a 10. Siguiendo el procedimiento descrito por Suggs<sup>7</sup>, se obtiene un flujo de  $1.62 \times 10^7$  meteoroides por hora por  $\text{km}^2$  con una magnitud límite de 10.

De manera similar, al realizar la distribución acumulativa de masas, se verifica que 42 impactos tienen masas superiores al umbral de 30 g, lo que resulta en un flujo de  $6.56 \times 10^8$  meteoroides por hora por  $\text{km}^2$  con una masa límite de 30 g, o equivalentes a  $5.70 \times 10^{10}$  meteoroides por año por  $\text{m}^2$ . Para el mismo límite de masa, Suggs<sup>7</sup> encontró un flujo de  $6.10 \times 10^{10}$  meteoroides por año por  $\text{m}^2$ . Este valor es muy cercano, aunque se basa en diferentes bases de datos y análisis.

Adicionalmente, en la Figura 4. se muestra el flujo uniforme de meteoritos en función de la masa para el área de estudio.

Organiza:

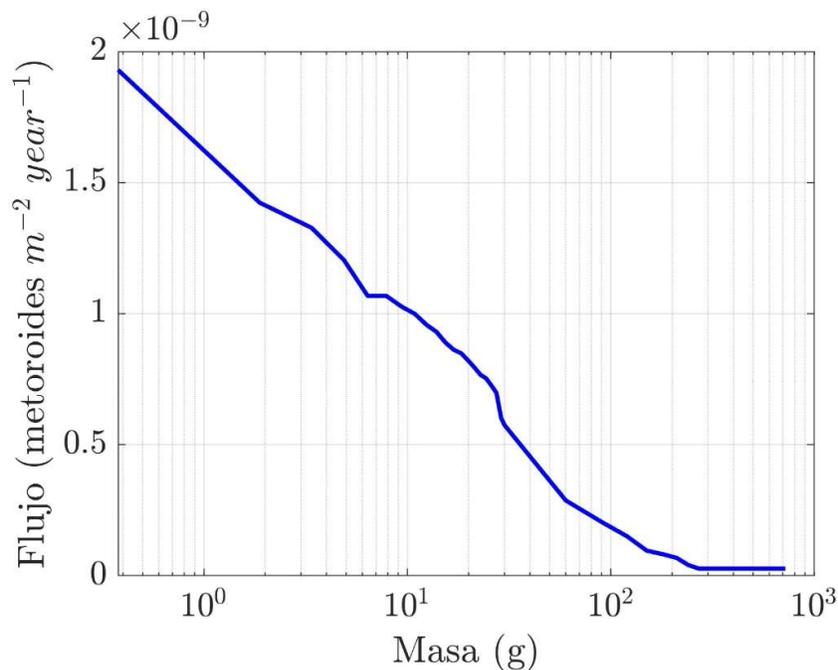


Figura 4. Flujo uniforme de impacto de meteoritos en el área de estudio en función de la masa.

### 3.4. Mapa de amenaza

La información obtenida de la base de datos construida puede analizarse de dos maneras: la primera, mediante el mapeo de las energías cinéticas de cada meteorito según su ubicación. Sin embargo, estos datos no son definitivos ni representativos en el modelo de evaluación de amenazas debido a la limitada cantidad de registros de energía y el corto período de estudio de solo 206 horas de observación óptima, representando el 0.44% del tiempo total disponible.

Por otro lado, existe la posibilidad de ubicar los registros de impacto para identificar los destellos según coordenadas selenográficas (latitud y longitud lunar), analizando las áreas con mayor densidad de impactos. Este mapa de densidad de impactos se utilizó para desarrollar un modelo probabilístico de evaluación de la amenaza de impactos directos de meteoritos en distintas zonas (alta, media y baja), relacionando la densidad de impactos con el parámetro de intensidad, definido aquí como energía cinética, ya que encapsula las propiedades físicas de masa y velocidad. El mapa resultante se presenta en la Figura 5.

Organiza:

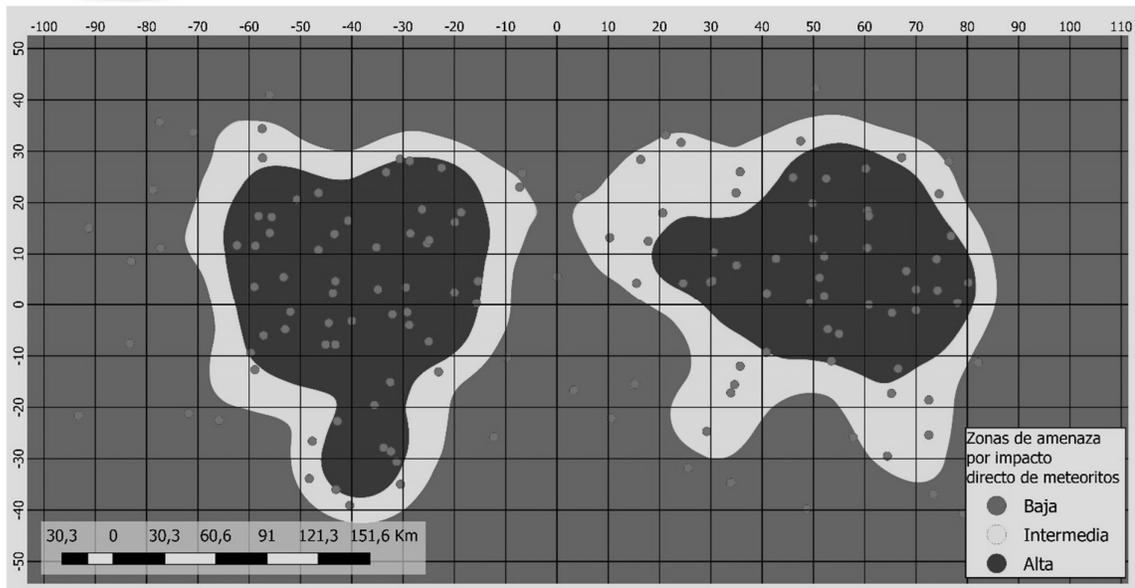


Figura 5. Mapa de amenaza por densidad de impacto.

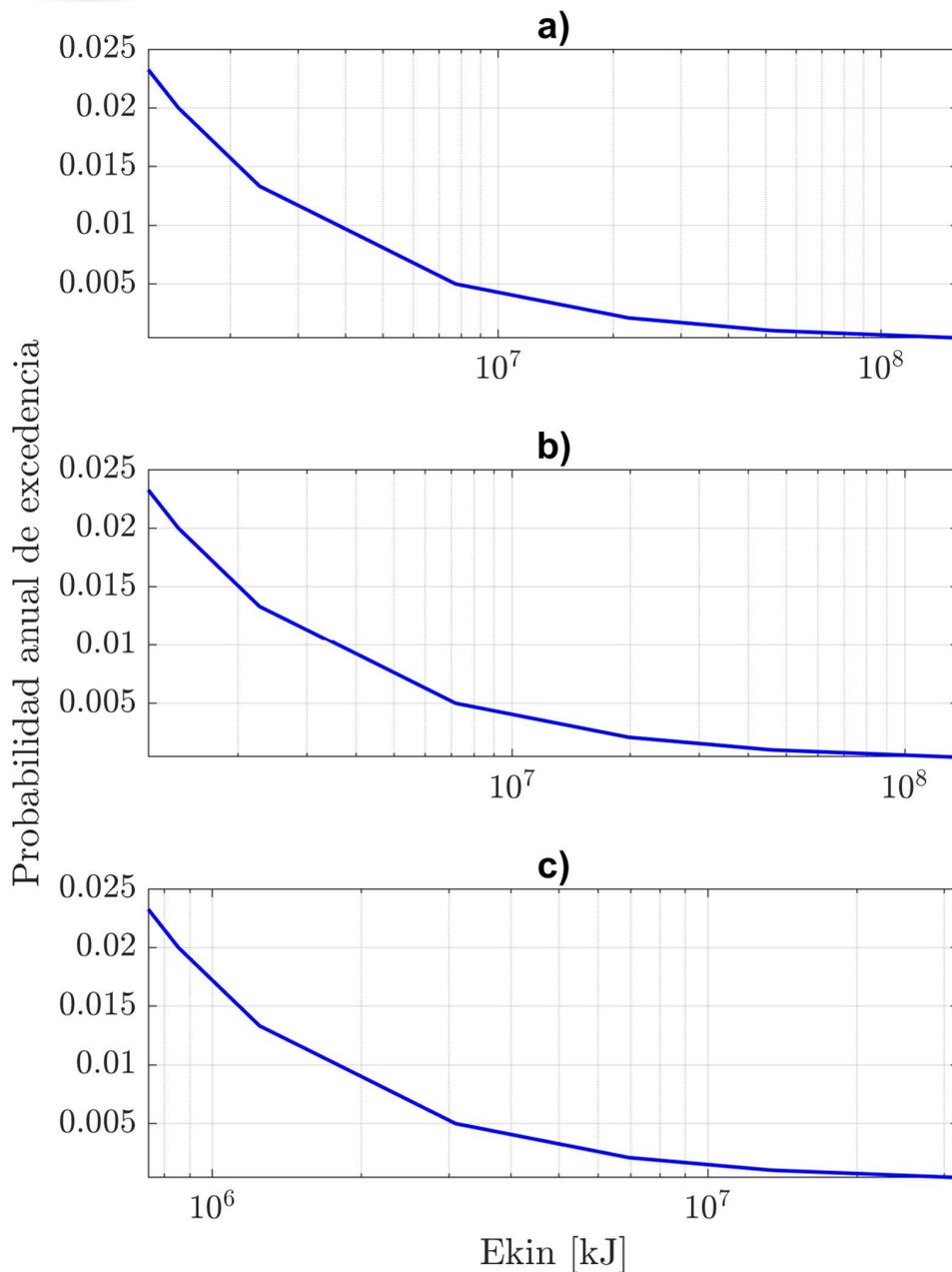
### 3.4. Curvas de amenaza

A diferencia del estudio de recurrencia en la evaluación de amenaza sísmica terrestre, la relación entre la magnitud y el logaritmo del número de eventos solo muestra un ajuste lineal cuando se consideran los eventos de menor energía, de los cuales se registra una mayor cantidad. No obstante, omitir los eventos de mayor energía representa un riesgo significativo para las estructuras. En el caso de la amenaza, ya sea baja, media o alta, el ajuste más preciso se obtiene mediante una línea de tendencia logarítmica.

Las curvas de amenaza basadas en el mapa de densidad de impactos directos para cada zona de amenaza se muestran en la Figura 5. Como se mencionó anteriormente, a diferencia de las consideraciones sísmicas típicas en la Tierra, que implican zonificación por energía, este estudio se enfoca exclusivamente en impactos directos sin considerar la interdependencia entre puntos de impacto o efectos secundarios. Es posible observar que, a mayor densidad de impacto, es decir, donde impacta la mayor cantidad de meteoritos, se registran las menores energías. Sin embargo, nuevamente es relevante resaltar que la cantidad de datos disponible fue muy limitada, por eso es importante ampliar la base de datos. Esto demuestra que lo más importante de esta investigación no son los resultados, sino la metodología, ya que proporciona una base sólida que puede aplicarse nuevamente cuando se disponga de una base de datos más amplia o mejores técnicas de observación.

Se emplearon múltiples períodos de retorno para abordar las incertidumbres de los impactos de meteoritos en las estructuras lunares, considerando datos observacionales limitados y las condiciones hostiles lunares. Los resultados para el período de retorno más bajo son los más confiables debido a la menor incertidumbre en las predicciones.

Organiza:



*Figura 6. Curvas de amenaza según zonificación para: a) Amenaza baja de impacto directo, b) amenaza media de impacto directo y c) amenaza alta de impacto directo.*

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó un análisis de los registros de destellos de impacto lunar recopilados por el programa NELIOTA entre el 1 de febrero de 2017 y el 4 de junio de

Organiza:

2022. Mediante estimaciones y metodologías probabilísticas, se determinaron las propiedades físicas de los meteoritos para diferentes niveles de energía luminosa. Se calcularon el flujo de impacto y se crearon mapas de amenaza basados en energía y densidad de impacto. Además, se elaboraron curvas de amenaza específicas para cada subzona. Los resultados destacan la relación inversa: a) entre el porcentaje de energía asignado a la eficiencia luminosa y las propiedades físicas como energía cinética y masa, lo cual sugiere la necesidad de investigaciones adicionales para definir de manera precisa este parámetro crucial; y b) entre el nivel de amenaza y la probabilidad anual de excedencia. Esto representa, de manera preliminar, que en la zona de mayor densidad de impacto se registran los meteoritos con menores energías asociadas.

La evaluación reveló una considerable incertidumbre asociada a las observaciones de destellos de meteoritos, influenciadas por factores como el clima terrestre y la iluminación del disco lunar. La limitada ventana de observación óptima plantea desafíos para validar completamente todos los destellos registrados, indicando la importancia de extender la base de datos a un período temporal más amplio. La falta de datos precisos sobre la velocidad de los meteoritos introduce aún más incertidumbre en la evaluación de la amenaza. Además, la limitación actual al considerar solo los efectos primarios de impacto subraya la necesidad de expandir la investigación para incluir los efectos secundarios, como la actividad sísmica y la eyección de partículas, para una evaluación más completa de la amenaza por impacto de meteoritos en el entorno lunar.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por la Universidad del Valle mediante el proyecto de convocatoria interna 21186 titulado: Diseño por desempeño de un hábitat lunar sometido a cargas sísmicas e impacto de meteoritos.

## REFERENCIAS

- [1] Kalapodis, N., Kampas, G., y Ktenidou, O.-J. (2020). A review towards the design of extraterrestrial structures: From regolith to human outposts. *Acta Astronautica*, 175, 540–569.
- [2] Rais-Rohani, M. (2005). “On structural design of a mobile lunar habitat with multilayered environmental shielding.” The 2004 NASA Faculty Fellowship Program Research Reports.
- [3] SanScoucie, M., Hull, P., Tinker, M., and Dozier, G. (2007). “Lunar habitat optimization using genetic algorithms.” Report no.
- [4] Avdellidou, C., and Vaubaillon, J., “Temperatures of lunar impact flashes: mass and size distribution of small impactors hitting the Moon,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 484, No. 4, 2019, pp. 5212–5222.
- [5] Benaroya, H. (2018). *Building habitats on the moon: engineering approaches to lunar settlements*. Springer.

Organiza:

- [6] Beck, C., Montoya, H., Gomez, D., Dyke, S., Bobet, A., Melosh, J., and Ramirez, J., "Hazard Assessment of Meteoroid Impact for the Design of Lunar Habitats," 2018.
- [7] Suggs, R., Moser, D., Cooke, W., and Suggs, R., "The flux of kilogram-sized meteoroids from lunar impact monitoring," *Icarus*, Vol. 238, 2014, pp. 23–36.
- [8] Grün, E., Zook, H. A., Fechtig, H., and Giese, R., "Collisional balance of the meteoritic complex," *Icarus*, Vol. 62, No. 2, 1985, pp. 244–272.
- [9] Fechtig, H., Hartung, J., Nagel, K., Neukum, G., and Storzer, D., "Lunar microcrater studies, derived meteoroid fluxes, and comparison with satellite-borne experiments," *Lunar and Planetary Science Conference Proceedings*, Vol. 5, 1974, pp. 2463–2474
- [10] Vanzani, V., Marzari, F., and Dotto, E., "Micrometeoroid impacts on the lunar surface," *Lunar and Planetary Science Conference*, Vol. 28, 1997, p. 481.
- [11] Arnold, J., Christiansen, E. L., Davis, A., Hyde, J., Lear, D., Liou, J., Lyons, F., Prior, T., Studor, G., Ratliff, M., et al., "Handbook for designing MMOD protection," Tech. rep., 2009.
- [12] Moorhead, A., Koehler, H., and Cooke, W., "NASA meteoroid engineering model release 2.0," Tech. rep., 2015.
- [13] Ryabova, G. O., Asher, D. J., and Campbell-Brown, M. D., *Meteoroids: Sources of Meteors on Earth and Beyond*, Vol. 25, Cambridge University Press, 2019.
- [14] Allende, M. I., Kiremidjian, A. S., Lepech, M. D., and Loftus, D. J., "Performance-Based Engineering Framework to Quantify Micrometeoroid Damage to Lunar Surface Structures," *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 34, No. 5, 2021, p. 04021055.
- [15] Ruess, F., Schaenzlin, J., and Benaroya, H., "Structural design of a lunar habitat," *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 19, No. 3, 2006, pp. 133–157
- [16] Jolly, S. D., Happel, J., and Sture, S., "Design and construction of shielded lunar outpost," *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 7, No. 4, 1994, pp. 417–434.
- [17] Evans, S. W., Stallworth, R., Robinson, J., Stellingwerf, R., and Engler, E., "Meteoroid risk assessment of lunar habitat concepts," *Earth & Space 2006: Engineering, Construction, and Operations in Challenging Environment*, 2006, pp. 1–8.
- [18] Liakos, A., Bonanos, A., Xilouris, E., Bellas-Velidis, I., Boumis, P., Charmandaris, V., . . . others (2019). Neliota lunar impact flash detection and event validation. arXiv preprint arXiv:1901.11414.
- [19] Ortiz, J., Aceituno, F., y Aceituno, J. (1999). A search for meteoritic flashes on the moon. *Astronomy and Astrophysics*, 343, L57–L60.
- [20] Madiedo, J. M., Ortiz, J. L., Yanagisawa, M., Aceituno, J., and Aceituno, F. (2019). "Impact flashes of meteoroids on the moon." *Meteoroids: Sources of Meteors on Earth and Beyond*, 136.
- [21] Madiedo, J. M., Ortiz, J. L., Morales, N., and Cabrera-Caño, J. (2015a). "Midas: Software for the detection and analysis of lunar impact flashes." *Planetary and Space Science*, 111, 105–115.
- [22] Ortiz, J., Sada, P., Bellot Rubio, L., Aceituno, F., Aceituno, J., Gutierrez, P., and Thiele, U. (2000). "Optical detection of meteoroidal impacts on the moon." *Nature*,

Organiza:

405(6789), 921–923.

- [23] Madiedo, J., Ortiz, J., Morales, N., and Cabrera-Caño, J. (2016). “Analysis of lunar impact flashes recorded during the activity period of the lyrid meteor shower in 2013.” 47th Annual Lunar and Planetary Science Conference, number 1903, 1124.
- [24] Liakos, A., Bonanos, A. Z., Xilouris, E., Koschny, D., Boumis, P., Bellas-Velidis, I., Moissl, R., Maroussis, A., Basilakos, S., and Kontoes, C. (2023). “Lunar impact flash results and space surveillance activities at kryoneri observatory.” arXiv preprint arXiv:2303.00670.
- [25] Madiedo, J. M., Ortiz, J. L., Organero, F., Ana-Hernández, L., Fonseca, F., Morales, N., and Cabrera-Caño, J. (2015b). “Analysis of moon impact flashes detected during the 2012 and 2013 perseids.” *Astronomy & Astrophysics*, 577, A118.
- [26] Artem’eva, N., Kosarev, I., Nemtchinov, I., Trubetskaya, I., and Shuvalov, V. (2001). “Light flashes caused by leonid meteoroid impacts on the lunar surface.” *Solar System Research*, 35(3), 177–180.
- [27] Artem’eva, N., Kosarev, I., Nemtchinov, I., Trubetskaya, I., and Shuvalov, V. (2001). “Light flashes caused by leonid meteoroid impacts on the lunar surface.” *Solar System Research*, 35(3), 177–180.
- [28] Bouley, S., Baratoux, D., Vaubaillon, J., Mocquet, A., Le Feuvre, M., Colas, F., Benkhaldoun, Z., Daassou, A., Sabil, M., and Lognonné, P. (2012). “Power and duration of impact flashes on the moon: Implication for the cause of radiation.” *Icarus*, 218(1), 115–124.
- [29] Swift, W. R., Moser, D., Suggs, R. M., and Cooke, W. (2010). “An exponential luminous efficiency model for hypervelocity impact into regolith.” *Meteoroids 2010: An International Conference on Minor Bodies in the Solar System*, number M10-0209.
- [30] Ortiz, J., Aceituno, F., Quesada, J., Aceituno, J., Fernández, M., Santos-Sanz, P., Trigo Rodríguez, J., Llorca, J., Martín-Torres, F., Montañés-Rodríguez, P., et al. (2006)
- [31] Hughes, D. (1993). “Meteorite incidence angles.” *Journal of the British Astronomical Association*, vol. 103, no. 3, p. 123-126, 103, 123–126.
- [32] Meeus, J. H. (1991). *Astronomical algorithms*. Willmann-Bell, Incorporated.
- [33] Jenniskens, P. (1994). “Meteor stream activity i. the annual streams.” *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 287, p. 990-1013 (1994), 287, 990–1013.
- [34] Moorhead, A. V., Egal, A., Brown, P. G., Moser, D. E., and Cooke, W. J. (2019). “Meteor shower forecasting in near-earth space.” *Journal of Spacecraft and Rockets*, 56(5), 1531–1545.
- [35] Babadzhanov, P. and Kokhirova, G. (2009). “Densities and porosities of meteoroids.” *Astronomy & Astrophysics*, 495(1), 353–358.
- [36] Liakos, A., Bonanos, A., Xilouris, E., Koschny, D., Bellas-Velidis, I., Boumis, P., Charmandaris, V., Dapergolas, A., Fytsilis, A., Maroussis, A., et al. (2020). “Neliota: Methods, statistics, and results for meteoroids impacting the moon.” *Astronomy & Astrophysics*, 633, A112.
- [37] Steel, D. (1996). “Meteoroid orbits.” *Space Science Reviews*, 78(3-4), 507–553.

Organiza:

- [38] Brown, P., Spalding, R., ReVelle, D. O., Tagliaferri, E., and Worden, S. (2002). "The flux of small near-earth objects colliding with the earth." *Nature*, 420(6913), 294–296.
- [39] Baker, J., Bradley, B., and Stafford, P. (2021). *Seismic hazard and risk analysis*. Cambridge University Press.
- [40] Nysmith, C. R. and Summers, J. L. (1961). Preliminary investigation of impact on multiple-sheet structures and an evaluation of the meteoroid hazard to space vehicles, Vol. 1039. National Aeronautics and Space Administration.
- [41] Bjork, R. (1961). "Meteoroids vs. space vehicles." *ARS Journal*, 31(6), 803–807.
- [42] Landgraf, M., Jehn, R., Flury, W., and Dikarev, V. (2004). "Hazards by meteoroid impacts onto operational spacecraft." *Advances in Space Research*, 33(9), 1507–1510.
- [43] Gutenberg, B., and Richter, C. F., "Frequency of earthquakes in California," *Bulletin of the Seismological society of America*, Vol. 34, No. 4, 1944, pp. 185–188.
- [44] Cornell, C. A., and Vanmarcke, E. H., "The major influences on seismic risk," *Proceedings of the fourth world conference on earthquake engineering*, Vol. 1, 1969, pp. 69–83.

Organiza: