

El Universo también puede inspeccionar maletas.

Muografía. De la exploración de pirámides y volcanes a la seguridad fronteriza: Europa ensaya una tecnología que permite observar el interior de grandes cargas sin generar radiación artificial. Su posible aplicación futura a maletas, mochilas y paquetes abre un debate técnico, operativo y jurídico.

By Carlos Jorge Brito

*Oficial de la Policía Nacional. Graduado en Derecho.
Título propio universitario en Criminología (Universidad de Oviedo).
Estudiante de Ingeniería en Organización Industrial (VIU).*

I. Una pregunta para la seguridad del futuro.

Un paquete sospechoso, una maleta abandonada o una mercancía cuyo contenido no coincide con la documentación que la acompaña. En determinadas circunstancias, conocer lo que se oculta en su interior resulta imprescindible para adoptar una decisión de seguridad.

Durante décadas, los rayos X han constituido una de las herramientas fundamentales para responder a esa necesidad. Los avances en radiografía digital, detectores y procesamiento de imágenes han incrementado notablemente sus prestaciones. Sin embargo, su utilización sigue teniendo una característica física invariable: requiere generar radiación ionizante.

¿Sería posible conocer el interior de determinados objetos sin producirla? La respuesta podría encontrarse, parcialmente, en unas partículas que atraviesan continuamente la atmósfera terrestre y que hasta hace relativamente poco tiempo resultaban desconocidas para buena parte de la sociedad: los **muones cósmicos**.

La técnica que aprovecha estas partículas se denomina *muografía*. Su desarrollo ha permitido estudiar el interior de volcanes, grandes construcciones y estructuras de difícil acceso. Más recientemente, la investigación ha comenzado a trasladarla al ámbito de la seguridad fronteriza y la inspección de mercancías.

Pero existe una diferencia fundamental entre detectar una anomalía en un contenedor marítimo e identificar los componentes internos de una mochila sospechosa. Precisamente en esa distancia entre lo que la ciencia permite y lo que necesita un servicio de seguridad se encuentra el verdadero interés de esta investigación.

II. Ver lo invisible sin encender una fuente de radiación.

Los muones son partículas subatómicas que se originan, principalmente, cuando los rayos cósmicos primarios interactúan con la atmósfera terrestre. Se producen de manera natural, poseen una notable capacidad de penetración y alcanzan continuamente la superficie terrestre. Su flujo es relativamente reducido: aproximadamente un muón por centímetro cuadrado y minuto al nivel del mar, como orden de magnitud.

Carlos Jorge Brito
Oficial de la Policía Nacional
Graduado en Derecho · Articulista

La muografía utiliza detectores para registrar cómo estas partículas atraviesan o se desvían al pasar por diferentes materiales y mediante el tratamiento matemático de esa información pueden obtenerse representaciones del interior de determinados objetos.

La absorción permite contar cuántos muones atraviesan un objeto. La dispersión mide cuánto se desvían al pasar por distintos materiales.

La peculiaridad es que el sistema no necesita generar los muones: utiliza los que ya existen en el entorno.

Conviene introducir aquí una precisión científica importante. **Los muones sí forman parte de la radiación ionizante natural.** La muografía cósmica no es, en sentido estricto, una técnica basada en radiación no ionizante. Su singularidad es que el sistema de detección pasivo no requiere incorporar una fuente artificial para irradiar el objeto. Esta diferencia, aparentemente pequeña, tiene consecuencias relevantes desde la perspectiva de la protección radiológica.

III. De las pirámides egipcias a los controles fronterizos.

En 2017, la colaboración internacional «ScanPyramids» publicó en *Nature* el descubrimiento de una gran cavidad hasta entonces desconocida en la pirámide de Keops mediante el empleo de muones cósmicos. En 2023, nuevas investigaciones permitieron caracterizar un corredor próximo a la cara norte de la misma construcción.

La técnica había demostrado que era posible obtener información sobre estructuras inaccesibles sin necesidad de perforarlas. Sin embargo, la aplicación que ahora interesa a la seguridad no se desarrolla entre monumentos milenarios, sino en puertos y centros de inspección de mercancías.

Uno de los ejemplos más relevantes es «SilentBorder», proyecto financiado por la Unión Europea dentro del programa «Horizonte 2020». Coordinado por la Universidad de Tartu, en Estonia, contó con un presupuesto de aproximadamente 7,47 millones de euros, comenzando el 1 de mayo de 2021 y finalizando el 31 de julio de 2025. **Su objetivo consistía en desarrollar un sistema de inspección pasiva mediante muones cósmicos para identificar materiales peligrosos, mercancías ilícitas y anomalías ocultas en camiones y contenedores.**

El 19 de junio de 2025 se celebró una demostración pública en las instalaciones de GScan, en Tartu. Los responsables del proyecto presentaron el escáner y realizaron comparaciones con tecnologías de inspección mediante rayos X. En 2026, el consorcio volvió a divulgar los resultados de aquella demostración.

La existencia de un demostrador construido e integrado constituye un avance verificable. No obstante, **no debe confundirse con la acreditación de un sistema comercial universalmente implantado ni con la disponibilidad de un equipo portátil para inspeccionar paquetes individuales.** La investigación europea se dirige, por ahora, principalmente a grandes volúmenes de carga. Y esta distinción resulta decisiva.

IV. El problema que la tecnología todavía no ha resuelto: el tiempo.

Si los muones pueden atravesar materiales densos y proporcionar información sobre su interior, ¿por qué no se utilizan ya para examinar cualquier maleta o paquete? La respuesta se encuentra en la propia física... A diferencia de un generador de rayos X, que puede producir radiación durante una exposición controlada, un sistema de muografía cósmica depende de las partículas que llegan naturalmente. No puede incrementar arbitrariamente ese flujo. Para obtener información detallada sobre estructuras pequeñas es necesario acumular suficientes trayectorias, lo que condiciona los tiempos de adquisición y la resolución alcanzable.

No obstante, la investigación reciente ha conseguido avances especialmente interesantes. Un estudio de 2024, desarrollado mediante simulaciones Monte Carlo¹, examinó la posibilidad de distinguir determinadas mercancías dentro de contenedores en tiempos de aproximadamente diez segundos, combinando información de dispersión y absorción.

Otro trabajo, publicado como prepublicación científica en 2025, analizó la identificación de discrepancias en cargas relativamente uniformes mediante ventanas de observación de diez a veinte segundos.

Una tercera investigación, también basada en simulaciones, propuso una inspección en dos etapas: una primera detección de anomalías de alrededor de sesenta segundos y una fase posterior, considerablemente más larga, destinada a obtener información espacial detallada. Estos resultados son relevantes, pero requieren una interpretación cuidadosa.

Detectar una anomalía estadística no equivale a obtener una radiografía de alta resolución.

Tampoco debe equipararse una simulación informática con un ensayo operativo validado en condiciones reales y reproducibles. En la inspección de un bulto sospechoso, el operador puede necesitar identificar la disposición interna de determinados componentes con precisión y rapidez. La muografía cósmica no ha acreditado todavía prestaciones equivalentes a las de la radiografía portátil para esa función, aunque persigue ese camino.

La inteligencia artificial podrá perfeccionar los algoritmos de reconstrucción, reducir ruido y facilitar la clasificación de anomalías. Pero no puede eliminar por completo las limitaciones estadísticas impuestas por el número de partículas detectadas. Por tanto, el desafío no consiste únicamente en conseguir mejores imágenes: consiste en obtener **la información adecuada, con una fiabilidad demostrable, dentro del tiempo que permite cada intervención.**

¹ Técnica matemática y computacional que utiliza números aleatorios para simular fenómenos físicos y calcular resultados probables.

4.1. SAKURA: un detector de muones que cabe en la palma de la mano.

Los avances recientes buscan aprovechar mejor la información de los muones mediante inteligencia artificial y obtener nuevas pistas sobre los materiales que atraviesan. Pero hay una novedad especialmente llamativa: los detectores cada vez más pequeños y económicos.

El proyecto SAKURA, descrito por C. Matsushita y colaboradores en octubre de 2026, presenta un detector bidimensional de muones del tamaño de la palma de una mano. Utiliza cuatro fotomultiplicadores de silicio y, según sus autores, puede construirse por menos de mil dólares. Su respuesta espacial se evaluó con un haz de muones del CERN en 2024 y arrojó resoluciones de 16,5 y 7,93 milímetros en los respectivos ejes de medida.

Lo singular de SAKURA es tanto su sencillez como su origen educativo: el diseño y el estudio estuvieron protagonizados por estudiantes de secundaria con apoyo científico. Un detector compacto no equivale a un tomógrafo capaz de inspeccionar mercancías; para ello hacen falta una geometría adecuada, suficiente información de trayectorias, capacidad de reconstrucción y ensayos específicos. Pero demuestra que algunas piezas de la tecnología pueden ser más accesibles.

La aportación de SAKURA no consiste en ofrecer ya un escáner de maletas, sino en mostrar que los detectores de muones pueden ser pequeños y económicos. Todavía queda demostrar que esa tecnología pueda obtener información suficientemente detallada y rápida para una inspección real. Además, reducir el tamaño del detector no aumenta la cantidad de muones cósmicos que llegan de forma natural.

V. España también participa en esta investigación.

Uno de los aspectos menos conocidos de «SilentBorder» es su dimensión española. La Agencia Estatal de Administración Tributaria (AEAT) figura oficialmente entre las entidades participantes en el consorcio europeo. Su presencia resulta particularmente significativa por las competencias aduaneras y de control de mercancías que desempeña la organización.

No significa que España haya implantado un sistema de muografía en sus aduanas. Significa que una institución pública española ha participado en un proyecto internacional dirigido a investigar y desarrollar esta tecnología.

También existen contribuciones científicas vinculadas a la Universidad de Oviedo. En 2025 se publicaron investigaciones sobre la optimización de detectores y sistemas de tomografía de muones para seguridad fronteriza, con participación de investigadores vinculados a dicha universidad y a la colaboración científica MODE².

Entre las líneas estudiadas figuran la configuración geométrica de los detectores, la mejora de su sensibilidad y el empleo de herramientas informáticas para optimizar el

² MODE (Machine-learning Optimized Design of Experiments) es una colaboración científica internacional que utiliza inteligencia artificial para mejorar el diseño y funcionamiento de instrumentos de investigación, entre ellos los detectores de muones.

rendimiento de los sistemas. Estos trabajos permiten situar a España dentro de una investigación tecnológica con aplicaciones potenciales para las administraciones públicas. Pero plantean, además, una pregunta de mayor alcance:

¿Qué condiciones deberían cumplirse para que una tecnología desarrollada inicialmente para grandes contenedores pudiera resultar útil en otros ámbitos de la inspección de seguridad?

La respuesta requiere abandonar las expectativas comerciales y regresar a las necesidades reales de los servicios que tendrían que utilizarla.

VI. De los contenedores a la paquetería: ¿una aplicación posible?

La inspección de un contenedor, el reconocimiento de un paquete postal y la valoración urgente de un objeto sospechoso no son operaciones equivalentes. Difieren en tamaño, composición de los materiales, información requerida, condiciones de trabajo y tiempo disponible. Por ello, la posible evolución de la muografía debería distinguir, al menos, tres escenarios.

1. Grandes cargas y contenedores.

Es el ámbito de desarrollo más avanzado. El tamaño y la composición de las mercancías pueden favorecer determinadas técnicas de análisis de dispersión y absorción. Los resultados de «SilentBorder» y las investigaciones sobre verificación rápida de cargas muestran que existe una línea tecnológica real de interés para el control aduanero.

2. Objetos densos y paquetería sometida a inspección no urgente.

Este es el escenario prospectivo que merece mayor atención. Podrían investigarse sistemas diseñados para analizar objetos almacenados, determinadas mercancías retenidas o bultos cuya inspección no requiera una decisión inmediata. La finalidad inicial no tendría necesariamente que ser obtener una imagen comparable a una radiografía convencional. Podría consistir en identificar irregularidades de densidad, caracterizar determinados materiales o aportar información complementaria.

Sin embargo, esta posibilidad todavía debe demostrar su viabilidad mediante ensayos específicos con objetos de menor tamaño.

3. Intervenciones urgentes sobre bultos sospechosos.

Aquí las limitaciones son mucho mayores. La rapidez de respuesta y el detalle de la información obtenida son factores críticos. La radiografía portátil mantiene una posición de referencia que la muografía cósmica no está actualmente en condiciones de sustituir.

En consecuencia, no parece por ahora científicamente defendible presentar esta tecnología como un relevo inmediato de los equipos utilizados en intervenciones de seguridad.

VII. El principio ALARA y la obligación de considerar tecnologías más seguras.

La innovación en sistemas de inspección no puede analizarse únicamente a partir de su capacidad de detección. También es necesario examinar las condiciones en las que trabajan quienes los utilizan.

La Directiva 2013/59/Euratom establece los principios fundamentales de protección radiológica: justificación, optimización y limitación de dosis. La optimización se relaciona con el conocido principio ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*), orientado a mantener las exposiciones tan bajas como sea razonablemente posible, considerando también los factores técnicos, económicos y sociales.

En España, el RD 1029/2022 desarrolla el marco general de protección frente a las radiaciones ionizantes. Existe un aspecto especialmente relevante para esta investigación: su art. 2.2.a excluye expresamente del ámbito de aplicación del reglamento la exposición a los rayos cósmicos a nivel del suelo. Esto no convierte los muones en radiación no ionizante. Lo que establece es una diferencia jurídica entre determinadas exposiciones naturales y las prácticas sometidas a regulación por incorporar fuentes o equipos productores de radiación.

Por otra parte, la Ley 31/1995, de PRL, establece principios generales destinados a evitar, evaluar y reducir los riesgos asociados al trabajo.

No se trata de una obligación específica de utilizar muografía. Tampoco puede deducirse que los equipos de rayos X, correctamente utilizados y sometidos a las medidas de protección correspondientes, produzcan necesariamente exposiciones ocupacionales significativas.

La prevención radiológica exige valorar las condiciones reales de uso, las dosis, los procedimientos y las medidas de protección. No obstante, **cuando una tecnología alternativa consiga aportar información equivalente con menor riesgo, su evaluación estará plenamente alineada con los principios generales de prevención.**

La cuestión jurídica no consiste, por tanto, en declarar obsoletos los rayos X.

Consiste en recordar que la seguridad del procedimiento y la seguridad de quien lo ejecuta son objetivos que deben avanzar conjuntamente.

En ese marco, investigar sistemas de inspección pasiva resulta una opción técnicamente legítima y preventivamente razonable.

VIII. Seguridad privada y protección radiológica: ¿necesitarán dosímetro los operadores de muografía?

La posible llegada de la muografía al ámbito de la inspección de mercancías plantea una cuestión que va más allá de las prestaciones técnicas del equipo: ¿qué consecuencias tendría para los trabajadores encargados de utilizarlo?

La pregunta adquiere especial relevancia en el sector de la seguridad privada, cuyos profesionales realizan diariamente controles de acceso, inspección de equipajes, paquetería y mercancías en instalaciones públicas y privadas.

El art. 32.1.b de la Ley 5/2014, de 4 de abril, de Seguridad Privada (LSP), contempla expresamente entre las funciones de los vigilantes de seguridad el control de objetos personales, paquetería, mercancías y vehículos, incluido su interior, en las condiciones previstas legalmente. La incorporación futura de un escáner de muones cósmicos a estos servicios podría abrir un escenario novedoso: **trabajadores utilizando una tecnología basada en radiación ionizante sin que ello implique necesariamente su clasificación como personal profesionalmente expuesto a efectos de protección radiológica.**

8.1. Radiación ionizante no significa necesariamente exposición profesional regulada

Los muones son partículas ionizantes. Esta circunstancia física no admite discusión. Sin embargo, la muografía cósmica pasiva aprovecha partículas que ya forman parte de la radiación natural del entorno. A diferencia de un generador de rayos X, el detector no produce deliberadamente una nueva fuente de radiación para examinar el objeto. La diferencia tiene consecuencias jurídicas.

El art. 2.2.a del RD 1029/2022 excluye expresamente de su ámbito de aplicación los rayos cósmicos a nivel del suelo. Por su parte, el apartado 84 del art. 4 define al trabajador expuesto atendiendo a su participación en una práctica regulada y a la posibilidad de recibir determinadas dosis, contemplando también situaciones específicas de exposición al radón y a la radiación cósmica en aeronaves o vehículos espaciales.

En consecuencia, **un vigilante de seguridad que opere exclusivamente un sistema pasivo de muografía cósmica a nivel del suelo no adquiriría, por ese solo hecho, la condición reglamentaria de trabajador expuesto a radiaciones ionizantes.**

Tampoco surgiría automáticamente la obligación de utilizar un dosímetro personal. Esta conclusión presupone que el equipo únicamente detecta radiación cósmica natural, sin incorporar fuentes radiactivas, generadores de rayos X u otros dispositivos que produzcan exposiciones adicionales.

8.2. ¿Qué ocurre con los equipos convencionales de rayos X?

La situación puede ser diferente cuando los profesionales trabajan en instalaciones que utilizan fuentes artificiales de radiación ionizante. Ahora bien, tampoco en estos casos la mera proximidad a un escáner determina necesariamente la clasificación del trabajador.

El citado RD 1029/2022 exige valorar las condiciones reales del puesto, las características del equipo, las medidas de protección y las exposiciones potenciales. Cuando proceda clasificar al trabajador como profesionalmente expuesto, el art. 22 establece dos categorías:

Categoría A. Comprende a quienes, por las condiciones de su trabajo, puedan recibir una dosis efectiva superior a 6 milisieverts anuales o superar los umbrales de dosis equivalente establecidos para determinados órganos y tejidos.

Categoría B. Comprende a los trabajadores expuestos que no reúnen las condiciones para su clasificación en la categoría A.

La distinción tiene consecuencias sobre la vigilancia dosimétrica. Para los trabajadores de categoría A sometidos a riesgo de exposición externa, el art. 33 establece, con las excepciones reglamentariamente previstas, la obligación de utilizar dosímetros individuales.

En cambio, para los trabajadores de categoría B, el art. 34 permite estimar las dosis individuales mediante la vigilancia radiológica de los lugares de trabajo, siempre que los resultados permitan justificar adecuadamente su clasificación.

Por tanto, **trabajador expuesto y obligación de portar permanentemente un dosímetro individual no son conceptos absolutamente equivalentes**. La necesidad y modalidad del control dependerán de la evaluación radiológica correspondiente.

8.3. ¿Y si el futuro escáner combina varias tecnologías?

Los desarrollos tecnológicos no tienen por qué limitarse a utilizar un único procedimiento de detección. Es posible concebir instalaciones que combinen muografía con radiografía convencional u otros sistemas complementarios. En ese supuesto, la evaluación de riesgos tendría que considerar el conjunto de tecnologías empleadas. La condición pasiva del detector de muones no permitiría excluir las obligaciones de protección radiológica derivadas de otros equipos emisores de radiación ionizante.

En función de las características de la instalación y de las exposiciones previsibles, podrían resultar necesarias medidas de vigilancia ambiental, clasificación del personal, formación específica y control dosimétrico. Lo determinante sería la exposición profesional evaluada, no la denominación comercial del escáner.

8.4. La prevención de riesgos laborales continúa siendo obligatoria

La ausencia de una obligación automática de dosimetría no significa que el empresario quede eximido de sus responsabilidades preventivas. La Ley 31/1995, de PRL, mantiene su aplicación general.

Antes de incorporar estos sistemas sería necesario evaluar los riesgos derivados de su utilización, proporcionar formación adecuada y verificar las condiciones de seguridad de la instalación. También deberían considerarse otros riesgos laborales asociados al equipo, su mantenimiento, la manipulación de mercancías y las características físicas del puesto de trabajo. La prevención no se agota en la protección frente a las radiaciones.

Para el sector de la seguridad privada, la eventual aparición de estos dispositivos podría plantear una situación singular: disponer de una técnica de inspección que utiliza partículas ionizantes naturales sin necesitar, por ello y de forma automática, el régimen de control dosimétrico propio de determinadas prácticas con fuentes artificiales. Esa característica podría representar una ventaja desde el punto de vista preventivo, siempre que la tecnología demostrase prestaciones suficientes para las tareas encomendadas. La cuestión merece, por tanto, una conclusión propia.

No es la naturaleza ionizante de la partícula lo que determina por sí solo la obligación de control dosimétrico, sino la existencia de una situación de exposición profesional sometida al régimen aplicable y las condiciones reales de riesgo.

Si la muografía consigue trasladarse algún día a la inspección rutinaria de determinados bultos, el beneficio no debería evaluarse únicamente por su capacidad para identificar materiales ocultos.

También debería valorarse por las condiciones de seguridad que pueda ofrecer a quienes tengan que utilizarla diariamente. Y esa será otra de las cuestiones que deberá resolver la investigación tecnológica antes de dar el salto definitivo al servicio operativo.

IX. Seguridad privada: una modernización tecnológica pendiente de desarrollo reglamentario

La LSP quiso actualizar un sector transformado por la tecnología. Sin embargo, más de doce años después de su entrada en vigor, continúa aplicándose en cuanto no la contradice el Reglamento aprobado por RD 2364/1994, dictado para desarrollar la ley anterior. Esta supervivencia normativa está expresamente prevista por la disposición derogatoria de la LSP; por tanto, no supone por sí misma una irregularidad. Sí plantea una pregunta sobre la suficiencia del marco general para los instrumentos de seguridad que se están investigando.

Las órdenes ministeriales han seguido actualizando materias parciales, como formación, uniformidad y habilitaciones. Un ejemplo reciente es la Orden INT/25/2026, de 19 de enero, sobre instructores de tiro, que remite al reglamento de 1994 y a la normativa anterior en esta materia. Es una muestra verificable de que el desarrollo reglamentario continúa siendo fragmentario.

¿Qué ocurriría si una futura instalación de muografía pudiera utilizarse de forma rutinaria para inspeccionar mercancías? El art. 32.1.b de la LSP ya contempla funciones de control de paquetería y objetos por parte de los vigilantes de seguridad. No parece, por ello, que la mera aparición de un nuevo detector exija necesariamente reformar la ley. Pero sí habría que determinar sus requisitos técnicos, las competencias del operador, la formación, las condiciones de homologación cuando proceda y las garantías aplicables a la información obtenida.

Aquí importa la jerarquía normativa. La DF 3.^a de la LSP habilita al Gobierno para desarrollar reglamentariamente las condiciones de prestación de los servicios y las características de los medios. Una orden ministerial puede concretar aspectos técnicos cuando exista habilitación suficiente; no debería utilizarse para sustituir indebidamente el desarrollo general que corresponde a una norma de mayor rango.

La cuestión, en definitiva, no es oponerse a una eventual Orden INT que establezca especificaciones técnicas para un equipo. Es evitar que la adaptación a sistemas radicalmente distintos dependa de una sucesión de soluciones parciales sin un marco reglamentario coherente. Una tecnología del siglo XXI merece requisitos y garantías formulados para su realidad, no simplemente añadidos a disposiciones pensadas para otra época.

X. Conclusión: investigar hoy para decidir mañana

La muografía no constituye una solución inmediata para todos los problemas de inspección de seguridad. Las limitaciones físicas asociadas al flujo natural de muones, la necesidad de acumular información estadística y las exigencias de resolución impiden considerarla actualmente una alternativa general a la radiografía portátil de bultos sospechosos. Sin embargo, reducirla a una curiosidad científica sería ignorar los avances experimentados durante los últimos años.

La UE ha financiado el desarrollo de sistemas específicos para inspección fronteriza. Existen demostradores de tecnología pasiva, investigaciones sobre análisis rápido de mercancías y herramientas informáticas cada vez más sofisticadas para reconstruir y clasificar la información obtenida. España participa en ese proceso mediante instituciones públicas y equipos de investigación.

El siguiente paso no debería consistir en anunciar una revolución tecnológica todavía no demostrada, sino en promover evaluaciones independientes y estudios de viabilidad sobre aplicaciones concretas. La inspección de determinados objetos densos o de paquetería no urgente podría constituir una línea de investigación, siempre que consiga acreditar ventajas efectivas frente a las tecnologías disponibles.

Para los responsables de seguridad, el futuro no debería medirse únicamente por la resolución de un detector o la potencia de un algoritmo. Debería medirse también por su fiabilidad, su utilidad, su coste y las condiciones en las que permite trabajar a los profesionales.

Porque la verdadera innovación no consiste en sustituir una herramienta por otra simplemente porque sea más novedosa, sino en proporcionar información suficiente para tomar mejores decisiones, con el menor riesgo razonablemente posible.

Quizá los muones cósmicos no permitan mañana examinar una mochila en segundos. Pero podrían contribuir a que, en determinados escenarios del futuro, conocer el interior de un objeto no exija generar una nueva fuente de radiación. Y esa posibilidad, aunque todavía esté lejos de convertirse en una solución universal, merece ser investigada.

Referencias normativas y científicas

1. Directiva 2013/59/Euratom del Consejo, de 5 de diciembre de 2013, por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros de la exposición a radiaciones ionizantes.
2. Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales.
3. Real Decreto 1029/2022, de 20 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes.
4. Ley 5/2014, de 4 de abril, de Seguridad Privada.
5. Morishima, K. et al. (2017). «Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons». *Nature*, 552, 386–390.
6. Procureur, S. et al. (2023). «Precise characterization of a corridor in the Great Pyramid of Giza by cosmic-ray muons». *Nature Communications*.
7. Comisión Europea. Proyecto SilentBorder, acuerdo de subvención 101021812, programa Horizonte 2020. Ficha y resultados publicados en CORDIS (fecha de finalización: 31 de julio de 2025). CAEN (22 de febrero de 2021). «CAEN as technology provider for borders security» (previsión inicial de finalización en abril de 2025).
8. Consorcio SilentBorder (2026). «The Future of Security is Here: Celebrating the SilentBorder Final Demonstration». Sitio web oficial del proyecto.

Carlos Jorge Brito
Oficial de la Policía Nacional
Graduado en Derecho · Articulista

9. Georgadze, A. Sh. (2024). «Rapid cargo verification with cosmic ray muon scattering and absorption tomography». Prepublicación científica, arXiv:2407.01020.
10. Georgadze, A. Sh. (2025). «Rapid Muon Tomography for Border Security». Prepublicación científica, arXiv:2504.01525.
11. Georgadze, A. Sh. (2025). «Muon Imaging for Illicit Cargo Detection: A Simulation-Based Study». Prepublicación científica, arXiv:2505.18851.
12. «Optimisation of Muon Tomography Scanners for Border Control Using TomOpt» (2025). *Particles*, 8(2), 53. DOI: 10.3390/particles8020053.
13. «Optimization of a cosmic muon tomography scanner for cargo border control inspection» (2025). *Journal of Applied Physics*, 138, 194903. DOI: 10.1063/5.0287758.
14. Real Decreto 2364/1994, de 9 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de Seguridad Privada.
15. Orden INT/25/2026, de 19 de enero, por la que se regula la habilitación de instructores de tiro del personal de seguridad privada.
16. Matsushita, C. et al. (2026). «A compact two-dimensional radiation detector for educational applications». *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 1090, 171664. DOI: 10.1016/j.nima.2026.171664 (SAKURA).

Nota editorial. Este artículo constituye un análisis técnico, jurídico y prospectivo elaborado a partir de fuentes públicas. Se distinguen los resultados experimentales, las simulaciones científicas y las aplicaciones futuras todavía no validadas. No describe procedimientos operativos internos ni contiene información reservada. Investigación cerrada a 18 de octubre de 2026.