

# Criminalística nuclear en apoyo de las investigaciones



**IAEA**

Organismo Internacional de Energía Atómica

# COLECCIÓN DE SEGURIDAD FÍSICA NUCLEAR DEL OIEA

La *Colección de Seguridad Física Nuclear del OIEA* trata de cuestiones de seguridad física nuclear relativas a la prevención y detección de actos delictivos o actos intencionales no autorizados que están relacionados con materiales nucleares, otros materiales radiactivos, instalaciones conexas o actividades conexas, o que vayan dirigidos contra ellos, así como a la respuesta a esos actos. Estas publicaciones son coherentes con los instrumentos internacionales de seguridad física nuclear como la Convención sobre la Protección Física de los Materiales Nucleares y su Enmienda, el Convenio Internacional para la Represión de los Actos de Terrorismo Nuclear, las resoluciones 1373 y 1540 del Consejo de Seguridad de las Naciones Unidas, y el Código de Conducta sobre la Seguridad Tecnológica y Física de las Fuentes Radiactivas, y los complementan.

## CATEGORÍAS DE LA COLECCIÓN DE SEGURIDAD FÍSICA NUCLEAR DEL OIEA

Las publicaciones de la *Colección de Seguridad Física Nuclear del OIEA* se clasifican en las subcategorías siguientes:

- Las **Nociones Fundamentales de Seguridad Física Nuclear**, que especifican el objetivo del régimen de seguridad física nuclear de un Estado y sus elementos esenciales. Estas Nociones Fundamentales sirven de base para las Recomendaciones de Seguridad Física Nuclear.
- Las **Recomendaciones de Seguridad Física Nuclear**, que establecen las medidas que los Estados deberían adoptar para alcanzar y mantener un régimen nacional de seguridad física nuclear eficaz y conforme a las Nociones Fundamentales de Seguridad Física Nuclear.
- Las **Guías de Aplicación**, que proporcionan orientaciones sobre los medios que los Estados pueden utilizar para aplicar las medidas enunciadas en las Recomendaciones de Seguridad Física Nuclear. Estas guías se centran en cómo cumplir las recomendaciones relativas a esferas generales de la seguridad física nuclear.
- Las **Orientaciones Técnicas**, que ofrecen orientaciones sobre temas técnicos específicos y complementan las que figuran en las Guías de Aplicación. Estas orientaciones se centran en detalles relativos a cómo aplicar las medidas necesarias.

## REDACCIÓN Y EXAMEN

En la preparación y examen de las publicaciones de la *Colección de Seguridad Física Nuclear* intervienen la Secretaría del OIEA, expertos de Estados Miembros (que prestan asistencia a la Secretaría en la redacción de las publicaciones) y el Comité de Orientación sobre Seguridad Física Nuclear (NSGC), que examina y aprueba los proyectos de publicación. Cuando procede, también se celebran reuniones técnicas de composición abierta durante la etapa de redacción a fin de que especialistas de los Estados Miembros y organizaciones internacionales pertinentes tengan la posibilidad de estudiar y debatir el proyecto de texto. Además, a fin de garantizar un alto grado de análisis y consenso internacionales, la Secretaría presenta los proyectos de texto a todos los Estados Miembros para su examen oficial durante un período de 120 días.

Para cada publicación, la Secretaría prepara los siguientes documentos, que el NSGC aprueba en etapas sucesivas del proceso de preparación y examen:

- un esquema y plan de trabajo en el que se describe la nueva publicación prevista o la publicación que se va a revisar y su finalidad, alcance y contenidos previstos;
- un proyecto de publicación que se presentará a los Estados Miembros para que estos formulen observaciones durante los 120 días del período de consultas;
- un proyecto de publicación definitivo que tiene en cuenta las observaciones de los Estados Miembros.

En el proceso de redacción y examen de las publicaciones de la *Colección de Seguridad Física Nuclear del OIEA* se tiene en cuenta la confidencialidad y se reconoce que la seguridad física nuclear va indisolublemente unida a preocupaciones sobre la seguridad física nacional de carácter general y específico.

Un elemento subyacente es que en el contenido técnico de las publicaciones se deben tener en cuenta las normas de seguridad y las actividades de salvaguardias del OIEA. En particular, los Comités sobre Normas de Seguridad Nuclear pertinentes y el NSGC analizan las publicaciones de la *Colección de Seguridad Física Nuclear* que se ocupan de ámbitos en los que existen interrelaciones con la seguridad tecnológica, conocidas como documentos de interrelación, en cada una de las etapas antes mencionadas.

CRIMINALÍSTICA  
NUCLEAR EN APOYO DE LAS  
INVESTIGACIONES

Los siguientes Estados son Miembros del Organismo Internacional de Energía Atómica:

AFGANISTÁN	FILIPINAS	PAKISTÁN
ALBANIA	FINLANDIA	PALAU
ALEMANIA	FRANCIA	PANAMÁ
ANGOLA	GABÓN	PAPUA NUEVA GUINEA
ANTIGUA Y BARBUDA	GEORGIA	PARAGUAY
ARABIA SAUDITA	GHANA	PERÚ
ARGELIA	GRANADA	POLONIA
ARGENTINA	GRECIA	PORTUGAL
ARMENIA	GUATEMALA	QATAR
AUSTRALIA	GUYANA	REINO UNIDO DE
AUSTRIA	HAITÍ	GRAN BRETAÑA E
AZERBAIYÁN	HONDURAS	IRLANDA DEL NORTE
BAHAMAS	HUNGRÍA	REPÚBLICA ÁRABE SIRIA
BAHREIN	INDIA	REPÚBLICA
BANGLADESH	INDONESIA	CENTROAFRICANA
BARBADOS	IRÁN, REPÚBLICA	REPÚBLICA CHECA
BELARÚS	ISLÁMICA DEL	REPÚBLICA DE MOLDOVA
BÉLGICA	IRAQ	REPÚBLICA DEMOCRÁTICA
BELICE	IRLANDA	DEL CONGO
BENIN	ISLANDIA	REPÚBLICA DEMOCRÁTICA
BOLIVIA, ESTADO	ISLAS MARSHALL	POPULAR LAO
PLURINACIONAL DE	ISRAEL	REPÚBLICA DOMINICANA
BOSNIA Y HERZEGOVINA	ITALIA	REPÚBLICA UNIDA
BOTSWANA	JAMAICA	DE TANZANÍA
BRASIL	JAPÓN	RUMANIA
BRUNEI DARUSSALAM	JORDANIA	RWANDA
BULGARIA	KAZAJSTÁN	SAMOA
BURKINA FASO	KENYA	SAN MARINO
BURUNDI	KIRGUISTÁN	SAN VICENTE Y
CAMBOYA	KUWAIT	LAS GRANADINAS
CAMERÚN	LESOTHO	SANTA LUCÍA
CANADÁ	LETONIA	SANTA SEDE
COLOMBIA	LÍBANO	SENEGAL
COMORAS	LIBERIA	SERBIA
CONGO	LIBIA	SEYCHELLES
COREA, REPÚBLICA DE	LIECHTENSTEIN	SIERRA LEONA
COSTA RICA	LITUANIA	SINGAPUR
CÔTE D'IVOIRE	LUXEMBURGO	SRI LANKA
CROACIA	MACEDONIA DEL NORTE	SUDÁFRICA
CUBA	MADAGASCAR	SUDÁN
CHAD	MALASIA	SUECIA
CHILE	MALAWI	SUIZA
CHINA	MALÍ	TAILANDIA
CHIPRE	MALTA	TAYIKISTÁN
DINAMARCA	MARRUECOS	TOGO
DJIBOUTI	MAURICIO	TRINIDAD Y TABAGO
DOMINICA	MAURITANIA	TÚNEZ
ECUADOR	MÉXICO	TURKMENISTÁN
EGIPTO	MÓNACO	TURQUÍA
EL SALVADOR	MONGOLIA	UCRANIA
EMIRATOS ÁRABES UNIDOS	MONTENEGRO	UGANDA
ERITREA	MOZAMBIQUE	URUGUAY
ESLOVAQUIA	MYANMAR	UZBEKISTÁN
ESLOVENIA	NAMIBIA	VANUATU
ESPAÑA	NEPAL	VENEZUELA, REPÚBLICA
ESTADOS UNIDOS	NICARAGUA	BOLIVARIANA DE
DE AMÉRICA	NIGER	VIET NAM
ESTONIA	NIGERIA	YEMEN
ESWATINI	NORUEGA	ZAMBIA
ETIOPÍA	NUEVA ZELANDIA	ZIMBABWE
FEDERACIÓN DE RUSIA	OMÁN	
FIJI	PAÍSES BAJOS	

El Estatuto del Organismo fue aprobado el 23 de octubre de 1956 en la Conferencia sobre el Estatuto del OIEA celebrada en la Sede de las Naciones Unidas (Nueva York); entró en vigor el 29 de julio de 1957. El Organismo tiene la Sede en Viena. Su principal objetivo es “acelerar y aumentar la contribución de la energía atómica a la paz, la salud y la prosperidad en el mundo entero”.

COLECCIÓN DE SEGURIDAD FÍSICA NUCLEAR DEL OIEA  
Nº 2-G (Rev. 1)

CRIMINALÍSTICA  
NUCLEAR EN APOYO DE LAS  
INVESTIGACIONES

GUÍA DE APLICACIÓN

ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA  
VIENA, 2022

## DERECHOS DE AUTOR

Todas las publicaciones científicas y técnicas del OIEA están protegidas en virtud de la Convención Universal sobre Derecho de Autor aprobada en 1952 (Berna) y revisada en 1972 (París). Desde entonces, la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (Ginebra) ha ampliado la cobertura de los derechos de autor, que ahora incluyen la propiedad intelectual de obras electrónicas y virtuales. Para la utilización de textos completos, o parte de ellos, que figuren en publicaciones del OIEA, impresas o en formato electrónico, deberá obtenerse la correspondiente autorización y, por lo general, dicha utilización estará sujeta a un acuerdo de pago de regalías. Se aceptan propuestas relativas a la reproducción y traducción sin fines comerciales, que se examinarán individualmente. Las solicitudes de información deben dirigirse a la Sección Editorial del OIEA:

Dependencia de Mercadotecnia y Venta  
Sección Editorial  
Organismo Internacional de Energía Atómica  
Vienna International Centre  
PO Box 100  
1400 Viena, Austria  
fax: +43 1 26007 22529  
tel.: +43 1 2600 22417  
correo electrónico: [sales.publications@iaea.org](mailto:sales.publications@iaea.org)  
<https://www.iaea.org/es/publicaciones>

© OIEA, 2022

Impreso por el OIEA en Austria  
Febrero de 2022  
STI/PUB/1687

CRIMINALÍSTICA NUCLEAR EN APOYO DE LAS  
INVESTIGACIONES  
OIEA, VIENA, 2022  
STI/PUB/1687  
ISBN 978-92-0-315621-9 (papel) | ISBN 978-92-0-315721-6  
(PDF)  
ISSN 2521-1803

## PRÓLOGO

El principal objetivo que asigna al OIEA su Estatuto es el de “acelerar y aumentar la contribución de la energía atómica a la paz, la salud y la prosperidad en el mundo entero”. Nuestra labor supone a un tiempo prevenir la propagación de las armas nucleares y asegurar que la tecnología nuclear esté disponible con fines pacíficos en ámbitos como la salud o la agricultura. Es esencial que todos los materiales nucleares y otros materiales radiactivos, así como las instalaciones que los albergan, sean gestionados en condiciones de seguridad y estén debidamente protegidos contra todo acto delictivo o acto no autorizado intencional.

Aunque la seguridad física nuclear es una responsabilidad que incumbe a cada Estado, la cooperación internacional es básica para ayudar a los Estados a implantar y mantener regímenes eficaces de seguridad física nuclear. La función central que desempeña el OIEA para facilitar esta cooperación y prestar asistencia a los Estados goza de gran predicamento, fiel exponente de la amplitud de su composición, su mandato, sus singulares conocimientos técnicos y su dilatado historial de prestación de asistencia técnica a los Estados y asesoramiento especializado y práctico.

Desde 2006, el OIEA viene publicando obras de la *Colección de Seguridad Física Nuclear* para ayudar a los Estados a instituir regímenes nacionales eficaces de seguridad física nuclear. Estas publicaciones son un complemento de los instrumentos jurídicos internacionales existentes en la materia, como la Convención sobre la Protección Física de los Materiales Nucleares y su Enmienda, el Convenio Internacional para la Represión de los Actos de Terrorismo Nuclear, las resoluciones 1373 y 1540 del Consejo de Seguridad de las Naciones Unidas o el Código de Conducta sobre la Seguridad Tecnológica y Física de las Fuentes Radiactivas.

En la elaboración de estas orientaciones participan activamente expertos de los Estados Miembros del OIEA, lo que garantiza que den cuenta de un sentir consensuado sobre las buenas prácticas en materia de seguridad física nuclear. El Comité de Orientación sobre Seguridad Física Nuclear del OIEA, establecido en marzo de 2012 e integrado por representantes de los Estados Miembros, examina y aprueba los borradores de las publicaciones de la *Colección de Seguridad Física Nuclear* a medida que se van elaborando.

El OIEA seguirá trabajando con sus Estados Miembros para que los beneficios derivados del uso pacífico de la tecnología nuclear se hagan realidad y deparen mayores cotas de salud, bienestar y prosperidad a las poblaciones del mundo entero.

## NOTA EDITORIAL

*Las orientaciones publicadas en la Colección de Seguridad Física Nuclear del OIEA no son vinculantes para los Estados; no obstante, los Estados pueden servirse de ellas como ayuda para cumplir sus obligaciones en virtud de los instrumentos jurídicos internacionales, así como para cumplir sus responsabilidades en materia de seguridad física nuclear en el Estado. Las orientaciones en las que se usan formas verbales condicionales tienen por fin presentar buenas prácticas internacionales e indicar un consenso internacional en el sentido de que es necesario que los Estados adopten las medidas recomendadas o medidas alternativas equivalentes.*

*Los términos relacionados con la seguridad física han de entenderse según las definiciones contenidas en la publicación en que aparecen, o en las orientaciones más generales que la publicación concreta complementa. En los demás casos, las palabras se emplean con el significado que se les da habitualmente.*

*Los apéndices se consideran parte integrante de la publicación. El material que figura en un apéndice tiene la misma jerarquía que el texto principal. Los anexos se usan para dar ejemplos prácticos o facilitar información o explicaciones adicionales. Los anexos no son parte integrante del texto principal.*

*Aunque se ha puesto gran cuidado en mantener la exactitud de la información contenida en esta publicación, ni el OIEA ni sus Estados Miembros asumen responsabilidad alguna por las consecuencias que puedan derivarse de su uso.*

*El uso de determinadas denominaciones de países o territorios no implica juicio alguno por parte de la entidad editora, el OIEA, sobre la situación jurídica de esos países o territorios, sus autoridades e instituciones o la delimitación de sus fronteras.*

*La mención de nombres de empresas o productos específicos (se indiquen o no como registrados) no implica ninguna intención de violar derechos de propiedad ni debe interpretarse como una aprobación o recomendación por parte del OIEA.*



# ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN .....	1
	Antecedentes (1.1–1.4) .....	1
	Objetivo (1.5) .....	2
	Ámbito de aplicación (1.6–1.8) .....	3
	Estructura (1.9) .....	4
2.	LA FUNCIÓN DE LA CRIMINALÍSTICA NUCLEAR EN LA INFRAESTRUCTURA NACIONAL DE SEGURIDAD FÍSICA NUCLEAR (2.1–2.3) .....	5
	La criminalística nuclear como medida preventiva (2.4, 2.5) .....	6
	Modelo de plan de acción de criminalística nuclear (2.6–2.8) .....	7
	Marco nacional para la adquisición de capacidad criminalística nuclear (2.9–2.13) .....	8
	La criminalística nuclear en relación con los instrumentos jurídicos internacionales y nacionales (2.14–2.16) .....	10
3.	ELABORACIÓN DEL PLAN DE EXAMEN FORENSE Y EL CORRESPONDIENTE PLAN DE ANÁLISIS CRIMINALÍSTICO NUCLEAR (3.1–3.4) .....	11
	Elaboración de un plan de análisis criminalístico nuclear (3.5–3.7) ..	12
	Submuestreo (3.8, 3.9) .....	15
	Distribución de las pruebas (3.10, 3.11) .....	15
4.	EXAMEN FORENSE DE PRUEBAS CONTAMINADAS CON RADIONUCLEIDOS (4.1, 4.2) .....	16
	Pruebas contaminadas (4.3–4.6) .....	17
	Manipulación de las pruebas contaminadas con radionucleidos (4.7–4.13) .....	18
5.	ANÁLISIS DEL LABORATORIO DE CRIMINALÍSTICA NUCLEAR (5.1) .....	21
	Caracterización (5.2) .....	21
	Laboratorio de criminalística nuclear designado (5.3–5.6) .....	21

	Instrumentos analíticos (5.7–5.10) . . . . .	23
	Secuenciación de técnicas y métodos (5.11, 5.12) . . . . .	24
	Análisis de muestras (5.13–5.21) . . . . .	25
6.	INTERPRETACIÓN CRIMINALÍSTICA NUCLEAR (6.1) . . . . .	29
	Procesos de interpretación (6.2–6.6) . . . . .	29
	Creación de una biblioteca nacional de criminalística nuclear (6.7–6.9). . . . .	31
	Conocimiento de los procesos del ciclo del combustible nuclear y de la fabricación de fuentes radiactivas (6.10–6.15). . . . .	31
	Proceso deductivo e iterativo (6.16, 6.17) . . . . .	33
7.	CONSTATAIONES DE CRIMINALÍSTICA NUCLEAR (7.1) .	35
	Confianza en las constataciones (7.2–7.4) . . . . .	35
	Comunicación de las constataciones (7.5–7.8). . . . .	36
	Examen a posteriori (7.9, 7.10) . . . . .	37
8.	COOPERACIÓN Y ASISTENCIA INTERNACIONALES (8.1) .	38
	Cooperación internacional (8.2–8.6) . . . . .	38
	Asistencia criminalística nuclear durante la investigación de un suceso relacionado con la seguridad física nuclear (8.7–8.10) . . . . .	40
9.	CREACIÓN DE CAPACIDAD EN MATERIA DE CRIMINALÍSTICA NUCLEAR (9.1, 9.2) . . . . .	41
	Sensibilización (9.3) . . . . .	42
	Capacitación (9.4, 9.5) . . . . .	42
	Ejercicios (9.6, 9.7). . . . .	43
	Enseñanza y creación de conocimientos especializados (9.8) . . . . .	44
	Investigación y desarrollo (9.9, 9.10) . . . . .	44
	REFERENCIAS . . . . .	47
	ANEXO I: DISCIPLINAS DE LA CIENCIA FORENSE . . . . .	51
	ANEXO II: TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN . . . . .	58

ANEXO III: EJEMPLOS DE ACTIVIDADES DE ENSEÑANZA,  
CAPACITACIÓN, EJERCICIO E INVESTIGACIÓN  
Y DESARROLLO..... 66

GLOSARIO ..... 69



# 1. INTRODUCCIÓN

## ANTECEDENTES

1.1. La ciencia forense, denominada criminalística, es el examen de las pruebas físicas, biológicas, conductuales y documentales en el contexto del derecho internacional o nacional. El objetivo de la criminalística es descubrir vínculos entre personas, lugares, cosas y sucesos. La ciencia forense nuclear es una subdisciplina de la ciencia forense y se denomina criminalística nuclear. La criminalística nuclear es el examen de materiales nucleares u otros materiales radiactivos, o de pruebas contaminadas con radionucleidos, en el contexto de procedimientos judiciales con arreglo al derecho internacional o nacional relacionados con la seguridad física nuclear. El análisis del material nuclear u otro material radiactivo procura determinar qué es el material; cómo, cuándo y dónde fue fabricado, y cuál era su uso previsto. Un examen criminalístico nuclear tiene que realizarse en condiciones de seguridad, tanto física como tecnológica, para velar por la protección del público, el medio ambiente y las pruebas [1].

1.2. A mediados de la década de 1990 hubo un aumento de la notificación de materiales nucleares y otros materiales radiactivos no sometidos a control reglamentario, cuyo ámbito de aplicación se define en las normas básicas internacionales de seguridad [1], que se consideró indicativo de un aumento del tráfico ilícito de tales materiales. La comunidad internacional reconoció ese aumento del tráfico ilícito como una importante amenaza de seguridad física. Para investigar esos incidentes de tráfico ilícito que involucraban materiales nucleares y otros materiales radiactivos, las autoridades nacionales solicitaron información sobre los materiales; cómo, cuándo y dónde se habían fabricado, y su historial desde entonces. De esas pesquisas surgió la criminalística nuclear como un elemento clave de una infraestructura de seguridad física nuclear [2].

1.3. Dadas la generalización y la importancia del uso de materiales nucleares y otros materiales radiactivos, todos los Estados deberían ser conscientes de la función de la criminalística nuclear en apoyo de la seguridad física nuclear. La criminalística nuclear, haciendo uso de competencias mantenidas por el Estado, puede contribuir a la investigación de los sucesos relacionados con la seguridad física nuclear y ayudar a determinar y remediar las vulnerabilidades de la infraestructura de seguridad física nuclear del Estado. Como medida preventiva, la capacidad criminalística nuclear es eficaz porque propicia tanto la determinación de las deficiencias en cuanto a la seguridad física del material como al enjuiciamiento de los delitos relacionados con ese material.

1.4. Como reconocimiento de los beneficios que comporta la capacidad criminalística nuclear para la implantación de infraestructuras nacionales de seguridad física nuclear, en 2006 el OIEA publicó las primeras orientaciones técnicas en esta esfera, contenidas en la publicación N° 2 de la *Colección de Seguridad Física Nuclear del OIEA*, titulada *Nuclear Forensics Support*,<sup>1</sup> basándose en una metodología general aplicable a la realización de un examen criminalístico nuclear elaborada por el Grupo de Trabajo Técnico Internacional sobre Criminalística Nuclear (ITWG) [3]. Desde entonces ha habido más avances en la criminalística nuclear. Los exámenes criminalísticos nucleares se han aplicado con éxito en diversos casos notificados que implicaban tráfico ilícito de uranio muy enriquecido y de plutonio, así como en sucesos que involucraban materiales nucleares y otros materiales radiactivos no sometidos a control reglamentario. También se han utilizado técnicas similares a las empleadas en la criminalística nuclear para apoyar la lucha contra el terrorismo nuclear y el cumplimiento de varios instrumentos internacionales, como la Convención sobre la Protección Física de los Materiales Nucleares [4]. Habida cuenta de esta evolución, la publicación de orientaciones técnicas titulada *Nuclear Forensics Support* ha sido actualizada para conformar la base de la presente guía de aplicación.

## OBJETIVO

1.5. Esta publicación tiene por objetivo proporcionar a los encargados nacionales de la formulación de políticas, las autoridades competentes, las fuerzas del orden y el personal técnico orientaciones sobre la función de la criminalística nuclear en el contexto de la investigación de un abanico de posibles sucesos relacionados con la seguridad física nuclear que involucren materiales nucleares y otros materiales radiactivos no sometidos a control reglamentario. Está concebida para describir la función de la criminalística nuclear en apoyo de la investigación de un suceso relacionado con la seguridad física nuclear y situar la criminalística nuclear en el contexto de una infraestructura nacional de seguridad física nuclear. Además, esta publicación fomenta la cooperación internacional alentando a los Estados a solicitar o a prestar asistencia, según proceda, con respecto al desarrollo de competencias o durante la investigación de un suceso relacionado con la seguridad física nuclear.

---

<sup>1</sup> INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Nuclear Forensics Support*, IAEA Nuclear Security Series No. 2, IAEA, Vienna (2006). Estas orientaciones técnicas publicadas en 2006 quedan reemplazadas por la presente guía de aplicación.

## ÁMBITO DE APLICACIÓN

1.6. En esta publicación se presentan descripciones de exámenes criminalísticos nucleares, la función de la criminalística nuclear en la infraestructura nacional de seguridad física nuclear, que abarca la investigación de un suceso relacionado con la seguridad física nuclear, y los mecanismos de cooperación y asistencia internacionales en materia de criminalística nuclear. También se describen los elementos esenciales de la creación de capacidad en materia de criminalística nuclear, a saber, la sensibilización, la enseñanza, el desarrollo de conocimientos especializados y la capacitación. En esta publicación, además, se hace hincapié en que la capacidad criminalística nuclear no consiste meramente en instrumentación o mediciones analíticas. La criminalística nuclear entraña un plan integral aplicado por los Estados para determinar el origen y el historial de materiales nucleares y otros materiales radiactivos en apoyo de investigaciones realizadas por las fuerzas del orden o relacionadas con la seguridad física nuclear. Esas investigaciones pueden ser, por ejemplo, incidentes de tráfico ilícito u otros hallazgos casuales de material nuclear u otro material radiactivo no sometido a control reglamentario.

1.7. En esta publicación no se proporciona orientación detallada sobre el diseño, el equipamiento o la dotación de personal de un laboratorio en el que puedan llevarse a cabo exámenes criminalísticos nucleares; tampoco se proporciona orientación detallada sobre la gestión de la escena de un delito radiológico, la realización o gestión de la investigación de un suceso relacionado con la seguridad física nuclear o los exámenes forenses tradicionales, si bien cada uno de estos temas contribuye al éxito de un examen criminalístico nuclear. La criminalística tradicional incluye el examen de pruebas físicas, biológicas y documentales realizado en las disciplinas forenses tradicionales por las autoridades investigadoras. Los siguientes son algunos ejemplos de esas disciplinas:

- huellas dactilares;
- marcadores genéticos, como el ADN nuclear y el ADN mitocondrial;
- huellas de calzado y de neumáticos;
- marcas de herramientas;
- explosivos, pinturas y otros productos químicos;
- metalurgia, y
- pruebas indiciarias, como fibras, pelos y polen.

1.8. Esta publicación presta apoyo en relación con las recomendaciones publicadas (en inglés) en 2011, tituladas *Recomendaciones de seguridad física nuclear sobre materiales nucleares y otros materiales radiactivos no sometidos*

a control reglamentario [5], y se complementa con otras publicaciones de la Colección de Seguridad Física Nuclear del OIEA:

- *Combating Illicit Trafficking in Nuclear and other Radioactive Material* [6];
- *Recomendaciones de seguridad física nuclear sobre la protección física de los materiales y las instalaciones nucleares (INFCIRC/225/Rev.5)* [7];
- *Identificación de fuentes y dispositivos radiactivos* [8], y
- *Gestión de la escena de un delito radiológico* [9].

## ESTRUCTURA

1.9. Tras esta introducción, la sección 2 ilustra el modelo de plan de acción de criminalística nuclear y destaca las cuestiones que todos los Estados han de tomar en consideración al desarrollar capacidad criminalística nuclear. La sección 3 explica la importancia de elaborar un plan de examen forense y un plan de análisis criminalístico nuclear. La sección 4 presenta distintas metodologías para llevar a cabo los exámenes forenses de pruebas contaminadas con radionucleidos. La sección 5 analiza los requisitos de un laboratorio de criminalística nuclear designado y los distintos tipos de análisis criminalístico nuclear. La sección 6 proporciona una visión general de los métodos y procesos que intervienen en la interpretación criminalística nuclear, y la sección 7 trata de la importancia de la confianza en los resultados analíticos y en la comunicación de las constataciones. La sección 8 describe la cooperación internacional en la esfera de la criminalística nuclear y las consideraciones al solicitar asistencia en la materia. La sección 9 trata de las actividades de creación de capacidad que deben emprenderse a nivel nacional a fin de desarrollar y mantener las competencias en materia de criminalística nuclear. En los tres anexos se proporciona, respectivamente, información más detallada sobre las técnicas de caracterización, sobre otras disciplinas de la ciencia forense y sobre ejemplos de actividades de creación de capacidad disponibles a escala internacional. A continuación de los anexos se proporciona un glosario cuyas definiciones han sido armonizadas con otras publicaciones del OIEA y de las Naciones Unidas.



## 2. LA FUNCIÓN DE LA CRIMINALÍSTICA NUCLEAR EN LA INFRAESTRUCTURA NACIONAL DE SEGURIDAD FÍSICA NUCLEAR

2.1. Los materiales nucleares y otros materiales radiactivos son de uso común en todo el ciclo del combustible nuclear, y su uso también está muy extendido en otras industrias y en la investigación, los estudios médicos o biológicos y otras aplicaciones técnicas y científicas. Es responsabilidad del Estado implantar una infraestructura de seguridad física nuclear para proteger esos materiales, que incluya medidas diseñadas para impedir, detectar y responder a sucesos relacionados con la seguridad física nuclear. Cuando se detecta material nuclear u otro material radiactivo no sometido a control reglamentario, los Estados deberían estar preparados para responder adecuadamente, lo que incluye la aplicación de la criminalística nuclear en apoyo de las investigaciones. En el cuadro 1 se muestran algunos ejemplos de materiales nucleares y otros materiales radiactivos.

CUADRO 1. EJEMPLOS DE TIPOS DE MATERIALES  
NUCLEARES Y OTROS MATERIALES RADIATIVOS

Tipo de material	Ejemplos	
Material nuclear	Pu	U 235
	U 233	U 238
Radionucleidos de uso médico	C 14	I 125
	Co 57	I 131
	Ga 67	Tc 99m
	I 123	Tl 201
Radionucleidos de uso industrial	Am 241	Co 60
	Ba 133	Cs 137
	Cd 109	Ir 192
	Cf 252	Sr 90

2.2. La Base de Datos sobre Incidentes y Tráfico Ilícito (ITDB)<sup>2</sup> del OIEA contiene información, notificada voluntariamente por los Estados, sobre la posesión no autorizada, el robo o la pérdida de materiales nucleares y otros materiales radiactivos, u otras actividades no autorizadas que involucren tales materiales. Desde enero de 1993 hasta diciembre de 2013 se notificaron a la ITDB 2477 incidentes confirmados. De esos incidentes confirmados, 424 implicaban la posesión no autorizada y actividades delictivas conexas (16 de cuales involucraban uranio muy enriquecido o plutonio), 664 implicaban el robo o la pérdida de material nuclear u otro material radiactivo y, en total, 1337 casos implicaban otros sucesos y actividades no autorizadas. Un incidente puede corresponder a uno o más de los tipos mencionados; por ejemplo, el robo y ulterior intento de venta de una fuente radiactiva. Por tanto, la suma de los incidentes de cada grupo puede no coincidir con el número total de incidentes. En 69 casos, la información notificada no era suficiente para determinar la categoría del incidente.

2.3. La cuantía de las notificaciones indica que, pese a la existencia de infraestructuras nacionales de seguridad física nuclear, siguen produciéndose incidentes que involucran materiales nucleares y otros materiales radiactivos no sometidos a control reglamentario —ya sea involuntariamente, como puede ser una pérdida, o bien intencionalmente a resultas de actos delictivos, como puede ser un robo—. Habida cuenta de esta información, es necesario que los Estados desarrollen la capacidad de impedir, detectar y responder a cualquier suceso que involucre materiales nucleares u otros materiales radiactivos y tenga consecuencias de seguridad física nuclear. Los sucesos de ese tipo se denominan sucesos relacionados con la seguridad física nuclear [5]. Un examen criminalístico nuclear puede ser un componente importante de la respuesta a un suceso relacionado con la seguridad física nuclear.

## LA CRIMINALÍSTICA NUCLEAR COMO MEDIDA PREVENTIVA

2.4. Las enseñanzas extraídas de la investigación de un suceso relacionado con la seguridad física nuclear pueden incorporarse a las medidas de seguridad física nuclear, mejorándolas y contribuyendo así a la prevención de eventuales sucesos relacionados con la seguridad física nuclear. Por ejemplo, las constataciones de criminalística nuclear pueden determinar que el material ha sido retirado de una instalación o un emplazamiento que hasta entonces se consideraba protegido. Pueden hallarse deficiencias en la contabilidad de los materiales o en los sistemas de seguridad física nuclear, tanto a nivel de la instalación como del Estado.

---

<sup>2</sup> Véase <http://www-ns.iaea.org/security/itdb.asp>.

2.5. Saber que un Estado posee competencias en materia de criminalística nuclear también puede ser un elemento disuasorio para las personas o grupos que, de otro modo, pudiesen intentar desviar o traficar ilícitamente con materiales nucleares u otros materiales radiactivos [4]. El éxito de la criminalística nuclear como elemento disuasorio dependerá de la confianza en su aplicación y su éxito demostrado en apoyo de las investigaciones y los ulteriores procedimientos judiciales basados en esas constataciones.

## MODELO DE PLAN DE ACCIÓN DE CRIMINALÍSTICA NUCLEAR

2.6. El modelo de plan de acción de criminalística nuclear que se muestra en la figura 1 proporciona orientaciones generales sobre la realización de un examen criminalístico nuclear y las actividades conexas que deberían llevarse a cabo en el contexto de la investigación de un suceso relacionado con la seguridad física nuclear. El plan abarca las actividades realizadas por las autoridades que solicitan un examen criminalístico nuclear y por los laboratorios a los que se puede recurrir para hacer los análisis y la interpretación.

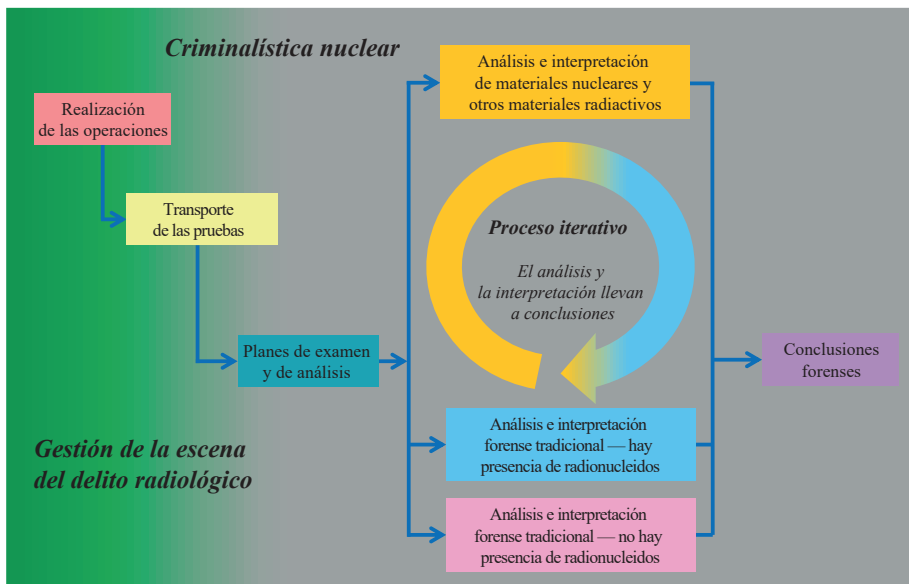
2.7. Un examen criminalístico nuclear se realiza para responder a preguntas cruciales planteadas por la autoridad investigadora, que pueden estar relacionadas con el uso previsto, el historial y el origen del material nuclear u otro material radiactivo involucrado en el suceso relacionado con la seguridad física nuclear objeto de la investigación. Las preguntas planteadas por la autoridad investigadora vendrán influidas por la naturaleza del suceso relacionado con la seguridad física nuclear y por los procedimientos judiciales conexas que puedan iniciarse a consecuencia de la investigación.

2.8. El análisis criminalístico nuclear y su interpretación pueden llevar a constataciones relativas al material asociado con un suceso relacionado con la seguridad física nuclear. Cuando se combinan con otros aspectos de la investigación, entre ellos las constataciones forenses tradicionales, pueden extraerse conclusiones sobre las asociaciones entre el material y personas, lugares, sucesos y procesos de producción. Los Estados deberían reconocer que la capacidad criminalística nuclear, si bien no puede utilizarse de manera regular, puede desempeñar una función importante en la investigación de un suceso relacionado con la seguridad física nuclear.

## MARCO NACIONAL PARA LA ADQUISICIÓN DE CAPACIDAD CRIMINALÍSTICA NUCLEAR

2.9. Todos los Estados deberían tener un plan nacional de respuesta a sucesos relacionados con la seguridad física nuclear para responder adecuadamente y de manera coordinada. Dado que la criminalística nuclear puede desempeñar una función decisiva en la investigación de un suceso relacionado con la seguridad física nuclear, el modelo de plan de acción de criminalística nuclear (véase la figura 1) debería estar incorporado, en la medida de lo posible, en el plan nacional de respuesta.

2.10. Los Estados deberían garantizar que las funciones y responsabilidades de criminalística nuclear en lo que atañe a sucesos relacionados con la seguridad física nuclear estén definidas claramente y que se cuente con conocimientos especializados, instrumentación y procedimientos. Asimismo, cabría disponer de almacenamiento en condiciones de seguridad tecnológica y de seguridad física de los materiales nucleares y otros materiales radiactivos incautados, así como



**Nota:** El sombreado del fondo indica la transición de la gestión de la escena del delito radiológico a la criminalística nuclear.

Fig. 1. Modelo de plan de acción de criminalística nuclear: un proceso que ayuda en la investigación de un suceso relacionado con la seguridad física nuclear.

de los medios para transportar dichos materiales en condiciones de seguridad tecnológica y de seguridad física desde el lugar de un suceso relacionado con la seguridad física nuclear hasta un emplazamiento donde almacenar las pruebas. Este emplazamiento de almacenamiento puede ser un laboratorio con capacidad para caracterizar el material recogido o un lugar provisional donde pueda colocarse el material incautado hasta ser transportado a un laboratorio de criminalística nuclear designado para su análisis.

2.11. El desarrollo de capacidad criminalística nuclear en un Estado debería comenzar por la determinación de las competencias existentes, incluidas las instalaciones que ya estén establecidas y los conocimientos especializados pertinentes que ya estén utilizándose con otros fines, y la creación de los mecanismos que se emplearán en una investigación. Las competencias pertinentes quizás existan, por ejemplo, en instituciones de protección radiológica, departamentos de radioquímica o física nuclear de las universidades, laboratorios de monitorización del medio ambiente, laboratorios de control de calidad de las instalaciones del ciclo del combustible nuclear o entes de seguridad y defensa. Algunos Estados tal vez puedan valerse de la experiencia o la infraestructura creada para ayudar a verificar el cumplimiento de los tratados internacionales o la adhesión a estos, como el Tratado sobre la No Proliferación de las Armas Nucleares [10] y la Convención sobre la Protección Física de los Materiales Nucleares [4] y su Enmienda de 2005 [11].

2.12. Cuando sea factible, los Estados también pueden establecer una biblioteca nacional de criminalística nuclear que esté bajo su control para posibilitar una evaluación fidedigna de si un material nuclear u otro material radiactivo que se haya hallado no sometido a control reglamentario es congruente con el material producido, usado o almacenado en el Estado. El establecimiento de una biblioteca nacional de criminalística nuclear se analiza más detalladamente en los párrafos del 6.7 al 6.9.

2.13. La cooperación internacional permite a los Estados solicitar, recibir y prestar asistencia en materia de criminalística nuclear para contribuir al desarrollo de competencias o como parte de la investigación de un suceso relacionado con la seguridad física nuclear. Los instrumentos analíticos especializados para caracterizar materiales nucleares y otros materiales radiactivos puede que estén disponibles solo en algunos laboratorios del mundo y que puedan solicitarse solamente para la investigación de una minoría de los sucesos relacionados con la seguridad física nuclear. Los Estados que no posean competencias propias para llevar a cabo una caracterización completa de materiales nucleares u otros materiales radiactivos o de pruebas contaminadas con radionucleidos pueden optar

por establecer acuerdos o arreglos bilaterales o multilaterales con laboratorios para que estos aporten competencias adicionales en materia de criminalística nuclear y/o faciliten asistencia si surgiese la necesidad (véanse los párrafos del 8.7 al 8.10).

## LA CRIMINALÍSTICA NUCLEAR EN RELACIÓN CON LOS INSTRUMENTOS JURÍDICOS INTERNACIONALES Y NACIONALES

2.14. La responsabilidad de la seguridad física nuclear y, por ende, de la criminalística nuclear, incumbe plenamente a cada Estado. Actualmente no existe un único instrumento jurídico internacional que abarque enteramente todos los aspectos de una infraestructura de seguridad física nuclear. La base jurídica de la seguridad física nuclear incluye un conjunto de instrumentos jurídicos internacionales de carácter vinculante, como convenciones y tratados (que son vinculantes para los Estados parte), y resoluciones del Consejo de Seguridad de las Naciones Unidas (que son vinculantes para los Estados Miembros de las Naciones Unidas), entre ellos los que figuran en las referencias [4, 10-20], así como en los principios reconocidos elaborados para la promoción de la tecnología nuclear y su uso tecnológica y físicamente seguro. Esos instrumentos internacionales han creado obligaciones por las que se exige que los Estados, entre otras cosas, creen delitos en relación con actos intencionales especificados que implican el uso indebido de materiales nucleares y otros materiales radiactivos y que instituyan mecanismos para solicitar, recibir y prestar asistencia. También contienen disposiciones sobre la devolución de dichos materiales en circunstancias definidas y en determinadas condiciones. Los instrumentos jurídicos bilaterales y multilaterales permiten la cooperación y el intercambio de información y competencias y refuerzan la seguridad internacional.

2.15. La criminalística nuclear contribuye a la aplicación de las medidas exigidas en virtud de:

- a) el marco jurídico internacional de seguridad física nuclear y la manera en que este rige las relaciones entre los Estados, en particular la cooperación y la asistencia en la investigación de sucesos relacionados con la seguridad física nuclear que tengan repercusiones transfronterizas, y
- b) el marco jurídico nacional de seguridad física nuclear, en particular en apoyo de las acciones judiciales de un Estado con respecto a un suceso relacionado con la seguridad física nuclear, incluido el posible enjuiciamiento penal.

2.16. Los Estados deberían garantizar el establecimiento y mantenimiento de un marco jurídico y regulador integral para apoyar y empoderar a las autoridades

competentes. Las responsabilidades que habrán de definirse y ejercerse abarcan la reglamentación, aduanas y protección de fronteras, el transporte de materiales, el cumplimiento de la ley y el mantenimiento del orden, y el enjuiciamiento y la decisión respecto de presuntos delitos que involucren material nuclear u otro material radiactivo.

### **3. ELABORACIÓN DEL PLAN DE EXAMEN FORENSE Y EL CORRESPONDIENTE PLAN DE ANÁLISIS CRIMINALÍSTICO NUCLEAR**

3.1. A efectos de la investigación de un suceso relacionado con la seguridad física nuclear, una vez realizada la evaluación preliminar en el lugar de los hechos, incluida la clasificación del material nuclear u otro material radiactivo, la autoridad investigadora debería elaborar un plan de examen forense, en consulta con los laboratorios forenses pertinentes, a saber, los laboratorios de criminalística nuclear designados. La clasificación se realiza para determinar las consecuencias para la seguridad física nuclear y el riesgo del material incautado para los primeros actuantes, el personal de las fuerzas del orden y el público. El plan de examen forense debería describir los requisitos de los exámenes que se llevarán a cabo en apoyo de un posible enjuiciamiento penal. Además, en la elaboración del plan de examen forense se debería tomar en consideración cualquier requisito para conservar las muestras que pudiera solicitar el tribunal si los resultados de la investigación se utilizasen en procedimientos judiciales.

3.2. Un problema que se presenta al realizar exámenes forenses es el establecimiento de la secuencia en que han de llevarse a cabo esos exámenes. La secuenciación de los exámenes realizados tanto en las disciplinas forenses tradicionales como en la criminalística nuclear debería asegurar que la información esencial se obtenga sin demoras innecesarias y que la cantidad y calidad de los datos obtenidos de cada muestra sean congruentes con la petición de la principal autoridad investigadora. La presencia de radionucleidos acentúa este problema, puesto que quizás restrinja los tipos de examen que puedan hacerse y los lugares donde puedan llevarse a cabo los exámenes. La secuenciación de los exámenes debería describirse en el plan de examen forense.

3.3. El plan de examen forense debería tener en cuenta las necesidades de la investigación, el valor percibido de los resultados previstos para la investigación,

la cierta o presunta pérdida de características esenciales a lo largo del tiempo si se demorasen los exámenes, y los procedimientos a escala nacional para la realización de exámenes en las disciplinas forenses tradicionales y en la criminalística nuclear. En general, se deberían priorizar los exámenes cuyos resultados permitan identificar específicamente a una persona (p. ej., el análisis de ADN o el examen de huellas dactilares) con respecto a aquellos cuyos resultados probablemente identifiquen solo un grupo o una clase (p. ej., huellas de calzado o de neumáticos, o la presencia de un tipo concreto de explosivo). Sin embargo, la presencia de otra información de investigación o de inteligencia podría acrecentar el valor de los resultados de características de clase, especialmente cuando reducir el abanico de posibilidades sea esencial para centrar la investigación.

3.4. En apoyo del plan de examen forense, cada uno de los laboratorios forenses implicados debería preparar un plan analítico en consulta con la principal autoridad investigadora. Esta consulta es importante para garantizar que en la preparación del plan analítico de cada uno de los laboratorios forenses no se pasen por alto los requisitos fundamentales del plan de examen.

## ELABORACIÓN DE UN PLAN DE ANÁLISIS CRIMINALÍSTICO NUCLEAR

3.5. Debería elaborarse un plan de análisis criminalístico nuclear para describir específicamente los tipos de análisis que se realizarán con miras a satisfacer las necesidades de la investigación, así como la secuenciación de los análisis apropiados para el material nuclear u otro material radiactivo y para las pruebas contaminadas con radionucleidos. La caracterización es un elemento indispensable de un plan de análisis criminalístico nuclear. La caracterización se efectúa para determinar la naturaleza del material radiactivo y las pruebas conexas (con respecto a los instrumentos analíticos y los métodos y técnicas de laboratorio aplicables a la caracterización, véanse los párrafos del 5.7 al 5.10 y del 5.13 al 5.21 respectivamente). El plan de análisis criminalístico nuclear debería ser elaborado por el o los laboratorios de criminalística nuclear designados, con las aportaciones y, en última instancia, el acuerdo, de la autoridad investigadora, de modo que satisfaga las necesidades del plan de examen forense y de la investigación. El plan de análisis criminalístico nuclear debería ser flexible y adaptable, de manera que, según se vaya obteniendo nueva información a través de la investigación o mediante el análisis de las muestras, puedan ir revisándose los requisitos del examen forense. El plan de análisis criminalístico nuclear puede modificarse en la medida de lo necesario, con las consultas y la documentación adecuadas.



## **Tipos de muestras y de análisis**

3.6. Los tipos de muestras y de análisis necesarios para responder las preguntas planteadas por la autoridad investigadora deberían tomarse en consideración durante la elaboración del plan de análisis criminalístico nuclear. En el cuadro 2 se ofrecen algunos ejemplos de los tipos de muestras que podrían recogerse en el curso de la investigación de un suceso relacionado con la seguridad física nuclear, el posible valor forense de dichas muestras y los requisitos para su examen. Debido a la naturaleza variada de estos tipos de muestras y sus requisitos específicos, quizás no sea posible analizar todas las muestras en el mismo lugar físico (p. ej., parte de una instalación o laboratorio), y esto debería ser tenido en cuenta al elaborar el plan de análisis criminalístico nuclear. Por ejemplo, si se requiere un análisis de trazas de radionucleidos, estas mediciones no se llevarían a cabo con, ni cerca de, el mismo aparato experimental que realiza el análisis volumétrico de materiales nucleares y otros materiales radiactivos.

## **Consideraciones sobre los laboratorios**

3.7. El laboratorio que lleve a cabo el análisis criminalístico nuclear debería funcionar en el marco de un plan de garantía de calidad, lo que incluye la cadena de custodia de las muestras, procedimientos analíticos validados, personal con competencias demostradas, procedimientos documentados, formularios de notificación estándares y gestión de registros. Los procedimientos de análisis criminalístico nuclear deberían incluir declaraciones sobre el control de la contaminación o la contaminación cruzada que sean aplicables explícitamente a la contaminación por radionucleidos. Al elaborar el plan de análisis criminalístico nuclear, el laboratorio debería determinar los procedimientos que se seguirán y la cantidad de material necesaria para cada análisis, así como cualquier desviación prevista de los procedimientos documentados. El plan de análisis criminalístico nuclear debería también abordar cualquier interrelación necesaria con los análisis forenses tradicionales, como, por ejemplo, si el laboratorio de criminalística nuclear ayudará en la recogida de pruebas tradicionales o en la eliminación de la contaminación radiactiva de los materiales antes de su examen por un laboratorio forense tradicional (véase la sección 4). Por otra parte, el valor probatorio de las constataciones de criminalística nuclear, aun cuando se basen en análisis que observen los protocolos y las normas pertinentes, puede verse seriamente comprometido por la desviación respecto de los parámetros y los exámenes requeridos que figuren en el plan de examen forense. Por consiguiente, los expertos de las fuerzas del orden deberían transmitir inequívocamente qué

## CUADRO 2. TIPOS DE MUESTRAS EN LOS QUE PODRÍA BASARSE UN PLAN DE ANÁLISIS CRIMINALÍSTICO NUCLEAR

Tipo de muestra	Posible valor forense	Requisitos de examen
Material nuclear u otro material radiactivo a granel	<p>Determinar la posesión no autorizada</p> <p>Averiguar los posibles orígenes del material</p> <p>Averiguar el historial de procesamiento del material</p> <p>Conectar los casos en que se haya descubierto el mismo material</p>	<p>Capacidad e infraestructura para manipular y caracterizar material radiactivo y material nuclear a granel</p> <p>Conocimientos especializados en tecnología del ciclo del combustible nuclear para interpretar los resultados</p>
Artículos contaminados con radionucleidos	<p>Determinar los lugares donde se haya manipulado o procesado el material nuclear u otro material radiactivo</p> <p>Detectar material nuclear u otro material radiactivo que pudiese haber sido manipulado anteriormente en un lugar donde se encontró material a granel.</p> <p>Asociar a los involucrados o los sospechosos con el material</p>	<p>Experiencia en análisis de trazas de materiales nucleares y otros materiales radiactivos y comprensión de las posibles limitaciones de tales muestras y resultados (p. ej., influencia del entorno ambiental)</p> <p>Aptitud para aislar y analizar muestras pequeñas</p> <p>Conocimientos especializados en análisis e interpretación forense tradicional</p>
Muestras biológicas (orina, sangre, pelo y tejidos)	<p>Identificar a personas que hayan manipulado el material nuclear u otro material radiactivo</p> <p>Identificar a personas que hayan recibido una dosis de radiación externa</p> <p>Conectar personas con sucesos que involucren material nuclear u otro material radiactivo</p>	<p>Experiencia en análisis de bioensayos o dosimetría en sangre</p> <p>Conocimientos especializados en física médica o radiobiología para interpretar los resultados</p>
Muestras ambientales o geológicas asociadas con el material nuclear u otro material radiactivo	<p>Determinar las posibles rutas o vías de contrabando a través de las cuales se haya transportado el material nuclear u otro material radiactivo</p>	<p>Conocimientos especializados en análisis ambiental (a saber, minerales, polvo y polen) e interpretación de datos geológicos y geoquímicos</p>

métodos y normas son aceptables para su uso ulterior en un tribunal de justicia, así como las posibles consecuencias de toda desviación respecto del plan de análisis criminalístico nuclear.

## SUBMUESTREO

3.8. En el caso de las muestras de materiales nucleares y radiactivos a granel, el tamaño de la muestra entera puede ser mayor que el especificado en el plan analítico. Asimismo, puede que haya limitaciones reglamentarias o técnicas respecto de la masa o actividad que pueda ser recibida y analizada en un laboratorio. Por lo tanto, puede ser necesario dividir el material —proceso que se denomina submuestreo— antes de su envío al laboratorio de análisis. Habida cuenta de la potencial heterogeneidad de la muestra, deberían seguirse protocolos especiales de submuestreo para asegurar que las submuestras sean verdaderamente representativas del material a granel. Toda limitación de estos métodos debería describirse en el plan analítico.

3.9. Para el muestreo representativo deberían emplearse técnicas que reduzcan al mínimo la posibilidad de resultados engañosos atribuibles a la heterogeneidad de las pruebas. En casos extremos, la necesidad de muestras representativas podría requerir el análisis de partículas individuales; lo más común es que el análisis volumétrico sea suficiente. Cuando se dispone de una escasa cantidad de material, el submuestreo puede no ser necesario o resultar difícil. En tales casos, no obstante, el plan de análisis criminalístico nuclear debería definir las prioridades para el reparto del material. En los casos de escasez de material es importante que todos los análisis no destructivos se hagan antes de hacer ningún análisis que consuma, o pueda alterar, las características de la muestra. Además, para las muestras pequeñas quizás sean más adecuadas las técnicas de trazas y microanalíticas que las técnicas optimizadas para cantidades de material más grandes. El submuestreo tiene la capacidad potencial de introducir contaminación o de comprometer las pruebas, y deberían tomarse las precauciones correspondientes.

## DISTRIBUCIÓN DE LAS PRUEBAS

3.10. Una vez establecidos el plan de examen forense y el plan de análisis criminalístico nuclear y efectuado el submuestreo que fuese necesario, las pruebas deberían distribuirse a los laboratorios que realizan los análisis.

3.11. Las muestras forenses deberían ser transportadas a los laboratorios empleando métodos que mantengan la cadena de custodia (p. ej., uso de aparatos de precintado o etiquetas de sellado). A fin de reducir al mínimo el riesgo de que durante el transporte se produzcan cambios no buscados en las muestras, deberían tomarse en consideración, y puede que también fuese necesario abordar, los posibles efectos de las condiciones de transporte (a saber, la temperatura, la humedad o la vibración). El transporte de los materiales nucleares y otros materiales radiactivos debería planificarse cuidadosamente y se debería contar con personas que posean conocimientos especializados sobre el transporte de materiales peligrosos, especialmente de materiales radiactivos. Además, la comunicación fiable y perdurable entre el remitente y el destinatario debería garantizar que se sigan los procedimientos necesarios para la entrega de muestras de material nuclear u otro material radiactivo a un laboratorio.

#### **4. EXAMEN FORENSE DE PRUEBAS CONTAMINADAS CON RADIONUCLEIDOS**

4.1. Los exámenes de pruebas físicas y documentales realizados en las disciplinas forenses tradicionales son un elemento habitual de las investigaciones llevadas a cabo por las autoridades investigadoras. Son ejemplos de tales disciplinas el estudio de las huellas dactilares, los marcadores genéticos (a saber, el ADN nuclear y el ADN mitocondrial), las huellas de calzado y de neumáticos, las marcas de herramientas, los residuos de explosivos, la balística de las armas de fuego, las pinturas y otros productos químicos, las características metálicas, los documentos y las pruebas indiciarias (a saber, fibras, pelo y polen), así como la medicina forense. En el anexo I se proporciona información adicional sobre estas disciplinas.

4.2. Los exámenes que se realicen en las disciplinas forenses tradicionales y los exámenes criminalísticos nucleares deben complementarse mutuamente. Ambos producirán resultados que podrían ayudar a determinar otros vínculos existentes entre personas, lugares, sucesos y procesos, y si esos vínculos son indicativos del punto en el que se perdió el control reglamentario. Esos resultados pueden demostrarse especialmente útiles cuando permiten hacer tales asociaciones o cuando permiten excluir algunos materiales nucleares u otros materiales radiactivos de toda consideración ulterior. El potencial del material radiactivo de estar presente como contaminante sobre o dentro de las pruebas físicas plantea

un problema específico para los exámenes que se realizan en las disciplinas forenses tradicionales.

## PRUEBAS CONTAMINADAS

4.3. Toda prueba asociada con un suceso relacionado con la seguridad física nuclear debería ser examinada para determinar si está o no contaminada con radionucleidos. Las pruebas que se determine que están libres de radionucleidos pueden someterse directamente al examen forense una vez lo autorice la autoridad competente, puesto que no existe peligro radiológico para las personas que las manipulen.

4.4. Cuando se sepa o se sospeche que las pruebas están contaminadas con radionucleidos deberían aplicarse consideraciones especiales. El término “prueba contaminada” tiene connotaciones diferentes para el científico forense y para el científico forense nuclear, y su significado merece ser analizado.

4.5. En el uso general de la ciencia forense, una “prueba contaminada” es el resultado de la transferencia directa o indirecta de material extraño a una muestra forense o a la escena de un delito. Esto también puede denominarse "contaminación cruzada". Las pruebas que están contaminadas con material extraño y, por lo tanto, están comprometidas, tienen un valor limitado a efectos de la investigación y deberían evaluarse cuidadosamente.

4.6. En criminalística nuclear, una “prueba contaminada” podría hacer referencia a la presencia de radionucleidos sobre o dentro de la prueba física. Este es el sentido en el que se emplea el término en la presente publicación, y para hacer más claro el significado se emplea el término “prueba contaminada con radionucleidos”. La contaminación de las pruebas por radionucleidos puede afectar la manera y el momento en que estas deberían examinarse. La contaminación cruzada por radionucleidos puede alterar la signatura de los radionucleidos, que es el objetivo del examen forense. Por consiguiente, en el contexto de la criminalística nuclear, el examen de una “prueba contaminada con radionucleidos” está sujeto a una planificación y unos procedimientos especiales.

## MANIPULACIÓN DE LAS PRUEBAS CONTAMINADAS CON RADIONUCLEIDOS

4.7. Para llevar a cabo exámenes por medio de las disciplinas forenses tradicionales de pruebas contaminadas con radionucleidos hay dos metodologías posibles. La primera entraña la eliminación o separación de los radionucleidos de las pruebas antes de efectuar ningún examen. Esto es lo que suele denominarse “descontaminación de la prueba”. La segunda metodología entraña el examen directo de la prueba mientras sigue estando contaminada con radionucleidos. Ambas metodologías requieren aportaciones de muchos organismos diferentes, en particular de organismos ajenos a la comunidad de las fuerzas del orden. Por este motivo, pueden necesitarse amplias consultas entre los expertos pertinentes al objeto de elaborar el plan de examen forense y antes de manipular las pruebas contaminadas con radionucleidos. Cada una de las metodologías ofrece algunas ventajas y adolece de algunas deficiencias, que deberían ser evaluadas en el curso de la investigación y se describen en los párrafos del 4.8 al 4.13.

### **Descontaminación de pruebas contaminadas con radionucleidos**

4.8. Los radionucleidos pueden eliminarse de las pruebas mediante procesos físicos o químicos como parte de la fase de descontaminación. Existen diversas técnicas con esta finalidad y la selección de la técnica óptima dependerá, entre otros factores, de la forma de la prueba, la forma de los radionucleidos presentes, el tipo de examen que deba hacerse y las prácticas dictadas por consideraciones a nivel nacional o local. La descontaminación de la prueba antes de la realización de un examen en una disciplina forense tradicional ofrece varias ventajas:

- a) La descontaminación de la prueba puede permitir ulteriormente un contacto más estrecho entre el examinador y la prueba, ya que las posibilidades de exposición a la radiación se habrán reducido al mínimo.
- b) El examen de la prueba descontaminada puede realizarse de modo similar al de las pruebas que no han sido contaminadas con radionucleidos, lo cual elimina toda necesidad de capacitación y, según proceda, de certificación de las personas que trabajan con técnicas de manipulación de radionucleidos.
- c) La necesidad de una infraestructura de apoyo especializada para la realización del examen queda invalidada.

4.9. Existen, sin embargo, algunas desventajas asociadas con la descontaminación de la prueba antes de la realización de un examen en una disciplina forense tradicional, a saber:

- a) Los radionucleidos con que esté contaminada la prueba podrían ser una prueba.
- b) Los recursos en términos de tiempo y de expertos que normalmente se necesitan para eliminar los radionucleidos pueden ser considerables.
- c) La prueba podría ser alterada de alguna manera que pudiese falsear las constataciones o degradar la característica que sea el objeto del examen.
- d) A menudo no se podrá lograr la eliminación completa de los radionucleidos, y la eliminación incompleta, si no se advirtiese, podría originar efectos radiológicos no corregidos en la prueba y/o la exposición accidental de los examinadores. La estricta observancia de los procedimientos operacionales para verificar la descontaminación de la prueba merma las posibilidades de efectos no buscados.
- e) Los desechos generados al eliminar los radionucleidos probablemente tengan que ser gestionados sin daños para el medio ambiente.

4.10. Ya se han llevado a cabo investigaciones sobre los efectos de distintas técnicas de descontaminación en exámenes físicos individuales [21]. En la obra de referencia se destacan algunas conclusiones respecto a cuándo es conveniente intentar descontaminar determinados tipos de pruebas. Esas conclusiones, y las nuevas investigaciones, deberían utilizarse para elaborar protocolos aplicables a la manipulación de las pruebas contaminadas con radionucleidos. Esos protocolos deberían ser estudiados antes de llevar a cabo un examen en el marco de la investigación de un suceso relacionado con la seguridad física nuclear.

### **Examen de pruebas contaminadas con radionucleidos**

4.11. El examen de las pruebas contaminadas con radionucleidos puede llevarse a cabo sin descontaminación. Este enfoque ofrece varias ventajas, entre ellas las siguientes:

- a) la reducción al mínimo de la posible pérdida o la degradación de características importantes para el examen que podría producirse a causa del proceso empleado para descontaminar las pruebas, y
- b) la celeridad del examen, que puede comenzarse de inmediato tras la recepción de las pruebas (en el supuesto de que se disponga de personal cualificado, del equipo adecuado y de la instrumentación, así como de un plan analítico por escrito).

4.12. Examinar directamente las pruebas físicas contaminadas con radionucleidos conlleva, sin embargo, algunas desventajas, a saber:

- a) la exposición del personal a la radiación, que puede reducirse con medidas de seguridad radiológica adecuadas que tengan en cuenta las normas internacionales de seguridad [1], pero cuya eliminación completa no es probable;
- b) la necesidad de instalaciones especializadas y personal capacitado para efectuar exámenes en las disciplinas forenses tradicionales de pruebas contaminadas con radionucleidos, incluidos instrumentos y equipo dedicado en dichas instalaciones;
- c) la necesidad de validar la aplicación de técnicas de la ciencia forense tradicional a pruebas contaminadas con radionucleidos en instalaciones atípicas para los exámenes forenses, y
- d) las posibilidades de que la exposición prolongada a la radiación degrade o afecte de otro modo la calidad forense de la prueba. Se han iniciado investigaciones para determinar si tal exposición tiene algún efecto y, si así fuese, si esos efectos podrían ser mitigados [22]. Esto debería hacerse con anterioridad a la investigación.

### **Determinación de la metodología adecuada con respecto a la descontaminación**

4.13. La decisión respecto de si intentar la descontaminación de las pruebas o bien realizar los exámenes de las pruebas mientras están aún contaminadas con radionucleidos debería abordarse en el plan de examen forense y dependerá de factores como los siguientes:

- a) la naturaleza de la prueba, el contaminante y los exámenes que se llevarán a cabo;
- b) la disponibilidad de los recursos pertinentes para la realización de los exámenes;
- c) la información obtenida hasta el momento por métodos de investigación o de inteligencia, así como de cualquier examen conexo que pueda haberse efectuado, y
- d) las políticas y procedimientos nacionales para responder a sucesos relacionados con la seguridad física nuclear.



## **5. ANÁLISIS DEL LABORATORIO DE CRIMINALÍSTICA NUCLEAR**

5.1. Sobre la base de la clasificación y los requisitos del plan de examen forense, puede ser necesaria la caracterización del material nuclear u otro material radiactivo. Esta caracterización debería tener lugar en un laboratorio de criminalística nuclear designado. Antes de comenzar los análisis, el laboratorio debería elaborar un plan de análisis criminalístico nuclear que, tal como se menciona en la sección 3, deberá contar con el acuerdo de la autoridad investigadora.

### **CARACTERIZACIÓN**

5.2. El objetivo de la caracterización es determinar las características físicas, la composición química y elemental y las relaciones isotópicas del material nuclear u otro material radiactivo, que se consigue mediante una serie de análisis pertinentes y puede incluir la identificación de los componentes mayores, menores y traza, según sea preciso. La caracterización por lo general no incluye el análisis mediante las disciplinas forenses tradicionales, ni tampoco las fases interpretativas, como la modelización de los procesos de reactores nucleares posiblemente relacionados con el origen del material o la averiguación de los posibles orígenes. La caracterización como tal lleva menos tiempo que la interpretación íntegra.

### **LABORATORIO DE CRIMINALÍSTICA NUCLEAR DESIGNADO**

5.3. Los laboratorios de criminalística nuclear designados son laboratorios que han sido reconocidos por un Estado como capaces de aceptar y analizar muestras de materiales nucleares y otros materiales radiactivos al objeto de apoyar los exámenes de criminalística nuclear. La responsabilidad respecto de los criterios y el proceso de decisiones para reconocer y luego designar un laboratorio de criminalística nuclear incumbe a cada Estado. Una vez que la autoridad investigadora haya determinado que se requiere un examen criminalístico nuclear, las pruebas deberían enviarse a un laboratorio que haya sido reconocido y designado como laboratorio preparado y equipado para recibir las muestras (materiales nucleares y otros materiales radiactivos, pruebas contaminadas con radionucleidos o una combinación de ambas cosas) y para analizarlas empleando la combinación necesaria de técnicas analíticas. La comunicación entre la autoridad investigadora y el laboratorio debería iniciarse lo antes posible tras la respuesta a un suceso relacionado con la seguridad física nuclear, de manera que puedan así transmitirse los requisitos y las competencias de

laboratorio y hacerse la planificación y los preparativos necesarios para recibir y analizar las muestras por medio de la elaboración del plan de examen forense y el plan de análisis criminalístico nuclear. Durante el transporte de las muestras a un laboratorio de criminalística nuclear designado y la admisión de las pruebas en dicho laboratorio debería tomarse en debida consideración la manipulación de las pruebas, a saber, la aplicación de las disposiciones adecuadas relativas a la cadena de custodia para la manipulación de las muestras (véase el párrafo 3.11).

5.4. La amplitud de las competencias disponibles en los laboratorios de criminalística nuclear designados probablemente variará de un Estado a otro. Quizás algunos Estados no posean un laboratorio de criminalística nuclear designado propio y dependerán, para la caracterización, de la asistencia bilateral o multilateral. Otros Estados pueden haber establecido laboratorios designados para llevar a cabo algunos aspectos de la caracterización o para algunos tipos de materiales y tener instituidos planes para solicitar asistencia en lo que atañe a las técnicas especializadas. En todo el mundo, solo unos pocos Estados tienen laboratorios que posean un conjunto completo de los instrumentos y técnicas de análisis criminalístico nuclear que podrían ser necesarios. Cada Estado debería tener un profundo conocimiento de su propia capacidad y asegurarse de estar preparado para cualquier eventualidad, lo que incluye tener instituidas disposiciones para solicitar, recibir o prestar asistencia, según proceda, para llevar a cabo el análisis criminalístico nuclear en apoyo de la investigación de un suceso relacionado con la seguridad física nuclear.

5.5. El Estado debería garantizar que todo laboratorio de criminalística nuclear designado tenga la capacidad de hacer un examen criminalístico nuclear y posea métodos analíticos validados, personal con competencias demostradas y procedimientos documentados. Es conveniente la acreditación del laboratorio conforme a una norma de calidad reconocida internacionalmente (p. ej., ISO 9001:2008 [23], ISO 14001:2004 [24], ISO/IEC 17025:2005 [25], OHSAS 18001:2007 [26]). Además, el laboratorio de criminalística nuclear designado debería tener la autorización necesaria para recibir materiales nucleares y otros materiales radiactivos y, si fuese posible, tener capacidad para manipular grandes cantidades de material (en términos de masa y actividad) si fuese necesario, pero aun así poder analizar componentes traza. Los laboratorios de criminalística nuclear designados pueden disponer de una caja de manipulación con guantes o, para casos en los que se prevean muestras muy radiactivas, celdas calientes. El laboratorio de criminalística nuclear designado también debería tener las instalaciones de laboratorio y los procedimientos operacionales adecuados para reducir al mínimo la contaminación cruzada entre las muestras.

5.6. El laboratorio de criminalística nuclear designado debería aplicar las medidas de protección física adecuadas y, si fuese preciso, procedimientos de contabilidad y control de materiales nucleares. Asimismo, el laboratorio debería cumplir plenamente los requisitos aplicables a las instalaciones donde se almacena y manipula material radiactivo [1] y, si fuese preciso, los correspondientes requisitos aplicables al almacenamiento y la manipulación de materiales peligrosos. El laboratorio debería tener instituidas medidas de seguridad física adecuadas para garantizar la integridad de la cadena de custodia y para proteger la información de carácter estratégico asociada con el examen criminalístico nuclear.

## INSTRUMENTOS ANALÍTICOS

5.7. El científico forense nuclear tiene a su disposición una amplia variedad de instrumentos para medir las propiedades de los materiales nucleares y otros materiales radiactivos. En el anexo II se proporcionan descripciones de muchas de las técnicas analíticas utilizadas para la caracterización. Esos instrumentos y técnicas individuales se clasifican en tres categorías generales: imagenología, análisis volumétrico y microanálisis.

5.8. Los instrumentos de imagenología producen imágenes o mapas muy ampliados de la superficie del material y proporcionan información sobre la heterogeneidad y la microestructura de las muestras. Evaluar el grado de heterogeneidad de las muestras es importante. Si el material es heterogéneo, el análisis volumétrico no producirá resultados que sean representativos de los que se obtendrían de muestras más pequeñas. La imagenología también puede revelar características espaciales y microestructurales (p. ej., la textura y la estructura granular), que podrían dar información sobre el proceso termodinámico o mecánico del material.

5.9. Los instrumentos de análisis volumétrico permiten caracterizar una muestra entera o una porción de ella para determinar las propiedades promedio del material. La caracterización del material nuclear u otro material radiactivo puede incluir mediciones de las características físicas, la composición química y elemental y las relaciones isotópicas (véanse los párrafos del 5.13 al 5.20). Si el objetivo del análisis volumétrico es proporcionar información sobre los componentes traza del material, para obtener mediciones exactas y precisas es necesario disponer de material suficiente. La presencia o la ausencia de componentes traza y sus correspondientes concentraciones suele ser importante para proporcionar información sobre el proceso de fabricación.

5.10. Si el análisis por imagenología confirma que la muestra es heterogénea, los instrumentos de microanálisis que pueden identificar químicamente y/o analizar cuantitativamente muestras muy pequeñas (<1 mg, generalmente) pueden caracterizar los componentes individuales del material. Los instrumentos de microanálisis también incorporan mediciones superficiales que permiten identificar contaminantes superficiales traza o medir la composición de capas o revestimientos finos, lo cual podría proporcionar información importante para la interpretación.

## SECUENCIACIÓN DE TÉCNICAS Y MÉTODOS

5.11. Muchos de los instrumentos analíticos utilizados en el análisis de material nuclear u otro material radiactivo son técnicas destructivas (es decir, que la muestra se consume durante la preparación y el análisis). Por lo tanto, la correcta selección y secuenciación de las técnicas analíticas es crucial y debería definirse minuciosamente en el plan de análisis criminalístico nuclear. La secuenciación de las técnicas analíticas debería basarse en las preguntas planteadas por la autoridad investigadora que habrán de responderse de acuerdo con el plan de examen forense, teniendo en cuenta la cantidad de las muestras disponibles para el análisis, la información de la que ya se disponga y las posibles firmas (físicas, químicas, elementales e isotópicas) que pudieran ayudar a una interpretación precisa.

5.12. El Grupo de Trabajo Técnico Internacional sobre Criminalística Nuclear (ITWG) —una asociación de profesionales de la criminalística nuclear— ha elaborado recomendaciones sobre la secuenciación de las técnicas al objeto de producir información de gran valor lo antes posible en el proceso de análisis. Las recomendaciones se basan en la opinión de los expertos y en la experiencia adquirida por conducto de tres ejercicios de análisis colaborativo efectuados por los laboratorios que forman parte del ITWG; esos ejercicios se abordan con más detalle en el anexo III. En el cuadro 3 se presenta la secuencia recomendada por el ITWG para los análisis, ordenados en función de las técnicas, que podrían efectuarse en el plazo de 24 horas, 1 semana o 2 meses a partir de la llegada de las muestras al laboratorio de criminalística nuclear designado (véanse en el anexo III las descripciones de las técnicas de uso frecuente). Algunas técnicas también pueden usarse con posterioridad para obtener resultados analíticos más precisos mediante tiempos de medición más largos. El uso de esas escalas temporales para la realización de los análisis del material también podría hacerse extensivo a los intervalos previstos para la notificación de los resultados, en correspondencia con los intervalos de análisis de 24 horas, 1 semana y 2 meses, según la situación. La duración del proceso de caracterización dependerá de la carga de trabajo del

laboratorio, la naturaleza de la muestra y las necesidades de la investigación detalladas en el plan de examen forense, pero con el objetivo de ser completado en el plazo de dos meses tras la recepción de la muestra.

## ANÁLISIS DE MUESTRAS

5.13. Tras la llegada de la muestra al laboratorio de criminalística nuclear, primero debería analizarse el material en condiciones controladas mediante la espectrometría gamma de alta resolución. El análisis puede confirmar o modificar el resultado del análisis realizado en el lugar de los hechos, y puede también proporcionar información nueva, como la cantidad total presente de material nuclear u otro material radiactivo.

5.14. La caracterización del material nuclear u otro material radiactivo puede incluir la medición de las características físicas, la composición química y elemental y las relaciones isotópicas, como se describe en los párrafos del 5.15 al 5.21 y se resume en el cuadro 3.

**CUADRO 3. MÉTODOS Y TÉCNICAS DE LABORATORIO CON LAS ESCALAS TEMPORALES TÍPICAS PARA EFECTUAR LOS ANÁLISIS**

Técnica/método	A efectuar en el plazo de		
	24 horas	1 semana	2 meses
Radiología	Tasa de dosis ( $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ , n) Contaminación superficial Radiografía		
Caracterización física	Inspección visual Fotografía Determinación del peso Determinación dimensional Microscopia óptica Densidad	Microestructura, morfología y otras características físicas Microscopia SEM Difracción de rayos X	Nanoestructura, morfología y otras características físicas Microscopia TEM

**CUADRO 3. MÉTODOS Y TÉCNICAS DE LABORATORIO CON LAS ESCALAS TEMPORALES TÍPICAS PARA EFECTUAR LOS ANÁLISIS (cont.)**

Técnica/método	A efectuar en el plazo de		
	24 horas	1 semana	2 meses
Análisis isotópico	Espectrometría HRGRS	Espectrometría TIMS Espectrometría ICP-MS	Espectrometría SIMS Técnicas de recuento de la radiactividad
Radiocronometría	Espectrometría HRGRS (para Pu)	Espectrometría TIMS Espectrometría ICP-MS	Espectrometría HRGRS (para U) Espectrometría alfa
Composición elemental/química	Fluorescencia de rayos X	Espectrometría ICP-MS Ensayo químico Espectrometría FTIR Espectrometría SEM/de rayos X Espectrometría IDMS	Cromatografía GC-MS
Disciplinas de la ciencia forense tradicional	Recolección de las pruebas asociadas con las disciplinas forenses tradicionales		Análisis e interpretación de las pruebas asociadas con las disciplinas forenses tradicionales

**Nota:** Espectrometría FTIR: espectrometría infrarroja por transformada de Fourier; cromatografía GC-MS: cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas; espectrometría HRGRS: espectrometría gamma de alta resolución; espectrometría ICP-MS: espectrometría de masas con plasma acoplado por inducción; espectrometría IDMS: espectrometría de masas por dilución isotópica; microscopía SEM: microscopía electrónica de barrido; espectrometría SIMS: espectrometría de masas de iones secundarios; microscopía TEM: microscopía electrónica de transmisión; espectrometría TIMS: espectrometría de masas de ionización térmica.

## **Mediciones físicas**

5.15. El primer paso de la caracterización de muestras suele entrañar la inspección visual del material, lo cual puede incluir documentar o fotografiar marcas específicas (p. ej., números de serie o logotipos de productos), el color, el tamaño y la forma. En el caso de piezas sólidas a granel, el peso, la densidad, la actividad y las características básicas de microestructura (tamaño del grano, textura e inclusiones, según corresponda), junto con los resultados de la inspección visual, pueden revelar información a escala macroscópica suficiente para identificar la muestra. Por ejemplo, en el caso de las pastillas de combustible para reactores nucleares, las dimensiones exactas y la geometría de una pastilla de combustible nuclear no irradiado por lo general son exclusivas de un fabricante determinado. Para las fuentes radiactivas selladas, el tamaño, la actividad y la forma de encapsulación generalmente permiten hacerse una idea con respecto al fabricante de la fuente.

5.16. A escala microscópica, las características microestructurales permiten hacer comparaciones más detalladas de los materiales. Por ejemplo, la distribución del tamaño de grano y la estructura granular de las pastillas de combustible de óxido de uranio puede proporcionar información sobre sus procesos de producción. En el caso de las muestras de polvo o de frotis, la morfología de las partículas puede mostrar características distintivas que sean resultado de procesos de producción diferentes.

## **Mediciones químicas y elementales**

5.17. La forma química del material nuclear (p. ej., metal, óxido o un producto intermedio, como el diuranato de amonio) u otro material radiactivo es un indicador importante que puede revelar información acerca del proceso de producción del material, así como proporcionar alguna idea sobre su uso previsto original. En el caso de un producto intermedio del uranio, el compuesto puede proporcionar una indicación del proceso utilizado para producir el material y, como resultado de ello, reducir el número de las posibles instalaciones de producción.

5.18. Aparte del material nuclear u otro material radiactivo de interés, en el material investigado puede haber muchos otros elementos presentes, algunas veces en concentraciones que sobrepasen las de cualquier radionucleido. Esos elementos pueden haber sido añadidos de manera deliberada para conseguir determinadas propiedades del material (p. ej., erbio y gadolinio para controlar la reactividad del combustible nuclear). También puede haber presencia no deliberada de impurezas químicas como resultado de elementos residuales de los materiales de alimentación iniciales o de residuos de productos químicos añadidos durante el

proceso de producción (p. ej., residuos ácidos), así como de la corrosión o abrasión de vasijas y redes de tuberías. Si esos elementos están presentes a niveles traza, se denominan impurezas, y el conjunto y las concentraciones de esos elementos pueden ser muy característicos de procesos, materias primas o instalaciones específicos. Las mediciones de esos elementos pueden ser, por consiguiente, importantes para un examen, dado que pueden proporcionar información no solo sobre el uso legítimo previsto sino también sobre el material básico o sobre el tipo de instalación de producción.

### **Mediciones isotópicas**

5.19. Las mediciones isotópicas se llevan a cabo para determinar la abundancia isotópica de los elementos presentes en el material nuclear u otro material radiactivo. La abundancia isotópica proporciona información sobre el historial del material y su uso previsto; por ejemplo, si el material nuclear es de composición isotópica natural o, si ha sido enriquecido en isótopos fisibles o reprocesado, si es probable que hubiese sido utilizado como combustible nuclear o, potencialmente, en un explosivo nuclear. Aparte de los principales isótopos fisibles ( $^{239}\text{Pu}$  y  $^{235}\text{U}$ ), las concentraciones relativas de isótopos menores del plutonio y el uranio (p. ej.,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{Pu}$  y  $^{236}\text{U}$ ) pueden revelar el historial de irradiación anterior del material nuclear.

5.20. La radiocronometría se vale de mediciones isotópicas para determinar el tiempo transcurrido desde la última purificación química del material nuclear u otro material radiactivo (es decir, el momento en que los nucleidos descendientes del decaimiento de sus radionucleidos padres fueron separados de los padres). La concentración de productos de la desintegración radiactiva del plutonio y el uranio, denominados productos de desintegración (p. ej.,  $^{241}\text{Am}$  y  $^{230}\text{Th}$ ), puede medirse y compararse con la concentración del isótopo padre para determinar la edad del material nuclear separado. La radiocronometría también es aplicable a fuentes de radioisótopos como las que contienen  $^{137}\text{Cs}$ , que se desintegra en  $^{137}\text{Ba}$  estable.

5.21. Además de la composición isotópica de los elementos fisibles y sus productos de desintegración, la presencia y la composición isotópica de otros elementos puede proporcionar información sobre el origen de una muestra, a partir de las variaciones isotópicas naturales conocidas en todo el mundo. Las relaciones isotópicas de esos elementos en una muestra pueden ser indicativas del proceso o el lugar de producción (p. ej., la relación  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ) o del material de alimentación (p. ej., la relación  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  y la relación  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ).



## 6. INTERPRETACIÓN CRIMINALÍSTICA NUCLEAR

6.1. Una vez realizados los análisis, puede ser necesario hacer uso de otros conocimientos especializados para interpretar los resultados analíticos y formular las constataciones de criminalística nuclear en respuesta al plan de examen forense. Puede ser preciso obtener esos conocimientos especializados fuera del laboratorio que haya llevado a cabo las mediciones. La interpretación criminalística nuclear es el proceso de comparar y asociar las características de la muestra con la información existente relativa a los tipos de material y los orígenes y métodos de producción del material nuclear u otro material radiactivo o con casos anteriores que involucrasen material similar. La interpretación criminalística nuclear proporciona el contexto, las explicaciones de los resultados analíticos y la base de las constataciones de criminalística nuclear.

### PROCESOS DE INTERPRETACIÓN

6.2. En criminalística nuclear, las firmas son uno o más conjuntos de datos característicos de una muestra dada de material nuclear u otro material radiactivo, que pueden permitir determinar si la muestra concuerda o no concuerda con un material nuclear u otro material radiactivo concreto utilizado, producido o almacenado en un Estado por la vía de la exclusión o la inclusión. Esas firmas pueden ayudar a determinar los procesos por los que fue creado el material y el historial posterior del material.

6.3. Las firmas de referencia para los procesos y las instalaciones de todo el ciclo del combustible nuclear, como base para interpretar los resultados analíticos de las muestras, se establecen mediante metodologías empíricas, con los resultados de análisis anteriores de materiales nucleares y otros materiales radiactivos, y metodologías de modelización basadas en la química y la física de los procesos del ciclo del combustible nuclear. Los conocimientos de la ciencia analítica pueden orientar la selección de los métodos adecuados para verificar la presencia o la ausencia de firmas forenses nucleares específicas.

6.4. La interpretación criminalística nuclear entraña la comparación de los resultados de los análisis de la muestra en cuestión con información sobre las características correspondientes de materiales existentes o conocidos. En general, una única firma de un material (p. ej., una medición isotópica) suele no ser suficiente para identificar una muestra específica exclusivamente a partir de las clases conocidas de materiales similares. A diferencia del examen de huellas

dactilares tradicional, por ejemplo, puede no ser práctico, en ausencia de un archivo, recurrir a la comparación del análisis de una única muestra en cuestión con el análisis de muestras existentes o conocidas. No obstante, el uso de combinaciones de firmas, como mediciones isotópicas, impurezas y microestructura, puede proporcionar mayor confianza en la asociación de una muestra específica con datos que representen una clase conocida de material similar. Asimismo, el uso de combinaciones de firmas puede posibilitar la exclusión —llegar a la conclusión de que una muestra específica no es comparable con clases conocidas de datos de materiales—, que también puede ser de utilidad en la interpretación criminalística nuclear.

6.5. Entre los recursos que pueden ser de ayuda en las comparaciones con información sobre las clases conocidas de materiales cabe citar una biblioteca nacional de criminalística nuclear o bases de datos afines que contengan información sobre los materiales nucleares y otros materiales radiactivos utilizados, producidos o almacenados en el Estado, ampliadas con conocimientos especializados en la materia para ayudar en el proceso interpretativo. Las muestras archivadas pueden volver a analizarse a efectos de comparación.

6.6. A modo de ejemplo, en el cuadro 4 se presenta parte de la información que puede necesitarse para responder preguntas acerca de una muestra de plutonio y las firmas empleadas para obtener esa información.

**CUADRO 4. EJEMPLOS DE FIRMAS DE RADIONUCLEIDOS DE INTERÉS EN EL PLUTONIO**

Información requerida	Firma
Fecha de procesamiento químico	Producción de isótopos descendientes
Técnicas de procesamiento químico	Elementos residuales (relación U/Pu)
Uso como fuente de energía de desintegración radiactiva	Actividad de los isótopos de Pu ( $^{238}\text{Pu}$ )
Espectro neutrónico y quemado del combustible del reactor	Relaciones isotópicas de Pu (p. ej., $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ )

## CREACIÓN DE UNA BIBLIOTECA NACIONAL DE CRIMINALÍSTICA NUCLEAR

6.7. Una biblioteca nacional de criminalística nuclear es un instrumento al que puede recurrirse para una interpretación criminalística nuclear. Una biblioteca y bases de datos de referencia pueden contribuir a la capacidad de un Estado de evaluar si un material que ha sido hallado no sometido a control reglamentario concuerda o no con los materiales nucleares y otros materiales radiactivos producidos, utilizados o almacenados en el Estado [5]. Una biblioteca nacional de criminalística nuclear es un conjunto organizado administrativamente de información sobre los materiales nucleares y otros materiales radiactivos producidos, utilizados o almacenados en un Estado y que puede proceder de fuentes diversas y diferentes. Una biblioteca puede facilitar las comparaciones de las características medidas en los materiales nucleares y otros materiales radiactivos con firmas de las clases conocidas de materiales (p. ej., las características físicas, la composición química y elemental y las relaciones isotópicas).

6.8. Una biblioteca nacional de criminalística nuclear con esta finalidad, en caso de existir, debería ser establecida, mantenida y controlada por el Estado y ser acorde al volumen y la complejidad de las existencias de materiales nucleares y otros materiales radiactivos del Estado.

6.9. A fin de fomentar esas comparaciones, una biblioteca nacional de criminalística nuclear debería crearse, si fuese factible, usando un marco de organización conceptual común.

## CONOCIMIENTO DE LOS PROCESOS DEL CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR Y DE LA FABRICACIÓN DE FUENTES RADIATIVAS

6.10. Las características reflejadas en las firmas forenses nucleares se transmiten a los materiales nucleares y otros materiales radiactivos en diversos momentos de su historia, por ejemplo durante su fabricación. Al objeto de la interpretación criminalística nuclear es fundamental comprender cómo se crean, persisten y se modifican esas firmas durante los procesos de producción de los materiales. Por lo tanto, el conocimiento de los procesos del ciclo del combustible nuclear y de la fabricación de fuentes radiactivas es fundamental para la interpretación acertada de las mediciones de laboratorio. Ese conocimiento se obtiene de los conocimientos especializados en la materia, que por lo general residen en una variedad de entidades internacionales, nacionales y no gubernamentales.

6.11. La modelización o simulación de los procesos del ciclo del combustible nuclear y de la producción de materiales puede predecir cómo se transmiten las firmas a los materiales nucleares y otros materiales radiactivos durante su producción. La modelización también puede permitir comprender mejor los fenómenos que crean o modifican las firmas, así como los que posibilitan su persistencia. El conocimiento adquirido mediante el proceso de modelización ayuda a contextualizar las mediciones de laboratorio ulteriores y también puede ayudar a revelar firmas nuevas.

6.12. Comparar los resultados de la caracterización del material con combinaciones de firmas tomadas de la información sobre los procesos (p. ej., mediciones isotópicas, impurezas y características microestructurales) permite comprender cómo puede haber sido fabricado el material y su uso previsto original. A la inversa, esas comparaciones también permiten excluir de toda consideración procesos de producción y usos previstos si no se establece ninguna asociación entre los resultados de la caracterización y combinaciones de firmas específicas.

### **Material archivado**

6.13. Los análisis comparativos de los materiales nucleares y otros materiales radiactivos archivados, incluido el material incautado, pueden contribuir en gran medida a la confianza en las constataciones de criminalística nuclear. Estos análisis permiten al experto en criminalística nuclear establecer conexiones entre el material y los procesos utilizados en su producción o fabricación. Conforme se van descubriendo nuevas firmas mediante nuevos métodos analíticos, cada vez es más importante que los datos archivados puedan acompañarse de material archivado. Según cuál sea el período de semidesintegración de los radionucleidos de interés en un material concreto, se puede volver a analizar el material archivado empleando los nuevos métodos analíticos y evaluar en los datos resultantes la presencia o la ausencia de las firmas recién descubiertas. Los archivos de muestras mantenidos por los explotadores, productores, reguladores, laboratorios ambientales y demás pueden incluir muestras de material analizadas anteriormente, como combustible de reactores, muestras de control de calidad y fuentes radiactivas de uso industrial.

### **Bibliografía de dominio público**

6.14. Muchos de los procesos nucleares básicos están documentados en libros de texto, informes y artículos de revistas que son obras de dominio público. El sitio web de información nuclear del OIEA, por ejemplo, tiene algunas bases de datos

en las que se documenta la información pública existente sobre las instalaciones nucleares de todo el mundo.<sup>3</sup>

### **Bibliografía de dominio privado**

6.15. La información privada o clasificada solo puede documentarse en obras de uso privado. Puede que las empresas deseen compartir información de dominio privado con las autoridades competentes o los laboratorios nacionales tras la concertación de un acuerdo de confidencialidad idóneo. Los institutos nucleares, los ministerios pertinentes y los laboratorios nacionales quizás tengan acceso a bibliografía clasificada de su propio Estado, pero es poco probable que tengan permiso para acceder a documentos clasificados de otros Estados.

### **PROCESO DEDUCTIVO E ITERATIVO**

6.16. El análisis criminalístico nuclear y su interpretación entrañan un proceso deductivo e iterativo, como se ilustra en la figura 2. La ejecución del plan analítico produce resultados que pueden ser comparados con la información sobre materiales existentes o conocidos, y esas comparaciones llevan a la interpretación, que contextualiza los resultados analíticos. El proceso comparativo entre los resultados analíticos y la información sobre materiales conocidos es iterativo porque cada una de las sucesivas comparaciones puede proporcionar nueva información que permita determinar nuevos análisis o comparaciones que, a su vez, puedan revelar signatures adicionales que ayuden a identificar el material con más precisión. Este proceso comparativo también puede ser deductivo, porque puede emplearse para ir excluyendo progresivamente procesos concretos, lugares u otros orígenes como fuentes posibles del material. Por ejemplo, las comparaciones de los resultados analíticos de materiales nucleares incautados con los procesos de producción conocidos indicarán los probables procesos de producción que pueden haber dado origen al material incautado, así como los procesos que no pueden haber dado origen al material incautado. Las comparaciones adicionales con otros procesos de producción existentes u otras mediciones analíticas servirán para reducir la lista de los probables procesos de producción atribuibles a la producción del material incautado.

6.17. Conforme se reciben e interpretan los resultados de los análisis, estos pueden ofrecer información que el personal de las fuerzas del orden podría utilizar a efectos de la investigación. Puede haber ocasiones en que de un examen criminalístico nuclear no pueda desprenderse una conclusión definitiva sobre

---

<sup>3</sup> Véase <http://nucleus.iaea.org>.

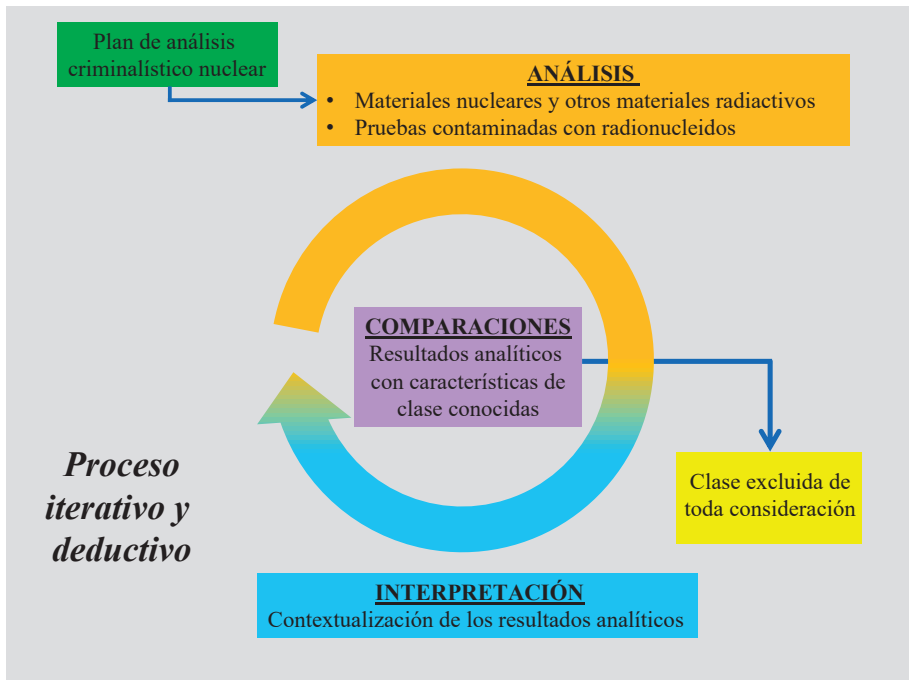


Fig. 2. Análisis criminalístico nuclear, comparaciones e interpretación: un proceso iterativo y deductivo para contextualizar los resultados analíticos.

cómo se fabricó un material o dónde puede haberse originado, pero que aun así puedan excluirse procesos que sean incongruentes con las pruebas en lo que se refiere al historial de producción del material. Ambas acciones —generar pistas de investigación y excluir determinadas hipótesis— sirven para estrechar el foco de la investigación. Por último, los resultados de las actividades de investigación llevadas a cabo por las fuerzas del orden pueden ayudar a descubrir otras pruebas que podrían establecer vínculos entre el material nuclear u otro material radiactivo y personas, lugares, momentos, sucesos y procesos de producción de interés.

## 7. CONSTATAIONES DE CRIMINALÍSTICA NUCLEAR

7.1. Las constataciones de criminalística nuclear son los productos del análisis criminalístico nuclear y su interpretación. Las constataciones pueden contribuir a las investigaciones de las fuerzas del orden, la información de índole reglamentaria y la formulación de políticas, y ayudar a otras partes interesadas pertinentes para mejorar la seguridad física nuclear e impedir sucesos posteriores relacionados con la seguridad física nuclear. Las preguntas cruciales que se plantean en todos los escenarios normalmente son las mismas:

- ¿Qué tipo de material hay involucrado?
- ¿Cuál es el posible origen del material?
- ¿Cuáles son los métodos de producción probables?

### CONFIANZA EN LAS CONSTATAIONES

7.2. En general, la confianza en los resultados analíticos depende de tres factores: i) métodos validados, ii) materiales de referencia certificados y iii) competencias probadas. El uso de métodos validados garantiza que el análisis sea idóneo para el material y capaz de medir los analitos de interés. El uso de materiales de referencia certificados garantiza que las mediciones tengan como parámetro de referencia valores conocidos y certificados. Los métodos validados y los materiales de referencia certificados inspiran confianza en las constataciones porque son una medida de la fiabilidad de los procedimientos mediante los cuales se obtuvieron. El uso de competencias probadas inspira confianza en las personas que efectúan los análisis.

7.3. La confianza en la interpretación depende de la articulación de las incertidumbres en los resultados de las mediciones analíticas individuales, en los resultados de las comparaciones iterativas de los resultados analíticos con la información de clase existente, y en la consideración de explicaciones alternativas al interpretar los resultados de tales comparaciones. Considerados en su conjunto, estos tres factores permiten defender la interpretación y su correspondiente nivel de confianza mediante una comprensión demostrada de su fundamento.

7.4. Es fundamental que los análisis criminalísticos nucleares y sus interpretaciones sean defendibles, porque las constataciones de criminalística nuclear pueden utilizarse en procedimientos judiciales o para descubrir

vulnerabilidades en materia de seguridad física nuclear. La estricta observancia de los procedimientos de la cadena de custodia durante toda la investigación y la aplicación de procedimientos de garantía y control de calidad en los laboratorios contribuye a la confianza en los resultados analíticos. Además, un plan analítico que utilice múltiples resultados para convergir en constataciones específicas (p. ej., asociar o excluir determinadas clases de materiales) aumenta la confianza en las constataciones y las conclusiones.

## COMUNICACIÓN DE LAS CONSTATAIONES

7.5. Todas las constataciones de criminalística nuclear deberían ser comunicadas de manera oportuna en un informe. Los informes pueden presentarse en forma de informe científico o puede que deban ajustarse a un formato estándar exigido por la autoridad nacional o el organismo investigador principal. La información de carácter estratégico incluida en esos informes se señalará y protegerá consiguientemente.

7.6. El nivel de confianza atribuido a los resultados y a su interpretación debería ser comunicado claramente de conformidad con los requisitos expuestos en el plan de examen forense. A fin de avanzar en la investigación, las constataciones de criminalística nuclear se combinarán con constataciones e información de otras disciplinas, incluidas otras disciplinas de la ciencia forense e información proporcionada por otras autoridades, como los servicios nacionales de seguridad. Los resultados del análisis criminalístico nuclear y los niveles de confianza correspondientes a las constataciones deberían ser comunicados amoldándolos a las necesidades de la investigación.

7.7. En un entorno vulnerable al paso del tiempo como es el de un suceso relacionado con la seguridad física nuclear, puede ser necesario obtener información inicial fiable lo más rápidamente posible. Los investigadores, así como los responsables de adoptar decisiones y otros funcionarios, solicitarán las constataciones de criminalística nuclear mucho antes de la finalización del análisis completo y la interpretación de las mediciones. Idealmente, debería haber un método instituido para articular los niveles de confianza correspondientes a los informes preliminares. Para atender las peticiones de información de los investigadores y los responsables de adoptar decisiones debería elaborarse un resumen de las constataciones de criminalística nuclear preliminares en el que se reseñen las constataciones básicas junto con las principales hipótesis, los niveles de confianza de dichas constataciones y cualquier otra explicación posible que siga siendo creíble a la luz de la información disponible hasta la fecha.



7.8. Para ayudar a manejar las expectativas con respecto a la notificación de resultados, el plan de examen forense debería dar una idea general de la forma específica y los plazos en que deban comunicarse las constataciones. Los informes sobre las constataciones y la situación respecto de los exámenes criminalísticos nucleares pueden emitirse periódicamente, tanto durante como después del suceso relacionado con la seguridad física nuclear. La preparación de los informes puede seguir las escalas de tiempo típicas para la conclusión de los análisis, de 24 horas, 1 semana y 2 meses, como se indica en el cuadro 3. Una vez concluido el examen, también debería emitirse un informe final. En el informe final se deberían señalar todos los datos y demás información utilizados en la evaluación, y se deberían describir las suposiciones hechas y la lógica de las constataciones presentadas. Asimismo, en el informe se debería señalar todo dato o información que no sea coherente con las constataciones, así como los criterios para excluir o descartar dicha información o para dar precedencia a otra información.

## EXAMEN A POSTERIORI

7.9. Tras la conclusión de un examen criminalístico nuclear y la terminación de todos los procedimientos judiciales conexos, puede ser útil hacer un “examen *a posteriori*” con miras a evaluar cuáles de los diversos análisis y procedimientos efectuados en el curso de la investigación cumplieron las expectativas y cuáles no. La finalidad de un examen *a posteriori* no es centrarse en las deficiencias exclusivamente, sino también entender qué contribuyó al éxito de las acciones que cumplieron las expectativas o las superaron. La realización de un examen *a posteriori* brinda la oportunidad de aprender de la experiencia y de proporcionar retroalimentación sobre los procesos utilizados para planificar y realizar los exámenes criminalísticos nucleares en el futuro.

7.10. Habida cuenta de la necesidad general de mejorar el modo en que se realizan los análisis criminalísticos nucleares, se alienta a los expertos en la esfera de la criminalística nuclear a que compartan con sus contrapartes de otros Estados las lecciones aprendidas de sucesos relacionados con la seguridad física nuclear reales o de la realización de ejercicios, cuando las consideraciones relativas a la confidencialidad así lo permitan.

## 8. COOPERACIÓN Y ASISTENCIA INTERNACIONALES

8.1. La cooperación y la asistencia internacionales pueden ser de ayuda antes, durante y después de un suceso relacionado con la seguridad física nuclear. El ámbito de aplicación de la cooperación y la asistencia internacionales en relación con la criminalística nuclear comprende un abanico de actividades que abarcan la sensibilización, la investigación y el desarrollo, la asistencia internacional y la creación de capacidad.

### COOPERACIÓN INTERNACIONAL

8.2. Diversas organizaciones, grupos e iniciativas internacionales promueven la sensibilización sobre la importancia de la criminalística nuclear y, previa solicitud, prestan apoyo en materia de criminalística nuclear en distintas formas. La Iniciativa Mundial de Lucha contra el Terrorismo Nuclear (IMLTN), la INTERPOL y el Grupo de Trabajo Técnico Internacional sobre Criminalística Nuclear (ITWG) ofrecen diversas modalidades de capacitación, orientaciones y asistencia. Los Estados pueden también optar por cooperar bilateral o multilateralmente en la esfera de la criminalística nuclear. Además, algunos Estados cuentan con programas nacionales que pueden prestar apoyo a asociados internacionales.

#### **Iniciativa Mundial de Lucha contra el Terrorismo Nuclear**

8.3. La IMLTN es una asociación voluntaria de Estados que trabajan para fortalecer la capacidad mundial de impedir, detectar y responder a la amenaza común del terrorismo nuclear. Actualmente, el Grupo de Trabajo sobre Criminalística Nuclear de la IMLTN está ayudando a dirigentes políticos de los Estados asociados a crear capacidad nacional en materia de criminalística nuclear mediante la elaboración de instrumentos para sensibilizar respecto de la criminalística nuclear, fomentar las relaciones intergubernamentales, llevar a cabo ejercicios conjuntos y promover las mejores prácticas de criminalística nuclear [27].

#### **Organismo Internacional de Energía Atómica**

8.4. El OIEA presta apoyo a los Estados en sus esfuerzos encaminados a establecer y mantener una infraestructura de seguridad física nuclear eficaz, incluidas las competencias en materia de criminalística nuclear. Ello se consigue

por conducto de las orientaciones internacionales divulgadas en las publicaciones de la *Colección de Seguridad Física Nuclear del OIEA*, como las presentes orientaciones sobre la aplicación del plan de acción modelo, y por conducto de medidas para ayudar a los Estados, previa solicitud, a aplicar esas orientaciones. Otras medidas son, por ejemplo, las actividades de capacitación relacionadas con la sensibilización respecto de la criminalística nuclear, la gestión de la escena del delito radiológico y las metodologías de criminalística nuclear, así como proyectos coordinados de cooperación [28].

## **INTERPOL**

8.5. La INTERPOL es una organización internacional que presta apoyo a las organizaciones policiales nacionales para prevenir la criminalidad y luchar contra ella, inclusión hecha del terrorismo radiológico y nuclear. La principal actividad de la INTERPOL es facilitar el intercambio de información, incluida la información sobre las investigaciones, entre sus miembros de todo el mundo. Además, la INTERPOL efectúa análisis de inteligencia e imparte capacitación (p. ej., sobre la gestión de la escena de un delito radiológico) y puede prestar apoyo operacional durante un suceso relacionado con la seguridad física nuclear.

## **Grupo de Trabajo Técnico Internacional sobre Criminalística Nuclear**

8.6. El ITWG es un grupo de trabajo oficioso de científicos nucleares, personal de las fuerzas del orden, primeros actuantes y expertos en reglamentación nuclear que colectivamente forman un órgano de profesionales de la criminalística nuclear [29]. El objetivo del ITWG es hacer avanzar la disciplina de la criminalística nuclear elaborando soluciones técnicas eficaces y prestando asesoramiento a las autoridades nacionales e internacionales sobre cómo responder de la mejor manera a actos delictivos e intencionales no autorizados que involucren material nuclear u otro material radiactivo. El ITWG elabora directrices técnicas, organiza ejercicios colaborativos de análisis de materiales y ejercicios de simulación, y promueve internacionalmente la divulgación. En el sitio web de la ITWG hay disponible más información.<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> Véase <http://www.nf-itwg.org>.

## ASISTENCIA CRIMINALÍSTICA NUCLEAR DURANTE LA INVESTIGACIÓN DE UN SUCESO RELACIONADO CON LA SEGURIDAD FÍSICA NUCLEAR

8.7. Durante la investigación de un suceso relacionado con la seguridad física nuclear, la asistencia se puede facilitar por conducto de organizaciones internacionales o de acuerdos y arreglos bilaterales o multilaterales. La asistencia puede incluir apoyo para recoger las pruebas, optimizar los métodos de análisis, realizar un análisis criminalístico nuclear, aumentar la confianza en los análisis, recopilar datos que ayuden a la interpretación criminalística nuclear o proporcionar otros tipos de información previa solicitud.

8.8. Para formular una solicitud de asistencia, la parte solicitante debería tomar en consideración los siguientes puntos (no se enumeran por orden de prioridad):

- a) si la solicitud es en respuesta a un suceso específico en el cual se ha hallado material nuclear u otro material radiactivo no sometido a control reglamentario, o si forma parte de una estrategia de preparación para tales sucesos [30, 31];
- b) si la solicitud ha de considerarse un asunto de carácter estratégico y, por consiguiente, requiere ser protegida como información de carácter estratégico;
- c) si el Estado solicitante permitirá que la parte prestadora dé a conocer los resultados a terceros u otras partes no directamente implicadas en la prestación de la asistencia y, si así fuese, en qué circunstancias y cómo se darían a conocer;
- d) si se le pide a la parte prestadora que se ocupe de recoger, embalar y transportar el material nuclear u otro material radiactivo desde el territorio de la parte solicitante a una instalación en territorio de la parte prestadora observando las consideraciones de seguridad, los requisitos de transporte y las declaraciones relativas a la importación y exportación de materiales nucleares y otros materiales radiactivos;
- e) si es necesario que la parte prestadora observe una cadena de custodia y otros requisitos de manipulación de pruebas conexos que rijan en el sistema jurídico de la parte solicitante;
- f) si la solicitud requiere la aprobación a nivel ministerial de la parte solicitante y/o de la parte prestadora y, si así fuese, cómo se obtendrán tales aprobaciones.
- g) si la parte prestadora puede esperar que le sean reembolsados los gastos en que incurra para atender a la solicitud o si se espera que asuma tales gastos;
- h) si puede que sea necesario el testimonio de expertos de la parte prestadora y, si así fuese, en qué condiciones podría ser requerido ese testimonio (p. ej., en persona, por escrito o a través de un enlace de comunicación remota), y
- i) si se contemplará la posibilidad de devolver el material nuclear u otro material radiactivo a la parte solicitante. Con respecto a este punto, tanto la parte

solicitante como la parte prestadora deberían tener presente las obligaciones dimanantes de los instrumentos jurídicos internacionales en cuanto a los materiales nucleares y otros materiales radiactivos, como las contenidas en la Convención sobre la Protección Física de los Materiales Nucleares [4], el Convenio Internacional para la Represión de los Actos de Terrorismo Nuclear [12] y en los acuerdos de salvaguardias y la reglamentación pertinente de control de las exportaciones.

8.9. Un modo de proceder para facilitar una solicitud de asistencia consiste en elaborar un pliego de condiciones o documento similar que será acordado por la parte solicitante y la o las partes prestadoras. En él se podrían abordar, según proceda, las cuestiones antes enumeradas y especificar las expectativas en lo que respecta al calendario y los medios de notificación, la elaboración de un plan analítico (si fuese necesario por la naturaleza de la solicitud), la manera de notificar los resultados y los análisis que se emplearán. Podría ser conveniente un modo de proceder menos formal cuando la solicitud no requiera análisis de laboratorio, por ejemplo una solicitud de intercambio de las mejores prácticas de criminalística nuclear, de ofrecimiento de asesoramiento de expertos sobre la realización de ejercicios relacionados con la criminalística nuclear o de ayuda con los planes para ampliar la capacidad nacional en materia de criminalística nuclear.

8.10. Dado que tales acuerdos implican cuestiones variadas y complejas, es aconsejable que cada Estado defina e incluya en su plan nacional de respuesta las disposiciones que puedan ser necesarias ante un suceso real relacionado con la seguridad física nuclear en lo que se refiere a la prestación o la solicitud de asistencia internacional.

## **9. CREACIÓN DE CAPACIDAD EN MATERIA DE CRIMINALÍSTICA NUCLEAR**

9.1. Incumbe a cada Estado desarrollar y mantener capacidad criminalística nuclear. Elementos como la infraestructura, los marcos jurídico y regulador, las operaciones, el capital humano y el equipo y los conocimientos especializados son fundamentales para poseer capacidad criminalística nuclear.

9.2. Disponer de estrategias para elaborar, probar y mantener la capacidad y las competencias en materia de criminalística nuclear es esencial para posibilitar una respuesta adecuada a un suceso relacionado con la seguridad física nuclear.

Esas metodologías incluirán la sensibilización de las partes interesadas a todos los niveles con respecto a la criminalística nuclear, la impartición de la capacitación adecuada al personal actual y futuro, el ensayo de las medidas de respuesta, el diseño de programas de investigación y desarrollo, la gestión eficaz del conocimiento en previsión de las eventuales necesidades y una enseñanza eficaz de las ciencias nucleares para fomentar y mantener las competencias (véanse ejemplos específicos en el anexo III).

## SENSIBILIZACIÓN

9.3. Un elemento clave para desarrollar capacidad criminalística nuclear en un Estado es tomar conciencia de la contribución de la criminalística nuclear a la infraestructura de seguridad física nuclear del Estado. La sensibilización de las partes interesadas del Estado con respecto a la criminalística nuclear puede ayudar a:

- propiciar la comprensión de la criminalística nuclear entre los encargados de facilitar y desarrollar una capacidad criminalística nuclear;
- clarificar las funciones y responsabilidades;
- potenciar el conocimiento de la criminalística nuclear aplicada a las investigaciones de las fuerzas de orden y las evaluaciones de la vulnerabilidad en materia de seguridad física nuclear, y
- fomentar el uso de una terminología común entre las diferentes organizaciones y disciplinas.

## CAPACITACIÓN

9.4. Incumbe al Estado velar por que su infraestructura nacional de seguridad física nuclear esté respaldada por personal debidamente capacitado. La capacitación técnica y el desarrollo del capital humano deberían abarcar las complejidades de la criminalística nuclear como un componente de las medidas preventivas y como un aspecto de la capacidad de respuesta. La capacitación es un componente fundamental de un programa de criminalística nuclear sostenible, ya que proporciona información esencial sobre las necesidades de la investigación de un suceso relacionado con la seguridad física nuclear, los métodos de análisis e interpretación recomendados y la función de la criminalística nuclear en la infraestructura de seguridad física nuclear del Estado. La capacitación también puede favorecerse mediante asociaciones internacionales de criminalística nuclear.

9.5. La capacitación debería adaptarse a los objetivos de aprendizaje requeridos. Por ejemplo, para la comunicación eficaz de los resultados científicos a los agentes de la autoridad y a los encargados de la formulación de políticas o la adopción de decisiones durante un suceso relacionado con la seguridad física nuclear es importante que los especialistas en criminalística nuclear estén capacitados para transmitir eficazmente esa información a ese público. En esa línea, el OIEA ha preparado actividades de capacitación introductorias, así como actividades de capacitación centradas en metodologías específicas de análisis técnico empleadas en los laboratorios de criminalística nuclear.

## EJERCICIOS

9.6. La eficacia de la capacidad criminalística nuclear depende de la colaboración entre las organizaciones científicas y tecnológicas, los organismos encargados de hacer cumplir la ley y otros organismos públicos, tanto a escala nacional como internacional. La elaboración de procesos y mecanismos de colaboración e intercambio es indispensable para el desarrollo constante de competencias en materia de criminalística nuclear. La planificación, la ejecución y el examen de ejercicios de criminalística nuclear son un elemento clave para impulsar esas competencias.

9.7. Los ejercicios de criminalística nuclear, en los que los encargados de la adopción de decisiones y el personal practican cómo ejercer sus funciones en una situación realista y de riesgo controlado antes de que ocurra un suceso, permiten a los Estados ensayar su respuesta a un suceso relacionado con la seguridad física nuclear y crear confianza al respecto. Los ejercicios de criminalística nuclear por lo general se basan en escenarios o son de ámbito analítico. A través de los ejercicios, las partes interesadas pueden evaluar sus competencias y determinar su desempeño en condiciones realistas, al tiempo que evalúan también las funciones y responsabilidades y las vías y mecanismos de intercambio de información. Los ejercicios ofrecen la oportunidad de refinar los planes de respuesta y de recuperación y la coordinación entre las partes interesadas. Los resultados y las conclusiones de los ejercicios deberían utilizarse para determinar las medidas correctoras, optimizar las técnicas y plantear nuevas ideas para mejorar la respuesta en general. Además, compartir las conclusiones con asociados de confianza puede mejorar la capacidad colectiva de los Estados para hacer frente a las nuevas amenazas que surjan.

## ENSEÑANZA Y CREACIÓN DE CONOCIMIENTOS ESPECIALIZADOS

9.8. La enseñanza y la creación de conocimientos especializados son aspectos clave para la eficacia y el mantenimiento de la capacidad criminalística nuclear. Un Estado debería tener acceso a personal técnico en posesión de conocimientos especializados que abarquen las disciplinas nucleares y geoquímicas más relevantes para la criminalística nuclear. A fin de garantizar la suficiente fuerza de trabajo de criminalística nuclear será imprescindible desarrollar la próxima generación de científicos, creando para ello un itinerario académico de estudios universitarios y postdoctorales en esferas como la radioquímica, la ingeniería nuclear, la física nuclear, la geoquímica isotópica, la ciencia de los materiales y la química analítica. Algunas medidas prácticas pueden ser las siguientes:

- a) alentar la colaboración y el intercambio entre las comunidades académica, científica y de políticas en el ámbito estatal, a fin de integrar a los estudiantes, el profesorado universitario, los expertos técnicos que trabajan en laboratorios del Estado y los funcionarios de la administración;
- b) ofrecer recursos, como becas de estudio, becas de investigación y pasantías, a estudiantes en las esferas antes mencionadas, a nivel de pregrado, grado y postgrado, y oportunidades de investigación práctica en instalaciones de laboratorio;
- c) prestar asistencia a las universidades en apoyo del desarrollo de programas de enseñanza que guarden relación con la criminalística nuclear, lo que supone la promoción de un enfoque multidisciplinar (p. ej., unir a los departamentos de química y física para ofrecer un programa conjunto de estudios de criminalística nuclear), y
- d) facilitar la captura y la transferencia de los conocimientos técnicos singulares de los expertos actuales mediante la tutoría de los científicos forenses nucleares más jóvenes.

## INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

9.9. La criminalística nuclear es una disciplina de la ciencia forense que está en desarrollo. La labor de investigación y desarrollo es esencial para crear confianza en las constataciones de criminalística nuclear y evaluar la fiabilidad de las firmas forenses nucleares como base para determinar el origen y el historial. La investigación debería centrarse, en particular, en esferas como la mejora de los procedimientos y las técnicas analíticas para clasificar y caracterizar materiales nucleares y otros materiales radiactivos; la identificación de firmas forenses



nucleares para su inclusión en una biblioteca nacional de criminalística nuclear; la comprensión de cómo se crean, persisten y se modifican las firmas a lo largo del ciclo del combustible nuclear, y cómo estas pueden medirse con exactitud [28].

9.10. Participar en actividades de investigación y desarrollo que promuevan la ciencia de analizar los materiales nucleares y otros materiales radiactivos puede potenciar la capacidad criminalística nuclear del país. Además, el examen por homólogos a través del proceso científico propicia la aceptación y la confianza en las técnicas empleadas para este tipo de análisis e interpretación. La aceptación por la comunidad científica permite adoptar esos instrumentos para utilizarlos en el curso de un examen criminalístico nuclear real.



## REFERENCIAS

- [1] AGENCIA PARA LA ENERGÍA NUCLEAR DE LA OCDE, COMISIÓN EUROPEA, ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO, ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE, *Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: Normas básicas internacionales de seguridad, Colección de Normas de Seguridad del OIEA* N° GSR Part 3, OIEA, Viena, 2016.
- [2] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Establecimiento de la infraestructura de seguridad física nuclear para un programa nucleoelectrico, Colección de Seguridad Física Nuclear del OIEA* N° 19, OIEA, Viena, 2018.
- [3] KRISTO, M.J., SMITH, D.K., NIEMEYER, S., DUDDER, G.B., Model Action Plan for Nuclear Forensics and Nuclear Attribution, Rep. UCRL TR 202675, Lawrence Livermore Natl Lab., Livermore, CA (2004).
- [4] *Convención sobre la Protección Física de los Materiales Nucleares*, INFCIRC/274/Rev. 1, OIEA, Viena, 1980.
- [5] INSTITUTO INTERREGIONAL DE LAS NACIONES UNIDAS PARA INVESTIGACIONES SOBRE LA DELINCUENCIA Y LA JUSTICIA, OFICINA DE LAS NACIONES UNIDAS CONTRA LA DROGA Y EL DELITO, OFICINA EUROPEA DE POLICÍA, ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE POLICÍA CRIMINAL INTERPOL, ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE ADUANAS, *Recomendaciones de seguridad física nuclear sobre materiales nucleares y otros materiales radiactivos no sometidos a control reglamentario, Colección de Seguridad Física Nuclear del OIEA* N° 15, OIEA, Viena, 2012.
- [6] EUROPEAN POLICE OFFICE, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INTERNATIONAL POLICE ORGANIZATION, WORLD CUSTOMS ORGANIZATION, *Combating Illicit Trafficking in Nuclear and other Radioactive Material*, IAEA Nuclear Security Series No. 6, IAEA, Vienna (2007).
- [7] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Recomendaciones de seguridad física nuclear sobre la protección física de los materiales y las instalaciones nucleares (INFCIRC/225/Rev.5)*, *Colección de Seguridad Física Nuclear del OIEA* N° 13, OIEA, Viena, 2012.
- [8] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Identificación de fuentes y dispositivos radiactivos, Colección de Seguridad Física Nuclear del OIEA* N° 5, OIEA, Viena, 2009.

- [9] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE POLICÍA CRIMINAL INTERPOL, INSTITUTO INTERREGIONAL DE LAS NACIONES UNIDAS PARA INVESTIGACIONES SOBRE LA DELINCUENCIA Y LA JUSTICIA, *Gestión de la escena de un delito radiológico*, Colección de Seguridad Física Nuclear del OIEA N° 22-G, OIEA, Viena, 2019.
- [10] *Tratado sobre la No Proliferación de las Armas Nucleares*, INFCIRC/140, OIEA, Viena, 1970.
- [11] *Enmienda de la Convención sobre la Protección Física de los Materiales Nucleares*, GOV/INF/2005/10 GC(49)/INF/6, OIEA, Viena, 2005.
- [12] *Convenio Internacional para la Represión de los Actos de Terrorismo Nuclear*, A/59/766, Naciones Unidas, Nueva York, 2005.
- [13] *Convenio Internacional para la Represión de los Atentados Terroristas Cometidos con Bombas*, A/52/653, Naciones Unidas, Nueva York, 1997.
- [14] *Convenio Internacional para la Represión de la Financiación del Terrorismo*, A/RES/54/109, Naciones Unidas, Nueva York, 1999.
- [15] *Protocolo de 2005 relativo al Convenio para la Represión de Actos Ilícitos contra la Seguridad de la Navegación Marítima*, Organización Marítima Internacional, Londres, 2005.
- [16] *Protocolo de 2005 relativo al Protocolo para la Represión de Actos Ilícitos contra la Seguridad de las Plataformas Fijas Emplazadas en la Plataforma Continental*, Organización Marítima Internacional, Londres, 2005.
- [17] *Convenio para la Represión de Actos Ilícitos relacionados con la Aviación Civil Internacional*, Organización de Aviación Civil Internacional, Beijing, 2010.
- [18] *Protocolo Complementario del Convenio para la Represión del Apoderamiento Ilícito de Aeronaves*, Organización de Aviación Civil Internacional, Beijing, 2010.
- [19] Resolución S/RES/1373 (2001) del Consejo de Seguridad de las Naciones Unidas, Naciones Unidas, Nueva York, 2001.
- [20] Resolución S/RES/1540 (2004), del Consejo de Seguridad de las Naciones Unidas, Naciones Unidas, Nueva York, 2004.
- [21] PARKINSON, A., COLELLA, M., EVANS, T., The development and evaluation of radiological decontamination procedures for documents, document inks, and latent fingermarks on porous surfaces, *J. Forensic Sci.* 55 (2010) 728–734.
- [22] COLELLA, M., PARKINSON, A., EVANS, T., LENNARD, C., ROUX C., The recovery of latent fingermarks from evidence exposed to ionizing radiation, *J. Forensic Sci.* 54 (2009) 583–590.
- [23] ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE NORMALIZACIÓN, *Sistemas de gestión de la calidad — Requisitos*, ISO 9001:2008, ISO, Ginebra, 2008.
- [24] ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE NORMALIZACIÓN, *Sistemas de gestión ambiental — Requisitos con orientación para su uso*, ISO 14001:2004, ISO, Ginebra, 2004.
- [25] ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE NORMALIZACIÓN, *Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración*, ISO/IEC 17025:2005, ISO, Ginebra, 2005.

- [26] BRITISH STANDARDS INSTITUTION, Occupational Health and Safety Management Systems: Requirements, OHSAS 18001:2007, BSI, London (2007).
- [27] HILL, D., “Emerging themes from the Global Initiative to Combat Nuclear Terrorism Nuclear Forensics Working Group”, Nuclear Security: Enhancing Global Efforts (Proc. Int. Conf. Vienna, 2013), IAEA, Vienna (2014).
- [28] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Application of Nuclear Forensics in Combating Illicit Trafficking of Nuclear and Other Radioactive Material, IAEA TECDOC 1730, IAEA, Vienna (2014).
- [29] GARRETT, B., MAYER K., THOMPSON, P., BÍRÓ, T., LASOU, G., “The Nuclear Forensics International Technical Working Group (ITWG): An Overview”, Nuclear Security: Enhancing Global Efforts (Proc. Int. Conf. Vienna, 2013), IAEA, Vienna (2014).
- [30] AGENCIA PARA LA ENERGÍA NUCLEAR DE LA OCDE, COMISIÓN PREPARATORIA DE LA ORGANIZACIÓN DEL TRATADO DE PROHIBICIÓN COMPLETA DE LOS ENSAYOS NUCLEARES, OFICINA DE COORDINACIÓN DE ASUNTOS HUMANITARIOS DE LAS NACIONES UNIDAS, ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE POLICÍA CRIMINAL (INTERPOL), ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO, ORGANIZACIÓN MARÍTIMA INTERNACIONAL, ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL, ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE, *Preparación y respuesta para casos de emergencia nuclear o radiológica, Colección de Normas de Seguridad del OIEA N° GSR Part 7*, OIEA, Viena, 2018.
- [31] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Gestión previa a la disposición final de desechos radiactivos, Colección de Normas de Seguridad del OIEA N° GSR Part 5*, OIEA, Viena, 2010.



## Anexo I

### DISCIPLINAS DE LA CIENCIA FORENSE

I-1. En este anexo se describen algunas de las principales disciplinas de la ciencia forense, con especial atención a las disciplinas que, según se estima, probablemente producirán información útil para las necesidades de la investigación de un suceso relacionado con la seguridad física nuclear.

I-2. La mayor parte de estas disciplinas tienen una considerable historia en la ciencia forense, de allí que se hable de ellas como las “disciplinas forenses tradicionales”. El valor investigador de los datos en formato binario (las “pruebas digitales”) está reconocido desde hace decenas de años, pero el aumento de las cantidades y tipos de dispositivos que capturan pruebas digitales ha acrecentado su importancia a efectos de la investigación. Debido al hecho de que los instrumentos y técnicas para analizar las pruebas digitales e interpretar los resultados siguen evolucionando y son importantes para el examen forense, se abordan más adelante en un apartado sobre una nueva disciplina de la ciencia forense.

#### DISCIPLINAS TRADICIONALES DE LA CIENCIA FORENSE

##### **Análisis de pruebas biológicas**

I-3. Los especímenes de origen biológico que podrían recuperarse como pruebas recogidas en el lugar o recogidas de una persona, lugar o cosa de interés para la investigación de un suceso relacionado con la seguridad física nuclear son la sangre, el semen y la saliva. Las pruebas biológicas humanas que contienen ADN nuclear (ADNn) pueden ser de particular valor porque es posible asociar los resultados de los ensayos con un individuo con un grado de fiabilidad que es aceptable a los fines de la justicia penal (es decir, los resultados de los ensayos tienen capacidad de individualización).

I-4. El ADN mitocondrial (ADNmt) se hereda por línea materna y lo tendrán en común todos los individuos que estén emparentados por vía materna (p. ej., hermanos, madre y abuela materna). En consecuencia, los resultados del ADNmt son menos útiles a efectos de individualización, pero podrían ayudar a estrechar el foco de la investigación. Además, el ADNmt puede recuperarse de especímenes biológicos en los que las concentraciones de ADNn sean insuficientes para

cualquier análisis significativo. Entre estos especímenes figuran el pelo caído naturalmente, los fragmentos de pelo, los huesos y los dientes, todo lo cual podría recuperarse en el lugar de un suceso relacionado con la seguridad física nuclear.

I-5. Una segunda categoría de especímenes de origen biológico comprende los materiales de origen animal, vegetal o micótico, como las plumas, la materia vegetal (p. ej., hojas, polen, semillas y pedúnculos) y las esporas. El análisis de estos materiales podría ofrecer pistas sobre, por ejemplo, zonas geográficas asociadas con el embalaje, el almacenamiento o el transporte de materiales nucleares y otros materiales radiactivos.

### **Análisis de patrones y huellas**

I-6. El análisis de los patrones de las huellas dactilares (es decir, de los dedos), de las palmas de las manos y de las plantas de los pies se denomina análisis de crestas de fricción. Esta técnica lleva utilizándose más de un siglo para identificar a individuos. El análisis de crestas de fricción y el análisis de ADNn son las principales disciplinas forenses que puede considerarse que producen resultados que permiten la individualización. El uso del análisis de crestas de fricción podría ofrecer resultados similares a los del análisis de ADNn, y debería tomarse en consideración al elaborar el plan de examen forense, especialmente si pueden recuperarse huellas dactilares, palmares o plantares del propio lugar del suceso o del material nuclear u otro material radiactivo, o del contenedor utilizado para almacenar o transportar el material. Existen varias bases de datos de huellas dactilares y palmares que sirven de ayuda para asociar esos patrones con un individuo y a las que tienen acceso las fuerzas del orden, por ejemplo, mediante solicitudes cursadas a la INTERPOL. En el contexto forense, una base de datos es una colección de datos o información en la que pueden hacerse búsquedas y que, por lo general, aunque no necesariamente, está en formato electrónico o digital. El sistema integral automatizado de identificación de huellas dactilares de los Estados Unidos de América es un ejemplo.<sup>1</sup>

I-7. Además de huellas dactilares, palmares y plantares, en la escena del delito o en otros lugares relacionados con la investigación se podrían encontrar otros patrones. Los patrones de este tipo suelen denominarse huellas de impresión y se producen cuando un objeto, como un zapato o un neumático, deja una marca en una superficie. Entre otros patrones que podrían analizarse cabe citar las marcas en balas y en casquillos de cartuchos, huellas auriculares, huellas labiales, algunas manchas de sangre, marcas de mordeduras e impresiones de guantes. Sin

---

<sup>1</sup> Véase [https://www.fbi.gov/about-us/cjis/fingerprints\\_biometrics/iafis/iafis](https://www.fbi.gov/about-us/cjis/fingerprints_biometrics/iafis/iafis).



embargo, a diferencia del análisis de crestas de fricción, es poco probable que el análisis de estos otros patrones permita la individualización. En cambio, los resultados pueden permitir asociar el patrón con una clase de personas u objetos; por ejemplo, una marca y el tamaño del zapato o el neumático. Esos resultados pueden ser importantes para estrechar el foco de la investigación de un suceso relacionado con la seguridad física nuclear.

### **Análisis de marcas de herramientas y armas de fuego**

I-8. El análisis de las marcas de herramientas y armas de fuego aprovecha las marcas que se crean cuando un objeto duro, como una herramienta o el percutor de un arma de fuego, entra en contacto con un objeto relativamente blando. Las comparaciones de las marcas de herramientas y armas de fuego pueden considerarse una forma especializada de análisis de impresiones. El análisis de las marcas dejadas por una herramienta o un percutor puede usarse para estrechar el foco de una investigación, tanto en virtud de la indicación de determinados fabricantes o procesos de fabricación de las herramientas o armas de fuego como de la eliminación de otros. Esas marcas podrían ser halladas en el propio material nuclear o radiactivo, en el contenedor utilizado para almacenar o transportar el material o en otros objetos recuperados de la escena del delito u otros lugares de interés para la investigación.

### **Análisis de pelos**

I-9. Los seres humanos y los animales pierden pelo de ordinario. Esos pelos podrían quedar en la escena del delito o podrían transferirse a otro individuo presente en el lugar o en otro sitio de interés a efectos de la investigación. Por consiguiente, en la investigación de un suceso relacionado con la seguridad física nuclear debería contemplarse la posibilidad de que pudiese haber caído pelo sobre el material nuclear u otro material radiactivo no sometido a control reglamentario o en las inmediaciones. El análisis microscópico del pelo es útil en relación con las características de clase, más que en relación con las características individuales. Es decir, los resultados pueden asociar el pelo con un tipo de persona (sobre la base, p. ej., del color del pelo o el uso de tinte de cabello) más que con un individuo único. Estos resultados pueden ser útiles cuando excluyen a determinadas personas del grupo de posibles fuentes del pelo, estrechando así el foco de la investigación.

## **Análisis de fibras**

I-10. El uso en la ciencia forense del análisis de fibras por examen microscópico tiene una larga historia. Las fibras pueden ser materiales sintéticos, como el acrílico, el nailon y el poliéster, así como fibras botánicas, como las que se utilizan en muchas cuerdas y sogas. Estos exámenes son similares a los que se realizan en pelos y tienen parecidas limitaciones; concretamente, que pueden determinarse características de clase pero es imposible la individualización. Más recientemente se han utilizado en fibras métodos modernos de análisis instrumental, como la espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier. Los métodos instrumentales permiten obtener información adicional de posible valor para una investigación. En general, los resultados de los análisis de fibras pueden confirmar que hubo una transferencia de fibras cuando un objeto entró en contacto con otro, estableciendo así una asociación de personas, lugares o cosas con material nuclear u otro material radiactivo no sometido a control reglamentario.

## **Examen de documentos cuestionados**

I-11. El examen de documentos cuestionados implica la comparación y el análisis de documentos y de los instrumentos de impresión o de escritura conexos. Tales exámenes tienen los siguientes objetivos:

- identificar o descartar individuos como fuente de un texto manuscrito;
- determinar si un documento ha sido producido mediante dispositivos de imagen mecánicos o electrónicos, como impresoras, fotocopiadoras y aparatos de fax;
- reconocer o descartar máquinas concretas como fuente de una salida impresa o mecanografiada;
- descubrir alteraciones, adiciones o eliminaciones;
- descifrar y restaurar trozos de un documento dañados, borrados u oscurecidos;
- calcular la edad del documento, y
- reconocer y preservar otras pruebas físicas que pudiesen existir en el documento, como huellas dactilares, pelos, fibras y otro material biológico.

I-12. Estos exámenes, por lo tanto, deberían tomarse en consideración al elaborar el plan de examen forense siempre que se recuperen documentos asociados con materiales nucleares y otros materiales radiactivos no sometidos a control reglamentario.

## **Análisis de pinturas, revestimientos y otros materiales superficiales**

I-13. El análisis de pinturas, revestimientos y otros materiales poliméricos puede ser de gran utilidad para la investigación de un suceso relacionado con la seguridad física nuclear, especialmente en las situaciones en que se recuperen contenedores en relación con material nuclear u otro material radiactivo. Esos contenedores podrían tener, por fuera o por dentro, marcas escritas o de otro tipo. Del mismo modo, pudiera ser que en los contenedores se utilizasen materiales poliméricos, por ejemplo, para proteger el material o como precinto. Del análisis de los componentes de cualquier pintura, revestimiento y otros materiales poliméricos podrían obtenerse resultados que ayuden a determinar las regiones del mundo donde se originaron.

## **Análisis de explosivos**

I-14. El análisis de explosivos se realiza en una serie de materiales. Para un dispositivo explosivo configurado que no ha detonado, tanto el explosivo como los demás componentes del dispositivo tienen valor probatorio. En el caso de un dispositivo que ha detonado, son pruebas de interés los polvos, líquidos o lechadas no quemados o no gastados; los fragmentos del dispositivo, incluidos los explosivos no detonados o no quemados, y los objetos hallados en las inmediaciones de una explosión que puedan contener residuos del explosivo o fragmentos del dispositivo. La interpretación de los resultados analíticos podría sugerir un grupo o un individuo concretos, sobre la base del diseño, los materiales de construcción y los registros de la adquisición de esos materiales. Así pues, la presencia de cualquier explosivo en la escena del delito condicionará todos los planes de examen forense.

## **Medicina forense**

I-15. A través de sus dos ramas principales, la medicina clínica forense y la patología forense, los médicos forenses podrían aportar conocimientos especializados en casos relacionados con la criminalística nuclear.

I-16. La medicina clínica forense entraña el examen clínico de sujetos vivos en casos de lesiones, quemaduras, exposiciones y complicaciones ocurridas en relación con los efectos y las consecuencias de un suceso relacionado con la seguridad física nuclear. Los conocimientos especializados de la clínica forense guardan relación con el tipo y la naturaleza de las lesiones (o quemaduras); si están o no causadas por la exposición a material nuclear u otro material radiactivo; la fecha de las lesiones; el período de tratamiento y las complicaciones resultantes, así como si existe alguna incapacidad (temporal o permanente).

I-17. La patología forense entraña la aplicación de los conocimientos médicos al examen de restos humanos. El principal instrumento empleado a tal efecto es la autopsia. Los objetivos típicos de la patología forense son la determinación de la causa y la forma de la muerte, el establecimiento de la naturaleza y el grado de las lesiones, y la averiguación de la identidad de los restos.

I-18. Son muchos los métodos de laboratorio que pueden usarse en ayuda de la medicina forense, entre ellos los asociados con los exámenes de ADNn y ADMmt (véase el párrafo I-4), los métodos para examinar seres humanos (p. ej., la imagenología por rayos X, la imagenología por resonancia magnética y la tomografía axial computarizada) y los métodos modernos de análisis instrumental (p. ej., la cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas, la cromatografía de líquidos y la espectrometría de masas con plasma acoplado por inducción).

I-19. En el caso de una víctima de un suceso relacionado con la seguridad física nuclear, la patología forense puede ser útil para determinar si la víctima murió por los efectos de la exposición a la radiación o por alguna otra causa. En el caso de un suceso relacionado con la seguridad física nuclear en que haya dispersión de material nuclear u otro material radiactivo, las constataciones de los exámenes realizados por los patólogos forenses podrían ser útiles para calcular la distancia de cada una de las víctimas con respecto al punto de dispersión.

## UNA NUEVA DISCIPLINA DE LA CIENCIA FORENSE

### **Análisis de pruebas digitales**

I-20. La importancia del análisis de las pruebas digitales —la mayoría de las veces, datos en formato binario— se ha incrementado por la expansión tanto de los tipos de dispositivos que registran tales datos como de la cantidad de esos dispositivos que utilizan las personas, las empresas y las instituciones gubernamentales. Pueden usarse métodos forenses para localizar datos contenidos en soportes físicos y en los sistemas operativos o las aplicaciones. Algunas posibles fuentes de pruebas digitales son, entre otras, las siguientes:

- computadoras de escritorio, portátiles y tabletas, así como unidades de disco duro, tarjetas de memoria y unidades de memoria instantánea de bus serie universal (USB);
- teléfonos móviles;

- cámaras de seguridad y de vigilancia, como las que utilizan los bancos en los cajeros automáticos y muchas empresas, así como algunos edificios residenciales o urbanizaciones;
- cámaras de tráfico, como las utilizadas para detectar infracciones de tráfico o para monitorizar el flujo rodado;
- reproductores multimedia portátiles, y
- cámaras digitales.

De los sistemas digitales de instrumentación y control de una instalación también pueden obtenerse pruebas digitales. En el contexto de la investigación de un suceso relacionado con la seguridad física nuclear, esos dispositivos, o las pruebas obtenidas de ellos, podrían recuperarse cerca o en el lugar donde se incaute el material nuclear u otro material radiactivo, a lo largo de las rutas por las que podría haber viajado el material y de los individuos de los que se sospeche alguna asociación con sucesos que culminen con la incautación del material. La generalización de los dispositivos de grabación digitales podría permitir trazar cronológica y geográficamente el movimiento de materiales nucleares y otros materiales radiactivos.

## Anexo II

### TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN

#### TÉCNICAS COMÚNMENTE UTILIZADAS EN EL ANÁLISIS CRIMINALÍSTICO NUCLEAR

II-1. Este anexo se basa en el capítulo 21 de la referencia [II-1] y en él se describen algunas de las técnicas más comúnmente utilizadas en el análisis criminalístico nuclear, como se muestra en el cuadro 3, sección 5. La lista de técnicas es representativa y no exhaustiva. Para completar esta información, en la referencia [II-2] se notifican los resultados de un proyecto coordinado de investigación sobre la aplicación de la criminalística nuclear en relación con el tráfico ilícito de materiales nucleares y otros materiales radiactivos.

#### **Caracterización física, incluidas la inspección visual y la fotografía**

II-2. La inspección visual de una muestra puede proporcionar información relacionada con su identidad, especialmente si hay presentes números de serie u otras marcas identificativas. El tamaño y la forma también pueden ser suficientes para identificar algunos objetos. Para calcular la densidad se puede utilizar una combinación de mediciones dimensionales y del peso de la muestra. El color del material puede ser un indicador importante de algunos compuestos químicos. El uso de una longitud calibrada y una escala de colores facilita la documentación de estas mediciones físicas.

#### **Microscopia óptica**

II-3. La microscopia óptica es el primer método para inspeccionar la muestra mediante aumento. Un microscopio óptico utiliza la óptica de la luz de aumento y métodos de reflexión y transmisión de la iluminación de la muestra para presentar a los ojos del usuario imágenes aumentadas de la muestra. La visión de las muestras con luz polarizada transmitida también puede revelar información sobre la composición y homogeneidad de la muestra. Los microscopios de luz pueden fácilmente aumentar una imagen hasta 1000 veces.

#### **Microscopia electrónica de barrido y espectrometría de rayos X**

II-4. La microscopia electrónica de barrido (microscopia SEM) proporciona imágenes aumentadas hasta 10 000 veces con una fuente convencional de

filamento térmico o hasta 500 000 veces con una fuente de emisión de campo. En la microscopia SEM, un haz de electrones enfocado con precisión hace un barrido de la muestra. La interacción de la energía de incidencia del haz de electrones con la muestra produce electrones retrodispersados, electrones secundarios y rayos X. La medición de la señal producida como una función de la posición de barrido permite visualizar una imagen o mapa de la muestra. Cada tipo de señal transmite información diferente sobre la muestra. Por ejemplo, los electrones secundarios transmiten información de alta resolución acerca de la morfología de la muestra. Un mapa de la intensidad relativa de los electrones retrodispersados mostrará la distribución espacial de la composición del material basada en el número atómico promedio de la muestra visualizada.

II-5. Los rayos X generados durante la microscopia SEM o el análisis por microsonda electrónica son una forma de medir la composición elemental de las muestras. Los rayos X pueden analizarse cuantitativamente mediante uno de dos métodos. En el primero de ellos, un espectrómetro de rayos X por dispersión de energía (EDX) utiliza un detector de estado sólido para medir simultáneamente la energía y la velocidad de los rayos X incidentes. En el segundo, en una configuración de microsonda electrónica, un espectrómetro de rayos X por dispersión de longitud de onda (WDX) utiliza un cristal analizador para difractar secuencialmente rayos X seleccionados en un contador proporcional de gas. El análisis de rayos X está limitado a una resolución espacial de alrededor de 1  $\mu\text{m}$ . El límite de detección del análisis de rayos X es aproximadamente del 0,1 %, según el elemento. La microscopia SEM en combinación con la espectrometría EDX o WDX puede usarse para trazar un mapa de la abundancia y distribución espacial de los elementos de la muestra.

### **Análisis por fluorescencia de rayos X**

II-6. El análisis por fluorescencia de rayos X (XRF) es útil para la cuantificación elemental no destructiva de una amplia variedad de muestras. Un haz de rayos X incidente excita los rayos X secundarios característicos de una muestra sólida, que se cuentan con un contador de estado sólido o un contador proporcional. Los límites de detección del análisis por fluorescencia de rayos X son del orden de 10 ppm (partes por millón). Pese a la emisión de rayos X de baja energía, se puede hacer el análisis de elementos ligeros (p. ej., boro, carbono y oxígeno) mediante correcciones de absorción de masa y un cristal analizador.

## **Análisis por difracción de rayos X**

II-7. Un análisis por difracción de rayos X (XRD) es un método para identificar la estructura química de material cristalino. Al incidir sobre redes cristalinas ordenadas, un haz de rayos X experimenta una interferencia constructiva y destructiva que depende del espaciado de la retícula, la longitud de onda de los rayos X y el ángulo de incidencia del haz de rayos X. Haciendo rotar la muestra en relación con una fuente de rayos X fija se producen variaciones en la interferencia, que dan lugar a patrones de difracción característicos. Estos patrones de difracción pueden compararse con espectros de referencia para identificar la fase cristalina específica. La difracción de rayos X no puede generar patrones de difracción de material amorfo (no cristalino).

## **Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier**

II-8. La espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier es útil para identificar compuestos químicos. Se expone la muestra a una amplia banda de frecuencias infrarrojas, y la intensidad de la radiación infrarroja reflejada o transmitida se mide como una función de la frecuencia. Sobre esa base se construye un espectro infrarrojo de absorbancia. La absorción en frecuencias específicas es característica de determinados enlaces. Por lo tanto, el espectro infrarrojo identifica los diversos enlaces y grupos funcionales de la molécula. Existen también compilaciones de espectros infrarrojos que ayudan a identificar compuestos desconocidos o, al menos, a situarlos en determinadas clases moleculares.

## **Técnicas de recuento de la radiactividad**

II-9. Cada isótopo radiactivo emite radiación de tipos y energías conocidos a una velocidad conocida determinada por su actividad. Mediante la medición de la radiación emitida por la muestra se puede cuantificar la cantidad de cada isótopo medido presente. Existen cuatro tipos de radiación que deben tomarse en consideración para la medición: alfa, beta, gamma y neutrónica. Cada tipo de radiación tiene sus propiedades y sus métodos de detección. Las dos más importantes para la criminalística nuclear son la espectrometría gamma y la alfa, que se describen en los párrafos del II-10 al II-13.

II-10. La espectrometría gamma es la primera técnica que se utiliza cuando, como parte de un examen criminalístico nuclear, se clasifica inicialmente el material nuclear u otro material radiactivo incautado, debido a la facilidad con que se hacen las mediciones y a que es una técnica no destructiva y no requiere



una preparación de la muestra. Se miden los rayos gamma (a saber, los protones con energías comprendidas entre 10 keV y más de 500 keV), aun cuando estarán atenuados por el material de embalaje o de blindaje, especialmente el plomo. Las mediciones para la clasificación inicial en el lugar se llevan a cabo con espectrómetros gamma portátiles como, por ejemplo, identificadores de mano de yoduro de sodio o detectores portátiles de germanio de gran pureza. En los laboratorios se utilizan sistemas de espectrometría gamma más sofisticados con mayor sensibilidad y resolución. Ello permite medir rayos gamma de menor abundancia con mayor resolución. Las energías próximas entre sí pueden resolverse en el espectro. Para resolver los espectros de baja energía observados para el plutonio y el uranio se utiliza *software* disponible en el mercado que permite calcular la composición isotópica del material. No obstante, cabe señalar que algunos nucleidos, como el  $^{242}\text{Pu}$  o el  $^{236}\text{U}$ , no pueden detectarse mediante la espectrometría gamma; para ello se utiliza la espectrometría de masas.

II-11. La espectrometría gamma también desempeña un papel importante en el análisis por activación neutrónica, en el que se utiliza para medir los nucleidos creados por la activación de las muestras en un reactor o generador de neutrones.

II-12. La espectrometría alfa detecta las partículas alfa, que son iones de  $\text{He}^{2+}$  con energías en el rango de 3 MeV a 8 MeV. La espectrometría alfa es una técnica destructiva. Las partículas alfa se frenan muy fácilmente por su gran interacción con la materia y, por lo tanto, para el recuento por espectrometría alfa se requiere una preparación radioquímica de las muestras.

II-13. La radioquímica seguida de una espectrometría alfa es importante para medir la actividad del  $^{238}\text{Pu}$  y el  $^{239+240}\text{Pu}$ . La separación radioquímica del plutonio y el americio es especialmente importante, porque las partículas alfa emitidas por el  $^{241}\text{Am}$  y el  $^{238}\text{Pu}$  tienen energías similares y, por consiguiente, se solapan en el espectro. Del mismo modo, las energías alfa del  $^{239}\text{Pu}$  y el  $^{240}\text{Pu}$  están muy próximas y no pueden resolverse en el espectro. Se miden, por lo tanto, como una suma (es decir,  $^{239+240}\text{Pu}$ ). La proporción atómica del  $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$  se obtiene por medio de la espectrometría de masas.

## Ensayo químico

II-14. La titulación química y la coulombimetría a potencial controlado son métodos estándares para determinar la concentración elemental del neptunio, plutonio, uranio y otros componentes importantes del material de los combustibles nucleares con fines de medición o de verificación contable. En la titulación química se hace reaccionar la muestra con una cantidad medida con

exactitud de un reactivo selectivo de composición conocida, lo cual da lugar a la terminación o punto final característico de una reacción estequiométrica bien conocida. Los métodos de titulación se designan, entre otras cosas, según la modalidad de detección del punto final (p. ej., titulación potenciométrica y titulación espectrofotométrica). En la coulombimetría a potencial controlado, el elemento que se analizará es oxidado o reducido en un electrodo metálico mantenido a un potencial determinado. El número de electrones perdidos a través de la oxidación o ganados a través de la reducción es una medida de la cantidad del elemento presente en la muestra.

II-15. La precisión y exactitud de estos métodos es mejor del 0,1 % con un tamaño de la muestra típico de algunos centenares de miligramos. Los métodos están bien consolidados y se utilizan de forma habitual en los laboratorios de contabilidad y salvaguardias nucleares. Pueden, por consiguiente, ser muy eficaces para la caracterización de materiales nucleares, siempre que las muestras sean como mínimo de algunas décimas partes de gramo.

### **Radioquímica**

II-16. Muchas muestras son demasiado complejas como para poder medir todos los isótopos radiactivos presentes sin una separación y purificación inicial. Sobre la base de las diferencias entre las propiedades químicas de los elementos se pueden idear sistemas para separar elementos o grupos de elementos a fin de medir los isótopos presentes mediante métodos de recuento radiactivo o por espectrometría de masas. Los isótopos medidos tienen una relación cuantitativa con la muestra original en referencia a un patrón interno isotópico que suele denominarse *spike* o trazador. Tanto la sensibilidad de la técnica como su selectividad se incrementan con las etapas de separación y purificación química. La radioquímica es especialmente importante para posibilitar la medición de los isótopos presentes de baja actividad y que se miden mejor por sus emisiones alfa o por espectrometría de masas. La radioquímica, combinada con técnicas de recuento de radiactividad y espectrometría de masas, tiene posibilidades de medir algunos isótopos a niveles de femtogramo ( $10^{-15}$  g).

### **Radiografía**

II-17. Las técnicas radiográficas pueden servir para determinar la distribución espacial y la actividad de los radionucleidos de una muestra. Por ejemplo, el análisis por trazas de fisión y el análisis por trazas alfa permiten ubicar y cuantificar los actínidos de una muestra por medio de detectores de trazas nucleares de estado sólido, y los métodos que emplean películas fotográficas o

tecnologías modernas basadas en dispositivos de carga acoplada permiten ubicar y cuantificar los emisores alfa y beta.

### **Espectrometría de masas**

II-18. La espectrometría de masas se utiliza para determinar la composición isotópica de los elementos de un material dado. La espectrometría de masas también puede proporcionar una cuantificación (también denominada “concentración” cuando se aplica a los componentes principales de la muestra) de esos elementos mediante la adición de una cantidad conocida de un isótopo específico. Esto es lo que se denomina espectrometría de masas por dilución isotópica (IDMS). Los métodos de espectrometría de masas permiten analizar tanto los isótopos radiactivos como los estables. En la espectrometría de masas, los átomos y las moléculas se convierten en iones con carga positiva o negativa. Luego estos se separan de acuerdo con su relación masa-carga y se miden las intensidades de los haces de iones separados por su masa resultantes. Las técnicas de espectrometría de masas elementales por lo general tienen una gran selectividad debido a la etapa de análisis de masas, excepto en casos específicos de interferencias isobáricas. La espectrometría de masas ofrece una precisión y exactitud de análisis muy elevada, así como una alta sensibilidad de abundancia.

### **Espectrometría de masas de ionización térmica**

II-19. En la espectrometría de masas de ionización térmica (TIMS) se deposita una muestra sobre un filamento metálico, el cual se calienta con el paso de una corriente eléctrica mantenida a alto vacío. Si el potencial de ionización de un elemento dado es suficientemente bajo en comparación con la función de trabajo del filamento, una fracción de los átomos de dicho elemento se ioniza a través de la interacción con la superficie del filamento a alta temperatura. Las masas se resuelven entonces en un espectrómetro de masas a alto vacío con un sector magnético. La especificidad del análisis por espectrometría TIMS refleja tanto las etapas de separación química como la temperatura de ionización. El espectrómetro de masas de ionización térmica puede medir normalmente relaciones isotópicas en muestras de nanogramos ( $10^{-9}$  g) o picogramos ( $10^{-12}$  g) o, en el caso de muestras raras, de unas decenas de femtogramos ( $10^{-15}$  g) mediante técnicas especiales de preconcentración. Este espectrómetro normalmente mide diferencias del orden de 1 ppm en las masas de relaciones isotópicas.

## **Espectrometría de masas con plasma acoplado por inducción**

II-20. En el análisis por espectrometría de masas con plasma acoplado por inducción (ICP-MS), una disolución de la muestra es aspirada en un plasma acoplado inductivamente, donde la alta temperatura del plasma divide la muestra en los átomos que la componen e ioniza esas especies. La espectrometría ICP-MS, además de medir las relaciones isotópicas, es útil como instrumento sensible de estudio elemental y como método para cuantificar con precisión los elementos traza componentes de una muestra. Los límites de detección están en el rango de 0,1 ppb (partes por mil millones) a aproximadamente 10 ppb en disolución. La espectrometría ICP-MS es problemática para medir algunos elementos con bajo número atómico, debido a las interferencias de fondo o la poca eficacia de ionización (p. ej., carbono, oxígeno, fósforo, potasio, silicio y azufre).

## **Espectrometría de masas de iones secundarios**

II-21. La espectrometría de masas de iones secundarios (SIMS) se usa para el análisis elemental y el análisis isotópico de muestras, incluidas las partículas pequeñas. En la espectrometría SIMS se utiliza un haz de iones primarios (p. ej.,  $\text{Cs}^+$ ,  $\text{Ga}^+$  u  $\text{O}_2^+$ ) enfocado con precisión para pulverizar la superficie de la muestra. El proceso de pulverización produce iones secundarios (característicos de la muestra) que pueden ser analizados mediante un espectrómetro de masas. En la modalidad de “microscopio” se bombardea la muestra con un haz de iones primarios relativamente grande, y la posición espacial de los iones secundarios resultantes se mantiene y se amplía través del espectrómetro de masas. Un detector por imagen sensible a la posición muestra y graba la imagen isotópica. En la modalidad de “microhaz”, un haz de iones primarios enfocado con precisión explora la muestra de forma similar a la de un microscopio electrónico. Luego se mide la señal de los iones secundarios resultantes y se correlaciona con la posición del haz de iones primarios para generar la imagen isotópica. La ablación de la superficie de la muestra por el haz de iones enfocado proporciona un perfil de profundidad extremadamente valioso para documentar los gradientes de composición o la alteración superficial.

## **Cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas**

II-22. La cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS) es una técnica útil para detectar y medir componentes orgánicos traza (a saber, de partes por millón) en una muestra a granel. En la cromatografía GC-MS, los componentes volátiles de una muestra se separan en el cromatógrafo de gases y se identifican en el espectrómetro de masas. El espectrómetro de masas ioniza y fragmenta cada

componente al ser eluido de la columna cromatográfica. Pueden emplearse muchos métodos de ionización diferentes, pero el más común para la cromatografía GC-MS es el de impacto electrónico. El espectrómetro de masas mide la intensidad de los iones de masas diferentes, por detección simultánea o bien secuencial, según de qué tipo sea. La gráfica resultante de la intensidad relativa y la relación masa-carga es lo que se denomina un “espectro de masas”. Existen grandes bibliotecas de espectros de masas que ayudan a identificar los componentes desconocidos detectados por medio de la cromatografía GC-MS.

### **Microscopia electrónica de transmisión**

II-23. En la microscopia electrónica de transmisión (TEM) se transmite un haz de electrones energéticos a través de una muestra ultrafina (de aproximadamente 100 nm de espesor). La microscopia TEM tiene mayor capacidad de aumento que la microscopia electrónica de barrido y puede mostrar imágenes de estructuras de muestras sumamente finas. Los electrones transmitidos pueden experimentar efectos de difracción, que pueden utilizarse como la difracción de rayos X para identificar los planos cristalinos del material.

## **REFERENCIAS**

- [II-1] KRISTO, M.J., “Nuclear forensics”, Handbook of Radioactivity Analysis, 3rd edn (L'ANNUNZIATA, M.F., Ed.), Elsevier, Oxford (2012).
- [II-2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Application of Nuclear Forensics in Combating Illicit Trafficking of Nuclear and Other Radioactive Material, IAEA TECDOC 1730, IAEA, Vienna (2014).

## Anexo III

### EJEMPLOS DE ACTIVIDADES DE ENSEÑANZA, CAPACITACIÓN, EJERCICIO E INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

III-1. En este anexo se describen algunas de las actividades de creación de capacidad que están desarrollándose actualmente.

#### ENSEÑANZA

III-2. En 2010, el OIEA creó la Red Internacional de Enseñanza sobre Seguridad Física Nuclear (INSEN) para velar por la eficacia de las prácticas de seguridad física nuclear mediante el establecimiento, el intercambio y el fomento de la excelencia en la enseñanza. Forman parte de la INSEN instituciones de enseñanza e investigación que están implicadas o prevén implicarse en la enseñanza de la seguridad física nuclear. Los miembros de la INSEN colaboran en la elaboración de libros de texto, herramientas de enseñanza y material educativo; la formación continua del cuerpo docente; el intercambio de estudiantes para fomentar el intercambio de información, la investigación y el desarrollo con miras a promover la confianza técnica; la evaluación de tesis y tesinas académicas, y los sistemas de medición del desempeño respecto de la eficacia de la enseñanza de la seguridad física nuclear.

#### CAPACITACIÓN

III-3. El OIEA ha diseñado un conjunto de cursos de capacitación para atender las demandas de distintos públicos destinatarios, que abarcan diversos aspectos de la criminalística nuclear en apoyo de la investigación de un suceso relacionado con la seguridad física nuclear. Entre ellos cabe mencionar: “Introducción a la criminalística nuclear”, “Metodologías de criminalística nuclear” y el curso conexo “Gestión de la escena de un delito radiológico”. En el Catálogo de Formación sobre Seguridad Física Nuclear del OIEA hay disponible más información; se accede a él desde el sitio web<sup>1</sup> de la División de Seguridad Física Nuclear del OIEA.

---

<sup>1</sup> Véase <http://www-ns.iaea.org>.

III-4. La INTERPOL también imparte capacitación a grupos multinacionales interinstitucionales de personal científico y de las fuerzas del orden sobre las mejores prácticas de gestión de la escena de un delito radiológico.

III-5. Además, los Estados Miembros ofrecen cursos de capacitación nacionales e internacionales.

## EJERCICIOS

III-6. El Grupo de Trabajo Técnico Internacional sobre Criminalística Nuclear (ITWG) lleva a cabo algunos ejercicios analíticos y basados en escenarios, que proporcionan a los laboratorios la oportunidad de evaluar su desempeño en materia de análisis así como demostrar sus competencias. El grupo especial de ejercicios del ITWG ha sido decisivo para planificar y realizar, así como para informar al respecto, ejercicios colaborativos con materiales —también llamados “intercomparaciones”—, durante los cuales todos los laboratorios participantes reciben muestras idénticas de materiales nucleares u otros materiales radiactivos, así como, en algunos casos, pruebas no nucleares, y se les encomienda la realización de análisis. Los participantes hacen los análisis e informan de los resultados en plazos establecidos de 24 horas, 1 semana y 2 meses. La participación en las intercomparaciones es completamente voluntaria y está abierta a los laboratorios que declaren sus capacidades de medición. Los resultados se codifican, de modo que los resultados de cada laboratorio se notifican de forma anónima y solo son conocidos por el coordinador del ejercicio. Los resultados prácticos de los ejercicios demuestran el desempeño individual de cada laboratorio en relación con la capacidad analítica declarada, además de determinar la utilidad de los distintos métodos de análisis aplicados a una misma muestra. En las intercomparaciones participan laboratorios internacionales y se emplean materiales diversos. Se han llevado a cabo tres ejercicios colaborativos con materiales:

- a) el ejercicio 1998-2000, en el que 6 laboratorios analizaron óxido de plutonio;
- b) el ejercicio 2000-2002, en el que 10 laboratorios analizaron óxido de uranio muy enriquecido, y
- c) el ejercicio de 2010, en el que 9 laboratorios analizaron uranio metálico muy enriquecido.

III-7. El Grupo de Ejecución y Evaluación de la Iniciativa Mundial de Lucha contra el Terrorismo Nuclear (IMLTN) imparte seminarios y realiza ejercicios de simulación. Los ejercicios tienen por finalidad:

- a) forjar y fomentar una comprensión común de las competencias en criminalística nuclear y sus principios;
- b) resaltar la importancia de la criminalística nuclear para los encargados de la formulación de políticas y la adopción de decisiones;
- c) analizar las relaciones entre las diversas comunidades (de las fuerzas del orden, judiciales, técnicas y de políticas) que intervienen en la criminalística nuclear;
- d) explorar los aspectos relativos a la política de intercambio de información para avanzar en la investigación de los sucesos relacionados con la seguridad física nuclear, y
- e) determinar las posibles asociaciones, tanto nacionales como internacionales, para el intercambio cooperativo de información.

## INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

III-8. A fin de crear confianza en la criminalística nuclear, profundizar en el estudio de las firmas forenses nucleares, facilitar la creación de bibliotecas de criminalística nuclear y fomentar la colaboración internacional, el OIEA puso en marcha los proyectos coordinados de investigación (PCI) siguientes:

- a) 2008-2011: “Aplicación de la criminalística nuclear en la lucha contra el tráfico ilícito de materiales nucleares y otros materiales radiactivos” [III-1].
- b) 2013-2016: “Identificación de firmas forenses nucleares de gran fiabilidad para crear bibliotecas nacionales de criminalística nuclear”.

III-9. En el sitio web<sup>2</sup> del OIEA se ofrece más información sobre todos los PCI del OIEA.

## REFERENCIAS

[III-1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Application of Nuclear Forensics in Combating Illicit Trafficking of Nuclear and Other Radioactive Material, IAEA TECDOC 1730, IAEA, Vienna (2014).

---

<sup>2</sup> Véase <http://www-crp.iaea.org>.



## GLOSARIO

**análisis volumétrico (*bulk analysis*).** El análisis de una muestra entera o una porción de ella para determinar las propiedades promedio de la porción medida.

**autoridad competente (*competent authority*).** Organización o institución gubernamental que ha sido designada por un Estado para ejercer una o más funciones relacionadas con la seguridad física nuclear. Por ejemplo, pueden ser autoridades competentes los órganos reguladores, los organismos encargados de hacer cumplir la ley, los de aduanas y control de fronteras, los de inteligencia y seguridad, los de salud, etcétera.

**biblioteca nacional de criminalística nuclear (*national nuclear forensics library*).** Conjunto organizado administrativamente de información sobre los materiales nucleares y otros materiales radiactivos producidos, utilizados o almacenados en un Estado.

**cadena de custodia (*chain of custody*).** Procedimientos y documentos que garantizan la integridad de las pruebas físicas mediante el seguimiento de su manejo y almacenamiento desde el punto de recogida hasta su disposición final. Otros términos que hacen referencia a este proceso son “cadena de la prueba”, “cadena de custodia física” y “cadena de posesión”.

**característica de clase (*class characteristic*).** Atributo o propiedad compartida por todos los miembros de una clase de personas u objetos.

**caracterización (*characterization*).** Determinación de la naturaleza del material radiactivo y las pruebas conexas.

**ciencia forense nuclear o criminalística nuclear (*nuclear forensic science o nuclear forensics*).** Disciplina de la ciencia forense que implica el examen de materiales nucleares y otros materiales radiactivos, o de pruebas contaminadas con radionucleidos, en el contexto de procedimientos judiciales.

**elemento traza (*trace element*).** Elemento de una muestra cuya concentración promedio es inferior a 1000 µg/g o al 0,1 % de la composición de la matriz.

**escena de un delito radiológico (*radiological crime scene*).** Escenario en el que se sabe o se sospecha que ha tenido lugar un delito u otro acto deliberado no autorizado que involucra material nuclear u otro material radiactivo.

**examen (*examination*).** Procedimiento utilizado para obtener información de las pruebas a fin de llegar a conclusiones respecto de la naturaleza de las pruebas y/o de las asociaciones relacionadas con ellas.

**individualización (*individualization*).** Capacidad de asociar un resultado forense o un conjunto de resultados exclusivamente con una única fuente, como una persona, un lugar o un proceso de producción.

**interpretación criminalística nuclear (*nuclear forensic interpretation*).** Proceso de correlacionar las características de la muestra con la información existente sobre los tipos de materiales, los orígenes y los métodos de producción de material nuclear u otro material radiactivo, o con casos anteriores que involucren material similar.

**laboratorio de criminalística nuclear designado (*designated nuclear forensic laboratory*).** Laboratorio que ha sido reconocido por un Estado como capaz de aceptar o de analizar muestras de materiales nucleares y otros materiales radiactivos al objeto de apoyar los exámenes de criminalística nuclear.

**radiocronometría (*radiochronometry*).** Utilización de las mediciones de los productos de desintegración radiactiva de una muestra de material para determinar el tiempo transcurrido desde la última separación de descendientes del material padre (y determinar así la “edad” del material de la muestra medida).

**signatura (*signature*).** Característica o conjunto de características de una muestra dada que permite comparar dicha muestra con materiales de referencia.



# IAEA

Organismo Internacional de Energía Atómica

Nº 26

## PEDIDOS DE PUBLICACIONES

Las publicaciones de pago del OIEA pueden adquirirse a través de los proveedores que se indican a continuación o en las principales librerías locales.

Los pedidos de publicaciones gratuitas deben hacerse directamente al OIEA. Al final de la lista de proveedores se proporcionan los datos de contacto.

### AMÉRICA DEL NORTE

#### ***Bernan / Rowman & Littlefield***

15250 NBN Way, Blue Ridge Summit, PA 17214, EE. UU.

Teléfono: +1 800 462 6420 • Fax: +1 800 338 4550

Correo electrónico: [orders@rowman.com](mailto:orders@rowman.com) • Sitio web: [www.rowman.com/bernan](http://www.rowman.com/bernan)

#### ***Renouf Publishing Co. Ltd***

22-1010 Polytek Street, Ottawa, ON K1J 9J1, CANADÁ

Teléfono: +1 613 745 2665 • Fax: +1 613 745 7660

Correo electrónico: [order@renoufbooks.com](mailto:order@renoufbooks.com) • Sitio web: [www.renoufbooks.com](http://www.renoufbooks.com)

### RESTO DEL MUNDO

Póngase en contacto con su proveedor local de preferencia o con nuestro distribuidor principal:

#### ***Eurospan Group***

Gray's Inn House

127 Clerkenwell Road

Londres EC1R 5DB

Reino Unido

#### ***Pedidos comerciales y consultas:***

Teléfono: +44 (0)176 760 4972 • Fax: +44 (0)176 760 1640

Correo electrónico: [euroman@turpin-distribution.com](mailto:euroman@turpin-distribution.com)

#### ***Pedidos individuales:***

[www.eurospanbookstore.com/iaea](http://www.eurospanbookstore.com/iaea)

#### ***Para más información:***

Teléfono: +44 (0)207 240 0856 • Fax: +44 (0)207 379 0609

Correo electrónico: [info@eurospangroup.com](mailto:info@eurospangroup.com) • Sitio web: [www.eurospangroup.com](http://www.eurospangroup.com)

### Los pedidos de publicaciones, tanto de pago como gratuitas, pueden enviarse directamente a:

Dependencia de Mercadotecnia y Venta

Organismo Internacional de Energía Atómica

Vienna International Centre, PO Box 100, 1400 Viena, Austria

Teléfono: +43 1 2600 22529 o 22530 • Fax: +43 1 26007 22529

Correo electrónico: [sales.publications@iaea.org](mailto:sales.publications@iaea.org) • Sitio web: <https://www.iaea.org/es/publicaciones>





Esta publicación es una versión revisada de la publicación N° 2 de la *Colección de Seguridad Física Nuclear del OIEA*, titulada *Nuclear Forensics Support*, que se publicó en 2006 y ha sido ampliamente adoptada por los Estados para desarrollar capacidad criminalística nuclear. Esta publicación proporciona información actualizada sobre la investigación de sucesos relacionados con la seguridad física nuclear, la base jurídica de la criminalística nuclear, la criminalística nuclear en un plan nacional de respuesta, la iniciación de un examen, la disponibilidad de un laboratorio de criminalística nuclear recurriendo a las competencias existentes en el país, y el análisis forense de materiales nucleares y otros materiales radiactivos y de pruebas contaminadas con radionucleidos.